

粪肥腐解过程中铜与腐殖物质结合状况及其 与铜淋失的关系

王旭东,马 宁,罗 敏,卢丽兰,刘 帅

(西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 **【目的】**探讨粪肥腐解过程铜与腐殖物质(HS)结合状况及其与铜淋失的关系。**【方法】**采用 H_2O 、 $NaOH$ 和 $NaOH+Na_4P_2O_7$ 连续浸提粪肥腐解过程中不同类型腐殖物质结合态铜(HS-Cu),检测其含量的变化,并采用淋溶试验,研究粪肥中铜的淋失特征。**【结果】**水溶性 HS-Cu 平均占粪肥全铜的 6%、自由态铜离子平均占粪肥全铜的 5%。随粪肥腐解的进行,HS-Cu 和自由态铜离子占全铜的比例均呈先升高后降低的变化趋势; $NaOH$ 溶性 HS-Cu 含量平均占全铜总量的 27.8%,在腐解的前 35 d 呈增大趋势,随后无明显变化; $NaOH+Na_4P_2O_7$ 溶性 HS-Cu 含量平均占全铜总量的 20%,随腐解进行其所占比例逐渐增加。 H_2O 溶性 HS-Cu 以富里酸结合态铜(FA-Cu)为主; $NaOH$ 溶性 HS-Cu 在腐解的前 50 d 以 FA-Cu 为主,50 d 以后则以 HA-Cu 为主; $NaOH+Na_4P_2O_7$ 溶性 HS-Cu 在腐解的前 28 d 以 FA-Cu 为主,28 d 以后以 HA-Cu 为主。粪肥中铜淋失量在腐解 35 d 以前随腐解的进行逐渐增加,35 d 以后又有所降低。铜淋失量平均占全铜量的 20%左右。各阶段的淋失铜量与 $NaOH$ 和 H_2O 溶性 HS-Cu、有机碳呈显著正相关,也与 H_2O 溶性总铜呈显著正相关;而与 $NaOH+Na_4P_2O_7$ 溶性 HS-Cu 和有机碳以及 H_2O 溶性自由态铜离子相关性不显著。**【结论】**在粪肥腐解过程中, $NaOH$ 溶性和 H_2O 溶性 HS-Cu 含量可以作为评价粪肥中铜淋失的指标。

【关键词】 鸡粪;腐殖物质;结合态铜;淋溶;铜淋失;粪肥腐解

【中图分类号】 X53;S141.3

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)03-0111-06

Dynamic of humic substance complexed copper and its relationship with copper leaching during manure composting

WANG Xu-dong, MA Ning, LUO Min, LU Li-lan, LIU shuai

(College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The objective of this paper is to study the changes of humic substance complexed copper (HS-Cu) during composting of chicken manure and to investigate the relationship between HS-Cu and leaching copper from manure. **【Method】** H_2O and $NaOH$ and $NaOH+Na_4P_2O_7$ were employed to extract HS-Cu sequentially, and leaching experiment was carried out to study copper leaching from manure. **【Result】** The results showed that the average amount of water dissolved HS-Cu accounted for 6 percent of the total copper in manure and free copper ion accounted for five percent. Both firstly increased and then decreased with composting. The amount of $NaOH$ extractable HS-Cu averaged 27.8% of the total copper in manure, which increased to a maximum at day 35 and leveled off thereafter. The amount of $NaOH+Na_4P_2O_7$ extractable HS-Cu averaged 20% of the total copper in manure and increased with composting process. For the H_2O extractable HS-Cu, Fulvic acid complexed copper (FA-Cu) was the main form. However, For $NaOH+Na_4P_2O_7$ extractable HS-Cu, fulvic acid complexed copper (FA-Cu) was the main form in the first 28 days composting and then

