

王 强, 郑梦蕾, 杨善莲, 等. 超氧化静态好氧堆制的城市污泥对小白菜生长和土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 1007-1014.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.028

超氧化静态好氧堆制的城市污泥对小白菜生长和土壤理化性质的影响

王 强¹, 郑梦蕾¹, 杨善莲¹, 李国亮², 马友华³

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 蚌埠圻润环境工程科技有限公司, 安徽 蚌埠 230036; 3. 安徽农业大学新农村发展研究院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 采用盆栽试验, 研究超氧化静态好氧堆肥处理的城市污泥对小白菜生长状况及土壤理化性质的影响。结果表明, 适当比例污泥的使用有利于促进小白菜的出苗和生长, 提高小白菜的产量及品质, 减少小白菜重金属富集, 提高土壤养分含量, 只要保持合理的污泥施用量, 不超过 1 500 kg/hm², 可以满足农产品的安全生产要求, 但应重点监控 Cd 元素可能带来的污染。

关键词: 城市污泥; 超氧化静态好氧堆制; 重金属; 小白菜; 富集系数; 污染指数

中图分类号: X703; S636 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-1007-08

Effects of super oxidation static aerobic composting of municipal sludge on the growth of pakchoi and physical and chemical properties of soil

WANG Qiang¹, ZHENG Meng-lei¹, YANG Shan-lian¹, LI Guo-liang², MA You-hua³

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Bengbu Qi Run Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Bengbu 230036, China; 3. New Rural Development Research Institute, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Pot experiment was conducted to study the effects of municipal sludge treated by super oxidation static aerobic composting on the growth of pakchoi and soil physical and chemical properties. The results showed that the appropriate application of sludge could promote the emergence and growth of pakchoi, improve the yield and quality, reduce the accumulation of heavy metals, and increase the soil nutrient content. Appropriate application of sludge (not more than 1 500 kg/hm²) can meet the safety production requirements of agricultural products, but the pollution caused by Cd element should be controlled.

Key words: municipal sludge; super oxidation static aerobic composting; heavy metal; pakchoi; enrichment coefficient; pollution index

城市污泥指城市污水处理中产生的残留半固体物质, 其成分非常复杂, 含有有机残片、细菌菌体、无

机颗粒、胶体等成分^[1]。城市污泥中含有植物所必需的氮、磷元素以及易被植被吸收的矿质元素等^[2], 可作为肥料或土壤改良剂^[3-4], 城市污泥的农用资源化是未来城市污泥处置的根本出路^[5]。污泥可增加土壤团聚体, 从而改善土壤结构、提高作物生长潜力^[6]。然而, 城市污泥源自医院、疗养院、工业和家庭的各种形式的危险废物, 含有潜在污染元

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800402)

作者简介: 王 强(1980-), 男, 安徽宿州人, 博士, 讲师, 主要从事资源环境与信息技术应用研究。(E-mail) 28104@ahau.edu.cn

素,一般认为其含有的铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)和汞(Hg)危害最大^[7-8],污泥中的污染物含量必须符合《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ/T309-2009)中相关标准才可农用^[9],通常运用内梅罗指数法对污泥中的重金属污染程度进行评价^[10-12],需控制重点污染元素后方可应用。虽然污水、污泥可以作为肥料产生经济效益^[13],但污泥通常含有有机物、重金属和盐类,甚至含有少量多氯联苯、二恶英等^[14],直接应用会导致植物中有害物质浓度增加^[15-16],必须经过处理才可安全用于农业。近年来,中国对污水、污泥主要采用生物、化学或热处理的方法^[17],经过高温堆肥或其他适当的工艺,并根据不同来源进行抑菌去毒^[18],安全合理应用污泥,避免破坏生态环境^[19]。国内外在污泥-土壤-植物系统中重金属的迁移转化规律等方面进行了广泛的研究,并取得显著进展,研究发现,适量污泥堆肥在短期内不会引起土壤重金属污染,也不会影响食用,但应保持监测^[20-21]。传统的污泥处理方式耗时费力、成本偏高,已不能满足日益剧增的污泥处理需求,堆肥农用是较为有效的处理方式之一。目前常用的堆肥技术按照有无发酵装置,分为开放式堆肥系统和发酵仓堆肥系统^[22];按细菌分解原理,分为低温厌氧堆肥和高温好氧堆肥;按堆肥方法,分为露天堆肥和机械堆肥^[23]。从国外经验和发展趋势来看,工厂化好氧堆肥处理是一种比较经济、操作便利、运行稳定的污泥处理方式,但并不适合中国的国情,因为其设备昂贵且不计能耗,而中国城市污泥处理必须走低能耗、高效的快速堆肥道路。虽然已有一批企业涉足污泥资源化利用技术,但是相关研究非常欠缺,堆肥应用不太广泛,处于初步发展阶段,大多采用好氧堆肥^[23],绝大部分企业凭传统经验堆肥,工业化程度不高,产品质量不稳定,产品对环境和作物具有危害。中国应该重点研究高效、低能耗污泥堆肥技术,并且开展堆肥产品在农业、林业、园林、育苗等产业中的大规模应用示范^[24]。污泥超氧化深度处理技术及快速堆肥技术,可以快速经济地处理城市污泥,产品符合国家农用标准。为了检验该方法处理后的污泥是否可以农用,本研究通过盆栽试验确定其对土壤和蔬菜理化性质的影响,为城市污泥农用提供相关参数和研究依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

