

余天红, 黎华寿, 贺鸿志, 等. 施用不同预处理猪粪对菜园土壤 pH、胡敏酸含量及 Cu、Zn 活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4):785–791.
YU Tian-hong, LI Hua-shou, HE Hong-zhi, et al. Effects of different swine manures on soil pH, humic acid content, and Cu and Zn activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4):785–791.

施用不同预处理猪粪对菜园土壤 pH、 胡敏酸含量及 Cu、Zn 活性的影响

余天红^{1,2}, 黎华寿^{1,2*}, 贺鸿志^{1,2}, 陈桂葵^{1,2}

(1.华南农业大学农学院, 广州 510642; 2.华南农业大学, 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642)

摘要:通过为期 30 d 的室内模拟试验,研究了风干新鲜猪粪(FM1)、风干堆肥猪粪(FM2)、干式发酵床废弃垫料猪粪(FM3)3 种不同预处理方式的高铜、高锌猪粪施用对菜园土壤 pH、胡敏酸(HA)含量和 Cu、Zn 含量及其活性动态变化的影响。结果发现,不同预处理猪粪的施入使土壤 pH 和 HA、全 Cu、全 Zn 含量均显著提高。第 1、10、20、30 d 的取样测定表明,随着时间的推移,HA 含量逐渐降低,水溶态 Cu、Zn 含量显著降低,而 HA 结合态的 Cu、Zn 含量则显著增加,其中 FM2 处理下 HA-Cu、HA-Zn 含量的增加最为显著。第 30 d 时,3 种处理的 HA-Cu 含量占 Cu 总量的比例分别比第 1 d 增加了 12.67%、21.23%、7.73%,HA-Zn 含量占 Zn 总量的比例分别比第 10 d 增加了 9.68%、21.90%、9.74%,但 HA-Zn 含量占 Zn 总量的比例低于第 1 d,说明 FM2 处理对 Cu 和 Zn 的活性下降影响最大,Cu 易与 HA 结合,HA 对 Cu 的固定能力强于 Zn。

关键词:猪粪;菜园土壤;胡敏酸;重金属;活性

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)04-0785-07 **doi:**10.11654/jaes.2016.04.024

Effects of different swine manures on soil pH, humic acid content, and Cu and Zn activities

YU Tian-hong^{1,2}, LI Hua-shou^{1,2*}, HE Hong-zhi^{1,2}, CHEN Gui-kui^{1,2}

(1.College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2.Key Laboratory of Tropical Agro-environment, Ministry of Agriculture of China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In the present study, three different swine manures containing excessive Cu and Zn, including air-dry fresh swine manure(FM1), air-dry swine manure compost(FM2), and bio-bed swine manure(FM3), were selected to investigate their effects on soil pH, humic acid(HA) content, total Cu and Zn, and Cu and Zn activities in vegetable soil in laboratory incubation for 30 days. Soil pH, HA content and total Cu and Zn content increased significantly after additions of three different manures, compared to the control. However, HA and water soluble Cu and Zn content decreased, but HA-Cu, HA-Zn content increased over time, with the most significant increases in HA-Cu and HA-Zn found in FM2-amendment. Compared to day 1, FM1, FM2, and FM3 treatments respectively increased percentages of HA-Cu by 12.67%, 21.23%, and 7.73% on day 30, enhanced HA-Zn percentages by 9.68%, 21.90%, and 9.74% on day 10. However, HA-Zn in three treatments were lower on day 30 than on the day 1. These results indicate that FM2 is most effective in reducing Cu and Zn activities.

Keywords: swine manure; vegetable soil; humic acid; heavy metal; activity

收稿日期:2015-11-15

基金项目:国家高新技术(863)项目(2013AA102402);国家自然科学基金项目(41271469)

作者简介:余天红(1990—),女,研究生,主要从事污染生态学研究。E-mail:1178194123@qq.com

*通信作者:黎华寿 E-mail:lihuashou@scau.edu.cn

近年来,我国畜禽养殖业迅速发展,集约化养殖过程中,为促进畜禽生长和预防疾病,含 Cu、Zn 等重金属的饲料添加剂大量使用,导致这些重金属在畜禽粪便中残留浓度较高^[1-5]。据统计,北京、江苏等 7 省、市猪粪中的 Cu、Zn 含量普遍较高,最高浓度分别达到了 1591、8710 mg·kg⁻¹^[6]。发酵床养猪作为新兴生态养殖模式,其对环境影响尤其是重金属积累和残留影响受到普遍关注^[7-9]。李亚军等^[7]研究表明,与传统养殖方式相比,发酵床养殖对周边土壤重金属污染较小。重金属的生物有效性不仅与其总量有关,更与其活性形态密切相关^[10]。重金属在土壤中的不同形态分布,直接影响重金属在土壤中的迁移、转化以及对生物的毒性。当猪粪中的重金属作为“外源”污染物进入土壤后,其迁移能力及生物可利用性不仅与其在粪便中的化学形态密切相关,还与土壤及粪便的理化性状密切相关。索超^[11]和熊雄等^[12]的研究均表明,猪粪堆肥过程中形成的腐殖质等稳定的有机质,可以吸附污泥中的重金属,是降低重金属污染风险的经济有效的途径。