* [收稿日期] 2007-03-02

[基金项目] 西北农林科技大学“青年骨干支持计划”和专项基金项目;教育部大学生创新计划资助项目

[作者简介] 王旭东(1965—),男,河南唐河人,教授,博士,主要从事土壤与环境化学研究。E-mail: wangxudong01@126.com

humic acid complexed copper(HA-Cu) was the main form. For the NaOH extractable HS-Cu,FA-Cu was the main form before 50 days decaying and then HA-Cu was the main form. The amount of leaching Copper from manure averaged 20% of the total copper in manure,which increased in the first 35 days composting and then decreased. The amount of leaching copper was correlated to NaOH or H₂O extractable HS-Cu and organic carbon,but was not correlated with NaOH+Na₄P₂O₇ extractable HS-Cu and organic carbon.【Conclusion】 Therefore,NaOH or H₂O extractable HS-Cu could be used for prediction of copper leaching from manure.

Key words: chicken manure;humic substance;complexed copper;leaching;copper leaching;manure decomposition

集约化养殖饲料中常添加铜等微量元素,导致粪肥中铜等微量元素大量增加^[1-3],这已经引起人们的广泛关注。此类粪肥在堆腐过程中铜等微量元素随水流失,会引起局部地表水的污染,大量或连年施入土壤后可引起土壤铜累积,造成生物毒害^[4-6]。铜在粪肥中的形态分配已有一些研究^[7-10],这些研究多采用化学分组方法,把铜离子划分为水溶态、代换态、腐殖物质结合态、氧化物结合态、残渣态等。但目前对腐殖物质结合态铜(HS-Cu)的研究很不系统,腐殖物质结合态铜在粪肥中占有重要比例,其对铜形态转化、铜的迁移性、生物有效性或毒性具有重要的调控作用^[11-12]。粪肥腐解过程中,腐殖物质的组成是一个动态变化过程,一方面,随腐解过程的进行,木质素、纤维素等分解转化为小分子的腐殖物质;另一方面,随着腐殖化进行,小分子腐殖物质又逐渐聚合或缩合形成结构复杂的腐殖物质^[13]。因此,在粪肥腐解过程中,HS-Cu 的数量、结构和性质也呈现出动态变化过程。为此,本试验以铜含量高的鸡粪为材料,研究了粪肥腐解过程中不同类型可溶性腐殖物质及其结合态铜的变化,并通过淋溶试验,研究不同腐解期粪肥中铜淋失量的变化及其与不同溶解性 HS-Cu 含量的关系,以期为高铜含量粪肥的安全管理奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 粪肥的腐解试验

采集铜含量较高(503 mg/kg)的新鲜鸡粪,调节其水分含量为粪肥干重的 60%,在发酵桶(95 cm×φ75 cm)进行发酵,分别在发酵 0,3,7,14,21,28,35,50,80 和 110 d 时取样。

1.2 不同类型 HS-Cu 的提取和分离

对上述不同腐解期的样品,分别用 H₂O、0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L NaOH+Na₄P₂O₇ (pH=13)连续提取粪肥中不同形态的 HS-Cu^[14],浸提液和粪肥质量比为 20:1,每种浸提剂浸提 5

次,合并其浸提液。将浸提溶液(H₂O 浸提液先经阳离子交换树脂吸附其自由态铜离子)分为二部分,一部分调节其酸度为 pH 为 1.0,用于分离其中的胡敏酸铜(HA-Cu)和富里酸铜(FA-Cu);另一部分直接用于有机碳和铜含量的测定。

1.3 淋溶试验

用内径为 7.5 cm、长为 12 cm 的 PVC 塑钢管,在不同腐解期于发酵桶的中心取粪肥样品,按等容重填入塑钢管中,然后用细尼龙纱布包裹塑钢管的底端,放置在漏斗上,用 1 200 mL 水进行淋溶试验,淋溶液经过滤后测定其铜含量,计算淋失铜含量占粪肥中全铜的比例。

