

张霞, 李健, 潘孝青, 等. 发酵床熟化垫料重金属含量、形态及农用潜在风险分析[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1212-1217.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.019

发酵床熟化垫料重金属含量、形态及农用潜在风险分析

张霞, 李健, 潘孝青, 邵乐, 秦枫, 顾洪如, 翟频, 杨杰
(江苏省农业科学院畜牧研究所/农业农村部种养结合重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 通过测定4种使用4年的不同原料组成(稻壳-木屑、酒糟-木屑、菌糠-木屑、棉花秸秆-稻壳-木屑)的发酵床熟化垫料的不同重金属(铬、铜、锌、砷、镉、铅)含量及形态组成等指标, 评价发酵床生态养殖熟化垫料的资源化利用价值及潜力。结果表明, 4种发酵床熟化垫料的铬、镉、铅含量均低于有机肥料农业行业标准(NY/T3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)中相应重金属的含量限值, 仅菌糠-木屑熟化垫料中的砷含量略高于标准中砷含量的限值要求。重金属形态分析结果表明, 发酵床熟化垫料中可交换态铬、可交换态铜、可交换态锌、可交换态砷、可交换态镉及可交换态铅的比例均较低, 铬、镉、铅以残渣态与有机结合态为主, 锌、砷以残渣态与铁锰氧化物结合态为主, 铜以有机结合态与铁锰氧化物结合态为主。由研究结果可以看出, 在施用发酵床熟化垫料的土壤中, 锌的 annual 输入总量相对较高, 其次是铜、铬、铅。

关键词: 发酵床; 垫料; 重金属; 潜在风险

中图分类号: S817.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2020)05-1212-06

Content, morphology and potential risk of farm-oriented uses of heavy metals in spent fermented litters of bio-beds

ZHANG Xia, LI Jian, PAN Xiao-qing, SHAO Le, QIN Feng, GU Hong-ru, ZHAI Pin, YANG Jie
(*Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop and Livestock Integration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China*)

Abstract: The resource utilization value and potential of spent fermented litter in bio-beds were evaluated by detecting indices such as contents of different heavy metals (Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb) and morphology composition of four spent fermented litters in bio-beds used for four years with different raw materials (rice hull-wood flour, vinasse-wood flour, mushroom substrate-wood flour, cotton straw-rice hull-wood flour). The results showed that the contents of Cr, Cd and Pb in four spent fermented litters of bio-beds were all lower than the limiting contents of corresponding heavy metals according to the agricultural industry standard for organic fertilizers, only the content of As in the spent mushroom substrate-wood flour litter was slightly higher than the requirements of the standard. The results of heavy metal speciation analysis showed that the proportions of exchangeable Cr, exchangeable Cu, exchangeable Zn, exchangeable As, exchangeable Cd, exchangeable Pb were relatively low, Cr, Cd and Pb were mainly in the forms of residues and organic bounds, Zn and As were mainly composed of residues

and iron-manganese oxides forms, Cu was mostly composed of organic bounds and iron-manganese oxides forms. It can be seen from the results that the annual input of Zn in the soils applying spent fermented litter is relatively high, followed by Cu, Cr, Pb.

Key words: bio-beds; spent fermented litter; heavy metal; potential risks

收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(18)2001]; 国家兔产业技术体系-南京综合试验站项目(CARS-43-G-2); 农业农村部种养结合重点实验室开放课题(201804)

作者简介: 张霞(1976-), 女, 河南新乡人, 博士, 副研究员, 主要从事畜禽粪便综合利用研究。(E-mail) 583765990@qq.com

通讯作者: 杨杰, (E-mail) 598320394@qq.com

发酵床生态养殖模式的建立基于畜禽粪便排放与污染的控制,主要是将锯末、稻壳、菌糠等不同材料混合后接种菌种堆积发酵用作垫料,在厚垫料上养殖畜禽,使畜禽粪污分解达到降低养殖舍内有害气体浓度和减少养殖污染排放的标准^[1-5]。如何处理养殖后的发酵床熟化垫料也是学者关注的内容之一,因为养殖后的发酵床熟化垫料中含有大量有机质、腐殖质与氮、磷、钾等营养元素,并且由于在饲喂过程中添加了含有重金属的饲料添加剂,使得发酵床熟化垫料中含有一定的重金属等^[4-9]。高重金属含量有机肥的长期大量农用,会导致重金属在土壤及植物中积累,从而对生态环境及人类产生危害^[10]。由此可见,垫料中的重金属含量将直接影响其作为有机肥施用时对环境的污染程度以及是否适合长期大量资源化利用。