目前畜禽粪便中重金属的含量以及施用畜禽粪便后对菜园土壤中重金属积累的影响已有一些研究报道^[13-15],对腐殖质与重金属的作用机理已经有较全面的研究,但不同预处理猪粪施用对土壤中胡敏酸(HA)含量和重金属活性变化以及 HA 对重金属分配特性影响的研究鲜见。HA 结合态重金属含量在该重金属总量中的分配比例可以客观地说明固相腐植酸对重金属的活性效果^[16],而针对高床生态养猪的发酵床废弃垫料进入土壤后对重金属分配与积累的影响及其农用环境安全性评价仍少有研究。鉴于此,本文通过室内模拟试验,比较研究了施用 3 种不同预处理的高铜、高锌猪粪过程中菜园土壤中 HA 含量以及重金属在腐植酸中的分配特性,以期了解施用畜禽粪便后土壤中重金属在土壤中的活性状态、迁移能力、生物有效性,并利用猪粪长时间堆肥过程中形成的复杂有机质与微生物的相互作用及其形成的腐殖质等稳定的有机质来吸附、固定重金属,降低重金属的生物

有效性,为有效降低猪粪便及发酵床废弃物中重金属污染风险提供科学依据,因而对于制定合理的猪粪预处理及其还田模式、维护区域农田环境安全具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样取自华南农业大学生态农场 0~20 cm 的菜园土层,土壤母质为河流冲积物。3 种不同预处理猪粪分别是新鲜猪粪、堆肥、干式发酵床废弃垫料,均取自同一大型养猪场。土壤和各处理猪粪经风干后过 2 mm 筛并混匀,分别用塑料袋密封备用。供试土壤和猪粪的基本理化性质见表 1。

1.2 实验设计

称取土壤 350 g 装于 500 mL 的玻璃瓶中,分别将 3 种不同预处理猪粪与土壤充分混匀,保持水分含量为田间最大持水量的 70%,用 Parafilm 封口膜封口,在 25 ℃ 下进行培养。试验共设 4 个处理:按 90.36 t·hm⁻² 施肥水平(40.0 g·kg⁻¹ 土)分别施用风干新鲜猪粪(FM1)、风干堆肥猪粪(FM2)、风干干式发酵床猪粪(FM3)以及不施任何肥料的对照组(CK)。各处理重复 4 次。试验共培养 30 d,分别在第 0、10、20、30 d 分 4 次取土样,风干磨碎过 100 目筛,保存备用。

1.3 测定方法

土壤 pH 测定用电位法(水土比 2.5:1);土壤胡敏酸采用土壤-腐殖质组分的测定-重铬酸钾氧化法(F-HZ-DZ-TR-0048);土壤重金属总量消煮采用浓硝酸+高氯酸+氢氟酸消煮法^[17];土壤中 Cu、Zn 水溶态和 HA 结合态分级和提取根据腐植酸存在形态和在不同 pH 下的溶解性,采用 H₂O 和 0.1 mol·L⁻¹ Na₄P₂O₇+0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液作为提取剂^[16],并参考 He 等^[18]和 Hsu 等^[19]的连续提取法,滤液中重金属含量采用原子吸收分光光度法测定(KIIM6 型原子吸收分光光度计)。每个处理设 3 个重复,取平均值作为最终结果。为保证试验准确性,同时加入标准样品测定,加

表 1 供试土壤和不同预处理猪粪的基本理化性状

Table 1 Basic properties of soil and swine manures

供试材料	pH	有机质/g·kg ⁻¹	全 N/g·kg ⁻¹	全 P/g·kg ⁻¹	全 K/g·kg ⁻¹	全 Cu/mg·kg ⁻¹	全 Zn/mg·kg ⁻¹
土壤	5.59	23.52	1.34	0.91	4.44	31.41	73.43
新鲜猪粪	7.06	643.31	26.45	24.01	5.41	287.53	985.71
堆肥	8.06	512.27	22.72	36.20	5.38	252.97	897.94
干式发酵床废弃垫料	6.29	232.27	12.30	9.15	2.37	336.46	910.59