试验于2018年3月至2018年7月在安徽农业大学农萃园内进行。污泥为蚌埠市第二污水处理厂处理后的污泥,其理化性质及重金属含量等如表1、表2所示。供试土壤为安徽省典型土壤类型黄褐土,面积总计 $8.379 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占安徽省土壤总面积的8.0%。主要分布于江淮低丘岗地、沿淮岗坡阶地和淮北部分地区,是污泥来源城市周边主要土壤类型。由于两淮地区位于安徽淮南和淮北,为华东地区最重要的能源基地,燃煤电厂大气汞排放每年达1.93 t,且属于湿润季风气候,可能由大气沉降作用造成土壤汞超标^[25]。试验用的小白菜种子,购于安徽春泽种业有限公司。

表1 供试土壤和污泥的基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil and sludge

类别	容重 (g/cm ³)	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)
土壤	1.26	11.68	1.60	0.38	21.20
污泥	1.22	338.00	38.80	0.61	0.73

表2 供试土壤和污泥的重金属含量及标准

Table 2 Heavy metal content and standard in soil and sludge

类 别	含量(mg/kg)				
	铬 (Cr)	铅 (Pb)	镉 (Cd)	砷 (As)	汞 (Hg)
土壤	58.24	28.44	0.16	10.63	0.41
《土壤环境质量标准》 GB 15618-1995	90.00	35.00	0.20	15.00	0.15
污泥	66.00	0.50	1.28	24.10	1.50
污泥农用标准《城镇污水 处理厂污泥处置 农用 泥质》CJ/T309-2009	500.00	300.00	3.00	30.00	3.00

1.2 污泥处理方法

污泥加水稀释,含水率达90%~93%后加入强酸调节pH值为4~5,然后投加质量分数为0.5%~2.0%、pH值为9~11的溶液形式的高铁酸钾(含量5%~10%),搅拌充分反应,发挥高铁酸钾的超强氧化作用,破坏胶体结构,破解污泥细胞壁,释放出胞内水和细胞表面吸附水,干燥粉碎后的污泥即采用静态好氧堆肥方式进行发酵,得到完全腐熟物料,作

为试验材料^[26]。

1.3 试验设计

试验设置 8 个处理,3 次重复,具体设计如表 3 所示,其中无肥区(I)作为对照,无机 NPK (II)处理选择磷酸铵、尿素、氯化钾 3 种肥料按照 N 172.5 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 100 kg/hm²配比施肥,无机NPK+低量污泥 (III)处理、无机 NPK+中量污泥 (IV)处理、无机 NPK+高量污泥 (V)处理分别在处理 II 的基础上再施用 750 kg/hm²、1 500 kg/hm²、3 000

kg/hm²污泥,无机 NPK+有机肥 (VI) 处理在处理 II 的基础上再施用1 500 kg/hm²腐熟鸡粪有机肥,有机肥 (VII)处理和污泥 (VIII) 处理分别单施3 000 kg/hm²腐熟鸡粪有机肥和3 000 kg/hm²污泥。盆栽方式随机排列,每盆混合土质量均为 3 kg,所有处理肥料作为基肥一次性施入土壤,施肥量按照2.25×10⁵ kg/hm²土壤质量折算,生育期不追加其他肥料。播种小白菜种子,间苗后每盆留 3 株幼苗。