重金属总量是评价有机肥或堆肥重金属生物有效性和环境效应的重要指标,重金属的生物有效性不仅与其总量相关,也与其化学形态密切相关,不同形态重金属的生物毒性以及在土壤中的移动性均不同^[11-12]。现有的相关研究主要集中在短期、长期发酵床养殖周期内垫料中重金属元素的累积量及其变化趋势方面^[6,13]。国内外对有机肥中重金属形态的研究主要是针对不同粪便在堆肥过程中重金属形态变化进行的,对发酵床垫料中重金属形态的研究仅见对垫料内水溶性重金属含量变化的报道^[14]。

本研究以连续使用4年的不同原料(稻壳-木屑垫料、酒糟-木屑垫料、菌糠-木屑垫料及棉花秸秆-稻壳-木屑垫料)的发酵床熟化垫料为研究对象,按照 Tessier 五步提取法将垫料中的重金属分为5种形态,分别为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态与残渣态^[15],从而评价发酵床熟化垫料中重金属总量及其不同化学形态,为熟化垫料进入土壤后可能存在的重金属移动与生物毒性提供更具体的信息,以期更准确地评价发酵床熟化垫料作为有机肥的生态环境效应,为其合理的资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验样品

本试验所用样品采集自江苏省农业科学院六合动物科学基地发酵床养殖场。采用的4年发酵床熟化垫料分别为稻壳-木屑熟化垫料(质量比为60:

40)、酒糟-木屑熟化垫料(质量比为60:40)、菌糠-木屑熟化垫料(质量比为60:40)及棉花秸秆-稻壳-木屑熟化垫料(质量比为60:20:20)。取样时每栏发酵床内取5个点,垫料厚度约为50 cm,分为上下2层,将每层5点的样品混合后作为该层的混合样品装于自封袋内。将取回的垫料样品置于60℃烘箱中烘至恒温,用小型高速粉碎机粉碎后贮存备用。

1.2 测定方法

采用 Tessier 等^[15]的连续提取法,稍作修改后进行重金属的形态分级。(1)可交换态(含水溶态)重金属含量的测定。称取2 g熟化垫料样品放入50 ml离心管中,再加入20 ml 0.5 mol/L $Mg(NO_3)_2$ (pH值为7.0),在室温下振荡1 h(220 r/min),之后于4 000 r/min离心10 min,过滤,滤液用于测定可交换态重金属(铬、铜、锌、砷、镉、铅)含量。(2)碳酸盐结合态重金属含量的测定。得到提取了可交换态重金属的残渣后,加入20 ml 0.5 mol/L NaOAc(用0.5 mol/L HOAc调节pH值为5.0),在室温、220 r/min条件下振荡5 h,4 000 r/min离心10 min,过滤,滤液用于测定碳酸盐结合态重金属含量。(3)铁锰氧化物结合态重金属含量的测定。得到提取了碳酸盐结合态重金属的残渣后,加入40 ml 0.04 mol/L盐酸羟胺($HONH_2Cl$)溶液(用体积分数为25%的HOAc溶液溶解,pH值为2.0),96℃±3℃水浴提取6 h,间歇搅拌,4 000 r/min离心10 min,过滤,滤液用于测定铁锰氧化物结合态重金属含量。(4)有机结合态重金属含量的测定。得到提取了铁锰氧化物结合态重金属的残渣后,先加入6 ml 0.02 mol/L HNO_3 和10 ml 30% H_2O_2 (用0.447 mol/L HNO_3 调节pH值为2.0, H_2O_2 可分次缓慢加入以防溢出),85℃水浴提取2 h,再加入6 ml 30% H_2O_2 ,85℃水浴提取3 h,间歇搅拌,加热结束后取出离心管,待冷却后加入10 ml 3.2 mol/L NH_4OAc (溶解于体积分数为20%的 HNO_3 中)并加蒸馏水定容至40 ml(再加约8 ml水),220 r/min振荡30 min,4 000 r/min离心10 min,过滤,滤液用于测定有机结合态重金属含量。(5)残渣态重金属含量的测定。用重金属总含量减去前4种形态的重金属含量即为残渣态重金属含量。