1.4 测定指标及方法

粪肥腐解过程中有机全碳、铜、灰分含量的测定采用常规方法^[15];3 种浸提剂提取的可溶性有机碳含量用丘林法^[15]测定;3 种浸液中的铜及从其中分离的富里酸结合态铜(FA-Cu)和淋溶液中淋失的铜含量,均经硝酸氧化后用原子吸收法测定。胡敏酸结合态铜(HA-Cu)含量用差减法获得。经阳离子交换树脂过滤前后分别测定 H₂O 浸提液的铜离子含量,过滤前与过滤后铜离子含量之差即为自由态铜离子含量。

2 结果与分析

2.1 粪肥腐解过程中有机碳、铜、灰分含量和 pH 的变化

图 1 表明,粪肥腐解过程中,有机碳含量由分解初期(鲜样)的 264 g/kg 逐渐下降到腐解 110 d 的 161 g/kg,有机碳矿化了 65%左右;不同腐解阶段有机碳的下降幅度不同,在腐解的前 50 d 有机碳含量下降幅度大,占整个腐解过程(110 d)有机碳矿化量的 88%;随着有机碳含量的减少,粪肥重量减轻,粪肥中铜含量则呈增加趋势,其中在腐解前 50 d,铜含量增加较快,之后增加变缓;灰分含量的变化趋势与铜含量基本一致。图 2 表明,腐解过程 pH 变化以 21 d

为分界点,前 21 d 随腐解进行 pH 呈降低趋势,到 21 d 时降为最低($\text{pH}=7.0$),21 d 后又逐渐升高,至 110 d 时 pH 高达 7.9。总体看来,腐解过程鸡粪 pH 基本在 7.0 以上,呈弱碱性。

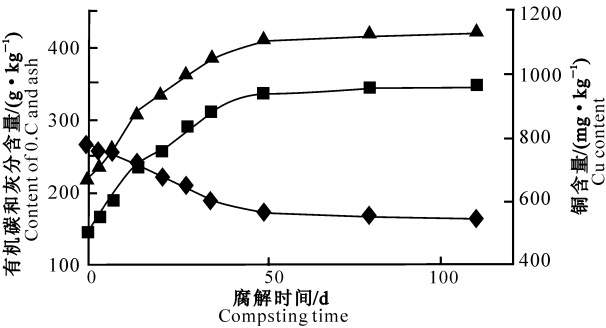


图 1 粪肥腐解时有机碳、灰分和铜含量的变化

—◆—, 有机碳; —▲—, 灰分; —■—, 铜

Fig. 1 Changes in contents of O, C and ash and Cu during manure composting

—◆—, Organic C; —▲—, Ash; —■—, Cu

2.2 粪肥腐解过程中 Cu 含量的变化

2.2.1 自由态铜离子含量的变化 连续浸提第一步以蒸馏水作为浸提剂,提取的铜既包含自由态铜离子,也包含 HS-Cu,其中自由态铜离子含量平均占粪肥全铜量的 5.36%。随着粪肥腐解的进行,自由态铜离子占全铜的比例在腐解的前 21 d,呈逐渐增加趋势,21 d 时达到最大值(为 7.8%);之后逐渐下降,至 110 d 时,达最低值 3.9%(图 2)。自由态铜离子变化与粪肥腐解过程 pH 的变化有关,两者之间呈负相关关系($r=-0.8695^{**}$)。

2.2.2 不同类型 HS-Cu 变化 图 3 表明,3 种浸提剂提取的 HS-Cu 含量有较大差异,从整个腐解过程的平均值来看,NaOH 溶性 HS-Cu 含量最高,平均占粪肥全铜量的 27.8%,其次是 NaOH +

