

施用污泥堆肥对龙葵生长及富集重金属的影响

朱秀红, 温道远, 韩晓雪, 杨金桥, 茹广欣

(河南农业大学林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 研究了施用不同比例 (0、5%、10%、15%、20%) 的城市污泥堆肥对龙葵生长和重金属含量的影响以及混合土壤理化性质、重金属含量的变化, 以探究城市污泥堆肥农用潜力。结果表明, 城市污泥堆肥不同施用比例下, 土壤氮磷钾和有机质含量均显著增加, 施用污泥堆肥不同比例的龙葵植株干重从大到小顺序为 5%、10%、15%、0(CK)、20%, 当施用比例为 5% 时, 龙葵的干重达最大值 5.04 g, 较对照不施城市污泥堆肥提高了 49.81%。土壤中的重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 等含量均随污泥施用比例的增加逐渐升高, 但均不超过污泥农用泥质 B 级标准。混合土壤中的重金属被龙葵富集, 富集量随堆肥的用量逐渐升高。低浓度下(施用比例为 5%)龙葵生长良好, 对混合土壤有很强的耐受性, 高浓度(施用比例为 15%~20%)会对龙葵植株产生毒害作用, 甚至导致植株凋亡。综上分析, 低浓度(5%)为最适宜龙葵生长的污泥堆肥施用浓度。

关键词: 城市污泥堆肥; 龙葵; 植物生长变化; 重金属

中图分类号: S567.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1463(2020)04-0017-07

doi: 10.3969/j.issn.1001-1463.2020.04.006

Effect of Municipal Sludge Compost on Growth and Heavy Metals of *Solanum nigrum* L.

ZHU Xiuhong, WEN Daoyuan, HAN Xiaoxue, YANG Jinju, RU Guangxin

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: The effects of different proportions (0%, 5%, 10%, 15% and 20%) of municipal sludge compost on plant growth and heavy metal content and the changes of physical and chemical properties and heavy metal content of mixed soil were studied to explore the agricultural potential of municipal sludge compost. The results showed that the soil nitrogen, phosphorus, potassium and organic matter content increased significantly under different sludge composting ratios. The order of dry weight of *Solanum nigrum* L. plants under each treatment was 5% > 10% > 15% > 0 (CK) > 20%, when the sludge composting ratio is 5%, the dry weight of *Solanum nigrum* L. reaches a maximum of 5.04 g, which is 49.81% higher than that of without municipal sludge composting (CK). The contents of heavy metals such as Cu, Zn, Pb, Cr and Cd in the soil increased gradually with the increase of the proportion of sludge application, but they did not exceed the B grade standard for Sludge Agricultural Mud. The heavy metals in the mixed soil were enriched by *Solanum nigrum* L., and the enrichment amount gradually increased with the amount of compost. The experiment showed that *Solanum nigrum* L. grew well at low concentration and was highly tolerant to mixed soil, high concentration (15% ~ 20%) may cause toxic effects on *Solanum nigrum* plants and even cause plant apoptosis. In summary, the low concentration(5%) is the

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-12-28

基金项目: 国家林草局生物安全与遗传资源项目 (KJZXSA2019042); 河南省林木种质资源建设项目 (30601998)。

作者简介: 朱秀红(1966—), 女, 河南信阳人, 副教授, 硕士, 硕士生导师, 研究领域为污染生态。Email: Zhuxiuhong001@126.com。

通信作者: 茹广欣(1963—), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究领域为林木遗传育种。Email: ruguangxin@126.com。

most suitable concentration of fertilizer for the growth of *Solanum nigrum* L.

Key words: Municipal sludge composting; *Solanum nigrum* L.; Plant growth change; Heavy metal