表 3 小白菜施肥处理方案

Table 3 Fertilization scheme of pakchoi

处 理	施用量 (kg/hm ²)				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	腐熟鸡粪有机肥	污泥
无肥区对照 (I)	0	0	0	0	0
无机 NPK (II)	172.5	75	100		
无机 NPK+低量污泥 (III)	172.5	75	100		750
无机 NPK+中量污泥 (IV)	172.5	75	100		1 500
无机 NPK+高量污泥 (V)	172.5	75	100		3 000
无机 NPK+有机肥 (VI)	172.5	75	100	1 500	
有机肥 (VII)				3 000	
污泥 (VIII)					3 000

1.4 样品采集

收获时分别采集土壤和植株,采用环刀法测得各组土壤样品水分及容质量,其余土壤利用竹铲采集,收集风干。植物样品采集处理是采集植株,称质量后经 65 ℃烘干至恒质量,分别过筛,标记装袋。

1.5 测试项目与方法

硝酸盐、可溶性糖、氨基酸含量分别采用高效液相色谱法、蒽酮比色法、氨基酸分析仪测定,土壤有机质、全氮含量分别采用重铬酸钾氧化法、凯氏蒸馏法测定,土壤全磷、全钾含量均采用氢氧化钠熔融法测定,土壤含水率、容质量分别采用烘干法、环刀法测定,土壤 pH、电导率采用电极法测定,小白菜和土壤中的铬、铅、镉、砷含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,小白菜和土壤中的汞均采用原子荧光光谱法测定。

1.6 数据处理

试验数据利用 Excel 进行整理,采用 SPSS 软件进行单因素方差分析,再采用 Origin 2018 软件绘图。

1.7 评价方法

采用单因子污染指数和多因子评价方法评价污

泥对小白菜重金属含量的影响。前者计算公式为: $P_i = C_i/S$,式中: P_i 为单项污染指数, C_i 为实测浓度, S 为《食品中污染物限量》GB2762-2012 标准中重金属含量限量标准。多种重金属同时污染一个对象,其计算公式如下:

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{i(\max)}^2 + P_{i(\text{ave})}^2}{2}} \quad (1)$$

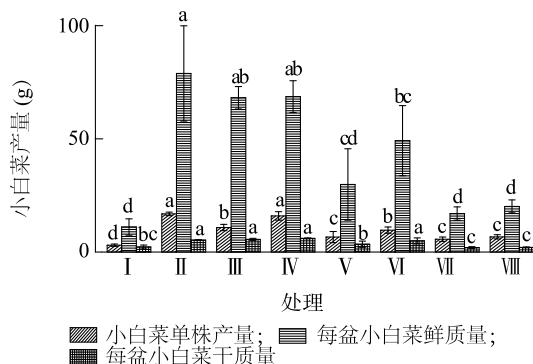
式中: P_n 为内梅罗污染指数; $P_{i(\text{ave})}$ 为各污染物污染指数的算术平均值; $P_{i(\max)}$ 为各污染物中最大的污染指数。综合评价分级标准如下: $P_n \leq 0.7$,安全; $0.7 < P_n \leq 1.0$,警戒; $1.0 < P_n \leq 2.0$,轻污染; $2.0 < P_n \leq 3.0$,中污染; $P_n > 3.0$,重污染。

2 结果与分析

2.1 施用污泥对小白菜生长的影响

2.1.1 施用污泥对产量的影响 由图 1 可知,各处理的小白菜单株产量均显著高于对照,污泥施用量对小白菜单株产量影响不明显;处理 II、III、IV、VI 的小白菜鲜质量显著高于对照,其他处理与对照无显著差异,污泥施用量对小白菜鲜质量影响不明显;处

理Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ小白菜干质量显著高于对照,污泥施用量对小白菜干质量影响不明显。施用适量污泥可以增加小白菜单株产量、鲜质量、干质量,施用量过多,会抑制作物的生长。与其他学者采用高温好氧发酵处理在番茄上得出的研究结果^[27]相比,使用本研究堆肥方法污泥增产效果明显,与对照间差异显著,在污泥用量上也与其他研究结果^[28]相似,但污泥要适量,否则抑制作用也很明显。



处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ见表3;相同指标不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

