

基施富硒有机肥料对玉米和土壤硒含量的影响

李圣男, 岳士忠, 李花粉, 乔玉辉*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:采用土培盆栽试验研究了贫硒土壤中添加富硒奶牛粪和富硒水稻秸秆生物炭2种不同富硒有机肥对玉米硒含量及贫硒土壤硒含量的影响。研究表明:添加富硒奶牛粪处理中的玉米对硒的吸收富集效果优于添加富硒水稻秸秆生物炭的处理,且植株根部吸收硒后更易于转运到地上部,硒在其体内的迁移率高。从2种有机肥的添加量来看,基施 $25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 富硒奶牛粪以及 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 富硒水稻秸秆生物炭对玉米生长有更好的促进作用,玉米植株内的硒含量及生长状况均优于其他处理。与此同时,富硒奶牛粪和富硒水稻秸秆的添加均能显著提高土壤中全硒的含量,且均随着富硒有机肥施用量的增加而增加,与富硒有机肥用量呈显著正相关。

关键词:富硒奶牛粪;富硒水稻秸秆生物炭;玉米;硒含量

中图分类号:S141.2 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2015)06-0571-06 doi: 10.13254/j.jare.2015.0140

Effect of Se-enriched Organic Fertilizers on Selenium Accumulation in Corn and Soil

LI Sheng-nan, YUE Shi-zhong, LI Hua-fen, QIAO Yu-hui*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The effect of two Se-enriched organic fertilizers (cow dung and rice straw biochar) on selenium accumulation of corn growing in selenium deficient soil was studied with pot experiment. The results showed that corn accumulated more selenium and the selenium was much easier to convert from root to shoot in the corn plant with the application of Se-enriched cow dung than Se-enriched rice straw biochar. With the application of more organic fertilizer such as $25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ Se-enriched cow dung or $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ Se-enriched rice straw biochar, the accumulation of selenium and growth status of corn were getting better than the other treatments. At the same time, as the application amount of Se-enriched organic fertilizers (cow dung and rice straw biochar) increased, the total selenium content in the soil also increased, which positively correlated with each other.

Keywords: Se-enriched cow dung; Se-enriched rice straw biochar; corn; selenium content

硒(Se)是动物生长发育必需的微量元素,也是植物生长发育的有益元素。近些年的研究表明,硒对动植物生长有显著的促进作用^[1],同时硒过量亦会产生较大的毒副作用^[2]。据统计,我国绝大部分地区人们日常生活膳食硒供应量为 $26\text{ }\mu\text{g}$ ^[3],远未达到我国营养学会规定的 $50\text{ }\mu\text{g}$ 每日的标准^[4],以及杨光圻^[5]推荐的膳食适宜供给量每日 $50\sim 250\text{ }\mu\text{g}$ 的标准。通过食物补

硒成为达到人体长期补硒目的的主要方式,有机富硒作物的研究开发成为近十年来的研究热点。

随着有机农业的发展,有机产品也越来越受到消费者的青睐,富硒有机产品的开发因其安全性和功能性而成为研究热点,有机农产品在生产过程中不能使用化学品,因此在富硒有机农产品开发过程中无机硒的使用成为此类产品开发的限制因素。富硒有机肥是指利用特定功能微生物与畜禽粪便、农作物秸秆等为原料,经无害化、混合处理腐熟而成的一类具有微生物功能和有机肥效应的肥料,养分全面、肥效均衡持久,同时也可以为农作物生长提供硒元素,可作为生产富硒有机农产品的一种环保型肥料,而有机硒肥作用研究报道相对较少。

本研究通过2种当地取材的有机硒肥(由富硒水

收稿日期:2015-06-01

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303106);“十二五”国家科技支撑计划项目“区域优势特色有机产品认证关键技术与示范”(2014BAK19B00)

作者简介:李圣男(1988—),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事农业生态与有机农业方面的研究。

E-mail: shengnan_li1989@sina.com

*通信作者:乔玉辉 E-mail: qiaoyh@cau.edu.cn

稻秸秆制得的富硒水稻秸秆生物炭、由富硒奶牛排出的富硒奶牛粪)作为肥料栽培玉米,以期获得不同有机硒肥在贫硒土壤中对玉米富硒规律及吸收生长的规律,并比较不同硒肥对土壤肥力的影响规律,为有机硒肥在生产实践中的应用提供理论依据,同时也可以使当地富硒有机肥料得以循环利用。

