

斯鑫鑫, 唐尚柱, 赵晓海, 等. 蓝藻有机富硒肥的研制及其在普通白菜种植中的应用[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 340-347.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.009

蓝藻有机富硒肥的研制及其在普通白菜种植中的应用

斯鑫鑫, 唐尚柱, 赵晓海, 王顺永, 李玉成
(安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了研究蓝藻与农业废弃物无害化处理及资源化利用技术, 开展蓝藻、菌渣、稻壳混合富硒堆肥试验, 设置对照组(CK)、富硒枯草芽孢杆菌组(W)、亚硒酸钠组(Y)研究不同硒处理对蓝藻好氧堆肥的影响。结果表明, 堆制 48 d 后, 各处理的堆肥均已满足有机肥料国家标准(NY 525-2012《有机肥料》)的要求, pH 值均维持在 5.5~8.5, 种子发芽指数均高于 85.00%, W 处理组的有机质含量分别较 CK、Y 处理组提高了 8.72%、9.13%, 总养分(N+P₂O₅+K₂O)含量分别较 CK、Y 处理组提高了 5.60%、4.70%, 总硒含量分别较 CK、Y 处理组提高了 1.92 倍、0.21 倍。盆栽试验结果表明, W、Y 处理组的普通白菜株高、根长、单株鲜质量均显著高于对照组($P<0.05$), 与对照组相比, W、Y 处理组的总硒含量分别提高了 127.73%、112.53%, 有机硒含量分别提高了 135.45%、102.73%, 此外, 施加硒肥减少了普通白菜体内铅、镉的累积量。综合考虑 2 种硒处理对蓝藻堆肥的影响得出, 富硒枯草芽孢杆菌处理的堆肥效果相对更好。

关键词: 蓝藻; 富硒枯草芽孢杆菌; 好氧堆肥; 普通白菜

中图分类号: X52; S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)02-0340-08

Development of selenium-enriched cyanobacteria organic fertilizer and its application in bok choy planting

SI Xin-xin, TANG Shang-zhu, ZHAO Xiao-hai, WANG Shun-yong, LI Yu-cheng

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: To study the technology of harmless treatment and resource utilization of cyanobacteria and agricultural wastes, experiment of selenium enriched composting using mixture of cyanobacteria, mushroom residue and rice husk was carried out. Groups of control (CK), selenium-enriched *Bacillus subtilis* (W) and sodium selenite (Y) were set up to study the effects of different selenium treatments on cyanobacteria aerobic composting. The results showed that, after 48 days of composting, the finished compost of each treatment met the requirements of the national standard for organic fertilizer (NY 525-2012 <organic fertilizer>). The pH was maintained at 5.5-8.5, and the seed germination index was higher than 85.00%. The organic matter content of W treatment group increased by 8.72% and 9.13% compared with CK and Y treatments respectively, the total nutrients (N+P₂O₅+K₂O) content increased by 5.60% and 4.70% compared with CK and Y treatment groups respectively, and the total selenium content increased by 1.92 times and 0.21 time compared with CK and Y treatment groups respectively. The pot experiment results showed that the plant height, root length and fresh weight of single bok choy plant in W and Y treatment groups were significantly higher than those of the control group ($P<$

0.05). Compared with the control group, the total selenium content of W and Y treatment groups increased by 127.73% and 112.53%, the organic selenium content also increased by 135.45% and 102.73% respectively, and the application of selenium fertilizer reduced the accumulation of lead and cadmium in the bok choy. Consider-

收稿日期: 2020-08-21

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX07603-002-001)

作者简介: 斯鑫鑫(1995-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为环境生物地球化学。(E-mail) 1987319795@qq.com

通讯作者: 李玉成, (E-mail) li-yucheng@163.com

ing the effects of two selenium treatments on cyanobacteria composting, the composting effect of selenium-enriched *B. subtilis* treatment is relatively better.

Key words: cyanobacteria; selenium-enriched *Bacillus subtilis*; aerobic composting; bok choy

