

网络出版时间:2012-08-15 15:27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120815.1527.017.html>

不同硒肥对马铃薯产量、硒含量及品质的影响

殷金岩,耿增超,孟令军,王海涛,张雯,陈心想

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**研究不同硒肥对马铃薯产量、硒含量及品质的影响,为富硒马铃薯的生产提供依据。**【方法】**选用马铃薯“早大白”作为研究对象,采用不同用量(0(CK),1.5,3.0,6.0,10.0 mg/kg)硒酸钠硒肥、亚硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥4种硒肥进行盆栽试验,研究4种硒肥对马铃薯产量、硒含量及淀粉含量的影响。**【结果】**硒肥用量为1.5 mg/kg(除亚硒酸钠硒肥外)时马铃薯产量增加,之后随着硒肥用量增加马铃薯产量降低;随着硒肥用量的增加,马铃薯总硒含量和有机硒的转化率均呈先升高后降低的趋势,综合考虑马铃薯的产量、总硒含量及有机硒的转化率,硒肥用量以3.0 mg/kg为宜。在适宜硒肥用量3.0 mg/kg时,4种硒肥不会影响马铃薯淀粉的累积。**【结论】**4种硒肥中,生物炭基硒肥、保水缓释硒肥对马铃薯的增产效果优于硒酸钠硒肥、亚硒酸钠硒肥,硒肥用量以3.0 mg/kg为宜。

【关键词】 控释硒肥;马铃薯;硒

【中图分类号】 S532.062

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)09-0122-06

Effects of different selenium fertilizers on the yield, selenium contents and qualities of potatoes

YIN Jin-yan, GENG Zeng-chao, MENG Ling-jun,
WANG Hai-tao, ZHANG Wen, CHEN Xin-xiang

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

Abstract: **【Objective】** The research was conducted to investigate the influence of different selenium fertilizers towards potatoes on yields, selenium contents and qualities, and provide basis for selenium-enriched potatoes production. **【Method】** We took ‘Zao Dabai’ potatoes as objective and processed soil with content of selenium (0(CK), 1.5, 3.0, 6.0, 10.0 mg/kg) sodium selenate fertilizer, sodium selenite fertilizer, biological carbon selenium fertilizer, selenium fertilizer of water absorbent and slow-release by pot experiment to study the effect of these four selenium fertilizers and their dosages on outputs, selenium contents and starch of potatoes. **【Result】** With the exception of sodium selenite fertilizer, when the application rate of Se was 1.5 mg/kg, the yields of potatoes would increase firstly and then decrease; selenium contents and transformation of potatoes increased firstly, and then decreased with the increase of selenium processing concentration, considering the crop, selenium contents and transformation of potatoes, the application rate of Se should be controlled at about 3.0 mg/kg at the proper selenium concentration (3.0 mg/kg), these four kinds of selenium fertilizers could not influence starch accumulation of potatoes. **【Conclusion】** Biological carbon selenium fertilizer and selenium fertilizer of water absorbent and slow-release have significant su-

【收稿日期】 2012-02-14

【基金项目】 国家林业局“948”项目“林果木生物质综合转化技术引进”(2009-4-64);农业部“948”项目“生物质技术引进及消化”(2010-Z19);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2010JM5004);陕西省攻关项目“高效生物炭基缓释肥配方及施用技术研究”(2010K02-12-1)

【作者简介】 殷金岩(1986—),男,河南商丘人,在读硕士,主要从事硒肥及富硒马铃薯研究。E-mail: yinjinyan19861117@163.com

【通信作者】 耿增超(1963—),男,陕西韩城人,教授,主要从事森林土壤及农业废弃物转化研究。E-mail: gengzengchao@126.com

periority in outputs of potatoes. The application rate of Se should be controlled at about 3.0 mg/kg.

