

城市污泥农用对油麦菜生理特性及品质的影响研究

易秀^{1,2}, 徐景景¹, 魏茅¹, 王育科³

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 陕西省环境监测中心站, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过盆栽试验研究了城市污泥农用对油麦菜生理特性和品质的影响。结果表明:(1)不同污泥用量对油麦菜吸收 Zn、Cu、Pb、Cd、As、Hg、Ni 的影响不显著。(2)第一期试验中,随污泥施用量的增加,所研究的油麦菜各指标呈现出先升高后降低的趋势:当污泥施用量在 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,发芽率达到最大,为 93%;油麦菜根系总吸收面积和活跃吸收面积在污泥施用量 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达最大,分别为 $1.93 \text{ cm}^2\cdot\text{株}^{-1}$ 和 $0.88 \text{ cm}^2\cdot\text{株}^{-1}$;叶绿素 a + b、可溶性糖含量最大值出现在污泥施用量为 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理中,分别为 $1.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $7.90 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;可溶性蛋白含量最大值出现在污泥施用量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理中,为 $25.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。(3)第二期残效试验中不同污泥处理的各项指标变化规律与第一期试验相似,但总体上不同处理各指标的测定值大于第一期试验,出现最大值的污泥处理量滞后。(4)通过对不同指标的综合分析,可以得出污泥有利于油麦菜生长和提高品质的最佳施用范围为 $6\sim 9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

关键词: 城市污泥;施用量;油麦菜;生理特性;蔬菜品质

中图分类号: S141.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0178-06

Effects of applying municipal sludge on physiological characteristics and qualities of leaf lettuce

YI Xiu^{1,2}, XU Jing-jing¹, WEI Mao¹, WANG Yu-ke³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China
3. Shaanxi Province Environmental Monitoring Center, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Effects of applying municipal sludge on physiological characteristics and qualities of leaf lettuce were investigated by using pot experiments. The results showed: (1) applying municipal sludge to soil did not make significant difference for leaf lettuce to uptake Zn, Cu, Pb, Cd, As, Hg and Ni with different sludge dosage. (2) In the first phase of experiment, determining values of various indicators of leaf lettuce growth was increased first and then decreased with increasing amount of sludge usage. When sludge dosage was $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, germination rate of leaf lettuce reached its maximum, 93%. The total roots absorbing area and active absorbing area of leaf lettuce reached maximum, $1.93 \text{ cm}^2\cdot\text{plant}^{-1}$ and $0.88 \text{ cm}^2\cdot\text{plant}^{-1}$, respectively, when sludge dosage was $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. When sludge dosage was $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, the maximum of chlorophyll a and b and soluble sugar content was $1.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $7.90 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively; The maximum of soluble protein content was $25.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ when sludge dosage was $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. (3) In the second phase of experiment, alternation patterns of all indicators by using different portions of sludge were similar to the patterns observed in the first phase of experiment, but actual measured values of all these indicators were bigger than that of the first phase experiment, and sludge dosage from which the leaf lettuce showed the maximum growth indicators lagged behind. (4) After had comprehensively analyzed all the indicators, we concluded that optimal sludge dosage ranges from 6 to $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and using sludge was beneficial to the growth and the quality of leaf lettuce.

Keywords: municipal sludge; sludge dosage; leaf lettuce; physiological characteristics; vegetable qualities

收稿日期:2012-12-15

基金项目:高等学校学科创新引智计划项目(B08039)

作者简介:易秀(1965—),女,青海西宁人,教授,博士,主要从事土壤与水资源环境污染防治的教学与科研工作。E-mail: yixiu@chd.edu.cn。

随着城市污水处理厂的出现,污泥处理的问题已成为迫切需要解决的问题。目前,全球每年干污泥产量将达 1×10^8 t,随着污水处理技术的发展,这一数字还将增长^[1-3]。目前城市污泥的主要处置方式是自然堆放或和城市垃圾一起混合填埋,被资源化利用的污泥很少。如何合理地处理城市污泥以及污泥的资源化利用问题显得越来越重要^[4,5]。由于城市污泥中含有大量农作物可利用的营养成分,其用作肥料可以减少化肥施用量,改善土壤理化性质,降低农业成本,因而污泥农用受到很多学者的重视,并且做了大量的研究^[6-11]。由于污水种类繁多,污泥性质各异,污泥农用后对农产品产量及品质的影响非常复杂,因而探讨不同农作物的污泥利用效果及其合理用量,对扩大污泥利用途径,减轻污泥填埋的环境压力,具有十分重要的理论意义和实际价值。