1 材料和方法

1.1 供试材料

试验土壤采集自江西省丰城市董家镇(115.78°E,28.20°N),为贫硒棕壤土,富硒奶牛粪及富硒水稻秸秆生物炭均采集自江西省丰城市,其基本的理化性质见表 1。本次试验供试植物玉米,为一年生禾本科草本植物,品种为“郑单 958”。

表 1 供试材料的基本理化性状

Table 1 Basic physicochemical properties of the tested material

供试材料	全硒/ mg·kg ⁻¹	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	EC/ μS·cm ⁻¹	pH 值
土壤	0.11	9.19	0.616	17.1	193	90.07	4.5
奶牛粪	0.9	633.79	0.093	1.58	3.5	8.87	8.62
水稻秸秆	0.48	868.53	0.059	0.93	4.87	3.39	10.51

注:土壤 pH 值的测定采用 1:2.5 土水比;富硒奶牛粪 pH 值的测定采用 1:5 土水比;富硒水稻秸秆生物炭 pH 值的测定采用 1:20 的土水比^[6]。

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理,分别为:对照(CK)不添加任何肥料、富硒奶牛粪用量(C1、C2、C3)分别为 5、15、25 t·hm⁻²;富硒水稻秸秆生物炭用量(B1、B2、B3)分别为 8、25、40 t·hm⁻²,对应 C1 和 B1、C2 和 B2、C3 和 B3 组全氮含量一致,各处理组混匀后硒含量基本情况见表 2。于 2013 年 8 月 20 日播种,培养一定时间(30、60、90 d)后,整株取样进行相关实验指标的测定。

表 2 供试处理组硒含量基本状况(mg·kg⁻¹)

Table 2 Basic situation of Se content in each treatment group (mg·kg⁻¹)

处理	CK	C1	C2	C3	B1	B2	B3
全硒含量	0.111	0.128	0.161	0.241	0.138	0.193	0.313

1.3 测定项目和方法

分别在玉米生长 30、60 d 和 90 d 时,测定玉米地上部(茎、叶)和根全硒含量:取过 0.5 mm 筛的植物样 0.2 g,置于聚四氟乙烯内胆中,加 5 mL 硝酸,2 mL 过氧化氢,盖好盖子,放置过夜。次日打开盖子,转摇释

放冷消解产生的 NO₂ 等气体,再拧紧钢套,置于恒温烘箱中 150 °C 条件下消解 5 h,待完全冷却后转移至 50 mL 容量瓶中,定容,摇匀,静置,取上清液待测。Se 测定采用 ICP-MS 法。

土壤全硒测定方法:取过 100 目筛 0.15 g 土样,置于聚四氟乙烯内胆中,加 5 mL 硝酸,室温下预消解 0.5~1 h,再加 2 mL 过氧化氢,拧紧缸套,置于恒温烘箱中 160 °C 条件下消解 9 h,待取出后冷却,在电热板上赶酸至近干,用去离子水转移至 50 mL 容量瓶中,倒置后静置 1~2 h,取上清液待测,Se 测定采用 ICP-MS 法。

采用国家标准土样 ESS-1 和 ESS-4 进行全程质量控制,Se 的回收率为 92%~103%。

1.4 数据分析

所有的试验数据利用 SPSS 20.0,单因素方差分析及多重比较判断处理间的差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同富硒有机肥对玉米地上部硒含量的影响

结果分析表明(图 1),玉米生长 30、60 d 和 90 d 时,玉米地上部硒含量随着富硒奶牛粪添加浓度的增加显著升高,二者显著正相关($P<0.05$),并且经不同富硒奶牛粪用量处理后玉米地上部硒含量分别为 CK 的 3.67~6.70、1.45~5.52 倍和 1.78~4.87 倍。当玉米生长 30 d 时,C2、C3 处理组间无显著差异,与此同时在玉米生长的整个周期中,添加富硒奶牛粪处理后收获的玉米,其地上部硒含量较 CK 均呈现显著增高,并且玉米地上部硒含量随着玉米的生长持续升高。