标回收率为 92%~102%。具体提取步骤^[17-19]如下:

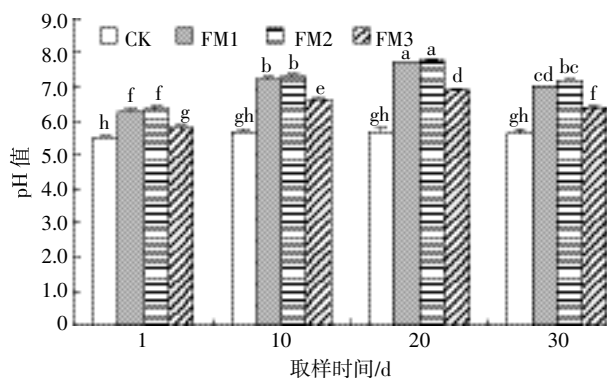
(1)水溶态:准确称取过 0.25 mm 筛的土壤样品 2.000 0 g 于 50 mL 聚乙烯离心管中,加入 30 mL 蒸馏水,25 ℃水浴振荡 24 h,离心 20 min (4000 r·min⁻¹),取上清液,残留物用适量蒸馏水洗涤,再次等速离心 10 min,合并 2 次上清液定容至 25 mL,待测。

(2)HA 结合态:向上一级残留固体中加入 20 mL 0.1 mol·L⁻¹ Na₄P₂O₇+0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液,操作步骤同水溶态,得到重金属的 HA 结合态。

2 结果与分析

2.1 预处理猪粪施用对土壤 pH 和 HA 含量的影响

土壤 pH 是影响土壤中重金属迁移转化的重要因素。图 1 是不同预处理猪粪对土壤 pH 值的影响。施用 3 种不同预处理猪粪后,土壤 pH 均显著增加,其中 FM1 和 FM2 处理下 pH 上升相对较高。随着时间的推移,pH 均先升高后降低。



不同字母代表 Duncan's 多重比较差异性显著 ($P < 0.05$)。下同
Bars with different letters show Duncan's significant differences at $P < 0.05$.
The same as below

图 1 施用不同预处理猪粪对土壤 pH 动态变化的影响

Figure 1 Dynamic effects of different pretreated swine manures on soil pH

土壤中 HA 也是影响土壤中重金属迁移转化的重要因素。图 2 是不同预处理猪粪对土壤中 HA 含量的影响。施用 3 种不同预处理猪粪后,土壤中 HA 含量均显著增加,且不同预处理猪粪间差异显著 ($P < 0.05$),其中 FM1 处理下 HA 含量增加最多,FM2 次之。随着时间的推移,HA 的含量均显著下降。施用 3 种不同预处理猪粪后菜园土壤的 pH 显著升高,主要是因为 3 种不同预处理猪粪均含有丰富的有机质,且显著高于土壤。随着时间的推移,有机质逐渐降解,导致土壤 HA 相应降低。

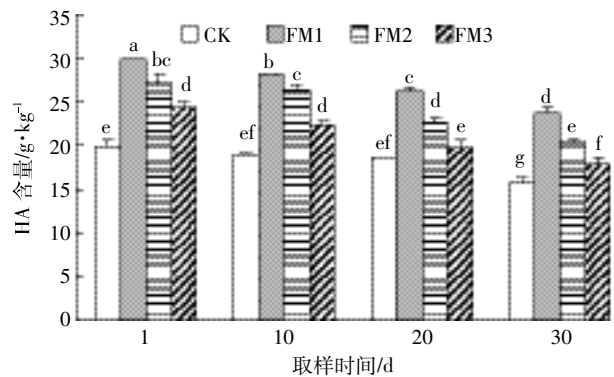


图 2 不同预处理猪粪对土壤 HA 含量的影响

Figure 2 Dynamic effects of different pretreated swine manures on HA in soil

2.2 预处理猪粪施用对土壤 Cu、Zn 含量的影响

图 3 是施用不同预处理猪粪后菜园土壤中 Cu、Zn 的含量。施用 3 种不同预处理猪粪后,土壤 Cu、Zn 均显著增加,不同预处理猪粪间差异不显著 ($P > 0.05$)。FM1、FM2、FM3 处理下,土壤中 Cu 的含量分别增加了 30.26%、20.74%、33.61%,Zn 的含量分别增加了 11.31%、16.81%、22.57%,其中,FM3 处理下土壤中 Cu、Zn 含量增加最为显著。由此可见,施用含过量