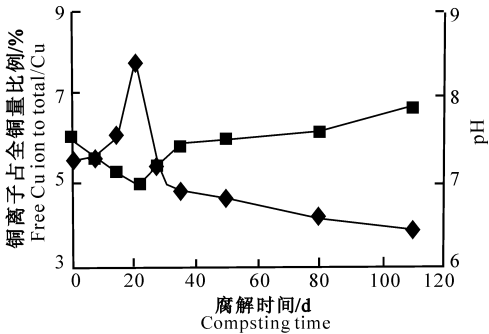


图 2 粪肥腐解时自由态铜和 pH 的变化

—◆—, 自由态铜离子; —■—, pH

Fig. 2 Changes in free Cu ion and pH during manure composting

—◆—, Free Cu ion; —■—, pH

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 溶性 HS-Cu,平均占粪肥全铜量的 20%,水溶性 HS-Cu 含量最低,平均仅占粪肥全铜量的 6%左右;随着粪肥腐解进行,在前 21 d,水溶性 HS-Cu 占全铜量的比例呈逐渐增加趋势,21 d 时最高(为 11.5%),21 d 后又逐渐降低;NaOH 溶性的 HS-Cu 占粪肥全铜量的比例,在腐解前 35 d 呈上升趋势,35 d 时达到最高值(占粪肥全铜量的 32%),之后逐渐降低,至腐解 110 d 时占粪肥全铜量的 29%;NaOH+ $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 溶性 HS-Cu 占粪肥全铜的比例在整个腐解过程中基本呈增加趋势,由腐解初期(0 d)的 16%增加到腐解结束(110 d)时的 26%。3 种浸提剂提取的可溶性 HS-Cu 总量占粪肥全铜的比例在腐解前 21 d 呈逐渐上升趋势,所占比例由 41%上升到 59%,21 d 后变化相对较小。

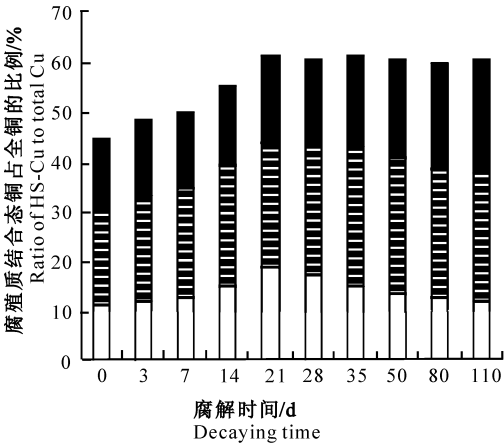


图 3 粪肥腐解时腐殖质结合态铜的分布

Fig. 3 Distribution of HS-Cu in manure

■, 焦磷酸钠溶性 HS-Cu ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7+\text{NaOH}$)-HS-Cu;
▨, 氢氧化钠溶性 HS-Cu NaOH-HS-Cu;
□, 水溶性 HS-Cu H_2O -HS-Cu

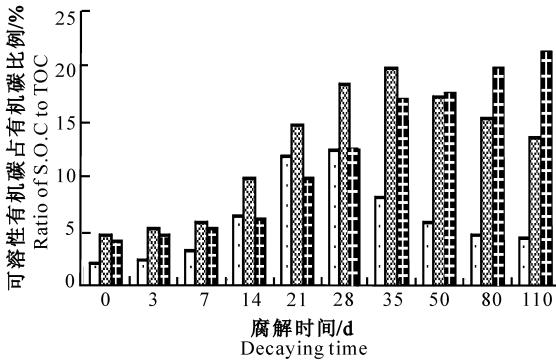


图 4 粪肥腐解时有机碳的分布

Fig. 4 Distribution of organic C in manure

□, 水溶性有机碳 H_2O -C;
▨, 氢氧化钠溶性有机碳 NaOH-C;
■, 焦磷酸钠溶性有机碳 ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7+\text{NaOH}$)-C

2.2.3 HS-Cu 与可溶性有机碳的关系 由图 4 可知,在粪肥腐解过程中,水溶性有机碳占有机碳总量的比例呈“马鞍”形变化,腐解 28 d 时达到最高值(为 12.5%),平均占有机碳总量的 6% 左右。NaOH 溶性有机碳占有机碳总量的比例,在腐解 35 d 以前也呈上升趋势,35 d 时达到最大(为 20% 左