近年来,随着巢湖流域周边人口的增加以及工农业的迅速发展,导致水体富营养化加剧,巢湖蓝藻水华暴发^[1]。目前,处理蓝藻最直接、最有效的措施是传统的机械和人工打捞^[2]。打捞上来的蓝藻堆置在湖边或填埋场,经过雨水冲刷,容易使土壤、水体受到污染,并且蓝藻中释放的微囊藻毒素的性质极其稳定,是一种能引发肝功能失调甚至肝癌的毒素^[3]。因此,将蓝藻废弃物进行资源化、无害化处理具有重大意义,其中厌氧发酵、好氧堆肥是治理蓝藻污染的主要技术。好氧堆肥相较于厌氧发酵具有周期短、成本低、操作简单等特点,在前期的工作中,笔者所在实验室进行了蓝藻好氧堆肥降解藻毒素的研究,结果表明,堆肥中微囊藻毒素 LR (MC-LR)、微囊藻毒素 RR (MC-RR) 含量均低于 1 μg/kg,降解率达 95%^[4],说明通过好氧堆肥能够有效消除蓝藻中的藻毒素。同时,蓝藻中含有大量营养物质,利用好氧堆肥能够生产出优质的有机肥料,实现蓝藻的资源化利用。由于蓝藻的碳氮比较低,需要结合其他物料来调节堆肥材料参数。农业废弃物中含有作物生长所需的养分,因此将蓝藻与农业废弃物进行混合堆肥不仅可以减少环境污染,还可充分利用有机物质资源,有利于农业的可持续发展。

随着有机农业的发展及人们生活水平的提高,发展功能农业是未来发展的方向。硒是人体必不可少的微量元素之一,具有抗氧化、防癌治病等生理功能^[5]。研究发现,中国约有 72% 地区的人口硒摄入量不足,严重影响了人们的身体健康^[6]。近年来,关于无机富硒肥的研究颇多,但是摄入过多的无机

硒会影响人们的身体健康,还会抑制作物生长和污染环境,导致作物产量和品质下降。有机富硒肥料作为土壤改良剂,在培养富硒作物方面利用率高,效果显著^[5]。由此可见,有机富硒肥料的研制是生产富硒有机农产品的一条有效途径。

以往研究富硒有机肥的原材料大都是畜禽粪便或其他农业废弃物,利用蓝藻生产有机富硒肥的研究甚少。本试验通过在堆肥材料中接种富硒枯草芽孢杆菌、添加亚硒酸钠制作蓝藻有机富硒肥,以蓝藻、菌渣、稻壳为原料进行混合堆肥,通过调节堆肥材料水分含量及碳氮比进行堆肥试验,探究不同硒处理对蓝藻堆肥效果的影响。由于普通白菜是常见的十字花科蔬菜,是人体补硒的理想硒源,且其生长周期短,适于四季栽种,易于大规模生产,因此本研究通过普通白菜盆栽试验,分析蓝藻有机富硒堆肥对普通白菜生长及硒含量的影响,以期为蓝藻有机富硒肥料在生产实践中的应用提供理论依据,同时使农业废弃物实现资源化利用,发展循环农业。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究所用普通白菜品种为四季青。堆肥试验所用蓝藻采用安徽省合肥市巢湖岸边晒干的蓝藻藻泥,食用菌菌渣取自合肥立新菌种厂培训学校,水稻稻壳取自紫蓬山试验基地,亚硒酸钠(分析纯试剂)购自合肥拜尔迪化学科技有限公司,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)购自中国林业微生物菌种保藏管理中心。堆肥原料的基本理化性质见表 1。

表 1 堆肥原料的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical characteristics of composting materials

原料	全碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	含水率 (%)	pH 值	碳氮比
蓝藻藻泥	430.3	57.1	11.80	10.53	10	6.75	7.54
菌渣	350.7	11.8	9.06	8.45	37	8.15	29.72
水稻稻壳	340.2	5.1	3.24	2.68	16	6.66	66.71

1.2 堆肥试验

1.2.1 富硒枯草芽孢杆菌的制备 *B. subtilis* 用 LB

液体培养基培养,分别向培养基中添加 0 mg/L、15 mg/L、30 mg/L、45 mg/L、60 mg/L、90 mg/L Na₂SeO₃

和体积分数为 2%、4%、6% 的枯草芽孢杆菌菌液(浓度为 1×10^8 CFU/ml)。利用 *B. subtilis* 的生物转化能力将有毒、利用率低的 Na_2SeO_3 转化为吸收率高且安全性好的有机硒,在培养 *B. subtilis* 的过程中通过添加不同质量浓度的 Na_2SeO_3 及使用不同菌种接种量,探究在不同加硒条件下 *B. subtilis* 的富集转化和生长情况。结果显示,培养 *B. subtilis* 的最适 Na_2SeO_3 质量浓度、接种量分别为 30 mg/L、4%,在最优条件下 *B. subtilis* 对无机硒的转化率达到 80.57%。