城市污泥中含有丰富的有机质、N、P 及植物生长所必需的微量元素，是一种很好的有机肥源^[1]。大量研究表明，城市污泥通过混合添加剂进行堆肥，可稀释重金属浓度，提高污泥堆肥养分含量，改善土壤结构和性能，从而进行农业利用^[2]。城市污泥中含有大量重金属，高温堆肥虽能有效降低其重金属的生物有效性，降低其毒性，但其含量并不会消减，因此堆肥污泥资源化利用不可避免的会将有毒有害的重金属带入到土壤中^[3]。国内外学者利用污泥改良土壤种植超富集植物，在植株生长期通过施肥、适时刈割等农业措施，可以提高超富集植物对土壤中重金属的去除能力^[4]。陈启敏^[5]研究发现，施加 3% 污泥堆肥时土壤性质得以改善，紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 的生长量提高，且堆肥量在 15% 以下均为安全用量。王婧等^[6]发现施用污泥堆肥既促进了合果芋 (*Syngonium podophyllum*) 生长，又降低了土壤重金属污染的风险。植物对污泥改良土壤的效应和对重金属富集、转移系数都高度依赖于污泥施用比例。刘强等^[7]研究发现，高羊茅 (*Festuca arundinacea* Schreb) 和万寿菊 (*Tagetes erecta*) 在污泥堆肥施加比例分别为 10% 和 5% 时植物生物量、株高达到最大值，且对污泥混配土壤中的 Zn 和 Cu 有较好去除效果；Orman 等^[8]发现紫苜蓿 (*Medicago sativa*) 对重金属的富集系数和转移系数大小与污泥施用量有明显的相关性。污泥堆肥施用最佳比例因植物而异，因此，污泥堆肥剂量对植物生长及其重金属吸收能力的影响还需开展更多研究。

龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 是一种镉超富集植物，为茄科茄属一年生或多年生草本植物。由于其生长周期短、富集能力强、生物量较大，即便在高浓度重金属环境中其生长

也不会受到影响，具有显著的生态价值和经济效益，因此成为植物修复机理研究和应用的良好材料^[9]。我们采用龙葵盆栽试验，将城市污泥与玉米秸秆堆肥作为肥料施入土壤^[10]，研究了不同污泥施用比例对龙葵生长变化及土壤理化性质的影响，为以后城市污泥的资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为龙葵 (*Solanum nigrum* L.)，种子为野生龙葵良种，购买于郑州市某种子公司。供试土壤为河南农业大学第三生活区 0~20 cm 表层褐土。供试污泥为含水率 80% 的脱水污泥，由郑州市五龙口污水处理厂提供。

1.2 试验设计

以脱水污泥为堆肥基质，以碎至 2 cm 的玉米秸秆为堆肥填充料，污泥与秸秆的质量配比为 3 : 1，堆肥时间为 30 d^[11]。选用河南农业大学第三生活区 0~20 cm 表层土作为盆栽基质，土壤经自然风干后去除杂质过 20 目筛。城市污泥堆肥后自然晾干、粉碎过 20 目筛，以底肥的形式按质量比 0% (CK)、5% (T1)、10% (T2)、15% (T3) 和 20% (T4) 充分混匀后一次性施入直径 18 cm、高 16 cm 的塑料盆钵，每盆装混合土 3 kg，下带托盘。供试材料基本理化性质与重金属含量见表 1。堆肥产品中有机质含量、重金属含量和其他养分均符合我国《城镇污水处理厂污泥处置——农用泥质标准》(见表 1)^[12]。龙葵种子经恒温培养催芽后选取长势一致的幼苗于 4 月 5 日移入盆钵，每盆栽 4 株，每处理 3 个重复，种植于河南农业大学第三生活区透光塑料大棚。

1.3 测定指标及方法

从 2018 年 4 月 15 日至 2018 年 6 月 4

日, 每 10 d 测定 1 次盆中植株株高, 连续测定 6 次^[13]。土壤及堆肥产品的 pH 采用 1 : 2.5 土水比电位法测定^[14]。将供试植物用蒸馏水清除杂质, 再用去离子水反复冲洗干净后放入 105 °C 烘箱, 2 h 后置于 80 °C 下烘干至恒质量, 称量干重^[15]。土壤基本理化性质参照《土壤农化分析》测定^[16]。样品消解采用 HNO₃-HF-HCl 微波消解法, 重金属总量采用火焰原子吸收分光光度计测试^[17-18]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 进行数据统计; 用 SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析; 用 Origin 9.2 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 施用污泥堆肥对土壤的影响

2.1.1 对土壤重金属含量的影响 从表 2 可以看出, 混合土壤中 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 的含量大都显著高于 CK, 重金属的含量随污泥堆肥用量的增加而显著上升。T1 处理、T2 处理下, 施肥混合土壤中重金属含量均低于土壤环境质量二级标准 (GB 15618—1995), 重金属没有对施肥混合土壤造成严重危害和污染^[18]; 而在 T3 处理、T4 处理下 (污泥堆肥施用比例为 15%、20% 时) 施肥混合土壤中 Zn 含量已超出或逼近土壤环境质