本试验选用西安市北石桥污水厂污泥,通过盆栽试验观察不同污泥施用量下油麦菜的生长情况,

测定其发芽率、根活性、叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白等指标来确定污泥农用对蔬菜生长及品质的影响,从而为探讨城市污泥农用的可行性及合理用量提供参考依据。

1 研究方法

1.1 供试污泥和土壤

试验用污泥来自西安市北石桥污水厂,即为污泥脱水后的泥饼。污泥采回后在阴凉通风处风干,磨碎,过 2 mm 筛备用。供试土壤取自西安市南郊无污染区耕层(0~20 cm)土壤(属褐土土类)。供试污泥和土壤的基本性质见表 1。

1.2 供试蔬菜

供试作物为油麦菜(*Lactuca sativa* L.)。油麦菜属伞形科一年生或二年生草本,株高约 20~30 cm。试验时选择发育正常、无霉、无蛀、完整而没有任何损坏的油麦菜种子。

表 1 供试土壤和污泥中的养分及重金属含量

Table 1 The contents of nutrient and heavy metal in municipal sludge and soil

项目 Items	pH	有机质/% Organic matter	全氮/% Total N	全磷/% Total P	重金属 Heavy metals/(mg·kg ⁻¹)						
					Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Hg	As
土壤 Soil	8.15	1.26	0.123	0.113	27	78	18.1	0.158	27.3	0.0923	11.5
污泥 Sludge	7.30	38.4	1.72	1.44	346	774	50.8	1.14	46.4	0.1932	13.7

1.3 试验设计

1.3.1 第一期试验 将采集的土壤风干,过 2 mm 筛,分装在直径 15 cm 的塑料盆内,每盆装 2 kg 土。每盆污泥用量分别 0、3、6、9、12、15、18、21、24、27、30 g/kg,共 11 个处理,每个处理设 6 个重复。将污泥与土壤充分混合均匀装盆,浇水至接近田间持水量。放置 2 周,待土壤与添加的污泥之间达到平衡后播种。播种时将盆内土壤表面抚平,每盆均匀撒种 20 粒,再覆盖一层土,厚度约 0.5~1.0 cm。置于室外环境,保证光照充足。按常规管理,每日观察记录生长情况,并于种植 10 d 后测定其发芽率。之后每盆定植 3 株,40 d 测定根系总吸收面积、根系活跃吸收面积^[12]、叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白各项指标^[13]及油麦菜中重金属 Zn、Cu、Pb、Cd、As、Hg、Ni 含量^[14]。

1.3.2 第二期残效试验 第一期盆栽试验结束后,将剩余植物及其根系除去,不再施加污泥,按第一期试验方法种植油麦菜,观察并测定上述指标以研究污泥对作物的残效。

2 结果及分析

2.1 不同污泥施用量下油麦菜中重金属的含量分析

在第一期油麦菜生长 40 d 后收获,测定植物体内 Zn、Cu、Pb、Cd、As、Hg、Ni 含量(表 2)。结果表明,不同污泥施用量下油麦菜中重金属含量除 Pb、Cd、Hg 个别样品超标外,其余都在国家蔬菜食品限量标准以内,且超标样品中重金属含量与污泥施用量没有明显的关系。这种蔬菜重金属含量与污泥施用量之间表现出的弱相关性表明蔬菜中重金属的积累并不完全决定于土壤或外源重金属的全量^[15]。由于重金属来源不同,其赋存形态差异较大,导致其在土壤-植物中迁移转化存在明显差异,因此要加强重金属的生物有效性研究,才能更好地理解土壤-蔬菜系统中重金属的富集特征。此外,土壤中重金属的生物有效性又与土壤 pH、有机质、粘粒含量、共存元素等因素有关,还受植物生理生化特性等因素的影响^[16-17]。