右),之后逐渐降低,平均占有机碳总量的 12.4%。NaOH+Na₄P₂O₇ 溶性有机碳占有机碳总量的比例,在整个腐解过程中呈增加趋势,由腐解开始时的 4.1% 增加到腐解 110 d 时的 21%,平均占有机碳总量的 11.8%。相关分析表明,不同类型 HS-Cu 与其相应的有机碳之间均呈极显著正相关关系(表 1)。

表 1 粪肥腐解过程中有机碳含量与 HS-Cu 含量和淋失铜量的相关系数
Table 1 Correlation coefficient between organic C and HS-Cu

因子 Factor	H ₂ O-C	NaOH-C	(Na ₄ P ₂ O ₇ + NaOH)-C	H ₂ O- HS-Cu	NaOH-HS- Cu	(Na ₄ P ₂ O ₇ + NaOH) HS-Cu	自由态 铜离子 Free Cu ion	H ₂ O 溶 性总铜 Total H ₂ O- Cu
NaOH-C	0.7097 *	1						
(Na ₄ P ₂ O ₇ +NaOH)-C	0.215 4	0.785 1 * *	1					
H ₂ O-HS-Cu	0.939 0 * *	0.501 1	-0.022 0	1				
NaOH-HS-Cu	0.578 8	0.963 0 * *	0.842 0 * *	0.389 7	1			
(Na ₄ P ₂ O ₇ +NaOH)-HS-Cu	0.127 2	0.639 2	0.955 4 * *	-0.050 1	0.720 2 *	1		
自由态铜离子 Free Cu ion	0.466 4	-0.133 6	-0.496 6	0.706 8	-0.249 5	-0.402 0	1	
H ₂ O 溶性总铜 Total H ₂ O-Cu	0.818 9 * *	0.281 2	-0.216 9	0.957 6 * *	0.159 4	-0.197 2	0.880 5 * *	1
淋失铜 Leaching Cu	0.962 7 * *	0.798 9 * *	0.340 8	0.879 3 * *	0.721 6 *	0.237 8	0.291 3	0.707 6 *

注:n-2=8;r_{0.05}=0.632;r_{0.01}=0.765;*表示在 0.05 水平上差异;* * 表示在 0.01 水平上差异。
Note:n-2=8;r_{0.05}=0.632;r_{0.01}=0.765;* indicates significant at 0.05 level;* * indicates significant at 0.01 level.

2.2.4 HS-Cu 中 HA-Cu 和 FA-Cu 的分配特征
图 5 表明,在粪肥腐解过程中,水溶性 HS-Cu 的 HA-Cu/FA-Cu 均小于 1,且随粪肥腐解进程变化较小,说明在水溶性 HS-Cu 中以 FA-Cu 为主。NaOH 溶性 HS-Cu 在腐解前期(50 d 以前)HA-Cu/FA-Cu 小于 1,随粪肥腐解进行 HA-Cu/FA-Cu 逐渐增加,至 50 d 时,HA-Cu/FA-Cu 比值为 1,之后 HA-Cu/FA-Cu 大于 1,说明 NaOH 溶性 HS-Cu 在粪肥腐解的前 50 d 以 FA-Cu 为主,之后则以 HA-Cu 为主。与水溶性、NaOH 溶性 HS-Cu 相比,NaOH + Na₄P₂O₇ 溶性 HS-Cu 的 HA-Cu/FA-Cu 较大,在腐

解初期(前 28 d)HA-Cu/FA-Cu 小于 1,之后 HA-Cu/FA-Cu 大于 1,腐解 110 d 时,HA-Cu/FA-Cu 达到 1.8 左右。说明在粪肥腐解的前 28 d,NaOH + Na₄P₂O₇ 溶性 HS-Cu 以 FA-Cu 为主,28 d 以后则以 HA-Cu 为主。

