

不同畜禽粪便好氧堆肥过程中重金属 Pb Cd Cu Zn 的变化特征及其影响因素分析

鲍艳宇¹, 娄翼来³, 颜丽², 关连珠²

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 教育部环境污染过程与基准重点实验室/天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 沈阳农业大学农业资源与环境学院, 沈阳 110161; 3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 畜禽粪便中的重金属含量及其生物有效性是限制其农业利用的重要因素。采用好气模拟培养方法对 6 种畜禽粪便好氧堆肥过程中 Pb、Cd、Cu、Zn 的总量以及生物有效性动态变化进行研究探讨, 并分析了影响重金属生物有效性的因素。结果表明, 根据现有的国际以及我国农用污泥农用标准, 某些粪便中存在着 Cd、Cu、Zn 含量超标, 由于饲料受重金属污染的不同, 造成不同畜禽粪便中不同的重金属含量差异性较大。堆肥过程中, 由于挥发性物质的挥发作用, 4 种重金属含量均呈现增加现象, 尤其是在 0~14 d 的堆肥中增加量最高; 而生物有效性重金属占其全量重金属的比例呈现先增加而后下降的趋势, 除仔猪粪外, 堆肥均能降低重金属生物有效性部分的比例, 这有利于降低其农业利用的风险。温度和水溶性碳对堆肥过程中 4 种重金属的生物有效性部分重金属相对含量的变化有着显著的影响。

关键词: 畜禽粪便; 堆肥; 重金属; 生物有效性

中图分类号: S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)09-1820-07

Dynamic Change Characteristic of Heavy Metals Pb, Cd, Cu and Zn During Aerobic Composting of Different Manure and the Analysis of Effect Factors

BAO Yan-yu¹, LOU Yi-lai³, YAN Li², GUAN Lian-zhu²

(1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Ministry of Education)/Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. College of Agricultural Resources and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: High total and bioavailable content of heavy metals in animal manures have become a major limiting factor for their land application in agriculture. Composting is the important disposal means to manure, so the change of heavy metals during composting should be further investigated. In the study, the dynamic change of total Pb, Cd, Cu, Zn contents and their relative bioavailable contents were investigated during aerobic composting of six manures including two chicken manures, three pig manures and a dairy manure. And the factors to affect the bioavailability of heavy metals were also analyzed. The results showed that Cd, Cu, Zn contents exceeded existing international standards and China's agricultural sewage sludge in some animal manures. Total heavy metals contents increased during manure composting because of the volatilization of volatile substances of manure substance, especially during 0~14 d composting process due to higher substance volatilization than other composting phases. The relative bioavailable contents of four heavy metals firstly increased and then decreased during composting. In the end of composting, heavy metals bioavailability decreased expect for young pig manure, which will reduce the risk of its agricultural use. Through the correlation analysis, temperature and water-soluble carbon can affect the change of heavy metals bioavailability during manure composting.

Keywords: animal manure; composting; heavy metals; bioavailability

收稿日期: 2010-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(40901259, 20977053); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金(707011)

作者简介: 鲍艳宇(1979—), 女, 副教授, 主要从事污染生态学、农业环境保护等方面的研究。E-mail: baoyanyu77@163.com

通讯作者: 关连珠

堆肥处理是畜禽粪便无害化和资源化的有效途径,其目的是使堆肥原料中不稳定的有机物通过高温好氧发酵而逐步降解为性质稳定、对作物无害并可改良土壤的堆肥产品。然而,畜禽粪便中除了含有丰富的有机质、氮、磷等养分外,还含有大量的重金属类物质,如 Pb、Cd、Cu、Zn 等,它们大量残留在粪便中,其主要来源于畜禽饲料中添加的 Cu、Zn、Fe、Co 等微量元素。饲喂畜禽的饲料中添加含有各种重金属的饲料添加剂,导致畜禽粪便中含有各种重金属,长期大量农用会在土壤及植物中积累,从而对环境和人类产生危害。目前对污泥等固体废弃物堆肥过程中的重金属污染状况比较关注^[1-5],但对畜禽粪便中重金属的污染还未引起广泛的关注,尤其是对生物有效性部分的重金属。因为研究普遍认为堆肥过程中重金属总量不能准确地反映重金属的潜在环境影响,而重金属的生态环境效应与其生物有效性密切相关,所以很有必要研究畜禽粪便堆肥过程中重金属总量以及生物有效性部分的动态变化,为其控制和降低有效性提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试物料