Key words: slow-release fertilizers; potatoes; selenium

硒是动物机体不可缺少的微量元素之一。长期缺硒可导致克山病、大骨节病等多种疾病^[1-2]。由于硒的地表分布极不平衡,我国大约有 72% 的县(市)不同程度缺硒,其中 1/3 为严重缺硒区,硒摄取不足的人口达 3 亿以上^[3]。在硒的吸收利用方面,有机硒大于无机硒,植物硒高于动物硒^[4];而且有机硒,特别是生物态有机硒毒性小,有利于人体吸收。因此,作物上产生的生物态有机硒更安全、更有效。通过对作物施硒肥,增加作物中的硒含量,进而开发富硒食物具有广阔的应用前景^[5]。

马铃薯(*Solanum tuberosum*)作为主要粮菜两用食物,在全世界都有广泛种植,尤其在一些地区更是不可缺少的食物。而马铃薯属于非特异性富硒作物,马铃薯中的自然硒含量难以满足人体需求。目前,国内对硒在烟草^[6]、水稻^[7]、茄子^[8]、大蒜^[9-10]、生菜^[11]、萝卜^[12]等作物上的肥效及积累特性进行了研究,而对硒在马铃薯上的研究较少^[13]。为此,通过施肥补充土壤硒,进而提高马铃薯硒含量是可选的技术途径。

近年来新型肥料研究引起广泛关注,其中新型缓释肥肥效较传统肥料明显提高,且减少了由肥料损失而引起的环境污染,具有潜在的生态、经济和社会价值^[14-15]。本研究利用保水剂和生物碳 2 种常用的高分子材料,通过吸附法将其制成生物炭基硒肥、保水缓释硒肥,与亚硒酸钠硒肥、硒酸钠硒肥一起作为硒肥,分析这 4 种硒肥对马铃薯产量、硒含量及品质的影响,以寻求适合马铃薯生长的最佳硒肥用量及各硒肥的作用效果,旨在为富硒马铃薯的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为陕西杨凌穆家寨渭河滩的沙质土,其基本理化性状为:有机质 4.71 g/kg,速效氮 30.23 mg/kg,速效钾 21.91 mg/kg,速效磷 7.42 mg/kg,pH 7.9,全硒 0.086 mg/kg。供试马铃薯品种为“早大白”。保水剂为东莞市安信保水剂有限公司生产,白色粒状干剂。保水缓释硒肥是将一定浓度的硒酸钠($\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)溶液均匀喷洒在保水剂上而制得。生物炭基硒肥是由硒酸钠与生物碳在实验室通过吸附反应制备而成,并过孔径

1 mm 筛,其中生物碳自行研制,采用间歇式热裂解中试设备生产。硒源为分析纯的 $\text{Na}_2\text{SeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2SeO_3 试剂。

1.2 试验设计

试验于 2011-08-10 在西北农林科技大学资源环境学院楼顶阳台进行。试验共采用 4 种硒肥,分别为亚硒酸钠硒肥、硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥,每种硒肥各设 0(CK),1.5,3.0,6.0,10.0 mg/kg 5 个施肥水平,4 次重复。其中,生物炭基硒肥中硒酸钠和生物碳的质量比为 1:20,即每个水平生物碳施量分别为 0,1.26,2.52,5.04,8.41 g;保水缓释硒肥中硒酸钠和保水剂的质量比为 1:40,即每个水平的保水剂施量分别为 0,2.52,5.04,10.08,16.82 g。将供试土壤过孔径 2 mm 筛,混匀后以 9.0 kg/盆装入 22 cm × 28 cm 塑料盆中,每 kg 干土中施入 K_2O 0.15 g, N 0.07 g 和 P_2O_5 0.22 g 作底肥。将硒肥作为底肥均匀施入土中,浇足水后种植马铃薯种子。出苗后,每盆保留 1 株苗。生长 60 d 后收获马铃薯样品,将样品洗净后于 60 °C 下烘干备用。

1.3 测定项目及方法

马铃薯样品中硒含量测定采用尚庆茂等^[11]的方法。取 1 g 马铃薯干样,加入 20 mL 4 mol/L 的 HCl,在 170 °C 下回流反应 20 min,冷却后取上清液,测定样品中无机硒含量。取 0.5 g 马铃薯干样,加入 7 mL 混合消化液(4 mL HNO_3 + 1 mL HClO_4),180~200 °C 消化 2 h,冷却后再加 10 mL 4 mol/L 的 HCl 还原 10 min,蒸馏水定容,用氢化物发生-原子荧光光谱法测定总硒含量。有机硒含量=总硒含量-无机硒含量。淀粉含量采用酸式水解法测定。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 DPS v7.05 版统计分析软件进行分析和处理。