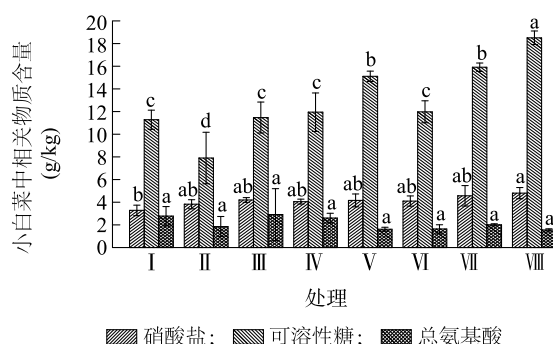
图1 不同处理中小白菜产量性状

Fig.1 Production traits of pakchoi under different treatments

2.1.2 施用污泥对小白菜品质性状的影响 由图2可知,单用污泥处理小白菜硝酸盐含量显著高于对照,其他处理与对照无显著差异,污泥施用量对小白菜硝酸盐含量影响不明显;处理Ⅴ、Ⅶ、Ⅷ可溶性糖含量比对照显著提高,其他处理整体与对照间无显著差异,可溶性糖含量随污泥施用量增加而提高;各种处理间氨基酸含量无显著差异。与前人研究结果^[29]比较,施用污泥均提高了植物可溶性糖含量,但本研究中施用污泥提高了硝酸盐含量,可能与污泥的来源差异较大有关。

2.2 施用污泥对土壤养分和土壤理化性质的影响

2.2.1 施用污泥对土壤养分的影响 由图3可知,各处理的土壤有机质含量均显著高于对照,污泥施用量对土壤有机质含量影响不明显;处理Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ的土壤全氮含量显著高于对照,其他处理与对照无显著差异,土壤全氮含量随污泥施用量的增加而提高;各处理土壤全磷含量除处理Ⅱ、Ⅳ外均比对照显著提高,污泥施用量对土壤全磷含量影响不明显;处理Ⅲ、Ⅳ、Ⅶ的土壤全钾含量显著高于对照,污泥施用量对土壤全钾含量影响不明显。污泥单独施用和

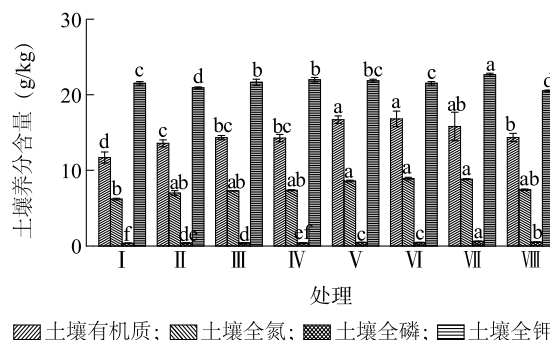


处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ见表3;相同指标不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同处理小白菜品质性状

Fig.2 Quality traits of pakchoi under different treatments

与化肥配合施用,均可提高土壤中的有机质、全氮和全磷含量,培肥地力,同时小白菜吸收利用的其他养分多,造成全钾吸收减少。与前人研究结果^[30]相似,随着堆肥施用量的增加,土壤养分含量也呈明显的增加趋势。



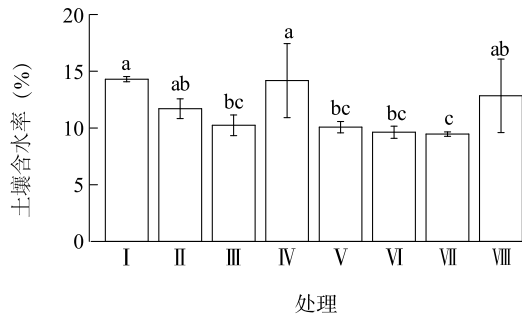
处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ见表3;相同指标不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图3 不同处理土壤养分含量

Fig.3 Soil nutrient content in different treatments

2.2.2 施用污泥对土壤理化性质的影响 由图4可知,处理Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ的土壤含水率显著低于对照,其他处理与对照间无显著差异,污泥施用量对土壤含水率影响不明显。