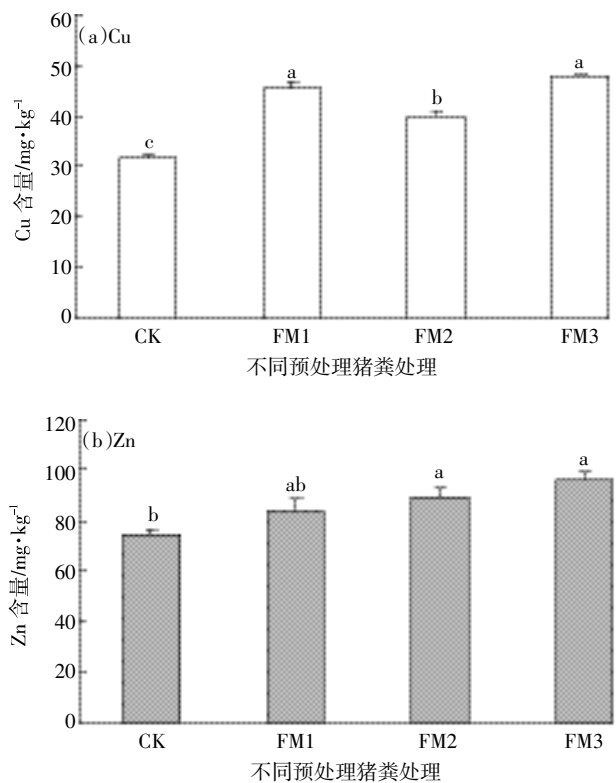


图 3 施用不同预处理猪粪后菜园土壤中 Cu、Zn 的含量

Figure 3 Soil Cu and Zn concentrations in treatments with different pretreated swine manures

Cu、Zn 的不同预处理猪粪后,土壤中 Cu、Zn 的含量会显著增加。

2.3 预处理猪粪施用对土壤 Cu、Zn 活性的影响

图 4 是猪粪施入菜园土壤后土壤中两种不同形态 Cu 浓度的变化。不同预处理猪粪的施入显著增加了菜园土壤中两种不同形态 Cu 的浓度,其中,FM1 处理下土壤中水溶态和 HA 结合态 Cu 的浓度均最高。CK 处理下,两种不同形态 Cu 的浓度随时间变化差异性不显著($P>0.05$)。不同预处理猪粪处理下,土壤水溶态 Cu 的浓度变化均呈先降低后趋于稳定的趋势,但不同预处理猪粪间差异显著($P<0.05$),试验第 30 d,FM1、FM2、FM3 处理下水溶态 Cu 的浓度相对于试验第 1 d 分别减少了 33.09%、8.38%、27.56%。HA 结合态 Cu 的浓度随着时间的推移显著升高,且不同预处理猪粪间差异显著($P<0.05$),试验第 30 d,FM1、FM2、FM3 处理下 HA 结合态 Cu 的浓度相对第 1 d 分别增加了 2.62%、21.38%、7.74%。

图 5 是猪粪施入菜园土壤后土壤中两种不同形态 Zn 浓度的变化。不同预处理猪粪的施入第 1 d,各

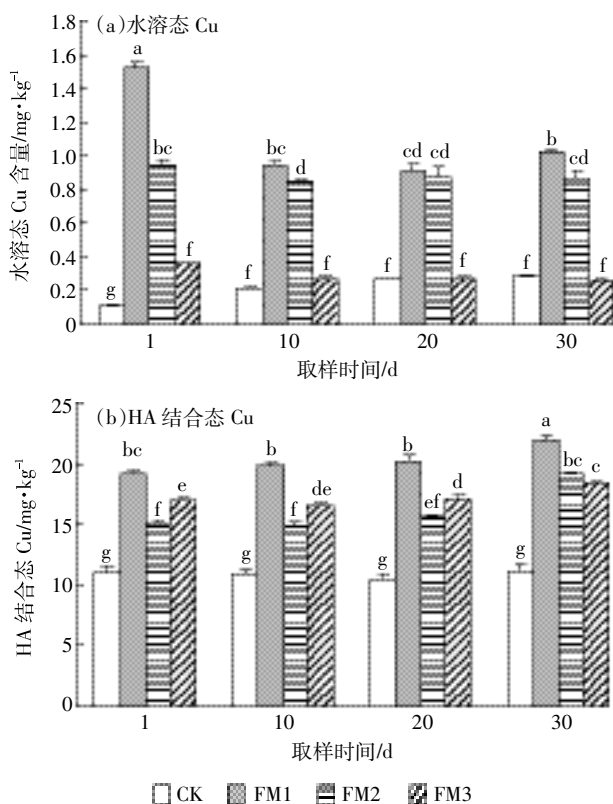


图 4 不同预处理猪粪施入菜园土壤后土壤中水溶态 Cu 和 HA 结合态 Cu 浓度的动态变化

Figure 4 Changes of water soluble Cu and HA-Cu over time in swine manure-amended vegetable soil