浸提液中 HA/FA 变化趋势(图 6)与 HA-Cu/FA-Cu 基本保持一致。相关性分析表明,各浸提液的 HA-Cu/FA-Cu 与 HA/FA 之间的相关系数分别为 0.872 9(水浸提液),0.949 5(NaOH 浸提液)和 0.942 1(NaOH+Na₄P₂O₇ 浸提液),达到极显著水平。

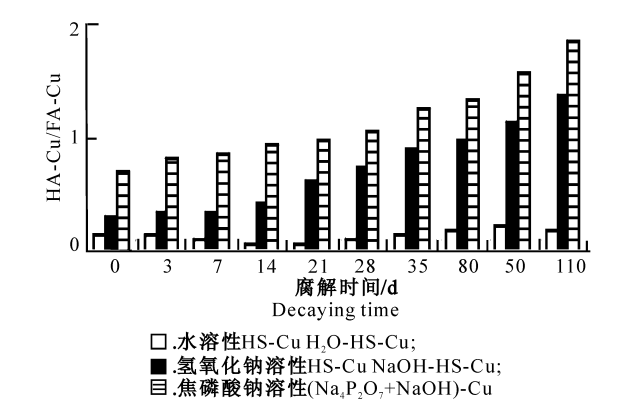


图 5 铜在胡敏酸富里酸中分布

Fig. 5 Cu distribution in HA and FA

2.3 粪肥腐解过程铜的淋失特征

图 7 表明,未腐解的粪肥(腐解 0 d),淋失铜量

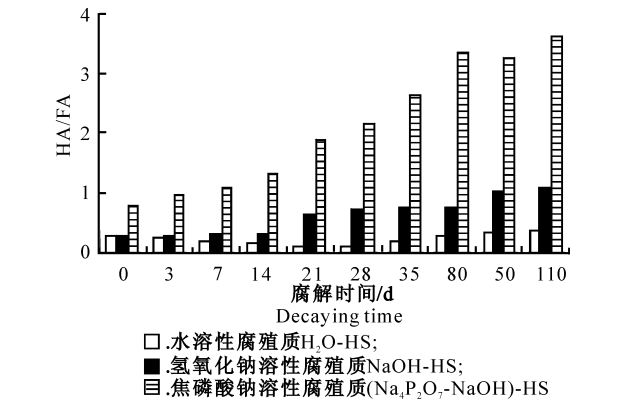


图 6 粪肥腐解过程中 HA/FA

Fig. 6 HA/FA ratio in manure compost

占粪肥中铜总量的 14%;随着粪肥腐解时间的增加,淋失铜量占粪肥铜总量的比例逐渐增加,至腐解

35 d 时达最高值 24%,35 d 以后铜的淋失量占全铜比例略有降低,但变化幅度较小。不同腐解阶段铜的淋失量平均占粪肥铜总量的 20%左右。

相关性分析结果(表 1)表明,不同腐解阶段淋失的铜量与水溶性有机碳、NaOH 溶性有机碳以及水溶性 HS-Cu、NaOH 溶性 HS-Cu 呈显著正相关,但与 NaOH+Na₄P₂O₇ 溶性的有机碳和 HS-Cu 相关性不显著;与自由态铜离子相关性不显著,但与 H₂O 溶性总铜(自由铜离子+HS-Cu)呈显著正相关。表 2 表明,淋失铜量与水溶性或 NaOH 溶性 HS-Cu 的关系可以用直线方程来描述,且前者直线的斜率大于后者,这说明水溶性 HS-Cu 对淋失铜的贡献率大于 NaOH 溶性 HS-Cu;NaOH+Na₄P₂O₇