2 结果与分析

2.1 不同硒肥对马铃薯产量的影响

由表 1 可知,硒肥用量为 1.5 mg/kg 时,亚硒酸钠硒肥、硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥的马铃薯产量分别为对照的 99.03%,100.14%,106.23% 和 116.01%;当硒肥用量为 3.0 mg/kg

时,保水缓释硒肥、硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥和亚硒酸钠硒肥的马铃薯产量分别为对照的 65.72%,77.88%,97.31%和 97.64%。说明硒肥施用量较低时(1.5 mg/kg,除亚硒酸钠硒肥外)促进了马铃薯的生长,增加了产量;之后随着硒肥用量增加($\text{Se}^{6+}>3.0\text{ mg/kg}$; $\text{Se}^{4+}\geq 1.5\text{ mg/kg}$),硒则抑制了马铃薯的生长,降低了产量。前人对生菜^[11]、黑

麦草^[16]、番茄^[17]等作物硒肥试验结果也显示,适量硒可以促进植株生长,提高产量,但过量硒则抑制其生长并产生毒害作用。在硒肥用量为 1.5 mg/kg 时,4 种硒肥中保水缓释硒肥、生物炭基硒肥的增产效果较好,其次是硒酸钠硒肥,亚硒酸钠硒肥效果最差。这是由于保水缓释硒肥、生物炭基硒肥具有较好的缓释效果。

表 1 不同硒肥对马铃薯产量的影响(干质量)

Table 1 Effect of four selenium fertilizers in different levels on yield of potatoes(dry weight) g/株				
硒肥用量/(mg·kg ⁻¹) Selenium application	硒酸钠硒肥 Sodium selenate fertilizer	亚硒酸钠硒肥 Sodium selenite fertilizer	生物炭基硒肥 Biological carbon selenium fertilizer	保水缓释硒肥 Selenium fertilizer of water absorbent slow-release
0	44.16±0.76 a	44.16±0.76 a	44.16±0.76 b	44.16±0.76 b
1.5	44.22±3.39 a	43.73±1.18 b	46.91±1.65 a	51.23±1.95 a
3.0	34.39±1.35 b	42.97±1.38 b	43.12±2.17 b	29.02±2.36 c
6.0	23.68±3.22 c	22.56±2.74 c	28.30±0.55 c	26.73±1.40 c
10.0	6.43±0.64 d	15.21±0.86 d	20.52±0.13 d	16.85±0.75 d

注:表中数据为“平均值±标准差”(n=4);同列数据后标不同小写字母者表示在 P<0.05 水平差异显著(LSD 检验)。表 2 同。
Note:Data are “mean±SD” (n=4);The different normal letters in the same row refer to significant difference among concentrations at P<0.05 levels (LSD test). The same as table 2.

2.2 不同硒肥对马铃薯硒含量的影响

2.2.1 总硒含量 不同硒肥对马铃薯总硒含量的影响结果见表 2。从表 2 可以看出,当亚硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥施用量小于 6.0 mg/kg,硒酸钠硒肥施用量小于 3.0 mg/kg 时,随着 4 种硒肥用量的增加,马铃薯总硒含量亦明显增加;

之后随着硒肥用量增加,除亚硒酸钠硒肥外,另外 3 种硒肥处理下马铃薯块茎总硒含量急剧下降。当硒肥用量为 1.5~3.0 mg/kg 时,在同一施硒水平下总硒含量由高到低依次为硒酸钠硒肥>生物炭基硒肥、保水缓释硒肥>亚硒酸钠硒肥。

表 2 不同硒肥对马铃薯总硒含量的影响

Table 2 Effect of four selenium fertilizers in different levels on the selenium content of potatoes μg/g				
硒肥用量/(mg·kg ⁻¹) Selenium application	硒酸钠硒肥 Sodium selenate fertilizer	亚硒酸钠硒肥 Sodium elenite fertilizer	生物炭基硒肥 Biological carbon selenium fertilizer	保水缓释硒肥 Selenium fertilizer of water absorbent and slow-release
0	0.68±0.04 c	0.68±0.04 e	0.68±0.04 e	0.68±0.04 e
1.5	15.55±4.06 b	2.77±0.35 d	11.36±1.00 d	9.48±0.70 c
3.0	28.68±1.14 a	4.89±0.33 c	18.21±0.40 c	18.48±0.49 b
6.0	12.78±0.48 b	5.63±0.28 b	25.68±2.11 a	26.76±1.70 a
10.0	1.25±0.25 c	10.56±0.57 a	21.59±2.63 b	4.22±0.42 d