针对贫硒土壤中添加富硒水稻秸秆生物炭的测定结果分析表明,玉米生长 30、60、90 d 时,玉米地上部硒含量随着富硒水稻秸秆生物炭添加量的增加显著升高,二者显著正相关($P<0.05$),并且经不同添加量的富硒水稻秸秆生物炭处理后玉米地上部硒含量分别为 CK 的 1.95~5.60、1.14~2.83 倍和 1.23~2.69 倍。当玉米生长 60 d 时,B1 处理组地上部硒含量较 CK 空白对照组无显著差异,除此之外,其他各阶段玉米地上部硒含量较 CK 均显著增高。玉米生长的整个周期中,各处理间地上部硒含量均呈显著差异,并且玉米地上部硒含量随着玉米的生长持续升高。

在玉米整个生长过程中,各处理间玉米地上部硒含量大小排序均为 C3>C2>B3>B2>C1>B1>CK。且生长 90 d 时,C2、C3、B3 处理组玉米地上部硒含量分别比 CK 处理组提高 241.3%、386.6%和 168.35%。

2.2 不同富硒有机肥对玉米根部硒含量的影响

由图2所示,玉米生长30、60 d和90 d时,玉米根部硒含量随着富硒奶牛粪添加量的增加显著升高,二者显著正相关($P<0.05$),并且经不同富硒奶牛粪用量处理后玉米根部硒含量分别为CK的2.0~7.53、1.34~1.95倍和1.31~7.31倍。当玉米生长90 d时,C1处理组玉米根部硒含量较CK无显著增加。在玉米生长的整个周期中,添加富硒奶牛粪处理后收获的玉米,其根部硒含量较CK均呈显著增高,并且玉米根部硒含量随着玉米生长持续升高。

由图2所示,玉米生长30、60、90 d时,玉米地上部硒含量随着富硒水稻秸秆生物炭添加量的增加显著升高,二者显著正相关($P<0.05$),并且经不同添加量的富硒水稻秸秆生物炭处理后玉米根部硒含量分别为CK的1.32~6.24、1.06~1.59倍和1.15~3.94倍。而在整个生长周期中,B1处理组根部硒含量较CK均无显著增加,B2、B3处理组各阶段玉米根部硒含量较CK均呈显著增高。玉米生长的整个周期中,各

处理根部硒含量均呈显著差异,并且玉米根部硒含量呈现随玉米的生长持续升高的趋势。

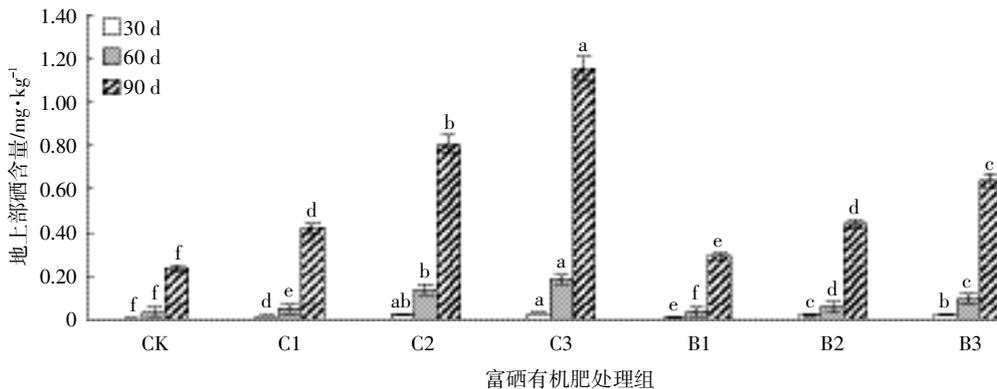
在整个生长过程中,各处理间玉米根部硒含量大小排序均为C3>C2>B3>B2>C1>B1>CK,且生长90 d时,C2、C3、B3处理组玉米地上部硒含量分别比CK处理组提高436.0%、631.6%和294.6%。