2.2 不同污泥施用量对油麦菜发芽率的影响

种子的发芽率可以反映种子受外界条件状况及其变化的影响。从油麦菜的第一期试验中可以看出(表 3),当污泥施用量较小时,发芽率随污泥施用量的增加有所提高,在污泥施用量为 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,发芽率达到最大,为 93%,明显大于对照处理的发芽率 75%。当污泥施用量超过 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,不同处理的发芽率均低于对照,并且随着污泥施用量的增大,发芽率减小。当污泥施用量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,发芽率仅为 13%。第二期残效试验中各处理的发芽率规律与第一期试验基本相似,但总体上各处理的发芽率大于第一期试验。说明低施用量污泥在一定程度上刺激了油麦菜发芽,但在残效试验中,低污泥施用量对出芽率的促进作用不如在第一期盆栽试验中明显,污泥施用量对油麦菜发芽率的抑制作用亦降低。这主要是由于经过第一期油麦菜的生长,污泥中的营养物及其它有害物质被作物部分吸收,或者其赋存形态发生了改变,导致营养作用和毒性都降低^[19]。污泥对种子萌芽的影响是污泥中各种成分综合作用的结果^[20-21]。污泥中的有机质含量高,

一些有机物质(如酚类、醛类和各种有机酸)会对种子发芽产生抑制作用。但随着时间的推移,这些有害有机物质分解的速度逐渐加快,含量逐渐下降,对作物种子发芽的抑制作用也就逐渐消失^[22]。

表 2 不同污泥施用量下油麦菜中重金属的含量

Table 2 The contents of heavy metal in leaf lettuce at different rates of municipal sludge application/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$

重金属 Heavy metals	国家蔬菜食品 限量标准 ^[18] National vegetable food limited standard	含量范围 Content range	平均值 Mean
Zn	≤ 20	5.78 ~ 14.53	10.34
Cu	≤ 10	3.24 ~ 7.58	5.63
Pb	≤ 0.2	0.130 ~ 0.271	0.162
Cd	≤ 0.05	未检出 ~ 0.071 Not detected ~ 0.071	0.037
As	≤ 0.5	未检出 ~ 0.316 Not detected ~ 0.316	0.192
Hg	≤ 0.01	未检出 ~ 0.018 Not detected ~ 0.018	0.008
Ni	≤ 0.3	0.175 ~ 0.236	0.195

表 3 两期试验中香菜的发芽率

Table 3 The germination rate of leaf lettuce in two phases of experiment/%

处理 Treatments	污泥施用量 Rate of municipal sludge application/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
第一期试验 First phase of experiment	75	83**	93**	63**	58**	50**	40**	38**	40**	27**	13**
第二期残效试验 The second phase of residual effect experiment	65	67**	73**	68**	63*	50**	47**	47**	55**	42**	40**

注: * 表示 5% 显著水平, ** 表示 1% 极显著水平, 下同。

Note: * represents the significantly difference at 5%, ** represents the significantly difference at 1%. Hereinafter the same.

2.3 不同污泥施用量对油麦菜根系活力的影响

植物根系是活跃的吸收器官和合成器官,根的生长情况和活力水平直接影响地上部的营养状况及产量水平。根系吸收总面积能反映根系吸收水分和养分能力的大小,而根系活跃吸收面积能在一定程度上反映根系活力情况。由表 4 可以看出,第一期试验中,随着污泥施用量的增加,油麦菜根系总吸收面积和活跃吸收面积都呈现先升高后下降的趋势,两个指标在污泥施用量为 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理时都达最大,最大值分别为 $1.93 \text{ m}^2 \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $0.88 \text{ m}^2 \cdot \text{株}^{-1}$,之后呈下降趋势;污泥施用量大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的各处理根系总吸收面积低于对照,而活跃吸收面积亦从污泥施用量为 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理后低于对照;污泥施用量大于 $24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后的各处理植物的生长明显受到抑制,生物量很小,已无法满足样品测定的要求,因