量二级标准, 这可能是因为城市污水管道中含有 Zn 镀层, 而 Cd 常与 Zn、Pb 共存, 导致 Cd 含量也超出或逼近临界值。另外土壤背景值的各重金属含量除 Zn 外均小于土壤环境质量一级标准, Zn、Cd 相比其他重金属更容易被农作物所吸附^[19], 因此污泥堆肥中的重金属在土壤中的残留累积必然会成为其在土地利用中连续施用的潜在危害, 施用量以及施用周期等均需严格控制。短期或者间隔一定年限施用可以达到农田安全利用的要求^[2]。

2.1.2 对土壤养分含量的影响 污泥堆肥施入土壤后可改变土壤的物理、化学及微生物特性^[19]。城市污泥经过堆肥后呈中性, 将风干后的表层土样与污泥堆肥按不同比例混合后发现, 其对土壤具有缓冲作用, 混合土壤随污泥堆肥用量增加 pH 逐渐降低。污泥堆肥以底肥形式施入土壤后, 混合土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量随施用比例逐渐增加 (表 3)。T1、T2、T3、T4 处理的混配土壤中, 有机质含量比 CK 分别提高了 143.90%、283.91%、339.13%、540.34%, 全氮分别是 CK 的 645.95%、843.24%、865.54%、925.57%; 全磷分别是 CK 的 102.19%、149.18%、269.95%、370.49%;

表 1 供试土壤与城市污泥的理化性质

材料	pH	有机质 /(g/kg)	全氮 /(g/kg)	全磷 /(g/kg)	全钾 /(g/kg)	Cr /(mg/kg)	Cu /(mg/kg)	Zn /(mg/kg)	Cd /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)
土壤	7.67	12.37	1.48	1.83	0.75	29.26	29.51	106.20	0.03	10.20
城市污泥	7.14	221.67	26.67	12.19	3.93	324.22	298.47	915.24	7.35	153.46
污泥农用泥 质 B 级标准	5.50~9.00	≥200	N+P ₂ O ₅ +K ₂ O≥30			1 000	1 500	3 000	15	1 000

表 2 施用污泥堆肥的重金属含量

处理	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
T0(CK)	2.37±0.31b	29.51±1.48e	106.25±1.70c	0.03±0.01d	10.21±1.26a
T1	44.28±2.06d	34.70±1.87c	131.72±2.51c	0.12±0.03b	17.68±1.01b
T2	51.82±2.85c	37.13±1.21d	161.31±0.22a	0.17±0.09c	19.78±1.85c
T3	60.23±1.28b	41.72±1.01b	193.43±1.57d	0.21±0.14c	26.75±1.34d
T4	74.97±2.10a	48.31±1.42a	235.41±1.93b	0.30±0.11c	28.32±3.81e
GB I	90	35	100	0.2	35
GB II	150	50	200	0.3	250

全钾分别是 CK 的 197.14%、368.57%、330.29%、540.57%。说明施用堆肥可以显著提高土壤中有有机质和全氮、全磷、全钾等营养元素的含量,可能是因为堆肥产品与土壤混配后有机态营养物质发生矿化,提高了有机质及营养元素的含量^[13]。

表 3 施用污泥堆肥对土壤养分含量的影响

处理	pH	有机质 /(g/kg)	全氮 /(g/kg)	全磷 /(g/kg)	全钾 /(g/kg)
T0(CK)	7.67 a	12.37 e	1.48 b	1.83 b	1.75 c
T1	7.45 b	30.17 d	9.56 d	1.87 a	3.45 b
T2	7.26 c	47.49 b	12.48 a	2.73 d	6.45 a
T3	7.25 d	54.32 c	12.81 b	4.94 a	5.78 c
T4	7.19 d	66.84 a	13.70 a	6.78 c	9.46 d

2.2 施用污泥堆肥对龙葵植株的影响

2.2.1 对龙葵株高变化的影响 龙葵在施加污泥堆肥后,株高的增长量变化差异明显。施用污泥堆肥 20 d 内,各处理下龙葵株高差异不显著。施加污泥 20 d 后,在 T4 浓度(污泥堆肥施用比例为 20%)下,龙葵逐渐表现出重金属毒害症状,具体表现为叶片边缘焦枯,下层叶片失绿脱落,植株生长缓慢;其余处理下毒害作用轻微或无不良现象,并于 5 月 10 日前后进入速生期,在污泥堆肥施用比例为 5%~15% 的范围内,堆肥产品的肥效营养作用促进了龙葵生长,而 T4(污泥堆肥施用比例为 20%)处理抑制了龙葵生长并出现死株,说明过量施加污泥堆肥产品会抑制植物生长。从图 1 可以看出,不同处理的污泥堆肥在龙葵生长初期对其生长变化