总重金属含量的测定:将硝酸、高氯酸按4:1的体积比混合后加入熟化垫料中,于130~210℃消煮,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定总重金

属含量。

1.3 数据分析

用 Excel 进行数据整理,用 SAS 8.1 进行方差分析,多重比较采用最小显著性差异法(LSD),用 Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 熟化垫料中重金属含量

由表 1 可知,不同熟化垫料中 Cr、Cd、Pb 含量均远低于有机肥料农业行业标准(NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)的要求(其中 Cr 含量 \leq 150 mg/kg, Cd 含量 \leq 3 mg/kg, Pb 含量 \leq 50

mg/kg);菌糠-木屑熟化垫料中 As 含量略高于有机肥料农业行业标准(NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)的要求(As 含量 \leq 15 mg/kg),其他 3 种垫料中 As 含量均在标准控制范围内。有机肥农业行业标准(NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)对 Cu、Zn 元素含量没有要求,熟化垫料中其含量均同时在农用污泥中污染物控制标准(GB 4284-2018《农用污泥污染物控制标准》)控制范围内(Zn 含量 \leq 1 500 mg/kg, Cu 含量 \leq 500 mg/kg)。同一元素的总含量在不同熟化垫料之间存在明显差异,稻壳-木屑熟化垫料中各重金属元素含量均低于其他 3 种熟化垫料。

表 1 4 种熟化垫料中重金属含量

Table 1 Contents of heavy metals in four spent fermented litters

熟化垫料	重金属含量 (mg/kg)					
	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb
稻壳-木屑	44.45±1.05c	196.72±10.31b	801.73±58.90b	10.54±1.72b	0.66±0.10b	24.55±2.66b
酒糟-木屑	57.85±4.84b	255.59±7.97a	1 062.38±120.53a	12.89±1.20ab	0.94±0.09ab	25.83±1.43b
菌糠-木屑	79.35±2.74a	296.37±12.67a	988.71±68.39a	16.25±0.64a	1.22±0.11a	38.26±15.53a
棉花秸秆-稻壳-木屑	85.18±12.82a	269.55±1.31a	1 073.67±65.66a	14.74±0.87a	1.39±0.05a	40.05±1.75a