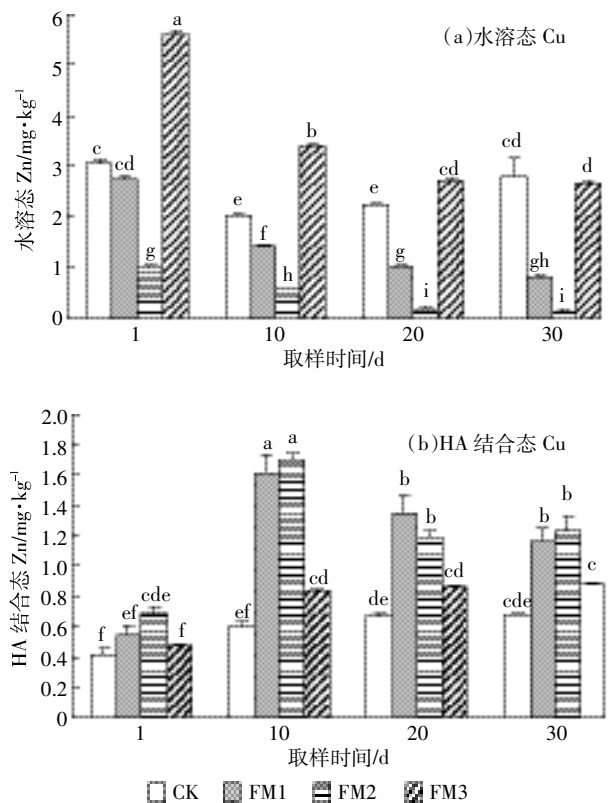


图 5 不同预处理猪粪施入菜园土壤后土壤中水溶态 Zn 和 HA 结合态 Zn 浓度的动态变化

Figure 5 Changes of water soluble Zn and HA-Zn over time in swine manure-amended vegetable soil

处理水溶态 Zn 的浓度差异显著($P<0.05$),其中 FM3 处理下土壤中水溶态 Zn 的浓度增加了 45.54%,而 FM1、FM2 分别减少了 10.22%、67.53%。由图 5a 可见,3 种不同预处理猪粪处理下,水溶态 Zn 的浓度在试验过程中均随时间的变化而逐渐降低,而 CK 处理下水溶态 Zn 的浓度先下降后上升,且不同处理间差异显著($P<0.05$)。第 30 d,CK、FM1、FM2、FM3 处理下水溶态 Zn 的浓度相对于第 1 d 分别减少了 8.29%、70.46%、88.92%、52.58%。由图 5b 可见,不同预处理猪粪施入第 1 d,相对于 CK,FM1、FM2、FM3 处理土壤中 HA 结合态 Zn 分别增加了 24.50%、39.88%、12.68%,其中 FM2 对 HA 结合态 Zn 浓度的增加最为显著。HA 结合态 Zn 的浓度变化呈先显著增加后逐渐下降趋势。第 30 d,CK、FM1、FM2、FM3 处理下 HA 结合态 Zn 的浓度相对于第 1 d 分别增加了 39.39%、52.99%、44.46%、46.02%。

HA 结合态重金属在重金属总量中所占比例可以表明固相腐植酸对重金属活性的影响效果^[17]。图 6

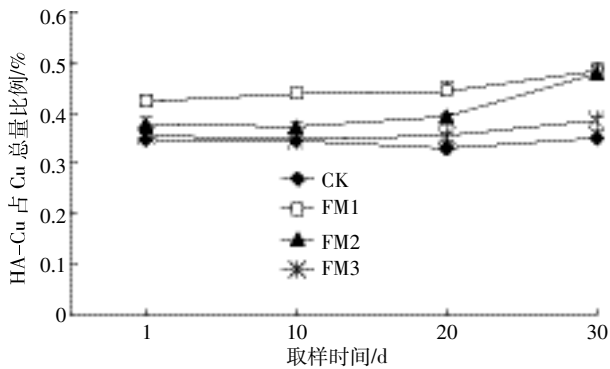


图 6 不同预处理猪粪施用后 HA 结合态 Cu 分配比例变化

Figure 6 Changes in HA-Cu percentages over time in swine manure-amended vegetable soil