堆肥原料采用新鲜的鸡粪、猪粪和牛粪,均来源于沈阳市附近大型集约化畜禽养殖场,上述畜禽粪便的基本性质见表 1 所示。

表 1 供试畜禽粪便的基本性质

Table 1 Some basic properties of different manure

	含水率/%	pH 值	全碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	C/N 比	全磷/g·kg ⁻¹
肉鸡粪	67.3	6.02	325.4	34.01	9.56	7.55
蛋鸡粪	66.5	7.05	313.1	34.53	9.07	9.36
肉猪粪	72.8	6.51	410.1	26.72	15.34	15.42
母猪粪	70.6	6.50	388.2	28.63	13.56	17.46
仔猪粪	79.3	7.04	338.7	35.02	9.67	22.06
奶牛粪	76.6	6.53	418.3	16.03	26.10	5.00

1.2 试验设计

畜禽粪便堆肥处理采用好气模拟培养,阶段性采样后进行分析的方法。具体设计为:将采集的新鲜畜禽粪便在阴凉通风处放置 3~5 d,使其含水率低于 60%,堆肥前测定每种畜禽粪便的含水率,添加适量的蒸馏水使畜禽粪便含水率至 50%~60%,不添加任何其他材料来调节堆料的 C/N 比,然后将每种纯畜禽粪便(4 kg)分别放入 6 个体积为 3 000 cm³(长、宽、高 15 cm×10 cm×20 cm)的塑料编织袋中,每种粪便设 2

个重复,然后在培养箱中共进行 70 d 的堆肥。

最初培养箱的温度设为环境温度(10 ℃),随着堆肥的进行,样品的温度上升,因此根据样品温度调节培养箱的温度,使其保持低于样品温度 1~2 ℃,避免畜禽粪便热量损失和防止人为升温的影响^[6-7],当样品温度超过 60 ℃,通过降低培养箱温度来控制样品温度;每天打开培养箱进行通风供氧 15 min,每隔 1 d 进行翻堆供氧并添加蒸馏水调节样品含水量不低于 60%。每天定时两次测定堆肥的温度,且分别在堆肥的 0、7、14、28、42、56、70 d 取样测定 pH 值和 Pb、Cd、Cu、Zn 的总含量以及 DTPA 浸提态重金属含量。

1.3 测定项目与方法

铅(Pb)、镉(Cd)、铜(Cu)、锌(Zn)总浓度的测定采用 HNO₃-HClO₄ 消煮,原子吸收分光光度计测定的方法;DTPA 浸提态重金属的测定采用 0.005 mol·L⁻¹ DTPA 浸提,液/样为 5:1,原子吸收分光光度计测定的方法。pH 值的测定:取鲜样按 10/1 液样比浸提,振荡 2 h,用 pH 计法测定。

各种有机物质的测定:全碳采用丘琳法;水溶性碳采用 30:1 水土比混合,连续振荡 5 h,然后测定滤液中含碳量,即为水溶性碳含量;微生物量碳采用氯仿熏蒸培养法;易氧化有机碳采用袁可能建议的方法^[8];腐植酸碳(包括胡敏酸碳和富里酸碳)采用科诺诺娃法^[9]。

2 结果与分析

2.1 Pb、Cd、Cu、Zn 含量在堆肥过程中的动态变化

如图 1 所示,4 种重金属在畜禽粪便中的含量差异较大,其中:Zn 的浓度最高,在 97.05~1 966 mg·kg⁻¹ 之间;其次为 Cu,浓度在 23.35~599.9 mg·kg⁻¹ 之间;再次是 Cd,浓度在 0.76~107.4 mg·kg⁻¹ 之间;Pb 的含量最低,在 2.97~7.40 mg·kg⁻¹ 之间。