影响不明显,随着生长期延长,各处理呈现差异性。其中在 T1 处理下,龙葵株高达到最大值 32.3 cm,相对于 CK 增长了 49.54%。而在 T4 处理下,龙葵生长发育迟缓,叶片失绿变黄且过早脱落,株高低于对照最终凋亡。这可能是因为城市污泥中的有害物质超过了龙葵耐受性的最大阈值^[20]。T2 处理、T3 处理在龙葵生长期内略高于对照,植株收获时比 CK 分别增长 29.17%、25.00%。

2.2.2 对龙葵生物量的影响 生物量是指某一时刻单位面积内实存生活的有机物质(干重)总量,植株的干重与有机物的积累有关^[21]。从图 2 可以看出, T1 处理、T2 处理、T3 处理的植株生物量均高于 CK,比 CK 分别增加了 49.81%、35.85%、20.75%。T1 处理、T2 处理的龙葵可以正常生长, T1 处理的干重最高,达 5.04 g。T3 处理的植株出现轻微毒害症状,叶缘淡黄微焦,叶片枯黄,干重为 4.07 g。表明龙葵对重金属具有一定程度的耐受性,其生物量随污泥堆肥施用比例的增加呈先增加后减少的趋势。植物受到的迫害越严重,干质量和鲜质量的减少量越大^[22]。T1 处理的龙葵生物量最高,说明污泥堆肥在低比例范围内更有利于龙葵的生长;而 T4 处理的龙葵生物量与 CK 相比降低了 36.11%,说明高比例处理对龙葵生长抑制作用明显。周丽丽^[23]研究发现,污泥堆肥除含有机质, N、P、K 等营养元素外,同时也含有对植株生长有抑制作用的物

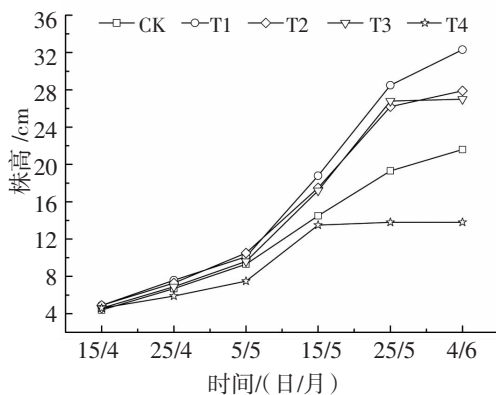


图 1 龙葵株高生长变化

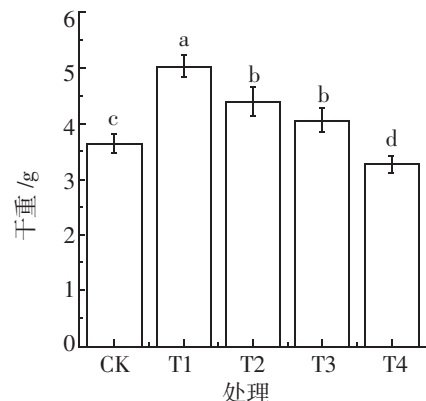


图 2 龙葵生物量(干重)变化

质, 当这些物质的浓度超过植株的伤害阈值, 植物就会出现伤害症状; 当这些物质的浓度超过其致死浓度时, 就会使植株死亡。表明 T1 处理(污泥堆肥施用比例为5%)是适合龙葵生长的最优施用量, T3 处理(污泥堆肥施用比例为15%)和 T4 处理(污泥堆肥施用比例为20%)会使龙葵生长受到抑制甚至凋亡。

2.2.3 对龙葵植株重金属含量的影响 图 3 表明, 施用污泥堆肥后, 各组处理的龙葵植株地上部 Zn、Cu、Cr 和 Cd 含量均高于 CK 处理, 且随污泥施用比例的增加而显著增加, Pb 含量除 T4 处理外, 其余处理均高于 CK, 说明污泥中的重金属被植株富集, 这与李淑芹等^[24]施用城市污泥堆肥对大豆种植研究结果相同。Cd 和 Zn 的含量远远超过