是不同预处理猪粪施用后 HA 结合态 Cu 的分配比例变化。CK 和 FM3 处理下,HA-Cu 含量占 Cu 总量的比例随时间变化差异不大($P>0.05$),而 FM1 和 FM2 处理下,HA-Cu 含量占 Cu 总量的比例随着时间的推移显著性增加,第 30 d 与第 1 d 相比,其比例分别增加了 12.67%、21.23%,说明 FM2 对 Cu 的活性影响最大,FM1 次之,FM3 最差。

图 7 显示不同处理下 HA-Zn 占 Zn 总量的比例变化均呈先降低后升高的趋势,且不同处理间差异显著($P<0.05$)。第 30 d 与第 10 d 相比,CK、FM1、FM2、FM3 处理下 HA-Zn 含量占该种重金属总量的比例分别增加了 1.30%、9.68%、21.90%、9.74%,其中 FM2 处理下,HA-Zn 占 Zn 总量的比例变化较显著($P<0.05$),说明 FM2 对 Zn 的活性影响最大。试验第 30 d 时,HA-Zn 含量占该种重金属总量的比例均低于第 1 d,而 HA-Cu 含量占该种重金属总量的比例均高于第 1 d,表明 Cu 易与 HA 结合,HA 对 Cu 的固定能力强

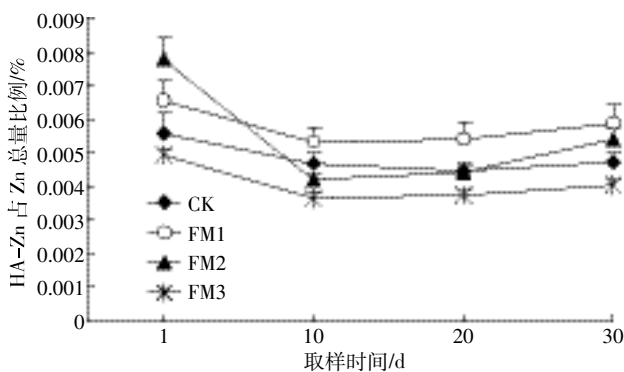


图 7 不同预处理猪粪施用后 HA 结合态 Zn 分配比例变化

Figure 7 Changes in HA-Zn percentages over time in swine manure-amended vegetable soil

于 Zn。

3 讨论

本试验所用的几种不同预处理猪粪中,风干新鲜猪粪和干式发酵床废弃垫料中 Cu、Zn 含量相对较高,堆肥中 Cu、Zn 含量相对较低,但三者 Cu、Zn 含量均超标。施用后,土壤中 Cu、Zn 积累量相对较高,长期使用对植物生长和农产品质量可能存在风险性。堆肥过程中,有机质不断被降解,重金属含量相对浓缩,导致堆肥腐熟样品中具有较高的重金属含量^[20]。发酵床垫料中的重金属主要来源于猪粪尿,随着垫料使用时间的增加,垫料内重金属不断积累^[9]。李买军等^[7]研究表明,在养殖过程中发酵床垫料中 Cu、Zn、Cr、Pb 随时间的推移有明显的累积,且在 0~20 cm 和 20~40 cm 垫料层的累积较为明显,由于发酵床养殖方式将绝大部分的污染物累积在垫料层,与传统养殖方式相比,该方式对环境的影响较小。当土壤重金属含量较高时,可以根据土壤重金属的形态转化规律采取一定措施,如在土壤中施用石灰提高 pH 和施用有机质以增加土壤有机质含量等,使重金属向相对较稳定的形态转化,降低重金属的生物有效性,从而减轻对植物的毒害。

本试验中,施用 3 种不同预处理猪粪初期菜园土壤 pH 显著升高,主要是因为 3 种不同预处理猪粪呈碱性,pH 比土壤高得多,且含有丰富的腐殖质,其中新鲜猪粪和堆肥的 pH、有机质含量相对较高。在整个试验过程中,不同处理下,pH 的变化均呈先升高后降低的趋势,HA 含量均呈下降趋势。在施肥初期,土壤中有有机酸分解,氨氮产生,使得 pH 开始上升。随着时间的变化,有机质逐渐降解,腐殖质含量不断降低,HA 含量也逐渐降低。此外随着时间的推移,在有机质降解过程中有机质官能团会分离出 H^+ ^[21-22],从而导致土壤 pH 逐渐下降。

pH 是改变重金属吸附-解吸-沉淀-溶解平衡的主要因素,通常,重金属的吸附和沉淀作用随 pH 上升而愈加明显,有机质一方面通过增加土壤 pH 值来降低土壤中重金属的有效性,另一方面通过与腐殖质的络合作用来降低重金属有效性^[23-26]。不同预处理猪粪中含有丰富的有机质,施用后会使得菜园土壤中 HA 含量增加和 pH 升高,从而增加了 HA 结合态重金属的含量。在开始阶段,土壤中 pH 升高、有机质含量增加,有利于交换态的 Cu、Zn 向结合态等较稳定的形态转化,当伴随着有机质的分解 pH 下降时,则可能