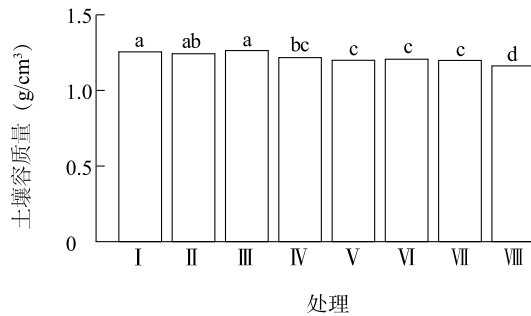
2.2.2.1 土壤容质量 由图5可知,除处理Ⅱ、Ⅲ外,其他处理土壤容质量均比对照显著降低,土壤容质量呈现随污泥施用量增加而降低的趋势。与前人研究结果^[31]相似,污泥中含有的大量有机质可增强土壤生物(动物、植物、微生物)的活动,从而增加土壤孔隙度,降低土壤容质量,提高土壤的持水能力。



处理 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII 见表 3; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 不同处理土壤含水率

Fig.4 Soil moisture content in different treatments

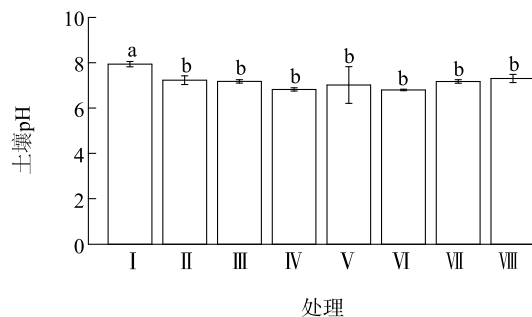


处理 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII 见表 3; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 5 不同处理的土壤容质量

Fig.5 Soil bulk density under different treatments

2.2.2.2 土壤 pH 由图 6 可知, 各处理土壤 pH 均比对照降低, 污泥用量对土壤 pH 的影响不明显。



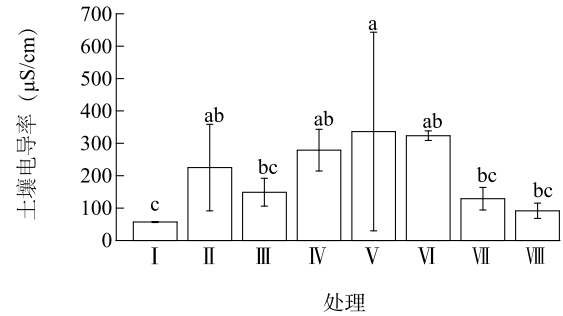
处理 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII 见表 3; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 6 不同处理土壤 pH

Fig.6 Soil pH under different treatments

2.2.2.3 土壤电导率 由图 7 可知, 处理 II、IV、V、VI 的土壤电导率显著高于对照, 土壤电导率随污泥施用量增加而提高。单用污泥对土壤电导率的影响最小, 但和无机化肥结合后明显提高了土壤的电导

率, 抑制植物对养分的吸收。



处理 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII 见表 3; 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同处理土壤电导率

Fig.7 Soil electrical conductivity under different treatments

2.3 施用污泥对小白菜吸收重金属元素的影响

由图 8 可知, 处理 III、V 小白菜中铬含量与对照差异不显著, 其他处理均显著低于对照; 处理 IV、V、VII 小白菜中铅含量与对照无显著差异, 小白菜中铅含量随污泥施用量增加而提高; 各处理小白菜中镉含量均显著低于对照, 小白菜中镉含量随污泥施用量增加而提高; 除处理 IV、V 外, 其他处理小白菜中砷含量均显著低于对照, 小白菜中砷含量随污泥施用量增加而提高; 各处理小白菜中汞含量均显著低于对照, 小白菜中汞含量随污泥施用量增加而提高。单用污泥降低镉效果最好, 单用无机 NPK 降低砷、汞效果最好。植物对重金属的吸收与积累是一个复杂的过程, 与重金属的种类及其生物有效性、植物生长代谢机制、土壤的理化性质等因素有关^[32], 本研究与前人研究结果^[1]相似, 污泥中较高含量的有机质及较低的 pH 也有利于金属-有机质的络合, 从而降低重金属在土壤-植物中的迁移风险。