B. subtilis 对无机硒转化率影响的测定^[7]。将培养好的 *B. subtilis* 菌液于 10 000 r/min 离心 10 min,取 3.0 ml 上清液,向其中加入 1.5 ml 4 mol/L HCl 和 3.0 ml 1 mol/L 抗坏血酸,上下摇晃使其充分反应,在室温下反应 10 min 后于 500 nm 处测定其吸光度。将所测吸光度代入标准曲线方程 $Y = 0.0032x - 0.0043$ ($R^2 = 0.9967$, x : 亚硒酸钠质量浓度; Y : 吸光度),计算残留的无机硒质量浓度,进而可以得出 *B. subtilis* 对无机硒转化率。

1.2.2 堆肥试验 将蓝藻、菌渣、稻壳按 1:10:1 的质量比混匀后,调节含水率为 60% 左右,调节碳氮比至 22 左右,再将其装入 30 L 自制的堆肥桶中,在堆肥桶中央和底部均钻洞以插入打过孔的聚氯乙烯(PVC)管并用弯头连接,在堆肥桶底部安装有鼓风机,以保证氧气的正常供给。试验设置 1 个对照组(CK)和 2 个处理组,处理组分别接种富硒枯草芽孢杆菌(W)和加入相同质量浓度的亚硒酸钠(Y),每个试验组设 2 个平行,每 3 d 鼓风 1 次,每 10 d 翻堆 1 次,每次翻堆视堆体含水情况补充适量水分。

1.2.3 采样时间与方法 从堆肥当天开始每天将堆肥发酵专用测温计插入堆体中部,读取堆体温度,同时记录环境温度。取样时间分别为堆肥后第 1 d、第 6 d、第 11 d、第 19 d、第 28 d、第 38 d、第 48 d,采样时,将每个样品分为风干样、新鲜样,风干样用于测定 pH 值、总有机碳(TOC)含量、总氮含量、总磷含量、总钾含量、总硒含量及不同形态硒的含量,新鲜样用于测定种子发芽率。

1.2.4 测定方法 pH 值的测定:称取 2.0 g 过 20 目筛的堆肥样品于 50 ml 离心管中,加入 20 ml 纯水,恒温振荡 25 min,静置 30 min 后,用 pH 计测定试样上清液的 pH 值。总氮含量、总磷含量、总钾含量的

测定参照 NY 525-2012《有机肥料》^[8],总有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定。

种子发芽指数(GI)的测定^[9]:取 5 kg 新鲜堆肥样品,以蒸馏水为溶剂,按 1 g:10 ml 的固液比浸提鲜样。取 10 ml 浸提液放入铺好滤纸的无菌培养皿中,点播 20 粒叶用莴苣种子(主要通过测试种子发芽率来评价堆肥产品是否腐熟及其毒性),每个处理设 3 次重复,同时设清水对照。培养皿置于 25 ℃ 恒温培养箱中培养 60 h 后测定种子发芽率及根长。GI 的计算公式如下:

$$GI = (\text{堆肥处理的种子发芽率} \times \text{种子根长}) / (\text{对照处理的种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100\%$$

总硒含量及不同形态硒含量的测定:用 HNO_3 - HClO_4 溶液(体积比为 3:2)于 170 ℃ 消解后测定总硒含量^[10]。硒形态的测定主要参考瞿建国等^[11]的连续浸提法,准确称取 1.0 g 过 100 目的风干样品置于 50 ml 离心管中,按固液比 1 g:10 ml 逐级加入浸提液进行连续浸提。

1.3 盆栽试验

试验用盆(长 42.5 cm,宽 18.5 cm,高 13.0 cm)为聚丙烯(PP)树脂材质,每盆装 3.0 kg 土(供试土壤采自安徽省合肥市紫蓬山试验基地),将发酵腐熟的有机富硒肥与土壤按质量比 1:3 混合使用,当天将土肥浇透水,隔天种植浸泡 5 h 的普通白菜种子^[12-13],每盆播种大小基本一致的饱满种子 20 粒。试验共设 3 个处理:(1)施堆肥 CK 组;(2)施堆肥 W 组;(3)施堆肥 Y 组,每个处理设 2 个重复,试验周期为 45 d。

普通白菜生长指标及总硒含量的测定参照宋卫卫^[12]的方法,铅、镉含量的测定采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)法。

普通白菜无机硒、有机硒含量的测定^[14]:称取 1 g 样品置于锥形瓶中,加入 30 ml 超纯水,经超声处理 30 min 后,于 5 000 r/min 离心 10 min 或用定量滤纸过滤,在上清液中加入 5 ml 环己烷,4 h 后收集水相,再将该水相溶液加热 2~3 min,用超纯水定容至 10 ml 容量瓶中后用 ICP-MS 法测定无机硒含量,有机硒含量=总硒含量-无机硒含量。