2.2.2 有机硒含量 不同硒肥对马铃薯无机硒和有机硒含量的影响结果见表 3。由表 3 可知,对照马铃薯的有机硒含量仅为 0.30 μg/g,而硒酸钠硒肥、亚硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥 4 种硒肥(0~6.0 mg/kg)处理马铃薯的最低有机硒含量分别为 4.13,1.62,7.03 和 4.96 μg/g,分别为对照的 13.76,6.81,23.45 和 16.53 倍。表明对土壤施加一定量的硒可显著提高马铃薯块茎中的有机硒含量。当硒肥用量为 1.5 mg/kg 时,硒酸钠硒肥、亚硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥 4

种处理有机硒的转化率为 53.41%,58.53%,61.90%和 52.30%,分别为对照的 1.21,1.33,1.40 和 1.19 倍;但随着硒肥用量的增加,有机硒的转化率基本呈下降趋势。王永勤等^[10]对大蒜有机硒转化的研究和杜振宇等^[18]对胡萝卜有机硒转化的研究结果均显示,高浓度外源硒会引起有机硒转化率下降。这可能是由于土壤施用硒含量较高时,会导致马铃薯中毒从而影响无机硒向有机硒的转化。综合考虑马铃薯的产量、总硒含量及有机硒的转化率,硒肥施用量以 3.0 mg/kg 为宜。

表 3 不同硒肥对马铃薯无机硒和有机硒含量的影响

Table 3 Effect of four selenium fertilizers in different levels on inorganic and organic selenium in potatoes				
硒肥类型 Species of selenium	用量/(mg·kg ⁻¹) treatments	无机硒/(μg·g ⁻¹) Inorganic Se	有机硒/(μg·g ⁻¹) Organic Se	转化率/% Transformation
硒酸钠硒肥 Sodium selenate fertilizer	0	0.38	0.30	44.12
	1.5	7.25	8.31	53.41
	3.0	12.51	16.17	56.37
	6.0	8.65	4.13	32.31
	10.0	1.00	0.25	20.32
亚硒酸钠硒肥 Sodium elenite fertilizer	0	0.38	0.30	44.12
	1.5	1.15	1.62	58.53
	3.0	2.93	1.97	40.15
	6.0	3.59	2.04	36.26
	10.0	7.70	2.86	27.06
生物炭基硒肥 Biological carbon selenium fertilizer	0	0.38	0.30	44.12
	1.5	4.33	7.03	61.90
	3.0	9.13	9.08	49.85
	6.0	11.57	14.11	54.94
	10.0	15.06	6.53	30.24
保水缓释硒肥 Selenium fertilizer of water absorbent and slow-release	0	0.38	0.30	44.12
	1.5	4.52	4.96	52.30
	3.0	10.07	8.42	45.54
	6.0	14.82	11.94	44.61
	10.0	3.10	1.12	26.48

注:转化率=有机硒/总硒×100%。
Note:Percentage of transformation=Organic Se/Total Se×100%.

2.3 不同硒肥对马铃薯淀粉含量的影响

不同硒肥对马铃薯淀粉含量的影响见图 1。

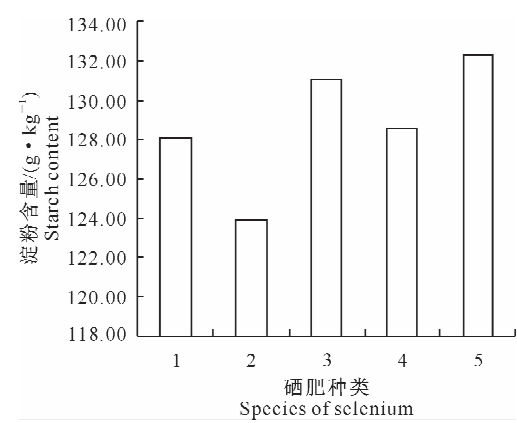


图 1 不同硒肥对马铃薯淀粉含量的影响
(C_{Se} = 3.0 mg/kg)