随着堆肥时间的延长,6 种畜禽粪便中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的含量均在不断增加(图 1)。事实上,堆肥过程中重金属含量的增加是必然趋势,这是由于重金属是灰分中的重要组成部分,是不可降解的,其绝对含量不随着堆肥的进行而变化。但是随着含 C、N、S 等有机物的降解损失,造成堆肥质量变小而引起重金属在堆料中浓缩,从而致使重金属含量呈增加趋势,表现为“相对浓缩效应”,这与其他物质(如污泥等)的堆肥结果相类似^[2-4]。

堆肥在不同阶段其重金属的增加量是不同的,如表 2 所示。4 种重金属浓度的增加主要是在堆肥的 0~14 d 内,其中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的增加范围分别为

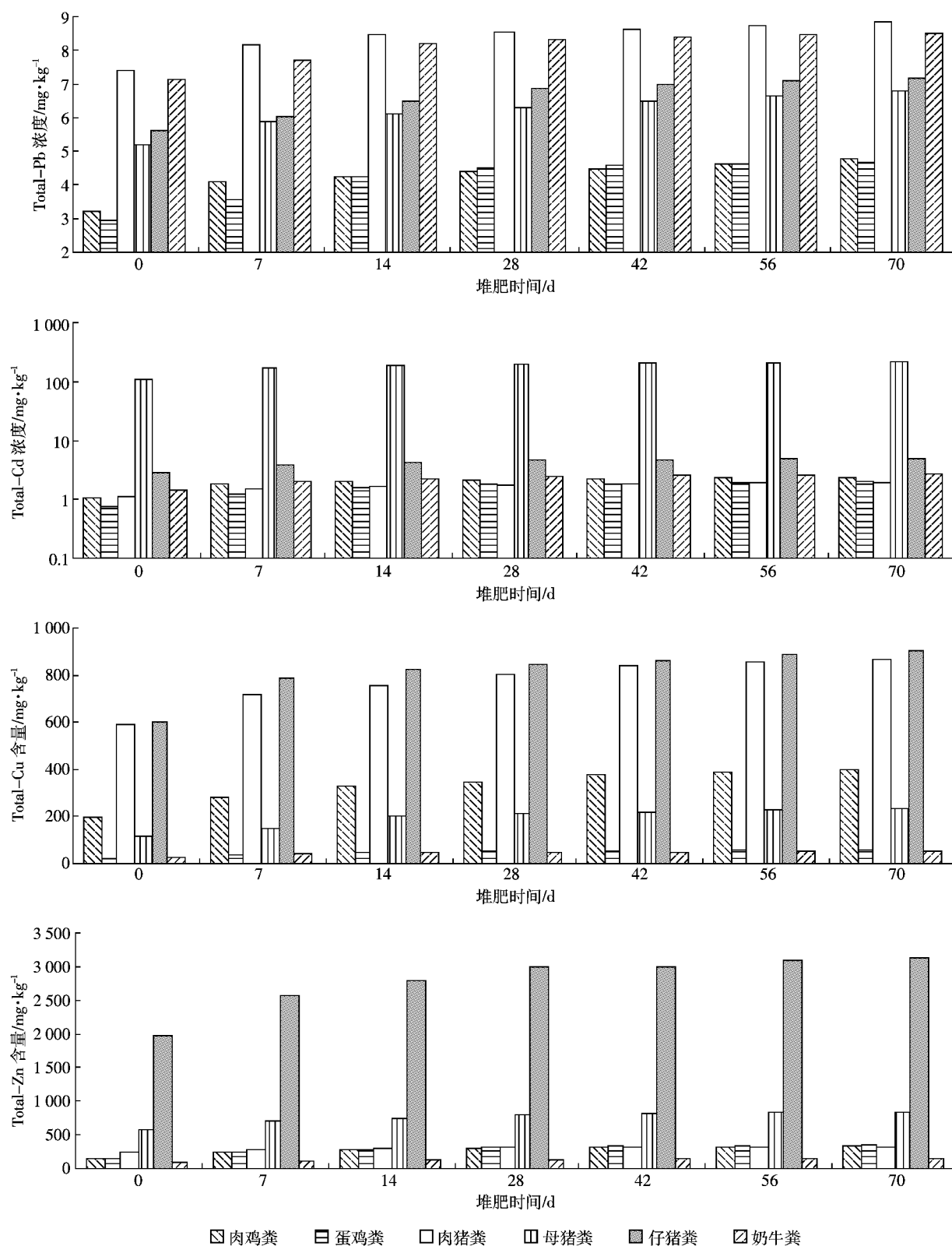


图 1 几种畜禽粪便堆肥过程中 Pb、Cd、Cu、Zn 总浓度的变化

Figure 1 The change of concentration of Pb, Cd, Cu, Zn during different manure composting

0.870~1.290 mg·kg⁻¹、0.57~76.13 mg·kg⁻¹、18.36~221.9 mg·kg⁻¹、30.96~820.7 mg·kg⁻¹;而对于每种重金属和粪

便而言,在 14~70 d 堆肥过程中重金属的增加量显著低于 0~14 d,这是由于 0~14 d 的高温造成此阶段干

表 2 不同畜禽粪便在不同堆肥时期重金属的增加量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 The increase quantity of total Pb, Cd, Cu, Zn in different composting time for different manure ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

样品	Pb		Cd		Cu		Zn	
	0~14 d	14~70 d	0~14 d	14~70 d	0~14 d	14~70 d	0~14 d	14~70 d