CK 且存在明显相关性。魏树和等^[25]发现, 龙葵是 Cd 的超积累植物, 在 Cd 投加浓度为 25 mg/kg 条件下, 龙葵茎和叶中 Cd 含量超过了 Cd 超积累植物的临界含量标准(100 mg/kg), 且植物的生长未受抑制, 这与本试验结果相似。重金属 Pb 和 Cr 的含量随污泥用量出现呈先增加后下降的趋势, 可能是由于 T4 处理的植物生长缓慢并逐渐凋亡, 导致其积累能力较低。重金属 Cu 的含量各处理间差异不显著。

从图 4 可以看出, 施用污泥堆肥后, 各组处理龙葵地下部根系的 Zn、Pb、Cu、Cr 和 Cd 含量均高于对照。重金属 Cd、Pb 和 Zn 含量在 T3 时达到最大值, 分别为 0.64、5.39、225.64 mg/kg, 这是因为 T3 处理的混

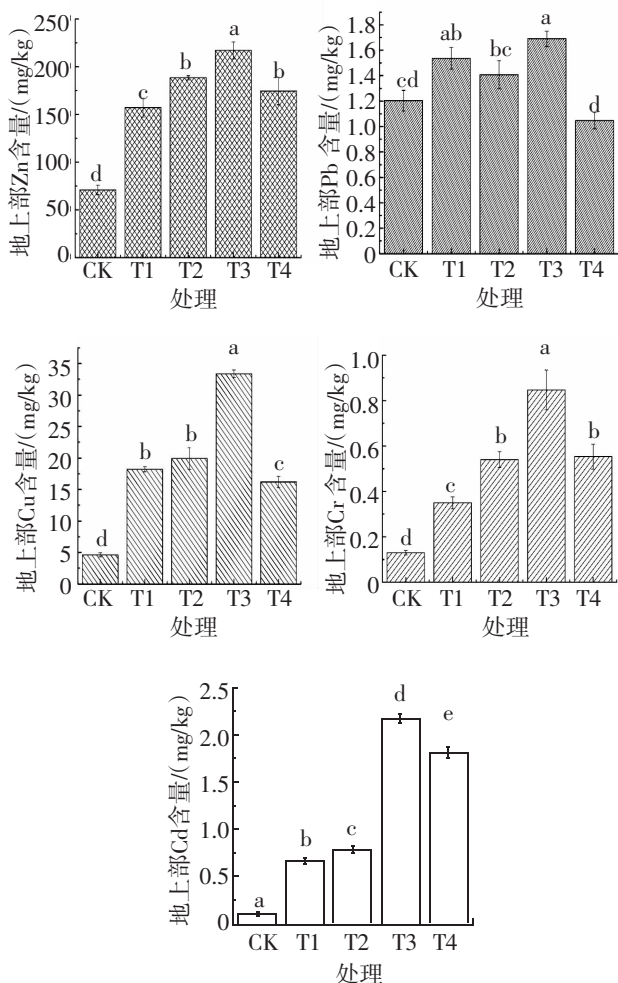


图 3 施用污泥堆肥对龙葵植株地上部重金属含量的影响

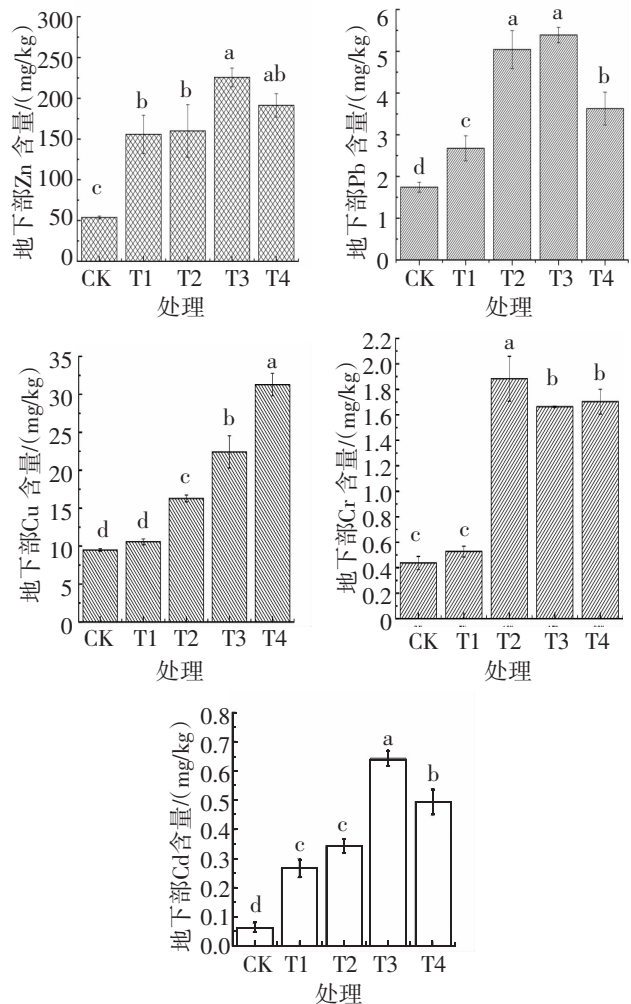


图 4 施用污泥堆肥对龙葵植株地下部重金属含量的影响

合土壤中重金属含量较高,此时有害物质的浓度已超过龙葵的伤害阈值,龙葵在生长过程中表现出明显伤害症状。重金属 Cu 在龙葵地下部分的含量随污泥浓度增加而增加且在 T4 处理时达到最大值。林义章等^[26]发现,Cu 污染会抑制叶绿素合成和根系生长,T4 处理的龙葵生长缓慢,根部有腐烂现象,与本次试验结果相似。施用堆肥后,高浓度处理下重金属 Cr 含量升高,低浓度下差别不显著,说明龙葵对重金属 Cr 富集能力较弱。

3 结论与讨论

试验表明,施用堆肥产品对龙葵株高及生物量均有不同的影响,城市污泥堆肥施用比例为 5%、10%、15%时均可以促进植株生长,当城市污泥堆肥施用比例为 20%时会抑制植物生长甚至凋亡。城市污泥堆肥施用比例为 5%的施用比是有利龙葵生长的最佳施用量。城市污泥堆肥施用比例为 5%时混合土壤中重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 含量分别为 34.70、131.72、17.68、44.28、0.12 mg/kg,符合我国土壤环境质量(GB15618—1995)二级标准。即城市污泥作用于混配土壤,使其全氮、全磷、全钾及有机质的含量随施用量的增加而显著增加,改善了土壤质量,达到了资源化利用的目的。