而本试验中所有项目都没有测定。说明低施用量的污泥对油麦菜根系活力起到了刺激作用。低施用量下污泥中的有机污染物、重金属等对油麦菜的抑制作用有限, N、P、K 等营养物质促进作用居于主导地位;污泥高施用量处理对油麦菜的根系活力有抑制作用^[23-24]。污染胁迫下植物往往通过改变其根系形态和生理来适应不利的生长环境,根系形态的变化可以直接影响根系活力等生理指标^[25]。

在残效试验中,只对其中 7 个处理的根活力指标进行了测定(表 4)。残效试验中的油麦菜根系总吸收面积、活跃吸收面积都高于第一期,且个别处理中根系总吸收面积和根系活跃吸收面积甚至是第一期试验中同处理水平的两倍以上。这可能是由于在第一期试验中,污泥所含的有害物质大部分被油麦菜吸收,土壤中有害物含量降低^[26],而且第一期试

验中植物根部释放的有机酸等分泌物也会改善土壤环境,减弱重金属等有害物质对植物的毒害^[24,27]。同时土壤中的微生物随环境条件的变化发生波动,积累了多种耐有害物质的真菌和细菌,这些微生物

通过多种方式降低了土壤中有害物质的毒性和生物可利用性^[28],使得植物的生理生化作用加强,根系活力大大提高。

表 4 两期试验中根活力指标测定结果
Table 4 The root activity in two phases of experiment

处理 Treatments	测定项目 Items	污泥施用量 Rate of municipal sludge application/(g·kg ⁻¹)									
		0	3	6	9	12	15	18	24	27	30
第一期试验 The first phase of experiment	根系总吸收面积/(m ² ·株 ⁻¹) Total roots absorbing area/(m ² ·plant ⁻¹)	1.63	1.73**	1.20**	1.93**	0.99**	1.01**	0.92**	—	—	—
	活跃吸收面积/(m ² ·株 ⁻¹) Active absorbing area/(m ² ·plant ⁻¹)	0.47	0.74**	0.65**	0.88**	0.72**	0.31**	0.26**	—	—	—
第二期 残效试验 The second phase of residual effect experiment	根系总吸收面积/(m ² ·株 ⁻¹) Total roots absorbing area/(m ² ·plant ⁻¹)	4.09	—	—	4.40	—	5.89	5.76	4.64	6.32	5.33
	活跃吸收面积/(m ² ·株 ⁻¹) Active absorbing area/(m ² ·plant ⁻¹)	1.69	—	—	1.83	—	1.84	1.99	1.61	1.55	0.82

注:“—”表示未测定,下同。 Note: — means not measured. Hereinafter the same.

2.4 不同污泥施用量对油麦菜叶绿素含量的影响

第一期试验中,从对照到污泥施用量为 18 g·kg⁻¹的 7 个处理中叶绿素 a + b 的含量测定值为 0.98 ~ 1.39 mg·g⁻¹。从图 1 中可以看出,叶绿素 a + b 含量随污泥施用量的增加呈现出先升高后降低的趋势,最大值出现在污泥施用量为 6 g·kg⁻¹的处理中,为 1.39 mg·g⁻¹,比对照处理的叶绿素 a + b 含量 1.04 mg·g⁻¹增加了 33%。经过多重比较分析,与对照相比达到了极显著差异。当施用量为 15 g·kg⁻¹时,叶绿素 a + b 含量仅为 1.02 mg·g⁻¹,已开始低于对照处理的叶绿素含量,与对照相比无显著差异,且下降趋势加快。在残效试验中,油麦菜叶绿素 a + b 含量同样呈现出随污泥施用量的增加先升高后降低的趋势,但最大值出现在施用量为 27 g·kg⁻¹的处理中,为 1.64 mg·g⁻¹。在污泥施用量小于 12 g·kg⁻¹的几个处理中,油麦菜叶绿素含量大于对照处理的叶绿素含量,说明污泥中大量 N、P、K 及有机质营养成分促进了油麦菜的生长,使得油麦菜代谢旺盛,有利于 N、P、Fe、Mg 等光合作用所需的无机盐等的运输,促进叶绿素 a + b 的合成^[29-30]。污泥中虽含有 Cu、Pb、Cr、Cd 等重金属元素,但土壤中的胶体物质会将一部分重金属元素吸附或固定,同时石灰性土