导致结合态的重金属溶解,使得金属离子被释放出来,从而增加其活性和迁移性^[27]。重金属的固定和溶解是相互可逆的两个过程,最终方向决定于两个过程的强弱对比,而这又可能和土壤的理化性质以及猪粪的差异有关。

本试验中,CK处理下两种不同形态Cu、Zn的浓度变幅基本不大,表明土壤处于一种相对稳定的状态。3种不同预处理猪粪处理下,土壤水溶态Cu、Zn浓度均呈下降趋势,说明随着时间的推移,水溶态的Cu、Zn会向其他比较稳定的形态转化。HA结合态Zn的浓度短期内显著上升,可能是由水溶态Zn转化而来,随后又开始下降,则可能由于HA和Zn亲和力不强,随着时间的进一步延长,HA结合态Zn经络合、沉淀等作用转化为更稳定的铁锰氧化物结合态(铁锰氧化物结合态是重金属被土壤中氧化铁锰或粘粒矿物的专性交换位置吸附或共沉淀而成),其稳定性较强。HA结合态Cu的浓度随时间的变化显著增加,一方面由水溶态Cu转化而来,另一方面与HA对Cu具有较强的亲和力有关。不同腐殖质组分中,主要是羧基、酚羟基起络合作用,且在酸性条件下,羧基的络合起主要作用,而在碱性条件下则是羧基和酚羟基共同作用。在络合物的稳定性方面,HA强于腐植酸,腐殖质-金属络合物稳定性为Cu>Zn,而Zn主要与腐植酸结合^[28-30]。此外,腐殖质对金属的络合强度受pH、腐植酸的性质等因素影响,分子量也可能是影响因素之一。本试验研究结果表明堆肥对土壤中Cu、Zn的活性作用最好,且HA与Cu亲和力大于Zn,Zn比Cu具有更强的潜在迁移性。

4 结论

试验过程中,不同预处理猪粪处理下,土壤pH变化呈先上升后下降的趋势,胡敏酸含量逐渐下降,其中风干堆肥处理下pH上升最显著,风干新鲜猪粪处理下土壤胡敏酸含量增加最显著。此外,干式发酵床废弃垫料的施用对土壤中Cu、Zn积累量影响较显著。

不同预处理猪粪处理下,土壤水溶态Cu浓度均呈先下降后变化不显著的趋势,胡敏酸结合态Cu浓度随着时间的变化显著升高;水溶态Zn浓度均随着时间的变化逐渐下降,胡敏酸结合态Zn的浓度变化呈先增加后下降的趋势;胡敏酸结合态Cu、Zn含量占对应重金属总量的比例随着时间的推移均有所增加。风干堆肥处理对Cu、Zn的活性下降影响最大,胡敏酸对Cu的固定能力强于Zn。

参考文献:

- [1] Zhang F S, Li Y X, Yang M, et al. Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in Northeast China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(8):2658-2668.
- [2] Wang H, Dong Y H, Yang Y Y, et al. Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China[J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2013, 25(12):2435-2442.
- [3] Zhao Y C, Yan Z B, Qin J H, et al. Effects of long-term cattle manure application on soil properties and soil heavy metals in corn seed production in Northwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(12):7586-7595.
- [4] 谢忠雷,朱洪双,李文艳,等.吉林省畜禽粪便自然堆放条件下粪便/土壤体系中Cu、Zn的分布规律[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11):2279-2284.
XIE Zhong-lei, ZHU Hong-shuang, LI Wen-yan, et al. Distribution of Cu and Zn in system of animal manures/excrement-subsoil under natural stacking of animal manures in Jilin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2279-2284.
- [5] 张丽萍,盛婧,孙国锋,等.养猪舍不同发酵床重金属累积特征初探[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3):600-607.
ZHANG Li-ping, SHENG Jing, SUN Guo-feng, et al. Accumulation of heavy metals in different pig bio-beds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):600-607.
- [6] 张树清,张夫道,刘秀梅,等.规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6):822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale live-stock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6):822-829.
- [7] 李买军,马晗,郭海宁,等.发酵床养猪对土壤重金属含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3):520-525.
LI Mai-jun, MA Han, GUO Hai-ning, et al. Effect of bio-bed pig raising on heavy metal contents in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):520-525.
- [8] 纪玉琨,何洪,薛念涛.我国发酵床养猪技术发展现状研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2014(6):135-139.
JI Yu-kun, HE Hong, XUE Nian-tao. Research of development status on deep litter system for pig breeding in China[J]. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2014(6):135-139.
- [9] 张霞,杨杰,李健,等.猪发酵床不同原料垫料重金属元素累积特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):166-171.
ZHANG Xia, YANG Jie, LI Jian, et al. Accumulated characteristics of heavy metals in different pig bio-bed materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):166-171.
- [10] Smith S R. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge[J]. *Environment International*, 2009, 35(1):142-156.
- [11] 索超.猪粪堆肥过程中腐殖质的生成及其对Cu的吸附作用研