2.4 施用污泥对土壤中重金属含量的影响

由图 9 可知, 处理 VI 土壤铬含量显著低于对照, 其他处理与对照无显著差异; 各处理土壤铅、镉、砷、汞含量与对照无显著差异。

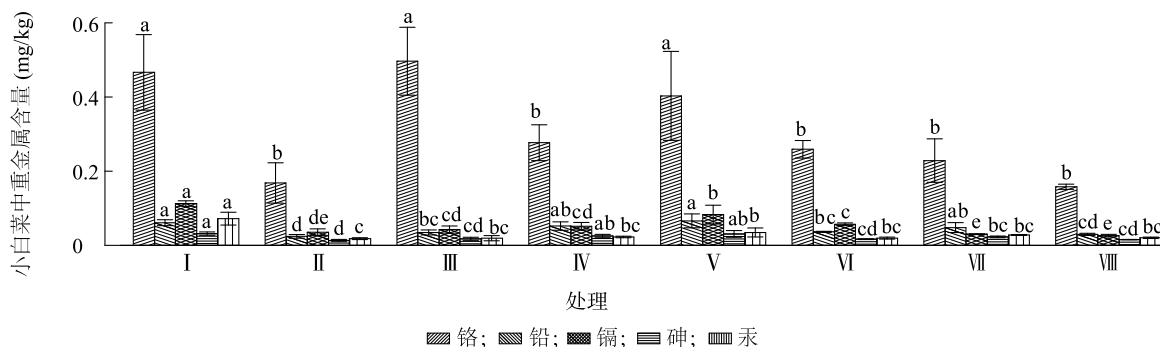
2.5 小白菜对重金属元素富集的影响

由表 4 可知, 处理 II、IV、VII、VIII 小白菜中铬富集系数显著低于对照, 其他处理与对照无显著差异, 小白菜中铬富集系数与污泥施用量间的关系不明显; 处理 II、III、VI、VIII 小白菜中铅富集系数显著低于对照, 其他处理与对照无显著差异, 小白菜中铅富集系数随污泥施用量增加而提高; 各处理小白菜中镉富集系数均显著低于对照, 小白菜中镉富集系数随污

泥施用量增加而提高;处理Ⅱ、Ⅲ、Ⅵ、Ⅷ小白菜中砷富集系数显著低于对照,其他处理与对照无显著差异,小白菜中砷富集系数随污泥施用量增加而提高;各处理小白菜中汞富集系数均显著低于对照,小白菜中汞富集系数随污泥施用量增加而提高。

单用污泥处理降低小白菜中铬富集效果最好,无机 NPK 处理降低小白菜中铅富集效果最好,单用污

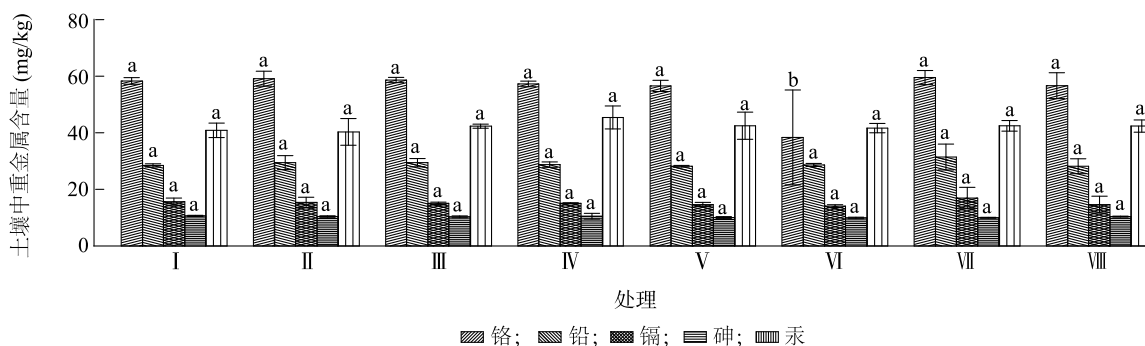
泥降低小白菜中镉富集效果最好,无机 NPK 降低小白菜中砷富集效果最好,但 NPK+高量污泥处理反而提高小白菜中砷富集系数,无机 NPK 降低小白菜中汞富集效果最好。不同处理下小白菜对重金属的吸收富集能力差异较大,污泥、有机肥及无机 NPK+中量污泥处理可以减少 5 种重金属富集,可能是污泥中含有大量有机物,可以吸附不同形态重金属。



处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ见表3;相同重金属不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图8 不同处理小白菜中的重金属含量

Fig.8 Heavy metal content in pakchoi under different treatments



处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ见表3;相同重金属不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。为图表统一量级,土壤镉、汞含量放大100倍。