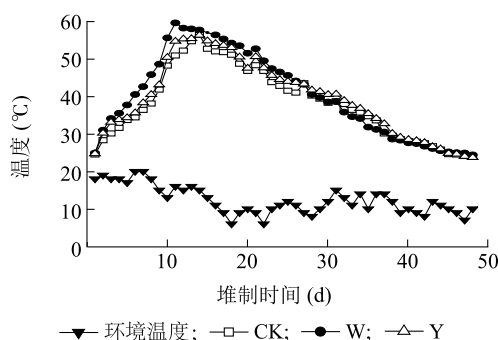
1.4 数据分析

用 Excel 2013、SPSS 22 软件对试验数据进行处理分析,用 Origin 2018 软件进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 堆制过程中堆肥的理化性质

2.1.1 堆制过程中堆肥温度的变化 温度是评价堆肥是否腐熟的重要指标之一^[9]。如图1所示,3个处理的堆肥温度总体呈先升高后降低最后趋于稳定的趋势,其中W处理组的温度在堆肥第11 d达到最高值59.6℃,且高温阶段(>50.0℃)持续了12 d。而CK、Y处理组的堆肥温度都在堆制第14 d达到最高值,分别为56.4℃、56.3℃,高温阶段(>50.0℃)分别只持续了8 d、10 d。在整个堆制过程中,W处理组的堆肥升温较快且温度较高,说明接种枯草芽孢杆菌能够促进堆肥发酵腐熟,提高堆体温度且延长高温持续时间。



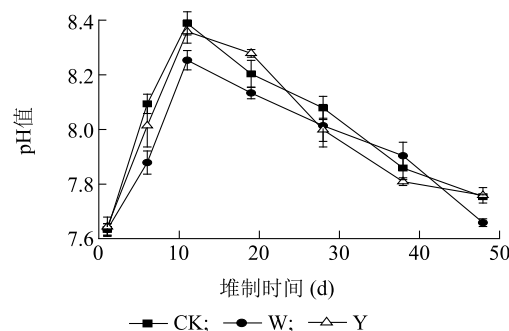
CK:对照组;W:接种富硒枯草芽孢杆菌处理组;Y:加亚硒酸钠处理组。

图1 堆制过程中堆肥温度的变化

Fig.1 Changes of compost temperature during composting

2.1.2 堆制过程中堆肥 pH 值的变化 pH 值是影响堆肥微生物生长繁殖的重要因素之一,同时也是反映堆肥腐熟进程的重要参数。pH 值过高或过低都不利于堆肥高温好氧堆肥反应的进行,从而严重影响堆肥腐熟周期及堆肥产品质量^[15]。由图2可以看出,在堆制过程中对照及W、Y 2个处理组的pH值均呈先上升后下降的变化趋势,变化范围为7.60~8.40。在堆制过程中,蓝藻堆肥中大量含氮化合物发生氨化作用,促进了 NH_4^+ 的生成,提高了堆肥pH值。在堆肥后期,氨化作用降低,硝化作用增强,同时大分子有机化合物分解产生的 H^+ 使堆肥pH值下降^[16]。经48 d的发酵,对照与W、Y处理组的pH值分别为7.75、7.66、7.76,符合堆肥对pH值的要求^[8],说明接种枯草芽孢杆菌可以加快堆肥的发酵腐熟,将更多有机物质转化为有机酸,从而降