溶性 HS-Cu 与淋失铜的关系可以用一元二次方程来描述。

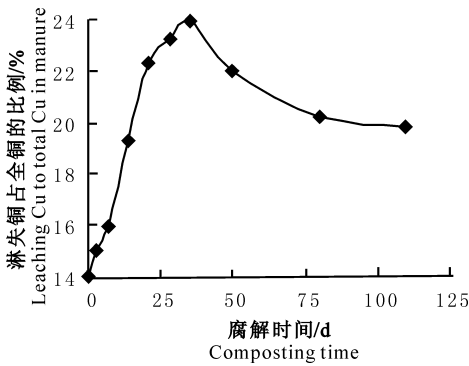


图 7 粪肥腐解过程中淋失铜的变化
Fig. 7 Change in leaching Cu during manure composting

表 2 粪肥腐解过程中淋失铜含量与不同类型 HS-Cu 的关系式

因子 Factors	方程 Equation	r ²
淋失铜(y)与 H ₂ O 溶性 HS-Cu(x)的关系 Relationship between leaching Cu(y) and H ₂ O extractable HS-Cu(x)	y=0.889 6 x + 12.695 0	0.773 2 * *
淋失铜(y)与 NaOH 溶性 HS-Cu (x)的关系 Relationship between leaching Cu (y) and NaOH extractable HS-Cu(x)	y=0.608 2 x+1.188 2	0.520 7 *
淋失铜(y)与 NaOH+Na ₄ P ₂ O ₇ 溶性 HS-Cu(x)的关系 Relationship between leaching Cu (y) and NaOH-Na ₄ P ₂ O ₇ extractable HS-Cu (x)	y=-0.223 8 x ² +9.527 6 x- 80.809	0.653 0 * *

注: * 表示在 0.05 水平上差异; * * 表示在 0.01 水平上差异。

Note: * indicates significant at 0.05 level; * * indicates significant at 0.01 level.

3 讨 论

腐殖物质和铜在 H₂O、NaOH 和 NaOH + Na₄P₂O₇ 3 种浸提液中的分配差异,反映出腐殖物质性质差异以及腐殖物质与铜的结合状况和溶解性的差异。用 H₂O 浸提的腐殖物质中,FA 占绝对优势。水溶性的腐殖物质结构简单、羧基含量相对较多,极性较强^[16]。因此易与金属离子之间通过键合作用形成络合物或离子化合物,增加金属离子的溶解性和迁移性。用 NaOH 浸提的腐殖物质为粪肥中的游离态腐殖物质,与 H₂O 溶性腐殖物质相比,其 HA/FA 明显升高,结构相对复杂,其中所含的金属离子主要通过键合作用与腐殖物质形成络合物,并随着腐殖物质的迁移而迁移。用 NaOH + Na₄P₂O₇ 浸提的腐殖物质以胡敏酸为主,腐殖物质分子的缩合程度高,结构更加复杂,与金属离子之间主要通过配位键或配位吸附形成络合物或螯合物,其中部分络合物或螯合物为难溶性的,移动性较差^[14]。因此,粪肥不同腐解时期淋失的铜与该时期的水溶性或 NaOH 溶性碳和铜呈显著正相关,而与 NaOH+Na₄P₂O₇ 溶性碳和铜不相关。

本研究中,粪肥腐解过程铜的淋失量以腐解 35

d 时最高,这是因为在腐解 35 d 前后 NaOH 溶性碳含量达到最高,其腐殖物质结合态铜处于较高水平,而且此时期水溶性碳和铜的水平也较高;35 d 后,由于小分子腐殖物质发生矿化以及进一步的缩合,导致水溶性铜络合物下降,NaOH+Na₄P₂O₇ 浸提性有机碳和 HS-Cu 的量增加,从而使淋失铜占粪肥铜总量的比例降低。另外,鸡粪属于含盐量较高的粪肥,在整个腐解过程 pH 偏碱性,腐解前期由于有机酸和小分子腐质物质产生较多,导致 pH 有所下降;腐解 21 d 以后,随着有机酸的矿化分解及盐分的进一步累积,pH 逐渐升高(腐解 110 d 时 pH 高达 7.9)。由于 pH 过高,粪肥中铜易形成难溶性的磷酸盐、碱式碳酸盐或氧化物,导致粪肥中铜的溶解性降低、淋失量减少。