壤较高的 pH 的化学沉淀作用,使得重金属元素对蔬菜的抑制作用有限,有的甚至有促进作用^[31-32]。

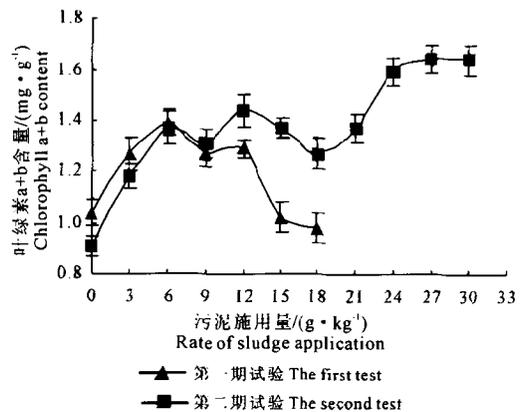


图 1 两期试验不同污泥处理叶绿素含量变化

Fig.1 The changes of chlorophyll in two phases of experiment

2.5 不同污泥施用量对油麦菜可溶性糖的影响

可溶性糖和可溶性蛋白含量是评价蔬菜品质高低的重要指标^[33-34]。第一期试验中,从对照到污泥施用量为 18 g·kg⁻¹的处理,油麦菜可溶性糖的含量测定结果为 3.38 ~ 7.91 mg·g⁻¹。从图 2 中可以看出,从对照处理到污泥施用量为 6 g·kg⁻¹时,可溶性糖含量变化不大,略有上升,最高值为 7.90

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 仅比对照处理的可溶性糖含量 $7.70 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加了 3%, 与对照相比, 处理之间差异不显著。之后不同处理可溶性糖呈下降趋势, 在污泥施用量为 $12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理中油麦菜可溶性糖只有 $3.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

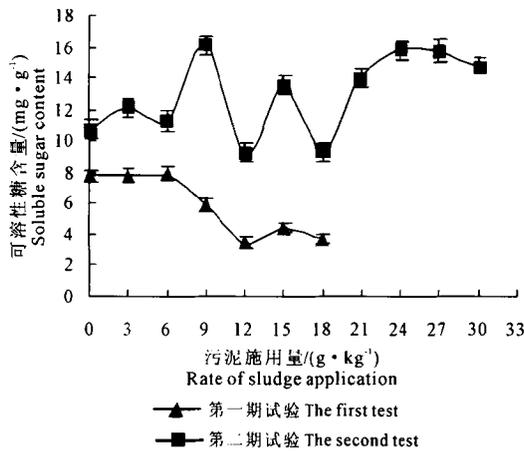


图 2 两期试验不同污泥处理可溶性糖含量变化

Fig. 2 The changes of soluble sugar in two phases of experiment

在第二期残效试验中(图 2), 油麦菜中可溶性糖含量波动较大, 规律不明显。在污泥施用量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理中可溶性糖含量达到了最大值, 为 $16.07 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在施用量为 $24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之后缓慢下降。残效试验中各处理可溶性糖含量均高于第一期

试验。说明随着污泥施用量的增加, 污泥中的大量有害物质被吸收利用, 叶绿素的合成首先受到了抑制, 进而导致植株糖的合成受到影响。在污泥施用量较低时, 有害物对植株的抑制作用有限, 有利于光合作用的进行, 可溶性糖作为光合作用的产物含量定然会有所升高^[35]。