低堆体的pH值^[17]。



CK、W、Y 见图1注。

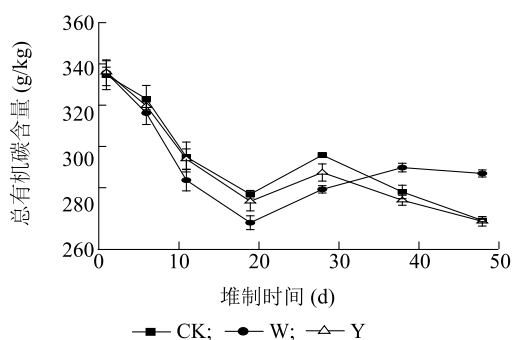
图2 堆制过程中堆肥 pH 值的变化

Fig.2 Changes of compost pH during composting

2.1.3 堆制过程中堆肥总有机碳含量的变化 从图3可以看出,在堆制过程中,对照组和W、Y 2个处理组的总有机碳含量均呈明显下降的趋势,并且在堆肥升温期和高温期下降幅度最大,可能是因为微生物在这2个阶段易于生长繁殖,降解有机物质的能力增强。堆制第19 d时,CK和W、Y处理组的总有机碳含量分别为277 g/kg、263 g/kg、273 g/kg,与初始含量相比分别下降了58 g/kg、73 g/kg、63 g/kg。随着堆肥反应的进行,总有机碳含量的下降幅度变缓,一方面可能由于微生物在降温、腐熟2个阶段的活性减弱且后期剩下的是难以分解的有机物,另一方面是由于堆肥引起了“浓缩效应”^[18]。堆制结束后,CK和W、Y处理组的总有机碳含量分别为264 g/kg、287 g/kg、263 g/kg,相对于堆制初期,损失率分别为21.19%、14.58%、21.73%。经计算,有机质含量分别为45.51%、49.48%、45.34%,均已达到有机肥行业标准^[8]。结果显示,堆制28 d时,W处理组的有机质含量分别较对照、Y处理组提高了8.72%、9.13%,说明接种枯草芽孢杆菌能够提高堆肥产品的有机质含量。

2.1.4 堆制过程中堆肥对种子发芽率的影响 GI是评价堆肥产品是否腐熟及其毒性的一个重要指标之一,可以在一定程度上衡量堆肥效果。相关研究发现,当种子GI>50.00%时,堆肥的毒性较低且在植物可接受的水平;当种子GI>80.00%时,说明堆肥已完全腐熟^[19]。

由图4可知,在堆制过程中对照组和W、Y 2个处理组的GI均呈不断上升的趋势,在堆制的前6 d,3组的GI均低于30.00%,堆肥第1 d CK和W、Y处

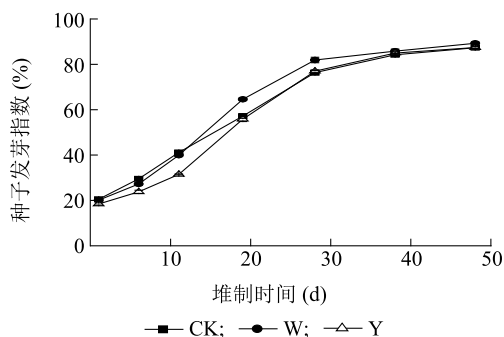


CK、W、Y 见图 1 注。

图 3 堆制过程中堆肥总有机碳含量的变化

Fig.3 Changes of total organic carbon content of the compost during composting

理组的 GI 分别为 20.75%、20.35%、18.65%。随着堆制的进行,堆肥浸提液毒性降低,3 组的 GI 均上升,W 处理组的 GI 最先达到 80.00%。堆制结束时,CK 和 W、Y 处理组的 GI 分别为 87.35%、89.3%、87.45%,表明接种枯草芽孢杆菌堆肥的效果更好,有利于加快堆肥腐熟进程。



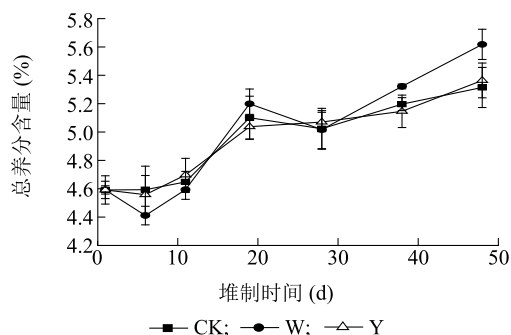
CK、W、Y 见图 1 注。

图 4 堆制过程中 GI 的变化

Fig.4 Changes of germination index (GI) during composting

2.2 堆肥质量评价

根据 NY 525-2012《有机肥料》中规定的技术指标,有机肥中的总养分($N+P_2O_5+K_2O$)含量(以干基计)应 $\geq 5\%$ 。从图 5 可以看出,堆制过程中对照组和 W、Y 2 个处理组的堆肥总养分含量整体均呈上升趋势,堆制结束时,CK 和 W、Y 处理组的总养分含量分别为 5.31%、5.61%、5.36%,均已达到有机肥行业标准^[8]。其中,W 处理组的总养分含量分别较 CK 和 Y 处理组提高了 5.60%、4.70%。通过对 3 组堆肥处理的 pH 值、种子发芽率及有机质含量、总养分含量进行综合比较得出,接种枯草芽孢杆菌提高了堆肥的品质。