龙葵作为超积累植物,对低浓度(5%)污泥堆肥表现出较好的耐受性,而过高浓度(15%~20%)则会超过其伤害阈值,出现毒害症状甚至凋亡。在龙葵生长期进行适时刈割,可以达到去除土壤重金属的效用。污泥的渗出液中含有重金属和 N、P、K 等营养元素,当其通过地表径流进入河流、湖泊或者海洋中,易造成水体富营养化,重金属迁移等环境问题^[15],因此城市污泥产品用量不宜长期大量施用。

本研究发现,城市污泥与玉米秸秆混合堆肥后作为底肥改善了土壤理化性质,混合土壤有机质以及氮磷钾等元素均随着堆肥产品用量的增加而逐渐升高,在农业方面具有

资源化利用的效果。堆肥产品总体上呈中性,与土壤混合后 5%、10%、15%、20%处理的 pH 分别为 7.45、7.26、7.25、7.19。混合土壤的 pH 小幅度降低,说明施用堆肥产品具有一定的缓冲作用。低浓度施用污泥堆肥产品对植株的株高和生物量均有显著促进作用,而过高浓度则会导致植株死亡。其可能的原因一是污泥堆肥产品中含有激素类物质、有机物质以及丰富的氮磷钾等元素,增加了混合土壤的肥效,对植物的生长发育具有促进作用。但随着施用量的增加,龙葵的株高、生物量均呈现降低趋势,说明过量施用堆肥产品会抑制植物的生长^[18];二是污泥堆肥产品中重金属含量较高,龙葵作为超富集植物对重金属胁迫具有快速响应的特点,当重金属含量超过其最大阈值就会导致植株死亡。施用城市污泥堆肥后,初期各处理的植物长势差别不明显,后期表现出促进植物生长的效果,这可能是由于一是污泥堆肥作为有机肥其肥效持续时间较长,在植物生长初期可利用物质含量较少,但随着时间的延长,堆肥产品中物质发生转化,逐渐表现出堆肥产品的肥效营养作用^[2];二是污泥中起抑制作用的激素类物质和有机污染物等物质被土壤微生物逐渐分解流失,导致其含量逐渐降低,抑制作用减弱^[21];三是随着植物的生长,其对环境的适应能力增强,抗逆性提高。施用污泥堆肥会使施肥土壤中的重金属增加,引起植物体内重金属含量的增加。污泥堆肥中的重金属被添加到土壤中后,少量具有生物有效性的重金属被植株吸收,大部分重金属渐趋于稳定被截留在土壤中^[2]。马可婧等^[27]、马双进等^[28]研究重金属淋溶迁移的结果显示,重金属 Cd、Pb 具有较强的迁移性,因此污泥堆肥农用需控制污泥堆肥施用量,在施用污泥堆肥时,除考虑重金属残留累积的危害外也应注意重金属迁移、危害水资源等问题。