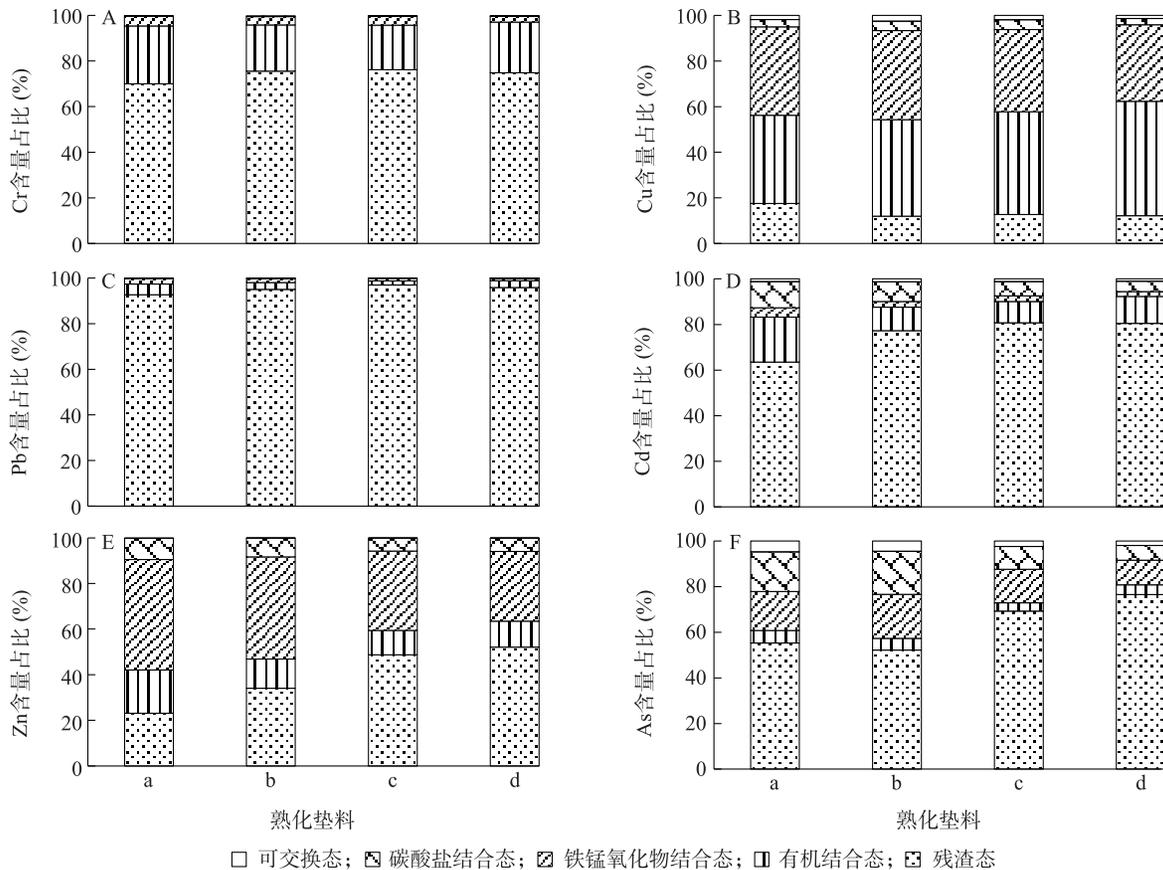
同一列数据后标有不同小写字母表示具有显著差异($P<0.05$)。

2.2 熟化垫料中重金属赋存形态

由图 1A 可以看出,4 种熟化垫料中 Cr 的残渣态含量占比、有机结合态含量占比、铁锰氧化物结合态含量占比、碳酸盐结合态含量占比、可交换态含量占比分别为 70.06%~76.21%、19.53%~25.33%、2.52%~4.33%、0.17%~0.40%、0.08%~0.13%。由此可见,本研究所得熟化垫料中 Cr 以残渣态为主,其次为有机结合态,在不同熟化垫料中二者含量之和占总含量的比例为 95.39%~97.08%。由图 1B 可以看出,4 种熟化垫料中 Cu 的有机结合态含量占比、铁锰氧化物结合态含量占比、残渣态含量占比、碳酸盐结合态含量占比、可交换态含量占比分别为 38.75%~50.22%、33.55%~39.09%、12.00%~17.50%、2.75%~4.29%、1.35%~2.52%。由此可得,4 种熟化垫料中 Cu 以有机结合态与铁锰氧化物结合态为主,2 种形态含量占总含量的比例为 77.49%~83.77%。熟化垫料中有机结合态 Cu 含量的占比最高,有研究者认为可能是因为有机质,尤其是腐殖质对 Cu 具有较高亲和力,从而促进有机态 Cu 的生成^[14-19]。由图 1C 可以看出,4 种熟化垫料中 Pb 的残渣态含量占比、有

机结合态含量占比、铁锰氧化物结合态含量占比、可交换态含量占比、碳酸盐结合态含量占比分别为 92.71%~96.95%、1.76%~4.65%、1.03%~2.28%、0.06%~0.21%、0.02%~0.15%。熟化垫料中 Pb 以残渣态为主,残渣态 Pb 与有机结合态 Pb 的占比为 97.37%~98.83%,显著高于蒋强勇等^[20]及郑国砥等^[21]对猪粪堆肥中各形态 Pb 的研究结果。由图 1D 可以看出,4 种熟化垫料中 Cd 的残渣态含量占比、有机结合态含量占比、碳酸盐结合态含量占比、铁锰氧化物结合态含量占比、可交换态含量占比分别为 63.57%~80.81%、9.29%~19.64%、4.52%~11.51%、2.14%~4.09%、1.02%~1.25%。熟化垫料中 Cd 以残渣态和有机结合态为主,二者之和的平均占比高于 83.21%。由图 1E 可以看出,4 种熟化垫料中 Zn 的铁锰氧化物结合态含量占比、残渣态含量占比、有机结合态含量占比、碳酸盐结合态含量占比、可交换态含量占比分别为 30.58%~48.37%、23.08%~52.09%、10.63%~19.02%、5.63%~9.31%、0.12%~0.22%。熟化垫料中 Zn 以铁锰氧化物结合态与残渣态为主,二者之和平均占比为 71.45%~83.62%,其中