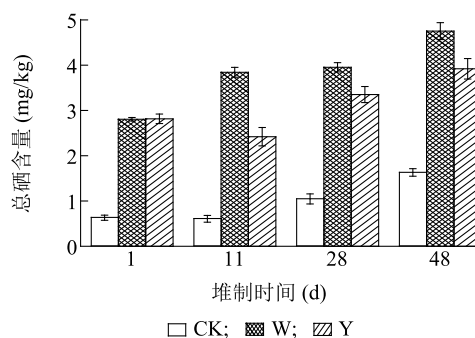
CK、W、Y 见图 1 注。

图 5 堆制过程中堆肥总养分含量的变化

Fig.5 Changes of total nutrient content of the compost during composting

2.3 堆制过程中堆肥总硒含量及硒形态的变化

由图 6 可以看出,堆制结束时,W、Y 处理组的总硒含量分别比对照组提高了 1.92 倍、1.41 倍。在堆制过程中,CK 和 W、Y 处理组的总硒含量整体均呈上升趋势,这可能是由于在堆制过程中有机物分解, CO_2 、 NH_3 释放及物料水分蒸发所造成的浓缩效应^[10]。W 处理组的总硒含量整体大于 Y 处理组,一方面由于接种枯草芽孢杆菌加快了有机物分解,另一方面可能是由于无机硒在适宜条件下被堆体中的微生物转化成二甲基硒 $[(CH_3)_2Se]$ 等挥发态硒^[20]。



CK、W、Y 见图 1 注。

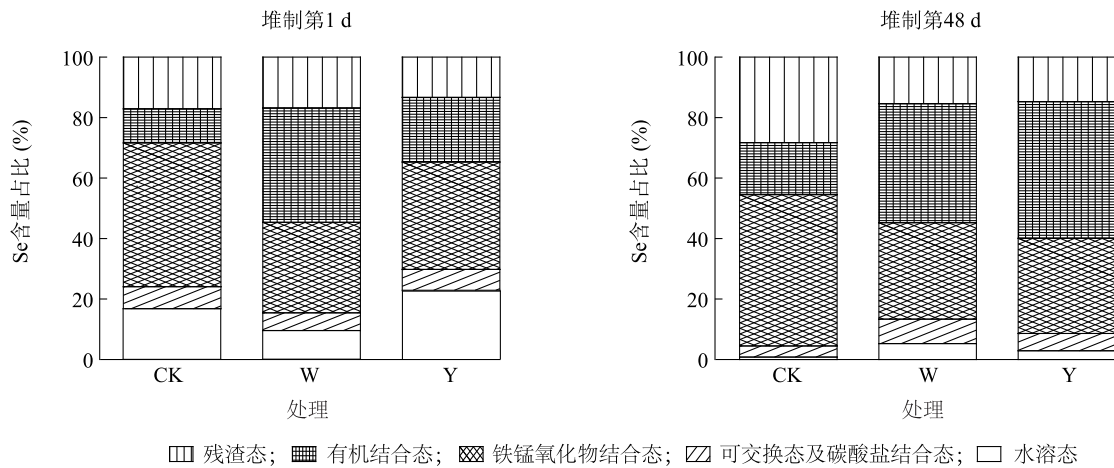
图 6 堆制过程中堆肥总硒含量的变化

Fig.6 Changes of total selenium content of the compost during composting

硒按形态可以分为水溶态、可交换态及碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态等,不同形态的硒被植物吸收利用的难易程度也大不相同。由图 7 可以看出,对照组的有机结合态硒、残渣态硒含量占比在堆制后 48 d 较堆制后 1 d 提高,水溶态硒的占比显著降低,铁锰氧化物结合态硒

含量所占比例基本不变。W 处理组的不同形态硒含量占比在整个堆制过程中变化较小,其中水溶态硒含量占比从堆制起始阶段的 9.53% 下降到堆制结束时的 5.28%,可交换态及碳酸盐结合态硒含量占比由堆制起始阶段的 5.88% 上升至堆制结束时的 8.09%,铁锰氧化物结合态硒含量占比从堆制起始阶段的 29.93% 上升至堆制结束时的 31.88%,有机结合态硒含量占比从堆制起始阶段的 37.82% 上升至堆制结束时的 39.38%,残渣态硒含量占比从堆制起始阶段的 16.84% 下降至堆制结束时的 15.37%。结果表明,通过微生物富集转化而来的有机硒在堆制过程中稳定。从 Y 处理组硒的各形态来看,堆制结束时的硒以有机结合态为主,占比从堆