贫硒土壤中添加不同种类不同用量富硒有机肥后,玉米地上部硒含量均显著高于根部硒含量,地上部是玉米硒元素的主要积累部位。并且随着各富硒有机肥用量的增加及玉米的生长发育,玉米地上部和根部硒含量均有显著上升趋势(图1~图2)。

2.3 不同富硒有机肥对玉米籽粒硒含量的影响

根据元素在玉米体内的迁移规律^[7-11],籽粒中元素含量约占茎秆中元素含量的25%,从而可以得到在玉米生长90 d时,经过不同富硒有机肥处理后的玉米籽粒中硒含量。

由图3所示,针对贫硒土壤中添加富硒奶牛粪的结果分析表明,玉米生长90 d时,C1、C2、C3各处理



不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

图1 不同富硒有机肥对玉米地上部硒含量的影响

Figure 1 Effects of the different Se-enriched organic fertilizers on shoot Se content of corn

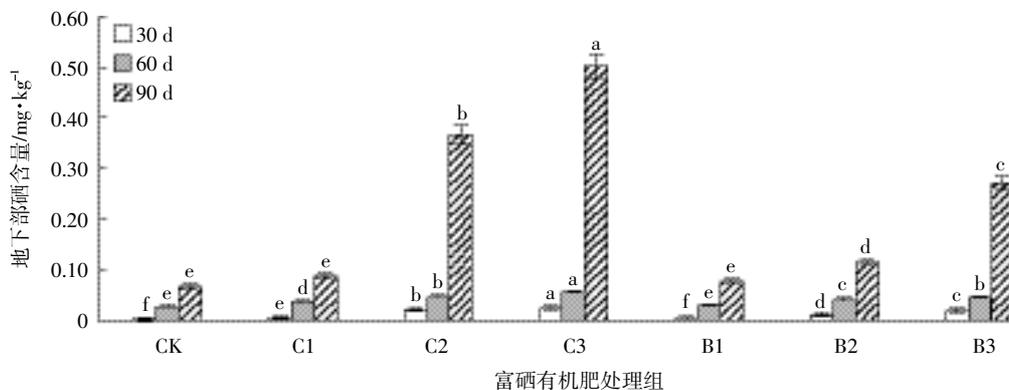


图2 不同富硒有机肥对玉米地下部硒含量的影响

Figure 2 Effects of the different Se-enriched organic fertilizers on root Se content of corn

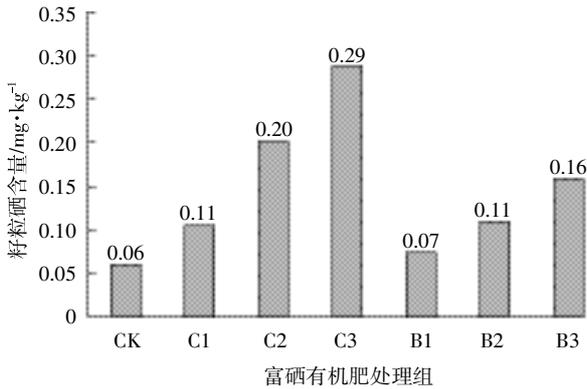


图 3 不同富硒有机肥对玉米籽粒硒含量的影响
Figure 3 Effects of the different Se-enriched organic fertilizers on grain Se content of corn

组玉米籽粒中硒含量分别为 0.105 2、0.202 2、0.288 3 mg·kg⁻¹,均达到陕西省地方标准(DB61/T 556—2012)所规定的玉米种全硒含量 0.15~0.30 mg·kg⁻¹ 的要求,分别较空白对照组增加 43.7%、241.35%、386.50%。

针对贫硒土壤中添加富硒水稻秸秆生物炭的测定结果分析表明,玉米生长 90 d 时,B1、B2、B3 各处理组玉米籽粒中硒含量分别为 0.073 1、0.109 8、0.159 1 mg·kg⁻¹,分别较空白对照组增加 23.21%、84.81%、168.35%。

玉米生长 90 d 时,按照陕西省地方标准(DB61/T 556—2012)所规定的玉米中全硒含量 0.15~0.30 mg·kg⁻¹ 的要求,玉米籽粒中硒含量达标率为 42.86%,在一定程度上说明富硒有机肥的可行性。