肉鸡粪	1.050	0.520	0.950	0.350	133.1	56.26	117.1	53.93
蛋鸡粪	1.290	0.390	0.810	0.420	23.22	12.20	127.6	60.95
肉猪粪	1.070	0.360	0.570	0.250	165.2	101.3	62.89	15.56
母猪粪	0.930	0.670	76.13	29.70	84.61	25.19	171.5	96.55
仔猪粪	0.870	0.700	1.390	0.670	221.9	65.63	820.7	312.0
奶牛粪	1.060	0.320	0.810	0.460	18.36	6.460	30.96	16.22

物质损失量大, 因此 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的增加量在此时期最大, 在随后的堆肥过程中(14~70 d)温度降低趋于平稳, 物料趋于稳定, 干物质的损失量较小, 因此重金属的增加量较小。

2.2 DTPA 浸提态 Pb、Cd、Cu 和 Zn 相对含量在堆肥过程中的动态变化

我们计算了 DTPA 浸提态重金属占其总浓度的比例, 结果如图 2 所示: DTPA 浸提态 Pb 占其总量的 35.90%~50.84%, Cd 占其总量的 17.50%~66.41%, Cu 占其总量的 24.24%~50.09%, Zn 占其总量的 34.16%~

50.95%。结果表明, 尽管每种重金属总量以及 DTPA 浸提态含量差异性较大, 但 DTPA 浸提态占总量的比例差异性并不大。

堆肥后, DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 浓度增加, 这是由于重金属总浓度增加引起的。为消除 DTPA 浸提态重金属浓度随总量增加而增加的影响(如图 2 所示), 本研究利用有效态/总量的比值获得 DTPA 浸提态重金属的相对含量(%), 进而探讨 DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 随堆肥时间的变化。可知, DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 的相对含量均呈现先增加后下降的趋势。