图9 不同处理土壤中重金属含量

Fig.9 Heavy metal content in soil under different treatments

表4 不同处理小白菜重金属富集系数

Table 4 Enrichment coefficient of heavy metal in pakchoi under different treatments

重金属元素	富集系数							
	无肥区对照 (Ⅰ)	无机 NPK (Ⅱ)	无机 NPK+ 低量污泥 (Ⅲ)	无机 NPK+ 中量污泥 (Ⅳ)	无机 NPK+ 高量污泥 (Ⅴ)	无机 NPK+ 有机肥 (Ⅵ)	有机肥 (Ⅶ)	污泥 (Ⅷ)
铬	0.803a	0.285c	0.847a	0.485bc	0.714ab	0.759ab	0.382c	0.280c
铅	0.215ab	0.083e	0.117cd	0.181ab	0.234a	0.128cd	0.155bc	0.106de
镉	0.725a	0.232de	0.283cd	0.343c	0.563b	0.403c	0.183e	0.181e
砷	0.298a	0.125d	0.173bc	0.248ab	0.310a	0.169bc	0.231ab	0.152cd
汞	1.787a	0.453c	0.460c	0.502bc	0.803b	0.469bc	0.661bc	0.487bc

处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ见表3;同行数据后标有不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.6 污染评价

由表 5 可知,各处理除镉 (Cd) 外均未达到污染水平(污染指数 ≤ 1.000),但一些处理镉单因子污染指数较高,其中无肥区对照 (I) $>$ 无机 NPK+高量污泥 (V) $>$ 无机 NPK+有机肥 (VI) $>$ 无机 NPK+中量污泥 (IV)。说明没有外源施肥时小白菜会直接吸收土壤重金属,从内梅罗污染指数来看,各处理中

处理 II、VII、VIII 处于安全清洁级 ($P_n \leq 0.7$),处理 III、IV、VI 处于警戒级 ($0.7 < P_n \leq 1.0$),尚清洁,处理 I 和 V 处于轻度污染级 ($1.0 < P_n \leq 2.0$),农作物开始受到污染,只要污泥施用量合理,不超过 1 500 kg/hm²,可以满足农产品的安全生产要求,但应重点控制 Cd 元素可能带来的污染。

表 5 不同污泥施用量的污染指数

Table 5 Pollution index under different sludge treatments

处 理	单因子污染指数					内梅罗污染指数 (P_n)
	铬 (Cr)	铅 (Pb)	镉 (Cd)	砷 (As)	汞 (Hg)	
无肥区对照 (I)	0.934	0.203	2.260	0.064	0.720	1.724
无机 NPK (II)	0.336	0.080	0.700	0.026	0.180	0.434
无机 NPK+低量污泥 (III)	0.994	0.117	0.860	0.036	0.190	0.845
无机 NPK+中量污泥 (IV)	0.554	0.173	1.040	0.052	0.230	0.864
无机 NPK+高量污泥 (V)	0.806	0.220	1.660	0.062	0.350	1.299
无机 NPK+有机肥 (VI)	0.518	0.123	1.140	0.034	0.200	0.923
有机肥 (VII)	0.458	0.160	0.600	0.046	0.280	0.509
污泥 (VIII)	0.316	0.100	0.520	0.032	0.210	0.410

处理 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII 见表 3。

3 结 论

本研究采用的污泥超氧化深度处理技术及快速堆肥技术,与其他堆肥技术相比可以快速经济地处理城市污泥,而且处理后的污泥符合国家农用标准,通过控制污泥施用量可以改变土壤 pH 及土壤中有机的种类和含量,可以提高植株鲜质量、干质量、可溶性糖含量、硝酸盐含量和氨基酸含量。施用适量污泥可以降低土壤含水率、土壤容重、土壤 pH,提高土壤电导率(盐度)及土壤有机质、土壤全氮、土壤全磷、土壤全钾含量。施用污泥可以减少小白菜重金属富集,超氧化静态好氧堆肥技术处理的污泥,只要用量合理,不超过 1 500 kg/hm²,可以满足农产品的安全生产要求,但应重点监控 Cd 元素可能带来的污染。

参考文献:

- [1] 刘梦娇,夏少攀,王 峻,等.城市污泥农用对植物-土壤系统的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4134-4142.
- [2] 吴冠男,谢震宇,张文妍.我国城市污泥农用的潜力浅析[J].广东化工,2014,41(16):141-142.
- [3] 邹绍文,张树清,王玉军,等.中国城市污泥的性质和处置方式

及土地利用前景[J].中国农学通报,2005,21(1):198-201,282.