1. 对照;2. 亚硒酸钠硒肥;3. 生物炭基硒肥;
4. 保水缓释硒肥;5. 硒酸钠硒肥

Fig. 1 Effect of different selenium fertilizer application on the starch content in potatoes(C_{Se} = 3.0 mg/kg)
1. Control;2. Sodium selenite fertilizer;3. Biological carbon selenium fertilizer;4. Selenium fertilizer of water absorbent slow-release;5. Sodium selenate fertilizer

由图 1 可见,在适宜硒肥用量下(3.0 mg/kg),硒酸钠硒肥、亚硒酸钠硒肥、生物炭基硒肥、保水缓释硒肥处理的马铃薯淀粉含量分别为对照的

103%, 88%, 102%和 100%,除亚硒酸钠硒肥外,其余硒肥处理马铃薯的淀粉含量与对照相比均有小幅增加,这可能是由于马铃薯中硒含量对淀粉合成过程中的酶有一定影响,在合成过程中硒与酶蛋白结合,硒含量越高,与之结合的酶蛋白越多,酶活性越强,淀粉含量越高。方差分析表明,各硒肥处理间淀粉含量差异不显著(P>0.05)。

3 结论与讨论

硒对植物生长的影响因硒的用量而有明显差异。施和平等^[17]、王永勤等^[10]、Bicas 等^[19]、宋家永等^[20]对番茄、大蒜、胡萝卜和小麦的研究均表明,低浓度硒对作物生长有益,而硒浓度过高时有害。本研究亦论证了这一点:适量硒肥(1.5 mg/kg)对马铃薯产量有促进作用;而硒肥用量过高(≥3.0 mg/kg)时则会对马铃薯的生长产生抑制,马铃薯长势较弱,产量降低。

植物对硒的吸收量与植物种类和土壤中的硒含量有很大关系。Fleming^[21]研究发现,十字花科植物、百合科和豆科作物对硒的耐受程度比菊科、禾本科和伞形科植物强。万佐玺^[22]对魔芋的研究表明,当土壤施硒量为 3 mg/kg 时,魔芋叶片中的硒含量高达 12.40 μg/g,球茎硒含量为 36.31 μg/g。而杜

振宇等^[18]对胡萝卜的研究表明,在相同土壤施硒量条件下,胡萝卜的硒含量仅为 3.95 $\mu\text{g/g}$ 。在本试验条件下,随着硒肥用量的增加,马铃薯块茎中的总硒含量呈先升高后降低的趋势,在硒肥用量为 3.0 mg/kg 时,4 种硒肥处理马铃薯块茎中的总硒含量为 4.89~28.68 $\mu\text{g/g}$ 。由于马铃薯属于非聚硒植物,当它生长在高硒介质中时,通常会表现出受伤症状,包括徒长、萎黄病、叶片萎缩干枯和植物未老先衰等^[23-24]。在本研究中,硒肥用量达到 10.0 mg/kg 时,马铃薯才表现出类似的症状。

硒在生物体内主要以有机硒形式存在,有机硒的生物活性强,易于被人体吸收利用^[4]。因此,有机硒含量高低也是衡量马铃薯品质的一个重要指标。杜振宇等^[8]对茄子的研究表明,低量施硒处理(0.15 mg/kg)未影响茄子的有机硒转化率,而在硒用量为 0.60 和 3.00 mg/kg 时则显著降低了有机硒转化率。王永勤等^[10]在大蒜上的研究表明,随土壤施硒量的增加,有机硒的转化率呈下降趋势。本研究结果表明,土壤施硒可明显提高马铃薯中有机硒含量,而在施硒过高(≥ 6.0 mg/kg)时则不利于有机硒的转化,具体原因尚需进一步研究。淀粉是衡量马铃薯品质的主要指标,关于硒对马铃薯淀粉含量影响的研究鲜有报道。本研究结果表明,适宜用量的硒肥(3.0 mg/kg)会提高马铃薯淀粉的含量,但不同硒肥间差异不显著。

在一些农作物和蔬菜上的应用说明,与普通复肥相比控释复肥明显促进作物的生长发育^[25-26]。本研究中,生物炭基硒肥、保水缓释硒肥 2 种肥料在马铃薯产量上的效果要优于硒酸钠硒肥、亚硒酸钠硒肥;综合考虑马铃薯的产量、总硒含量及有机硒的转化率,硒肥用量以 3.0 mg/kg 为宜。此外,除硒肥最高用量(10.0 mg/kg)外,在施硒量相同条件下,硒酸钠硒肥生产的马铃薯总硒含量比亚硒酸钠硒肥高,这是由于植物吸收 Se^{4+} 为被动吸收,而吸收 Se^{6+} 为主动吸收^[27],故在土壤硒含量相同的条件下植物体内 Se^{6+} 积累量大于 Se^{4+} 。