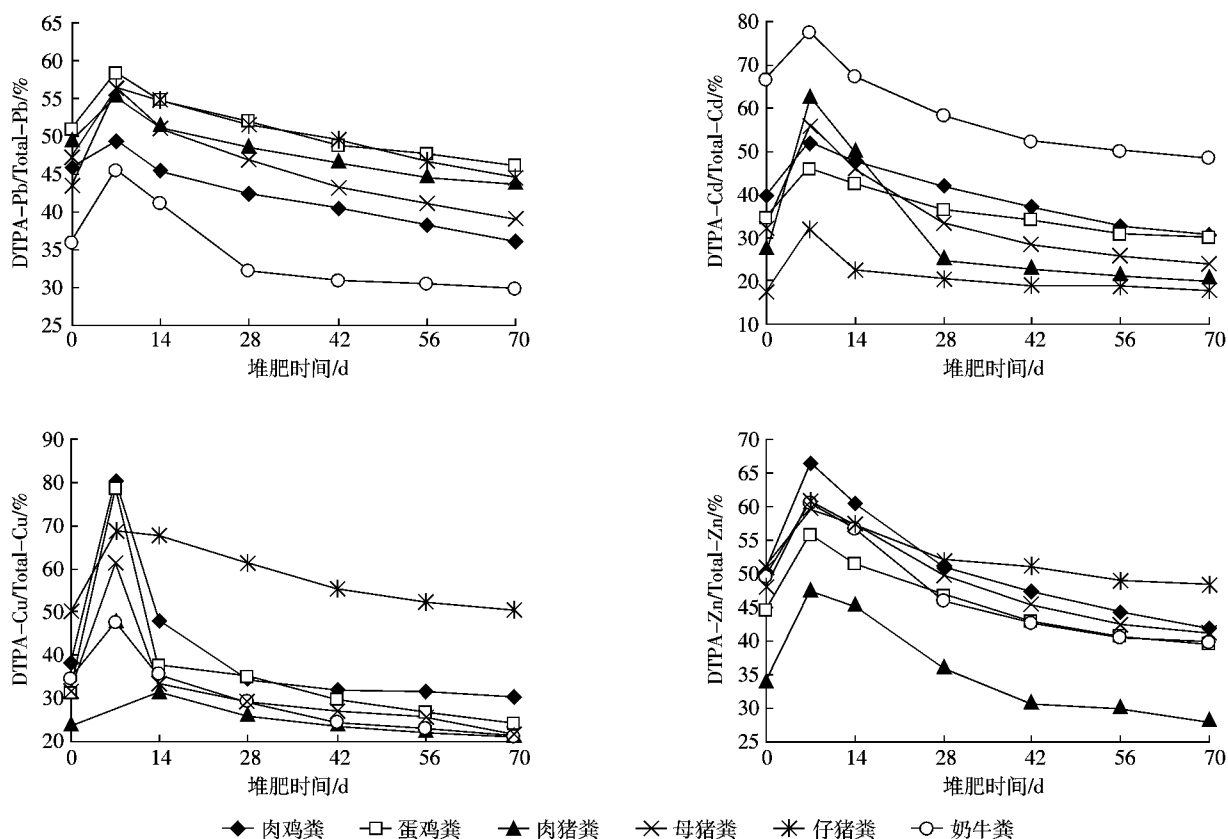


图 2 几种畜禽粪便堆肥过程中 DTPA 浸提 Pb、Cd、Cu 和 Zn 相对含量的变化

Figure 2 The change of relative contents of DTPA extracted Pb, Cd, Cu, Zn during different manure composting

2.3 堆肥过程中温度、pH 值以及不同类型有机物对重金属相对含量变化的影响

温度和 pH 值的变化是堆肥基本性质的体现,通过相关性分析发现,温度对 4 种重金属的 DTPA 浸提态相对含量的变化有着极显著的影响($P<0.01$),而 pH 值仅对 DTPA 浸提的 Cd 和 Zn 相对含量的变化有极显著影响($P<0.01$)。

堆肥是一个腐殖化的过程,有机质在微生物的作用下进行矿化分解,同时合成新的更稳定的有机物。在这个过程中,不同类型的有机物与重金属之间发生相互作用,从而改变了重金属的有效性。因此我们探讨了不同的有机物包括全碳、水溶性碳、微生物量碳、易氧化有机碳、腐植酸碳、胡敏酸碳、富里酸碳对重金属 DTPA 浸提态相对含量的影响。如表 3 所示,水溶性碳对 4 种重金属 DTPA 浸提态相对含量变化的影响均达到显著正相关水平($P<0.05$),其相关系数分别为 0.452**、0.403*、0.333*、0.636**,尤其是水溶性碳对 Pb 和 Cu 的影响达到了极显著水平($P<0.01$)。微生物量碳对 Cd 和 Zn 的 DTPA 浸提态相对含量变化的影响达到了极显著正相关水平($P<0.01$),但并未影响其他 2 种重金属 DTPA 浸提态相对含量。易氧化有机碳仅仅能够影响 Pb 的 DTPA 浸提态相对含量变化($P<0.01$)。腐植酸碳和胡敏酸对 Pb、Cu 和 Zn 的 DTPA 浸提态相对含量变化的影响达到了极显著负相关水平($P<0.01$),但对 Cd 的 DTPA 浸提态相对含量变化的影响未达到显著水平。