- [4] 李艳霞,陈同斌,罗 维,等.中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J].生态学报,2003,13(11):2464-2474.
- [5] 莫测辉,吴启堂,蔡全英,等.论城市污泥农用资源化与可持续发展[J].应用生态学报,2000,11(1):158-161.
- [6] 梁丽娜,黄雅曦,杨合法,等.污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(6):81-86.
- [7] 李金辉,吴汉福,翁贵英,等.贵州六盘水城市污泥中重金属的形态特征及其农用生态风险评价[J].江苏农业科学,2019,47(1):304-308.
- [8] 子 瑾,杨安幸,杨院琴,等.污泥农用对盆栽蔬菜农艺性状及重金属富集的影响[J].湖南农业科学,2018(6):28-32.
- [9] 修英楠.某城镇污泥中重金属含量分析及农用环境风险评价[J].环保科技,2017,23(2):11-14,20.
- [10] 赵 君,张 勇,吴 坤.贵州某市城市污泥成分分析及风险评价[J].贵州师范学院学报,2016,32(3):28-31.
- [11] 陈碧美.城市污泥重金属含量及农用风险评价[J].长春工业大学学报,2015,36(3):347-351.
- [12] 陈同斌,黄启飞,高 定,等.中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J].环境科学学报,2003,23(5):561-569.
- [13] UHRAM S, EUN J L. Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2010, 54(12): 1109-1116.

- [14] WANG X K, ZHENG G D, CHEN T B, et al. Effect of phosphate amendments on improving the fertilizer efficiency and reducing the mobility of heavy metals during sewage sludge composting [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235(1): 124-132.
- [15] BELHAJ D, ELLOUMI N, JERBI B, et al. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*) [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2016, 23(20): 20168-20177.
- [16] SINGH R P. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2229-2240.
- [17] 余杰, 李宇佳, 牟江涛, 等. 中国城市污泥土地利用限制性因素及前景分析[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(7): 64-68.
- [18] 王社平, 程晓波, 姚岚, 等. 城市污泥堆肥及农用前后重金属形态变化的研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(23): 116-121.
- [19] 袁柯馨, 孙荣, 李玉, 等. 城市污泥中重金属形态及资源化可行性分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 424-429.
- [20] 李琼, 华璐, 徐兴华, 等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 468-476.
- [21] 杨丽标, 邹国元, 张丽娟, 等. 城市污泥农用处置研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 420-424.
- [22] 余群, 董红敏, 张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展(综述)[J]. *安徽农业大学学报*, 2003, 30(1): 109-112.
- [23] 贾亚琪, 李赫, 王震洪. 我国城市固体废弃物现状及处理技术研究进展[J]. *环境保护前沿*, 2019, 9(5): 717-725.
- [24] 陈同斌, 郑国砥, 高定, 等. 城市污泥堆肥处理及其产业化发展中的几个关键问题[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(9): 104-108.
- [25] 王克健, 陈健, 王兴明, 等. 两淮地区燃煤电厂砷、汞、氟、铍和钍的大气排放清单的研究[J]. *四川环境*, 2019, 38(2): 58-64.
- [26] 徐重建, 李国亮, 康婷婷, 等. 一种脱水污泥深度干化的组合式化学调质方法; 105645732B[P]. 2018-05-08.
- [27] 蔡红, 陈同斌, 高定, 等. 城市污泥堆肥对蔬菜幼苗的盐害及其淋洗脱盐效果[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(15): 112-114.
- [28] 欧根能, 宁平, 杨月红, 等. 污泥堆肥农用对蔬菜生长状况及重金属吸收的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(5): 2159-2162.
- [29] SINGH R P, AGRAWAL M. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2229-2240.
- [30] 林云琴, 周少奇. 造纸污泥堆肥应用中重金属的累积行为[J]. *中国造纸*, 2005, 24(5): 30-33.
- [31] PARKPIAN P, RANAMUKHAARACHCHI S L, HANSEN G K, et al. Benefits and risks of using a combination of sewage sludge and chemical fertilizer on rice in acid sulfate soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65: 173-182.
- [32] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 65-72.

(责任编辑: 陈海霞)