Zn 的铁锰氧化物结合态含量占比最高。吕兑安^[14]认为,堆肥过程中 Zn 形态的变化可能主要是由氧化还原电位与 pH 值的变化引起的,垫料在使用过程中,好氧环境促使可交换态 Zn 向铁锰氧化物结合态 Zn 转化。由图 1F 可以看出,熟化垫料中 As 的残渣态含量占比、铁锰氧化物结合态含量占比、碳酸盐结合态含量占比、有机结合态含量占比、可交换态含量占比依次为 52.21%~76.56%、10.81%~19.36%、6.46%~18.87%、3.65%~5.49%、1.95%~4.84%,可见熟化垫料中 As 以残渣态为主。整体上看,熟化垫料中残渣态 As 的占比要低于何增明等^[19,21]对猪粪堆肥的研究结果。



□ 可交换态; ▨ 碳酸盐结合态; ▩ 铁锰氧化物结合态; ▪ 有机结合态; ▫ 残渣态

A;不同形态 Cr 含量占比;B;不同形态 Cu 含量占比;C;不同形态 Pb 含量占比;D;不同形态 Cd 含量占比;E;不同形态 Zn 含量占比;F;不同形态 As 含量占比。a;稻壳-木屑熟化垫料;b;酒糟-木屑熟化垫料;c;菌糠-木屑熟化垫料;d;棉花秸秆-稻壳-木屑熟化垫料。

图 1 4 种熟化垫料中不同形态重金属的比例

Fig.1 Proportion of different heavy metals in four spent fermented litters

一般认为, Tessier 分级法中的前 3 种形态(可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态)重金属进入环境中容易迁移转化,但是只有可交换态可直接被作物吸收利用^[17-19,22]。现有的有机肥及堆肥标准并未对不同形态重金属的含量及其占比作出规定。由图 1 可见,Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 这 6 类重金属的可交换态含量占比最低。与普通猪粪及鸡粪高温堆肥相比,不同重金属均以可交换态的占比最低,熟化垫料中可直接被作物吸收利用的重金属可交换态占比总体较低^[17-25]。熟化垫料中 Cu、Zn、As、Cd

的碳酸盐结合态平均占比分别为 3.60%、7.25%、13.14%、7.74%,高于郑国砥等^[21]的猪粪堆肥试验结果,而 Cr、Pb 的碳酸盐结合态平均占比分别为 0.31%、0.08%,则低于郑国砥等^[21]的相应试验结果。此外,在本试验中,熟化垫料中 Cu、Zn 的铁锰氧化物结合态平均占比比较高,分别达到 36.83%、39.66%,Cu、Zn、Cr、As 的铁锰氧化物结合态占比高于猪粪堆肥中各重金属铁锰氧化物结合态相应占比,Cd、Pb 的铁锰氧化物结合态占比低于猪粪堆肥中各重金属铁锰氧化物结合态相应占比。而 Cr、Zn

的有机结合态占比要低于猪粪堆肥中 Cr、Zn 的有机结合态相应占比, Cd、Pb 的有机结合态占比高于猪粪堆肥中 Cd、Pb 的有机结合态相应占比^[21-23]。此外, Cr、Cd、Pb 均以残渣态为主要形态, 平均占比分别为 74.18%、75.54%、95.15%, 远远高于猪粪堆肥^[21], 这可能是因为在垫料发酵腐殖化过程中, 腐殖质与重金属形成络合物或螯合物, 使垫料中重金属钝化, 在多年长期的发酵腐殖化过程中, 促使垫料中不同重金属的稳定态(有机结合态与残渣态)含量占比与普通猪粪堆肥相比更高^[21-26]。在未进行堆肥的猪粪中, Cu、Zn 主要以不稳定态(即可交换态)与碳酸盐结合态形式存在, 含量占比分别达 80%、70% 以上^[14, 25]。利用 3~4 年的熟化垫料中 Cu、Zn 稳定态(有机结合态与残渣态)含量平均占比分别为 57%、52%。总体看出, 现有的有机肥及堆肥标准并未对不同形态的重金属含量作出标准化规定, 熟化垫料中 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的可交换态含量占比均最低, 主要以稳定态形式存在, 其中 Cr、As、Cd、Pb 均以残渣态为主, Cu 以有机结合态和铁锰氧化物结合态为主, Zn 则以残渣态与铁锰氧化物结合态为主。