3 讨论

对于同一种重金属而言,不同畜禽粪便中含量差异性较大(如图 1 所示),这可能是由于添加的畜禽饲料中含有不同剂量的重金属而引起的。目前我国对畜禽粪便堆肥的重金属无害化标准采用的是污泥施用无害化标准,规定 Pb、Cd、Cu、Zn 总含量的最大极限值分别为 1 000、20、500、1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据我们在 6 种畜禽粪便中对这 4 种重金属的检测发现,母猪粪

中的 Cd($107.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、肉猪粪($589.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和仔猪粪($599.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)中的 Cu、仔猪粪中的 Zn($1\ 966\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量存在严重超标现象,饲料中的高含量重金属污染可能是其主要原因。例如,近年湖北省及某些省市饲料监测站对饲料级硫酸锌产品中含 Cd 量进行检测,结果显示 Cd 含量达到 1%以上,甚至高达 3.67%,由此导致添加剂预混料中 Cd 含量严重超标^[1]。目前各饲料厂和养殖场均普遍采用高 Cu、高 Zn 等微量元素添加剂,这是由于高 Cu、高 Zn 日粮对动物,尤其是猪确实有显著的促生长和防止腹泻等效果,被广泛应用于生产中。养殖者为了追求更大的经济利益,往往加入更高量的 Cu 和 Zn,从而使其直接大量残存在畜禽粪便中^[1]。考虑到 Cu、Zn 是作物生长的重要微量元素,且非严格控制指标,因此只要合理的施用并不会给环境带来大的影响。而 Cd 不同,因其毒性较大,母猪粪中高达 $107.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 会给生态环境带来较为严重的影响,这样的畜禽粪便需要经过处理后才能进行施用。

畜禽粪便好氧堆肥中由于干物质的挥发损失造成重金属的积累是必然的,重要的是如何控制堆肥原料中的重金属含量。否则长期施用这种肥料会在土壤中发生某些重金属积累的潜在环境风险^[10]。通过表 2 的分析可知,尽管堆肥过程中重金属含量的增加是必然趋势,但是如果注意降低高温阶段干物质的损失量,将有利于减轻堆肥中重金属的增加量。

很多研究表明,重金属的有效态含量与其进入植物的量成正比^[10],而 DTPA 浸提的重金属含量与其植物有效性有很好的相关性。DTPA 浸提的重金属所反映浓度更接近植物所吸收和利用的浓度,可靠性更高^[12-13],它已被广泛应用于评价重金属的生物有效性^[13]。因此研究畜禽粪便堆肥处理过程中 DTPA 浸提的有效态重金属的含量变化将有重要的意义。据报道,当土壤中有效态 Cu 和 Zn 分别达到 $100\sim 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时会造成土壤 Cu、Zn 污染^[14]。本研究原料中肉猪粪和仔猪粪的有效态 Cu 含量分别为 142.8

表 3 堆肥过程中不同因素对重金属总浓度以及 DTPA 浸提态相对含量的影响

Table 3 Effect of various conditions on total and DTPA extracted Pb, Cd, Cu, Zn during different manure composting

相关系数	温度	pH 值	全碳	水溶性碳	微生物量碳	易氧化有机碳	腐植酸碳	胡敏酸碳	富里酸碳
DTPA-Pb/Total-Pb/%	0.409**	0.020	0.040	0.452**	0.225	0.497**	-0.675**	-0.788**	-0.459**
DTPA-Cd/Total-Cd/%	0.458**	0.425**	0.128	0.403*	0.549**	0.221	0.113	0.168	0.200
DTPA-Cu/Total-Cu/%	0.524**	0.230	-0.130	0.333*	0.161	0.173	-0.451**	-0.570**	-0.265
DTPA-Zn/Total-Zn/%	0.516**	0.513**	-0.066	0.636**	0.520**	0.314	-0.559**	-0.631**	-0.401*