致谢:农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室和农业部西北植物营养与农业环境重点实验室工作人员在试验期间给予了许多帮助,在此一并感谢。

[参考文献]

[1] 李继云,任尚学,陈代中. 陕西省环境中的硒与大骨节病关系的研究[J]. 环境科学学报,1982,2(2): 91-101.
Li J Y, Ren S X, Chen D Z. Study on the relationships between environmental selenium and Kashin-Beck disease in Shaanxi

Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1982, 2(2): 91-101. (in Chinese)

[2] Martin A L. Toxicity of selenium to plants and animals [J]. Amer J Bot, 1936(23): 471-483.

[3] 陈 铭,谭见安. 环境硒与健康关系研究中的土壤化学与植物营养学[J]. 土壤学进展,1994,22(4): 1-10.
Li M, Shao J A. Study on soil chemistry and plant nutrition between environmental selenium and healthy relationship [J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(4): 1-10. (in Chinese)

[4] Rosenfeld R S. Selenium: Geobotany biochemistry toxicity and nutrition [M]. New York and London: Academic Press, 1964: 223-227.

[5] Rayman M P. Food chain selenium and human health: Emphasis on intake [J]. Nutr, 2008, 100: 254-268.

[6] 杨兰芳,丁端兴. 叶面施硒对烤烟生化品质的影响 [J]. 湖北农业科学, 2000(11): 51-53.
Yang L F, Ding D X. Effect of selenium by leaves on biochemistry quality of tobacco [J]. Hubei Agric Science, 2000(11): 51-53. (in Chinese)

[7] 周文美. 硒对水稻生长、根系活性及籽粒形状的影响 [J]. 贵州农业科学, 1990(5): 29-32.
Zhou W M. Influence of selenium on growth and some physiologic activities in rice [J]. Guizhou Agricultural Science, 1990(5): 29-32. (in Chinese)

[8] 杜振宇,史衍玺,王清华. 施硒对茄子吸收转化硒和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 298-301.
Du Z Y, Shi Y X, Wang Q H. Effects of selenium application on the selenium absorption and transformation of eggplant and its qualities [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 298-301. (in Chinese)

[9] 王昌全,李 冰,周 瑾,等. 硒硫配施对大蒜的营养效应研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 206-211.
Wang C Q, Li B, Zhou J, et al. Study of selenium-sulphur combined application on nutrition function of garlic [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 206-211. (in Chinese)

[10] 王永勤,曹家树,李建华,等. 施硒对大蒜产量和含硒量的影响 [J]. 园艺学报, 2001, 28(5): 425-429.
Wang Y Q, Cao J S, Li J H, et al. Effect of selenium on selenium content and yield of garlic [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(5): 425-429. (in Chinese)

[11] 尚庆茂,李平兰,高丽红. 水培生菜对硒的吸收和转化 [J]. 园艺学报, 1997, 24(3): 255-258.
Shang Q M, Li P L, Gao L H. Selenium uptake and inversion by hydroponic lettuce [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1997, 24(3): 255-258. (in Chinese)

[12] 王晋民,赵之重,李国荣,等. 硒对胡萝卜含硒量、产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 240-244.
Wang J M, Zhao Z Z, Li G R, et al. Effects of selenium application on the selenium content, yield and qualities of carrot [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 240-244. (in Chinese)

[13] 黄景新,秦昕. 硒肥对马铃薯块茎产量及含硒量的影响[J]. 中国马铃薯,1999,13(2): 94-95.
Huang J X,Qin X. Effects of selenium application on the selenium content and yield of potato [J]. Chinese Potato Journal, 1999,13(2): 94-95. (in Chinese)

[14] 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]. 北京: 气象出版社,1999.
Wang D S. Collaborative effect and coupling model of fertilizer and water on dry land [M]. Beijing. China Meteorological Press,1999. (in Chinese)