[参考文献]

[1] 刘荣乐,李书田,王秀斌.我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属含量状况分析[J].农业环境科学学报,2005,24(2)392-397.
Liu R L,Li S T,Wang X B. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes [J]. Journal of Agro-environmental Science, 2005, 24 (2): 392-397. (in Chinese)
[2] 郑国砥,陈同斌,高 定,等.好气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.
- Zheng G D, Chen T B, Gao D, et al. Influence of high temperature aerobic composting treatment on the form of heavy metals in pig manure [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(1): 6-9. (in Chinese)
- [3] Nicholson F A, Chamber B J, Williams J R, et al. Heavy metals contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales [J]. *Bioresouce Technology*, 1999(70): 23-31.
- [4] Zhou D M, Hao X Z, Wang Y J, et al. Copper and zinc uptake by radish and pakchoi as affected by application of livestock and poultry manures [J]. *Chemosphere*, 2005(59): 167-175.
- [5] Valtcho D Z, Phil R W. Phytoavailability and fractionation of copper, manganese and zinc in soil following application of two composts to four crops [J]. *Environment Pollution*, 2004 (131): 187-195.
- [6] 李剑超, 王 果. 有机物料影响下土壤溶液铜形态及其有效性研究 [J]. *农业环境保护*, 2002, 21(3): 197-200.
- Li J C, Wang G. Forms and availability of copper in solution of soil containing organic materials [J]. *Agro-environmental protection*, 2002, 21(3): 197-200. (in Chinese)
- [7] Ihnat M, Fernanders L. Trance elements characteristics of composted poultry manure [J]. *Bioresource technology*, 1996(57): 143-156.
- [8] Diana H, Cesar P, Nicola S. Detection of copper and zinc binding to humic acids from pig slurry and amended soil by fluorescence spectroscopy [J]. *Environment Pollution*, 2005(24): 1-9.
- [9] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 337-343.
- Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, et al. Degradation of antibiotics and passivation of heavy metals during therophlic composting process [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 337-343. (in Chinese)
- [10] 李国学, 孟凡乔, 姜 华, 等. 添加钝化剂对污泥堆肥处理中重金属形态(Cu Zn Mn)影响[J]. *中国农业大学学报*, 2000, 5(1): 105-111.
- Li G X, Meng F Q, Jiang H, et al. Studies on the effect of stabilizing materials to the status of heavy metals(Cu Zn Mn) during composting sewage sludge [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 105-111. (in Chinese)
- [11] Shoko I, Chisato T. Effects of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability for lettuce sprouts [J]. *Environment International*, 2005(31): 603-608.
- [12] Garcia-Mina J M, Antolin M C, Sanchez-Diaz M. Metal-humic complexes and palnt micronutrients uptake [J]. *Plant and Soil*, 2004(258): 57-68.
- [13] 王旭东, 关文玲. 纯有机物料腐解形成腐植物质性质的动态变化 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2001, 29(5): 88-91.
- Wang X D, Guan W L. Property changes of humic Substances from organic materials in different decomposing period [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2001, 29(5): 88-91. (in Chinese)
- [14] Jenn-Hung H, Shang-Lien L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese and zinc from swine manure[J]. *Environment Pollution*, 2001(14): 119-127.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-38.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing, China Agriculture Press, 2000: 25-38. (in Chinese)
- [16] 王旭东, 胡田田, 张一平. 不同结合态胡敏酸性质结构研究 [J]. *西北农业学报*, 1998, 7(1): 75-78.
- Wang X D, Hu T T, Zhang Y P. Property and structure of different combined humic acids [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentali Sinica*[J]. 1998, 7(1): 75-78. (in Chinese)