注:对于温度和 pH 值的 $r_{0.05}=0.304$, $r_{0.01}=0.393$, $n=42$;而对于各种有机物的 $r_{0.05}=0.325$, $r_{0.01}=0.418$, $n=36$ 。

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $300.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 母猪粪和仔猪粪的有效态 Zn 含量分别为 $289.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $944.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 因此对于肉猪粪、母猪粪和仔猪粪堆肥后产品不宜长期过量施用, 否则会引起土壤 Cu、Zn 污染。

DTPA 浸提态重金属的相对含量在 0~7 d 堆肥过程中增加, 是由于此阶段络合能力较强的 DOC 含量随着温度的升高迅速增加, 而 DOC 含有大量的功能基团, 可以与重金属通过络合和螯合作用, 形成有机-金属配合物, 提高重金属的可溶性。且此阶段矿质化作用产生的小分子 DOC 较多, 由于小分子的 DOC 与大分子的 DOC 相比具有更多的结合点位, 从而对金属离子的络合能力强^[9]。同时此阶段堆肥过程中产生的大量有机酸也具有提高重金属有效性的作用, 因此导致了 DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 的相对含量的增加。

在 7~70 d 的堆肥过程中, 随着腐殖化作用的增强, 腐殖质含量增加, 堆肥过程中有机质氧化分解产生大量官能团提高了腐殖质与重金属的结合能力, 其中羧基、酚羟基、烯醇基、酮基、羟基酮、内酯、脂和醇羟基, 是吸附重金属能力最强组分^[16], 通过吸持作用而降低重金属的有效性。如有毒重金属可以与有机质中胡敏酸形成不溶性有机络合物而被保持, 不受淋溶而且相对来说对植物无效, 这样在某些环境条件下, 有毒重金属离子的浓度可以通过络合而降低到无害水平^[10], 因此使得 7~70 d 堆肥过程中 DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 的相对含量降低。除仔猪粪外, 其他 5 种畜禽粪便在堆肥的 42 d 时 DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 的相对含量都低于初始值, 至堆肥结束时肉鸡粪、蛋鸡粪、肉猪粪、母猪粪和奶牛粪的 DTPA-Pb、Cd、Cu 和 Zn 相对浓度明显下降, 而仔猪粪的 4 种 DTPA 浸提态重金属浓度均增加, 这是由于仔猪粪结构过于致密, 通气状况不良而导致堆肥状况不佳造成的。其中肉鸡粪、蛋鸡粪、肉猪粪、母猪粪和奶牛粪的 DTPA-Pb 相对浓度分别降低了 9.811%、4.820%、5.632%、8.178%、6.175%; DTPA-Cd 相对浓度分别降低了 9.185%、4.440%、6.748%、8.072%、18.18%; DTPA-Cu 相对浓度分别降低了 7.854%、7.117%、2.830%、10.40%、13.49%; DTPA-Zn 相对浓度分别降低了 8.126%、4.994%、5.784%、9.785%、9.638%。结果表明堆肥处理有利于降低 DTPA 浸提态重金属相对含量。

通过表 3 的相关性分析可知, 堆肥的基本性质中温度对 DTPA 浸提态的 4 种重金属相对含量的变化有着显著的影响; 在各种类型的有机物中, 以水溶性碳对 DTPA 浸提态重金属相对含量变化的影响最大。

4 结 论

(1) 6 种不同畜禽粪便中 Pb、Cd、Cu、Zn 的浓度差异性较大, 是因饲料中重金属污染不同造成的。堆肥过程中 Pb、Cd、Cu、Zn 4 种重金属含量均呈现逐渐增加的现象; 由于堆肥 0~14 d 的高温作用所引起的干物质损失最为严重, 从而造成此阶段重金属含量的增加量最大。