2.4 不同富硒有机肥对玉米硒富集规律及转运的影响

BCF 指玉米地上部(C_{shoot})和根部(C_{root})的硒含量与土壤(C_{soil})中硒浓度的比值,表示为 $BCF_{shoot}=C_{shoot}/C_{soil}$ 或 $BCF_{root}=C_{root}/C_{soil}$,反映玉米吸收富集硒的能力^[9-10]; TF 为玉米地上部与根部硒含量的比值,表示为 $TF_{shoot/soil}=C_{shoot}/C_{root}$,反映硒在玉米体内的分布特征^[11-12]。生物富

集系数(BCF)和转移因子(TF)能在一定程度上反应玉米吸收富集硒的能力和硒在玉米体内的分布特征。

2.4.1 不同富硒有机肥对玉米硒富集规律的影响

由表 3 可知,随着玉米的生长,各处理组 $BCF_{shoot/soil}$ 和 $BCF_{root/soil}$ 均呈现持续增大的趋势。同一生长时期,相同施用量富硒奶牛粪和富硒水稻秸秆生物炭处理的 $BCF_{shoot/soil}$ 均大于 $BCF_{root/soil}$,可见玉米地上部的富集能力强于根部,即说明硒易在玉米地上部积累。

2.4.2 不同富硒有机肥在玉米体内的转运规律

由表 4 可知,针对贫硒土壤中添加富硒奶牛粪的结果分析表明,各生长时期,经富硒奶牛粪处理的 $TF_{shoot/root}$ 均大于 1,范围为 1.122~4.690。C1 处理组的 $TF_{shoot/root}$ 随着玉米的生长呈现先减小后增大的趋势,而 C2、C3 处理组的 $TF_{shoot/root}$ 随着玉米的生长均呈现先增大后减小的趋势。

针对贫硒土壤中添加富硒水稻秸秆生物炭的结果分析表明,各生长时期,经富硒水稻秸秆生物炭处理的 $TF_{shoot/root}$ 均大于 1,范围为 1.137~3.834。B1、B2 处理组的 $TF_{shoot/root}$ 随着玉米的生长呈现先减小后增大趋势,而 C3 处理组的 $TF_{shoot/root}$ 随着玉米的生长呈现持续增大的趋势。说明硒从玉米根部转移到地上部的能力与土壤硒浓度及生长阶段有一定关系。

2.5 不同富硒有机肥对土壤中全硒含量的影响

由图 4 所知,随着时间的推移,各处理组土壤中全硒含量均呈现持续下降的趋势,减少范围为 60.63%~82.21%。降低幅度最大的是 CK 空白对照组,降幅为 82.21%;降低幅度最小的是 C3 处理组,降幅为 63.54%。可以看出,随着富硒有机肥添加量的增加,在玉米的整个生长过程中,土壤中全硒含量降幅逐渐减少。

针对贫硒土壤中添加富硒奶牛粪的结果分析表明,在玉米生长的全过程中,添加富硒奶牛粪处理的

表 3 不同富硒有机肥对玉米硒富集系数影响

Table 3 Effects of selenite on BCF of corn

处理	BCF 地上部富集系数			BCF 地下部富集系数		
	30 d	60 d	90 d	30 d	60 d	90 d
CK	0.116 3e	1.328 3f	35.709 5b	0.090 4d	1.114 1d	10.400 3d
C1	0.358 8c	1.625 0e	32.385 1c	0.154 4c	1.265 6c	6.898 6e
C2	0.490 7a	4.251 6b	38.385 7b	0.426 8a	1.449 5b	17.471 9b
C3	0.450 4ab	5.605 6a	49.456 5a	0.401 3a	1.666 1a	21.514 1a
B1	0.213 7d	1.479 2ef	25.898 1d	0.115 4d	1.146 9d	6.976 6e
B2	0.422 6b	2.254 8d	28.690 4d	0.269 5b	1.492 8b	7.451 8e
B3	0.464 4ab	3.060 1c	32.682 8c	0.408 3a	1.446 1b	13.901 3c