2.6 不同污泥施用量对油麦菜可溶性蛋白的影响

第一期试验中, 从对照到污泥施用量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理中, 随着污泥用量增大, 可溶性蛋白含量逐渐增大, 在 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理时可溶性蛋白达到最大, 为 $25.38 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 是对照处理可溶性蛋白含量 $9.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 的 2.8 倍(表 5)。之后随着污泥用量的增加, 可溶性蛋白含量下降。在污泥施用量为 $18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 可溶性蛋白含量仅为 $17.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 但仍高于对照处理。在残效试验中, 对照到污泥施用量为 $27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的处理中, 可溶性蛋白含量基本呈现上升的趋势, 在污泥施用量为 $27 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时可溶性蛋白达最大值, 为 $25.26 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。经过相关性分析, 可溶性蛋白含量与叶绿素含量达到极显著相关, 相关系数为 0.7326。说明在残效试验中, 污泥的施入使得油麦菜的生理生化反应与代谢活动越旺盛, 蛋白质合成增加。在逆境条件下, 由于蛋白质分解加快, 合成受到抑制, 使植物体内蛋白质含量降低^[36]。

表 5 两次试验的各处理可溶性蛋白含量/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 5 The soluble protein contents of leaf lettuce in two phases of experiment

处理 Treatments	污泥施用量 Rates of sludge application/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)										
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
第一期试验 The first phase of experiment	9.14	20.38**	24.00**	25.38**	18.83**	18.42**	17.66**	—	—	—	—
第二期残效试验 The second phase of residual effect experiment	12.38	14.44	16.88	16.84	16.73	13.05	17.48	18.34	18.97	25.26	17.69

2.7 污泥合理施用量的探讨

经过方差分析, 将不同污泥施用量对油麦菜发芽率、根系活力、叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白的影响显著性与对照进行了多重比较。结果表明, 不同污泥用量在两期试验中对油麦菜的发芽率都有极显著影响, 污泥施用量为 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时发芽率为最高, 当污泥施用量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时发芽率下降, 且两处理之间有极显著的差异; 根系吸收总面积和活跃吸收面积在污泥施用量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时为最高, 之后在污泥不同处理下两指标都下降, 且污泥施用量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的两个处理之间有极显著差异, 说明污泥施用量超过 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以后, 根系吸收总面

积和活跃吸收面积的下降是极显著的; 同理分析得出叶绿素 a + b 和可溶性糖含量在污泥施用量超过 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 极显著下降, 可溶性蛋白含量在污泥施用量超过 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 后极显著下降。综合分析得出污泥有利于油麦菜生长和品质提高的最佳施用范围为 $6 \sim 9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3 结 论

- 1) 不同污泥用量对油麦菜中 Zn、Cu、Pb、Cd、As、Hg、Ni 的吸收影响不显著。
- 2) 发芽率随污泥施用量的增加有所提高, 在污泥施用量为 $6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 发芽率达到最大, 为 93%。

随着污泥施用量的增大,发芽率减小。残效试验中各处理的发芽率大于第一期试验。

3) 第一期试验中,随着污泥施用量的增加,油麦菜根系总吸收面积和活跃吸收面积都呈现先升高后下降的趋势,两项指标在污泥施用量 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达最大。残效试验中各处理油麦菜根系总吸收面积、活跃吸收面积都高于第一期。

4) 第一期试验中,油麦菜叶绿素 a + b 和可溶性糖含量最大值出现在污泥施用量为 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理中,分别为 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $7.90 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;可溶性蛋白含量最大值出现在污泥施用量为 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的处理中,为 $25.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在残效试验中,污泥施用量为 $27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,油麦菜叶绿素 a + b、可溶性蛋白含量达到最大值;可溶性糖在污泥施用量为 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到了最大值。