(2) 堆肥过程中, DTPA 浸提态的 4 种重金属相对含量均呈现先增加而后下降的趋势, 且除仔猪粪外, 其余 5 种畜禽粪便在堆肥结束时其相对含量均小于初始相对含量。

(3) 温度和水溶性碳对 DTPA 浸提态重金属相对含量变化的影响最大。

参考文献:

- [1] Mahdi Haroun, Azni Idris, Syed Omar. Analysis of heavy metals during composting of the tannery sludge using physicochemical and spectroscopic techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165: 111–119.
- [2] Miao-miao He, Guang-ming Tian, Xin-qiang Liang. Phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead during the aerobic composting of sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 163: 671–677.
- [3] Antonis A Zorpas, Vassilis J Inglezakis, Maria Loizidou. Heavy metals fractionation before, during and after composting of sewage sludge with natural zeolite[J]. *Waste Management*, 2008, 28: 2054–2060.
- [4] 孙西宁, 李艳霞, 张增强, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态变化[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1836–1841.
SUN Xi-ning, LI Yan-xia, ZHANG Zeng-qiang, et al. Extractable forms of heavy metals produced during municipal sludge composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(9): 1836–1841.
- [5] 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.
- [6] 王林权, 赵伯善, 周春菊. 粪肥堆腐过程中尿囊素的变化及其影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 1996, 4(2): 357–361.
WANG Lin-quan, ZHAO Bo-shan, ZHOU Chun-ju. Study on the change of allantoin during dung composting[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 1996, 4(2): 357–361.
- [7] 王林权, 周春菊, 王俊儒, 等. 鸡粪中的有机酸及其对土壤速效养分的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(2): 268–275.
WANG Lin-quan, ZHOU Chun-ju, WANG Jun-ru, et al. Organic acids in chicken feces and their effects on availability of nutrients in loess soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 268–275.
- [8] 袁可能, 等. 土壤腐殖质氧化稳定性的研究[J]. *浙江农业科学*, 1964

- (7).
YUAN Ke-neng, et al. Oxidative stability study of soil humus[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 1964(7).
- [9] 严昶升. 土壤肥力研究法[M]. 北京:农业出版社, 1988.
YAN Chang-sheng. The research methods of soil fertility[M]. Beijing: Agriculture Press, 1988.
- [10] 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社, 2000.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Composting of solid wastes and production of compound organic fertilizer[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [11] 张克强, 高怀友. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
ZHANG Ke-qiang, GAO Huai-you. The processing and disposal of contaminants in livestock and poultry breeding [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [12] 蒋晓惠, Baffi Claudio, Sandro Silva. 垃圾堆肥中重金属离子研究[J]. 四川师范学院学报:自然科学版, 1999, 20(1):31-35.
JIANG Xiao-hui, Baffi Claudio, Sandro Silva. A study of heavy metals in composting[J]. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural & Science)*, 1999, 20(1):31-35.
- [13] 杨国义, 李芳柏, 万洪富, 等. 猪粪混合堆肥过程中重金属含量的变化[J]. 生态环境, 2003, 12(4):412-414.
YANG Guo-yi, LI Fang-bai, WAN Hong-fu, et al. Changes in the contents of heavy metals in pig manure composting[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4):412-414.
- [14] 谷杰, 高华, 李鸣雷, 等. 养殖业废弃物对环境的污染及肥料化资源利用[J]. 西北农业学报, 2004, 13(1):132-135.
GU Jie, GAO Hua, LI Ming-lei, et al. Environmental contamination from domestic animal faeces and its utilization as resource of manure[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2004, 13(1):132-135.
- [15] 李延强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6):1083-1087.
LI Yan-qiang, YANG Xiao-e. Soil dissolved organic matter and its effect on chemical and biological behaviors of soil heavy metals[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6):1083-1087.
- [16] 黄国锋, 张振钿, 钟流举, 等. 重金属在猪粪堆肥过程中的化学变化[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1):94-99.
HUANG Guo-feng, ZHANG Zhen-tian, ZHONG Liu-ju, et al. Chemical changes of heavy metals in the process of pig manure composing[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(1):94-99.