表4 不同富硒有机肥对玉米体内全硒转移因子的影响
Table 4 Effects of Se on translocation factors (TF) of corn

处理	30 d	60 d	90 d
CK	1.280	1.192	3.456
C1	2.328	1.284	4.690
C2	1.150	2.933	2.200
C3	1.122	3.364	2.298
B1	1.851	1.290	3.710
B2	1.566	1.510	3.834
B3	1.137	2.116	2.351

组别,土壤中全硒的含量均较 CK 对照组呈现显著差异。玉米种植 30 d 后,CK 对照组土壤中全硒含量为 $0.0371 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 C1、C2、C3 处理组土壤中全硒含量依次为 0.0443 、 $0.0536 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0639 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别为 CK 对照组全硒含量的 1.19、1.44 倍和 1.72 倍; 种植 60 d 后,CK 对照组中全硒含量为 $0.0256 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 此时 C1、C2、C3 处理组土壤中全硒含量分别为 0.0302 、 $0.0326 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0334 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是对照组全硒含量的 1.18、1.27 倍和 1.30 倍; 种植 90 d 后,CK 对照组土壤中全硒含量为 $0.0066 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 此时 C1、C2、C3 处理组土壤中全硒含量分别为 0.0131 、 $0.0211 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0233 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是对照组全硒含量的 1.98、3.20 倍和 3.38 倍。

针对贫硒土壤中添加富硒水稻秸秆生物炭的结果分析表明,玉米种植 30 d 后,B2、B3 处理组土壤中全硒含量较 CK 对照组呈现显著差异,两组土壤全硒含量分别为 $0.0486 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0519 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是对照组土壤全硒含量的 1.31 倍和 1.40 倍; 种植 60 d 后, B2、B3 土壤中全硒含量较 CK 对照组仍然呈现显著差异, 此时, 2 组土壤全硒含量分别为 $0.0277 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0314 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是对照组土壤全硒含

量的 1.08 倍和 1.23 倍; 种植 90 d 后, 添加富硒水稻秸秆生物炭处理的组别土壤中全硒的含量均较 CK 对照组呈现显著差异, 此时 B1、B2、B3 处理组土壤中全硒含量依次为 0.0113 、 $0.0153 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0195 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别是 CK 对照组土壤全硒含量的 1.71、2.32 倍和 2.95 倍。

2.6 添加不同富硒有机肥后土壤硒含量与玉米硒含量的关系

由表 5 所知, 当贫硒土壤中添加富硒奶牛粪后, 在玉米生长的整个过程中, 土壤中硒含量与玉米地上部、根部硒含量均呈现极显著正相关关系 ($P<0.01$)。

由表 6 所知, 当贫硒土壤中添加富硒水稻秸秆生物炭后, 在玉米生长的整个过程中, 土壤中硒含量与玉米地上部、根部硒含量也均呈现极显著正相关关系 ($P<0.01$)。

3 结论

针对贫硒土壤中添加 2 种富硒有机肥(奶牛粪和水稻秸秆生物炭)后, 玉米生长的不同阶段玉米地上部和根部硒含量随着富硒奶牛粪添加浓度的增加显

表5 添加富硒奶牛粪后土壤硒含量与玉米硒含量间的相关性
Table 5 Pearson correlation between Se concentration of soil and corn with Se-enriched cow dung

采样时间/d	玉米硒含量	土壤硒含量
30	地上部硒含量	0.920**
	根部硒含量	0.932**
60	地上部硒含量	0.865**
	根部硒含量	0.947**
90	地上部硒含量	0.958**
	根部硒含量	0.848**