5) 通过不同指标的综合分析,可以得出污泥有利于油麦菜生长和品质提高的最佳施用范围为 $6 \sim 9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 杨金满,贾瑞宝.城市污泥资源化利用研究进展[J].工业用水与废水,2011,42(5):1-5.
- [2] 唐小辉,赵力.污泥处置国内外进展[J].环境科学与管理,2005,30(3):68-70.
- [3] Fytily D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new method—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12: 116-140.
- [4] 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):157-160.
- [5] 齐华.城市污水厂污泥的处理与综合利用[J].河北化工,2012,35(7):85-87.
- [6] 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,2003,23(11):2464-2474.
- [7] 包苏俊,刘长青,张峰青,等.岛城市污水厂污泥有机质、养分及重金属含量[J].城市环境与城市生态,2011,24(6):37-39.
- [8] 马学文,翁焕新,章金骏.中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化[J].中国环境科学,2011,31(8):1306-1313.
- [9] 李晶,郭黎民,赵利红,等.城市污水处理厂剩余污泥作为肥料使用对青菜生长的影响[J].化工技术与开发,2010,39(10):52-54.
- [10] 高翔.城市污水处理厂污泥农用可行性研究与监测方法[J].环境工程,2011,29(S):230-236.
- [11] 涂剑成,赵庆良,杨倩倩.东北地区城市污水处理厂污泥中重金属的形态分布及其潜在生态风险评价[J].环境科学学报,2012,32(3):689-695.
- [12] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,1990:59-64.
- [13] 邹琦.植物生理生化实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:51-61.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999:205-227.
- [15] 方凤满,汪琳琳,谢宏芳,等.芜湖市三山区蔬菜中重金属富集特征及健康风险评估[J].农业环境科学学报,2010,29(8):1471-1476.
- [16] 蔡立梅,马瑾,周永章,等.东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J].地理学报,2008,63(9):994-1003.
- [17] 郑娜,王起超,郑冬梅.锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J].环境科学,2007,28(6):1349-1355.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局.农产品安全质量[S].北京:中国标准出版社,2001:3-7.
- [19] 陈秋丽,张朝升,张可方,等.城市污水处理厂的污泥农用对土壤的重金属影响[J].污染防治技术,2008,21(1):23-25.
- [20] 王莹莹.西安市江村沟垃圾填埋场渗滤液对周边生态环境的影响研究[D].西安:长安大学,2008:35-36.
- [21] 王冬.多氯联苯(PCBs)的环境生态毒性研究[D].杭州:浙江大学,2006:93-97.
- [22] 宋艳龄,汪自强.污泥的改土作用和对作物的生长及品质的影响[J].世界农业,2006,(7):50-51.
- [23] 赵晓莉,徐德福,方华,等.污泥中有机污染物对农田植物影响研究综述[J].安徽农业科学,2008,36(18):7880-7882,7885.
- [24] 李雪梅,张利红,陈思源,等.不同有机酸对铅胁迫小麦幼苗的缓解作用[J].生态学杂志,2005,24(7):833-836.
- [25] 邵小杰,杨洪强,乔海涛,等.氯化镉对葡萄根系线粒体特性与根系活力的影响[J].应用生态学报,2009,20(6):1390-1394.
- [26] 荆旭慧,李恋卿,潘根兴.不同环境下土壤作物系统中重金属元素迁移分配特点[J].生态环境,2007,16(3):812-817.
- [27] 孙琴,王晓蓉,丁士明.超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展[J].生态学杂志,2005,24(1):30-36.
- [28] 聂静,杨健,姚阔为,等.城市污水污泥农用资源化评述[J].四川有色金属,2006,(4):53-56.
- [29] Prasad D D K, Prasad A R K. Effect of lead and mercury on chlorophylls synthesis in mung bean seedlings[J]. Phyto-chemistry, 1987, 26:881-883.
- [30] Kupper H, Kupper F, Spiller M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants[J]. Exp Bot, 1996, 47:259-266.
- [31] 马利民,陈玲,马娜,等.几种花卉植物对污泥中铅的富集特征[J].生态学杂志,2005,24(6):644-647.
- [32] 秦天才,吴玉树.镉、铅及其相互作用对小白菜生理生化特性的影响[J].生态学报,1994,14(1):46-50.
- [33] Prez A G, Sanz G, Rios J J, et al. Effects of ozone treatment on postharvest strawberry quality[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47:1652-1656.
- [34] 侯红英,苗洪利,车豪杰,等.调光生态膜对蔬菜品质的影响[J].激光生物学报,2006,15(6):584-587.
- [35] 赵晓莉,朱伟.城市污泥农用对生理生化指标和品质的影响[J].生态环境,2008,17(1):99-104.
- [36] 李亚敏,肖红利.2种藜类植物对Cd-Cu复合胁迫的生理响应[J].江苏农业科学,2011,39(4):441-443.