制起始阶段的 21.39% 上升至堆制结束时的 45.18%,可能由于堆制过程中有机质对硒的吸附与固定作用^[21]。水溶态硒含量占比由堆制起始阶段的 22.88% 下降至堆制结束时的 2.91%,可交换态及碳酸盐结合态硒含量占比从堆制起始阶段的 6.90% 下降至堆制结束时的 5.71%,铁锰氧化物结合态硒含量占比从堆制起始阶段的 35.50% 下降到堆制结束时的 31.47%,残渣态硒含量占比由堆制起始阶段的 13.33% 上升至堆制结束时的 14.73%,说明添加外源亚硒酸钠改变了堆肥中硒的形态平衡,经过氧化还原作用、微生物生化作用及腐殖化作用完成了不同硒形态间的相互转化^[20]。



CK、W、Y 见图 1 注。

图 7 堆制过程中堆肥硒形态的变化

Fig.7 Changes of selenium forms in the compost during composting

2.4 不同堆肥对盆栽普通白菜生长的影响

根据植物对硒的吸收累积能力,人们将植物分为聚硒植物、非聚硒植物和富硫且高聚硒植物,而一般农作物累积硒的能力排序为十字花科>黑麦草>豆类>谷类^[22]。普通白菜是常见的十字花科植物,且生长周期短,适于四季栽种,可以作为人体补硒的理想硒源,为人体提供有效的生物有机硒^[23]。因此,本研究以普通白菜作为研究蓝藻有机富硒肥效果的对象,探究加入不同硒处理的有机肥对普通白菜硒吸收及铅、镉累积的影响。由表 2 可以看出,W、Y 处理组的普通白菜株高分别较对照组提高了 13.2%、10.5%;W、Y 处理组的普通白菜根长均大于对照组,分别较对照组提高了 18.6%、11.7%,其单株鲜质量、单株干质量与对照组相比都有显著差异

($P < 0.05$)。上述生长指标在 W、Y 这 2 个处理组间并无显著差异,与殷金岩等^[24]的研究结果一致,说明蓝藻有机富硒肥中适量的硒促进了普通白菜生长。

由图 8 可以看出,与对照组相比,W、Y 处理组的普通白菜总硒含量均有所增加,分别较对照组提高了 127.73%、112.53%,有机硒含量分别较对照组提高了 135.45%、102.73%。结果表明,蓝藻有机富硒肥能够促进普通白菜对硒的吸收富集,显著提高普通白菜体内的总硒、有机硒含量。W 处理组的普通白菜总硒、有机硒含量是 Y 处理组的 1.00~1.16 倍,说明 W 处理组的效果更好,这与刘云发等^[25]的结果相似,可能是先利用微生物将亚硒酸钠富集转化成有机硒后再堆制成的有机富硒肥更能提高硒的

利用率,有助于提高普通白菜体内有机硒含量。施加硒肥减少了普通白菜体内铅、镉的累积量,其中 W、Y 处理组镉的累积量分别较对照组减少了 51.60%、43.70%,铅的累积量分别较对照组减少了 3.90%、24.30%。由此可见,硒对铅、镉表现出拮抗

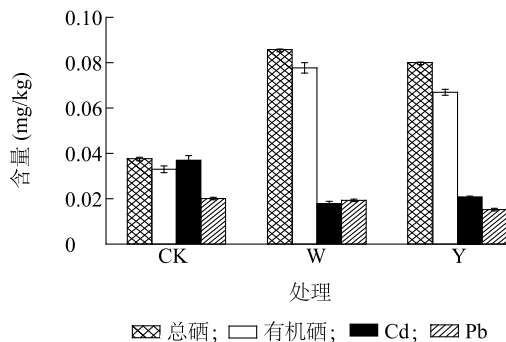
作用,能够缓解重金属铅、镉对普通白菜的胁迫作用,这与张翠翠等^[26]的研究结果一致,说明施加硒肥能够有效减少重金属铅、镉在普通白菜体内的累积量。

表 2 不同堆肥对普通白菜生长的影响

Table 2 Effects of different composting products on the growth of bok choy

处理	株高 (cm)	根长 (cm)	单株鲜质量 (g)	单株干质量 (g)	含水率 (%)
CK	26.03±0.67a	7.67±0.31a	33.52±1.97a	3.33±0.25a	0.88±0.028a
W	29.47±0.35b	9.10±0.30b	40.20±0.41b	3.96±0.16b	0.91±0.020a
Y	28.77±0.35b	8.57±0.21b	39.04±0.69b	3.81±0.22b	0.89±0.025a

CY、W、Y 见图 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。



CY、W、Y 见图 1 注。

图 8 不同堆肥对普通白菜总硒、有机硒、Cd、Pb 含量的影响

Fig.8 Effects of different fertilizer treatments on the total selenium, organic selenium, Cd and Pb contents of bok choy