2.3 施用熟化垫料对土壤重金属累积的潜在影响

在稻-麦轮作水田, 按每季作物施肥量(以氮计)为 300 kg/hm², 两季作物施肥量(以氮计)共为 600 kg/hm², 熟化垫料含氮量为 20 g/kg 计, 有机肥以 50% 等氮量替代化肥计算, 得到熟化垫料的年施用量约 15 t/hm²(以干物质计)。根据熟化垫料施用量, 计算通过施用熟化垫料带入土壤的重金属年输入量, 同时根据 20 cm 耕层土壤质量(2 500 t/hm²) 计算重金属总量、交换态与碳酸盐结合态重金属的

年增加量。由表 2 可知, 熟化垫料不同重金属的年总输入量排序为 Zn>Cu>Cr>Pb>As>Cd, 不同重金属的可交换态年输入量排序为 Cu>Zn>As>Cr>Pb>Cd, 土壤中不同重金属的年总增加量排序为 Zn>Cu>Cr>Pb>As>Cd; 土壤中交换态 Cu 含量的年度增加值最高(0.029 0 mg/kg), 其次是 Zn(0.008 2 mg/kg) 与 As(0.002 7 mg/kg), 交换态 Cr、Cd、Pb 含量的年度增加值较低(0.000 1~0.000 4 mg/kg)。出现上述现象主要是因为供试熟化垫料中 Zn、Cu 的总含量相对较高, 从而引起重金属年总输入量与土壤中年总增加量相对较高。尽管熟化垫料 Zn 的年总输入量远高于 Cu, 但是由于熟化垫料中 Cu 的交换态含量占总含量的比例相对较高, 使得交换态 Cu 的年输入量与土壤中年增加量高于 Zn。重金属在土壤中的迁移、转化以及对生物的有效性均与其在土壤中的形态直接相关, 只有溶出的离子态的重金属才能被植物直接吸收与积累^[27-30], 因此施用熟化垫料时 Cu 的潜在风险可能比 Zn 高。此外, 江苏省北部的石灰性及中性水稻土、江苏省北部的沭田区水稻土及南通滨海地区的水稻土普遍存在有效态锌缺乏的现象^[31], 苏南地区如常熟的土壤有效锌含量处于中等水平^[31-32]。虽然长期施用化肥可能会引起土壤 pH 值降低, 引起碳酸盐结合态 Zn 的释放^[21, 30, 32-33], 但是在熟化垫料碳酸盐结合态 Zn 的年输入量(1 050.94 g/hm²) 与年增加量(0.420 4 mg/kg) 均较高的情况下, 施用有机肥不仅能够增加土壤有机质含量与腐殖质含量, 提高土壤肥力, 更能改善土壤酸化情况^[16], 在长期施用熟化垫料的土壤中, 由于土壤 pH 值的降低, 碳酸盐结合态 Zn 转化为可交换态 Zn 的风险相对较小。

表 2 施用熟化垫料对土壤中重金属年输入量的影响

Table 2 Effects of spent fermented litter on annual inputs of heavy metals in the soil

重金属	年输入量(g/hm ²)			年增加量(mg/kg)		
	可交换态	碳酸盐结合态	总量	可交换态	碳酸盐结合态	总量
铬	1.07	3.21	1 000.58	0.000 4	0.001 3	0.400 2
铜	72.52	138.80	3 818.36	0.029 0	0.055 5	1.527 3
锌	20.43	1 050.94	14 724.34	0.008 2	0.420 4	5.889 7
砷	6.64	25.58	204.08	0.002 7	0.010 2	0.081 6
镉	0.18	1.11	15.78	0.000 1	0.000 4	0.006 3
铅	0.51	0.35	482.59	0.000 2	0.000 1	0.193 0

4 种熟化垫料中的重金属含量采用平均值。

3 结论

在本研究中,4种熟化垫料中的铬、铜、锌、砷、镉、铅等6种元素均是可交换态的含量占比最低,熟化垫料中的总铬含量、总镉含量、总铅含量均在标准规定范围内,并且以残渣态与有机结合态为主,其不同熟化垫料中的平均占比分别达96.02%、88.30%、98.24%,随着熟化垫料进入土壤,对作物的危害相对较小。菌糠-木屑熟化垫料中砷含量略高于有机肥农业行业要求(砷含量 ≤ 15 mg/kg),其他3个熟化垫料中砷含量均在标准控制范围内。施用熟化垫料的土壤中锌的年总输入量较高,但是因为熟化垫料中的可交换态铜占比较高,施用熟化垫料时铜的潜在风险可能高于锌。