[15] 李长荣,邢玉芬,朱健康,等. 高吸水性树脂与肥料相互作用的研究[J]. 中国农业大学学报,1989,15(2): 187-192.
Li Z R,Xing Y F,Zhu J K,et al. Preliminary study on the water and fertilizer retention capacity of a high water absorbent resin [J]. Journal of China Agricultural University,1989,15(2): 187-192. (in Chinese)

[16] 田应兵,陈芬,熊明标,等. 黑麦草对硒的吸收、分配与累积[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(1): 122-127.
Tian Y B,Chen F,Xiong M B,et al. G Y. Uptake,distribution and accumulation of selenium by ryegrass [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2005,11(1): 122-127. (in Chinese)

[17] 施和平,张英聚,刘振声. 番茄对硒的吸收、分布和转化[J]. 植物学报,1993,35(7): 541-546.
Shi H P,Zhang Y J,Liu Z S. Adsorption,distribution and transformation of selenium by tomato [J]. Acta Botany Sinica,1993,35(7): 541-546. (in Chinese)

[18] 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 Z Y,Shi Y X,Wang Q H. Effect of selenium application in soil on absorption and transformation of selenium and quality of radish [J]. Soils,2004,36(1): 56-60. (in Chinese)

[19] Bicas P A,Daoood H G,Kodar I. Effect of Mo,Se,Zn and Cr treatments on the yield,element concentration,and carotenoid content of carrot[J]. Agric Food Chem,1995,43: 589-591.

[20] 宋家永,李敬光,王永华,等. 喷施硒肥对小麦生理特性、子粒硒含量的影响[J]. 河南农业大学学报,2005,39(2): 139-142.
Song J Y,Li J G,Wang Y H,et al. Effect of applying selenium fertilizer on wheat physiological characteristics and the grain selenium content [J]. Journal of Henan Agricultural University,2005,39(2): 139-142. (in Chinese)

[21] Fleming G A. Selenium in Irish soil and plants [J]. Soil Science,1962,94: 28-35.

[22] 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.
Wang C X,Yi Y M,Yang L F,et al. Effect 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. (in Chinese)

[23] Acosta-Martinez V,Tabatabai M A. Arylamidase activity in soils: Effect of trace elements and relationships to soil properties and activities of amidohydrolases [J]. Soil Biol Biochem, 2001,33: 17-23.

[24] Mengel K,Kirkby E A. Principles of plant nutrition [M]. Bern: Int Potash Inst,1987: 687.

[25] 谢春生,唐桂虎,徐培智. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2): 177-182.
Xie C S,Tang S H,Xu P Z. Effects of single basal application of controlled-release fertilizers on growth and yield of rice [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2006,12(2): 177-182. (in Chinese)

[26] 侯笑林,张民,段路路. 控释复肥对马蹄莲养分淋溶损失及生长发育的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(4): 157-162.
Hou X L,Zhang M,Duan L L. Effects of controlled release compound fertilizers on leaching loss of nutrient and growth of *Calla* [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2008,22(4): 157-162. (in Chinese)

[27] Wu L,Huang Z Z,Burau R G. Selenium accumulation and selenium salt tolerance in five grass species [J]. Crop Sci, 1988,28: 517-522.

(上接第 121 页)

[16] Isupit A A,Hooijer C A,van Diepen. System description the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS [M]. Luxembourg:Office for Official Publications of the European Communities,1994.

[17] De Wit C T. Photosynthesis of leaf canopies [C]//Agricultural Research Report 63. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1965:1-57.

[18] De Wit C T. Dynamic concepts in biology [C]//Prediction and Management of Photosynthetic Productivity. Proceedings International Biological Program on Plant Production Technical Meeting. Wageningen, Netherlands: PUDOC,1970:17-23.

[19] 张建平. 基于作物生长模型的农业气象灾害对东北华北作物产量影响评估[D]. 北京: 中国农业大学,2010.
Zhang J P. Impact evaluation of agro meteorological hazard to yields of crops in Northeast China and North China based on crop growth model [D]. Beijing, China Agricultural University,2010. (in Chinese)

[20] 张建平,王春乙,杨晓光,等. 温度导致的我国东北地区玉米产量波动模拟[J]. 生态学报,2009,29(10): 5516-5522.
Zhang J P,Wang C Y,Yang X G,et al. Simulation of yields fluctuation caused by the temperature in Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(10): 5516-5522. (in Chinese)