注: “**”表示在 0.01 水平上显著相关。下同。

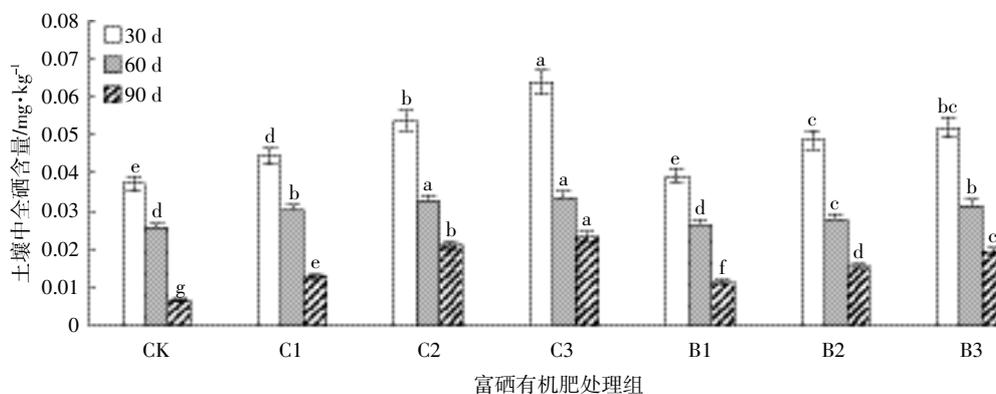


图4 不同富硒有机肥对土壤全硒的影响

Figure 4 Effects of the different Se-enriched organic fertilizers on total Se of soil

表 6 添加富硒水稻秸秆后土壤硒含量与玉米
硒含量间的相关性

Table 6 Pearson correlation between Se concentration of soil
and corn with Se-enriched corn biochar

采样时间/d	玉米硒含量	土壤硒含量
30	地上部硒含量	0.984**
	根部硒含量	0.966**
60	地上部硒含量	0.967**
	根部硒含量	0.906**
90	地上部硒含量	0.962**
	根部硒含量	0.871**

著升高,二者呈现显著正相关。富硒奶牛粪对玉米的富硒效果明显好于富硒水稻秸秆生物炭;随着富硒有机肥添加量的增加,对玉米生长的促进作用越大,其中以 25 t·hm⁻² 的富硒奶牛粪和 40 t·hm⁻² 的富硒水稻秸秆生物炭效果最佳。本实验中添加富硒有机肥处理后植株根部吸收硒后更易于转运到地上部,硒在其体内的迁移率高;参照陕西省地方标准(DB61/T 556—2012),玉米籽粒中硒含量达标率为 42.86%,在一定程度上说明利用富硒有机肥生产富硒有机玉米的可行性。

参考文献:

[1] 贾宏昉, 宋家永, 王海红, 等. 硒对作物生理、生长发育及产量、品质的影响研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(4): 449-454.
JIA Hong-fang, SONG Jia-yong, WANG Hai-hong, et al. Research progress on the effect of selenium on physiological functions, growth, yield and quality of crops[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(4): 449-454. (in Chinese)

[2] McAdam P A. Chronic toxicity and retention of dietary selenium fed to rats as D- or L-selenomethionine, selenite, or selenate[J]. *Nutrition Research*, 1987, 7(6): 601-610.

[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. (in Chinese)

[4] 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 Yong-qin, CAO Jia-shu, LI Jian-hua, et al. Effect of selenium application on the yield of garlic and its selenium content[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28(5): 425-429. (in Chinese)

[5] 杨光圻. 膳食硒需要量和安全摄入量范围研究结果述要[J]. 营养学报, 1992, 14(3): 318-321.
YANG Guang-qi. The results between the quantity demand of daily selenium and the scope of safe intake[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 1992, 14(3): 318-321. (in Chinese)

[6] Nishimiya K, Hata T, Imamura Y, et al. Analysis of chemical structure of wood charcoal by X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Journal of Wood Science*, 1998, 44(1): 56-61.

[7] 董同喜, 杨海雪, 李花粉, 等. 华北农田小麦-玉米轮作体系下土壤重金属积累特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 355-365.
DONG Tong-xi, YANG Hai-xue, LI Hua-fen, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in the soil with wheat-corn rotation system in north China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(4): 355-365. (in Chinese)

[8] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3): 277-282.

[9] Mattina M J I, Lannucci-Berger W, Musante C, et al. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(3): 375-378.

[10] Ekvall L, Greger M. Effects of environmental biomass-producing factors on Cd uptake in two Swedish ecotypes of *Pinus sylvestris*[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 121(3): 401-411.

[11] Matyjaszewski K, Xia J. Atom transfer radical polymerization[J]. *Chemical Reviews*, 2001, 101(9): 2921-2990.