- 究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.
- SUO Chao. The formation of humic substances during pig manure composting and the adsorption of copper on humic substances[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009.
- [12] 熊雄, 李艳霞, 韩杰, 等. 堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2137-2142.
- XIONG Xiong, LI Yan-xia, HAN Jie, et al. Formation and transformation of humus in composting and its impacts on bioavailability of toxic metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2137-2142.
- [13] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2):466-480.
- WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(2):466-480.
- [14] 罗春丽. 规模化养殖猪粪中重金属对土壤及蔬菜影响研究[D]. 南昌:江西农业大学, 2014.
- LUO Chun-li. Effect of large scale farms' swine manure-born heavy metals on soil and vegetables[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2014.
- [15] Wu L H, Tan C Y, Liu L, et al. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure[J]. *Geoderma*, 2012, 173(3):224-230.
- [16] 康军. 杨凌城市污泥高效好氧堆肥研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- KANG Jun. High-efficiency aerobic composting of municipal sewage sludge in Yangling[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [17] 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, 2000:318-333.
- LU Ru-kun. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China's Agricultural Science and Technology Press, 2000:318-333.
- [18] He X T, Logan T J, Traina S J. Physical and chemical characteristics of selected U.S. municipal solid waste composts[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(3):543-552.
- [19] Hsu J H, Shang L L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(1):119-127.
- [20] Haroun M, Idris A, Omar S. Analysis of heavy metals during composting of the tannery sludge using physicochemical and spectroscopic techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/2/3):111-119.
- [21] 董占荣, 陈一定, 林咸永, 等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1):35-39.
- DONG Zhan-rong, CHEN Yi-ding, LIN Xian-yong, et al. Investigation on the contents and fractionation of heavy metals in swine manures from intensive livestock farms in the suburb of Hangzhou[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1):35-39.
- [22] Zhu Y M, Berry D F, Martens D C. Copper availability in two soil amended with 11 annual application of copper-enrich hog manure[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1991, 22:769-783.
- [23] Park S, Kim K S, Kang D, et al. Effects of humic acid on heavy metal uptake by herbaceous plants in soils simultaneously contaminated by petroleum hydrocarbons[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(8):2375-2384.
- [24] Tang W W, Zeng G M, Gong J L, et al. Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468(1):1014-1027.
- [25] Amir S, Hafidi M, Merlina G, et al. Sequential extraction of heavy metals during composting of sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(6):801-810.
- [26] Hsieh C F, Hsu K N. An experiment on the organic farming of sweet corn and vegetable soybeans[J]. *Bulletin of Taichung District Agricultural Improvement Station*, 1993, 39:29-39.
- [27] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4):82-87.
- SUN Hua, TAN Chang-yin, HUANG Dao-you, et al. Effects of soil organic matter on the accumulation, availability and chemical speciation of heavy metal[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2011, 34(4):82-87.
- [28] 黄红丽, 罗琳, 王寒, 等. 猪粪堆肥中铜锌与腐殖质组分的结合竞争[J]. 环境工程学报, 2014, 48(9):3978-3982.
- HUANG Hong-li, LUO Lin, WANG Han, et al. Competitive binding of copper and zinc with humus fraction during pig manure composting[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 48(9):3978-3982.
- [29] 聂义宁, 张爱星, 高阳, 等. 密云水库上游铁矿区重金属在胡敏酸中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):266-273.
- NIE Yi-ning, ZHANG Ai-xing, GAO Yang, et al. Distribution of heavy metals in humic acids of iron mine soil in upper area of Miyun Reservoir, Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):266-273.
- [30] Garcia-mina J M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal-humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(12):1960-1972.