参考文献:

- [1] TAM N F Y, VRIJMOED L L P. Effects of the inoculum size of commercial bacterial product and the age of sawdust bedding on pig waste decomposition in a pig-on-litter system[J]. *Waste Management*, 1993, 11(2): 107-115.
- [2] 毕小艳,张彬. 发酵床生态养殖模式在养猪生产中的应用研究进展[J]. *中国动物保健*, 2010(9): 50-51.
- [3] 王志强,沈晓昆. 日本的发酵床养猪技术[J]. *世界农业*, 2004(2): 50-51.
- [4] 胡海燕,于勇,张玉静,等. 发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 252-258.
- [5] 盛清凯,武英,赵红波,等. 发酵床养殖垫料组分的变化规律[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(5): 1703-1705.
- [6] 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.
- [7] 张霞,李晟,顾洪如,等. 不同猪发酵床垫料内腐殖质变化特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2215-2221.
- [8] YANG X P, LI Q, TANG Z, et al. Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China[J]. *Waste Management*, 2017, 64: 333-339.
- [9] QIAN M R, WU H Z, WANG J M, et al. Occurrence of trace elements and antibiotics in manure-based fertilizers from the Zhejiang Province of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 174-181.
- [10] JIANG Y X, CHAO S H, LIU J W, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 1658-1668.
- [11] 戴树桂. 环境化学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 281.
- [12] 滕葳,柳琪,李倩,等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 15, 29-197.
- [13] 张霞,顾洪如,杨杰,等. 猪发酵床垫料中氮、磷、重金属元素含量[J]. *江苏农业学报*, 2011, 27(6): 1414-1415.
- [14] 吕兑安. 猪粪堆肥过程中重金属形态变化特征及钝化技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2014.
- [15] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [16] 林森. 土壤-水稻体系施用有机肥的主要生态效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [17] 栾润宇,高珊,徐应明,等. 不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 469-478.
- [18] 黄健,肖建中,唐世刚,等. 添加蒙脱石对猪粪好氧堆肥腐熟度和重金属钝化的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(1): 141-148.
- [19] 何增明,刘强,谢桂先,等. 好氧高温猪粪堆肥中重金属砷、铜、锌的形态变化及钝化剂的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2659-2665.
- [20] 蒋强勇,刘强,荣湘民,等. 不同钝化剂对猪粪堆肥处理重金属形态转化的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(6): 708-712.
- [21] 郑国砥,陈同斌,高定,等. 好氧高温堆肥处理对猪粪中重金属形态的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(1): 6-9.
- [22] 王玉军,窦森,李业东,等. 鸡粪堆肥处理对重金属形态的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 913-917.
- [23] WU S H, SHEN Z Q, YANG C P, et al. Effects of C/N ratio and bulking agent on speciation of Zn and Cu and enzymatic activity during pig manure composting[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119: 429-436.
- [24] 翟伟伟. 畜禽废弃物堆肥过程中砷的形态转化规律及其微生物驱动机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [25] 温沁雪,曹永森,陈志强. 猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 4405-4411.
- [26] BARKER A V, BRYSON G M. Bioremediation of heavy metals and organic toxicants by composting[J]. *The Scientific World Journal*, 2002(2): 407-420.
- [27] 陈红卫,张重路,王一山,等. 生物质炭对重金属污染土壤中汞的赋存形态及运移分配的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(8): 312-315.
- [28] 彭云霄,彭伟东,余江,等. 大田与盆栽条件下重金属镉赋存形态差异[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(6): 1368-1373.
- [29] 瞿飞,范成五,刘桂华,等. 不同钝化剂对贵州典型黄壤重金属有效态的影响[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(9): 1967-1972.
- [30] 孙颖,桂长华. 污泥堆肥化对重金属生物可利用性的影响[J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(3): 110-114.
- [31] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. *中国农业科学*, 1994, 27(1): 30-37.
- [32] 王子腾,耿元波,梁涛. 中国农田土壤的有效锌含量及影响因素分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(6): 55-63.
- [33] MENG J, WANG L, ZHONG L B, et al. Contrasting effects of composting and pyrolysis on bioavailability and speciation of Cu and Zn in pig manure[J]. *Chemosphere*, 2017, 180: 93-99.

(责任编辑:徐艳)