3 结论

本试验采用蓝藻藻泥和农业废弃物进行混合富硒堆肥试验,在 48 d 的堆制周期内,各处理堆肥成品均已满足有机肥料国家标准 (NY 525-2012《有机肥料》),pH 值维持在该标准规定的范围 (5.5~8.5),GI 高于 85.00%,表明堆肥已发酵腐熟。研究结果显示,接种富硒枯草芽孢杆菌有利于提高堆肥中的有机质含量、总养分含量、总硒含量,提升有机富硒肥的品质。通过盆栽普通白菜试验可以得出,不同硒处理堆制的有机富硒肥可以促进普通白菜生长,提高普通白菜体内的总硒含量、有机硒含量,并且能够减少铅、镉的累积量。目前生产瓜菜的硒含量需要控制在 0.01~0.10 mg/kg^[27],本研究中不同有机富硒肥处理的普通白菜中硒含量均已达标。在堆肥堆制过程中接种富硒枯草芽孢杆菌能提高硒的

利用率,从而有效提高普通白菜硒含量及有机硒占比,使生产出来的富硒普通白菜更加安全。

参考文献:

- [1] 朱超,杨晓冉,赵彬,等. 2017 年夏季巢湖水华期间浮游植物与蓝藻毒素的时空变化特征[J]. 中国环境监测, 2018, 34 (6):103-112.
- [2] 沈银武,刘永定,吴国樵,等. 富营养湖泊滇池水华蓝藻的机械清除[J]. 水生生物学报, 2004, 28(2):131-136.
- [3] CODD G A, MORRISON L F, METCALF J S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection[J]. Toxicol Appl Pharmacol, 2005, 203(3):264-272.
- [4] 汪晶晶,邓威,方梦紫,等. 水分含量对蓝藻堆肥腐熟及藻毒素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2):403-410.
- [5] 薛梅,陈悦,刘红芹,等. 富硒肥的研究及其应用[J]. 中国土壤与肥料, 2016, 261(1):7-12.
- [6] 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.
- [7] LI D B, CHENG Y Y, WU C, et al. Selenite reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 is mediated by fumarate reductase in periplasm[J]. Scientific Reports, 2014, 4:3735.
- [8] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准 有机肥料:NY 525-2012[S].
- [9] DUAN M L, ZHANG Y H, ZHOU B B, et al. Effects of *Bacillus subtilis* on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure-straw composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 303:122868.
- [10] 王松山. 土壤中硒形态和价态及生物有效性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [11] 瞿建国,徐伯兴. 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.
- [12] 宋卫卫. 有机硒在不同土壤中转化初探[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.

- [13] 李 哲. 外源硒在小白菜和小麦体内的分布及形态研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [14] HUSSAIN B, LIN Q, HAMID Y, et al. Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712:136497.
- [15] 张陇利,刘 青,徐 智,等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(2):266-269.
- [16] LIU W, HUO R, XU J X, et al. Effects of biochar on nitrogen transformation and heavy metals in sludge composting[J]. *Biore-source Technology*, 2017, 235:43-49.
- [17] 辛世杰. 微生物菌剂在有机废弃物堆肥中的作用及其机理研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [18] 刘 微,张 津,李博文,等. 不同微生物菌剂对番茄秸秆好氧堆肥中氮磷钾元素的转化规律的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(3):88-92.
- [19] ZUCCONI F, PERA A, FORTE M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. *BioCycle*, 1981, 22(2):54-57.
- [20] 沈燕春,周 俊. 土壤硒的赋存状态与迁移转化[J]. *安徽地质*, 2011, 21(3):186-191.
- [21] 谢 薇,杨耀栋,侯佳渝,等. 天津市蓟州区土壤硒的有效性及影响因素[J]. *环境化学*, 2019(10):140-150.
- [22] 李登超. 硒对菠菜、小白菜生长、养分吸收及抗氧化酶活性的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- [23] 况 琴,吴 山,黄 庭,等. 生物质炭和钢渣对江西丰城典型富硒区土壤硒有效性的调控效果与机理研究[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(6):705-714.
- [24] 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.
- [25] 刘云发,邓红军,刘晓娜,等. 不同类型富硒肥对水稻富集硒效果的影响试验初报[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(8):67-70, 78.
- [26] 张翠翠,常介田,赵 鹏. 叶面施硒对西瓜镉和铅积累的影响[J]. *华北农学报*, 2013, 28(3):159-163.
- [27] 张杨杨,焦自高,艾希珍,等. 硒对植物的生理作用及富硒瓜菜研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2014, 27(1):5-9.

(责任编辑:徐 艳)