参考文献:

- [1] 周健. 镉在施污黄土—马铃薯系统中迁移特征及生物有效性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [2] 程晓波. 城市污水厂污泥堆肥施用及重金属形态与吸附的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [3] 林云琴, 周少奇. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态转化[J]. 生态环境, 2008(3): 940-943.
- [4] 张桥, 吴启堂, 黄焕忠, 等. 施用污泥堆肥对作物和土壤的影响[J]. 土壤与环境, 2000(4): 277-280.
- [5] 陈启敏. 污泥堆肥改性黄土—紫花苜蓿系统中重金属迁移富集及控制技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [6] 王婧, 莫其锋, 储双双, 等. 污泥堆肥对园林植物合果芋 (*Syngonium podophyllum*) 生长及重金属吸收累积的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1752-1758.
- [7] 刘强, 陈玲, 邱家洲, 等. 污泥堆肥对园林植物生长及重金属积累的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 870-875.
- [8] ORMAN S, OK H, KAPLAN M. Application of sewage sludge for growing alfalfa: Its effects on the macro-micronutrient concentration, heavy metal accumulation and translocation[J]. *Ekoloji*, 2014, 23: 10-19.
- [9] 殷恒霞. 重金属超富集植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 对Cd耐受和富集的生理和分子机制初探[D]. 西宁: 青海师范大学, 2010.
- [10] 黄柳祯. 城市污水污泥好氧堆肥的研究概述[J]. 广东化工, 2017, 44(9): 222-224.
- [11] 袁檬, 张建琦, 付昱萌, 等. 城市污泥堆肥稳定化及其对小白菜生长的影响[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 37-40.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国城镇建设行业标准: 城镇污水处理厂污泥处置农用泥质(CJ/T309-2009)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 连鹏, 李志茹, 范周周, 等. 城市污泥与园林废弃物混合堆肥施用对紫穗槐生长及土壤环境的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 58-66.
- [14] 张行峰. 实用农化分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 112-165.
- [15] 蔡囊. 5种阔叶绿化树种对土壤Cu污染的耐性评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 高婷, 杨萱平, 胡文祥. 土壤样品前处理——微波消解研究[J]. 环境保护前沿, 2017, 7(2): 170-179.
- [18] 刘强, 陈玲, 黄游, 等. 施用污泥堆肥对土壤环境及高羊茅生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 199-203.
- [19] 王艳. 重金属(Cu、Zn、Cd)元素在红壤中的吸附动力学研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [20] 王社平, 程晓波, 刘新安, 等. 施用污泥堆肥对草莓生长及土壤重金属的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4375-4382.
- [21] 王立. 重庆主城区常见园林树种及群落的碳汇能力研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [22] 薛焱, 王迎春, 王同智. 濒危植物长叶红砂适应盐胁迫的生理生化机制研究[J]. 西北植物学报, 2012, 32(1): 136-142.
- [23] 周丽丽. 剩余污泥重金属脱除及资源化利用新工艺[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.
- [24] 李淑芹, 田仲鹤, 金宏鑫, 等. 施用城市污泥堆肥对土壤和大豆器官重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 352-357.
- [25] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004(24): 2568-2573.
- [26] 林义章, 徐磊. 铜污染对高等植物的生理毒害作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2007(1): 201-204.
- [27] 马可婧, 张明泉, 蔡圃. 堆肥污泥重金属在黄土中的淋滤特征[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1557-1562.
- [28] 马双进, 陈启敏, 张永利, 等. 熟污泥改良土壤中Cd的形态分布特征和生物有效性[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(6): 360-368.

(本文责编: 郑立龙)