

粪肥中铜锌的形态分布及其竞争研究

卢丽兰, 王旭东

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:选取铜锌比差异较大的不同鸡粪进行腐解试验,研究了腐解过程铜锌的形态变化以及各形态的 Cu/Zn 比值。结果表明,随着粪肥腐解的进行,粪肥中 Cu、Zn 的含量升高。在铜锌的各形态分布中,Cu 以有机态和氧化结合态为主,分别占粪肥全铜量的 37.3%、51.0%;而 Zn 以碳酸盐结合态和氧化物结合态为主,分别占全锌量的 38.6%、40.0%。随着粪肥腐解进行,Cu 元素的有机结合态所占全铜的比例进一步增多,氧化结合态所占比例下降,可交换态铜所占比例有一定降低;Zn 元素基本相反,有机结合态锌占全锌比例下降,而氧化态所占比例上升。和粪肥样品总的 Cu/Zn 相比,有机结合态的 Cu/Zn 比值升高,碳酸盐结合态的 Cu/Zn 比值降低,说明铜与有机质的结合竞争强,而锌对碳酸盐的结合竞争强。各形态的 Cu/Zn 比与粪肥样品中的 Cu/Zn 比呈显著或极显著正相关(腐解 30 d 时残渣态除外),表明铜锌对不同形态的竞争,不仅与离子本身特性有关,还受到离子浓度和数量的影响。

关键词:鸡粪;铜;锌;腐解过程;形态分布

中图分类号:X132 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-2064-05

The Fractional Distribution of Copper and Zinc and Their Competition in Manures

LU Li-lan, WANG Xu-dong

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

Abstract: Chicken manures with large variation in Cu/Zn ratios were used for composting experiment to study the changes of copper and zinc in the concentrations and fractional distribution. During the manures composting, the concentrations of copper and zinc increased in compost. For the fractional distributions of Cu and Zn, the main amounts of Cu were presented in the organic and oxide fractions, which accounted for 37.3% and 51.0% of total Cu in compost, respectively. The main amounts of zinc were presented in the carbonate and oxide fractions, which represented 38.6% and 40.0% of total zinc, respectively. With the manures composting, the ratio of copper in organic fraction to total copper increased and the ratios of copper in oxide fraction to total copper or exchangeable copper to total copper decreased. However, changes of zinc in organic fraction and in oxide fraction were on the contrary compared to copper. The ratio of zinc in organic fraction to total zinc decreased and the ratio of zinc in oxide fraction to total zinc increased. Compared to the ratios of total copper to total zinc in raw materials or composts, the ratios of copper to zinc in organic fraction increased and in carbonate fraction decreased, suggesting that copper is more competitive than zinc to be complexed with organic matter and zinc is more competitive than copper to bound with carbonate. The ratios of copper to zinc in different fractions were significantly correlated to the ratios of total copper to total zinc in raw materials and compost except in the residue fractions at the 30 days of decomposition, indicating that the competition between copper and zinc is not only determined by nature of the ions, but is also determined by the concentrations of the ions.

Keywords: chicken manure; copper and zinc; decomposing process; fractional distribution

由于微量元素等饲料添加剂的应用,集约化养殖的动物粪便尤其是鸡粪和猪粪中 Cu、Zn 含量较高。

刘荣乐等研究了中国的畜禽粪便和商品有机肥料后指出,在猪粪中 Cu 浓度高达 1 726 mg·kg⁻¹、Zn 浓度高达 2 286.8 mg·kg⁻¹;在鸡粪中,Cu 浓度高达 736.0 mg·kg⁻¹、Zn 浓度高达 1 017.0 mg·kg⁻¹[1,2]。Nicholson 等[3]研究了英国和威尔士的动物粪便中重金属的含量,结果也反映出重金属的含量较高现象。粪肥中除了含有较高浓度的 Cu、Zn,还有 As、Mn 和 Cr 等元素。重金属和痕量元素超标问题在养殖场粪便堆肥处理过程

收稿日期:2007-10-24

基金项目:国家自然科学基金(39800093);西北农林科技大学“青年骨干支持计划”以及大学生创新计划(2007)

作者简介:卢丽兰(1981—),女,硕士生,研究方向为土壤和环境化学。
E-mail:lulilan1234@163.com

通讯作者:王旭东 E-mail:wangxudong01@126.com

以及堆肥后的土地利用中引起的环境污染问题受到人们的关注^[4,5]。局部地区土壤长期施用粪肥会导致重金属元素在植物体中累积并对人体的健康产生危害^[6,7]。过去对畜禽粪便中重金属的研究多局限于总量,而忽视了其化学形态的变化^[8]。重金属对环境的危害不仅与其总量有关,更重要取决于其化学形态^[9]。近年来虽然对粪肥中重金属形态分级有一些研究,但涉及到形态随腐解进程变化的研究还较少^[4,10]。粪肥中铜锌并存,其形态分布存在竞争;但目前对铜锌之间的形态竞争关注较少。铜锌之间的竞争不仅与离子本性有关,而且还与离子的浓度数量有关。为此,本试验以铜锌含量不同 5 种鸡粪样品为材料,研究好氧堆腐过程 Cu、Zn 的形态分布,通过各形态的分配系数和 Cu/Zn 比值研究,揭示各形态中铜锌的竞争,为进一步研究粪肥中铜锌的生物有效性和毒性奠定基础。

1 材料与方法

1.1 采样方法

本试验的新鲜鸡粪来源于陕西省西安市杨凌镇 5 个不同中型养鸡场,采的样品分别放在不同的塑料袋中,并把不同鸡场的新鲜鸡粪分为:M1、M2、M3、M4、M5。

1.2 粪肥的腐解试验

采用铜锌含量不同的新鲜鸡粪 5 种(分别用 M1、M2、M3、M4、M5 表示),在发酵桶(95 cm×φ75 cm)中进行静态强制通气发酵(15 d 以前通气量为 30 L·min⁻¹·m⁻³,15 d 以后停止通气)。发酵期间水分控制为 60%~65%。分别在发酵 15、30 d 时将发酵桶中的腐解样品上下搅拌混匀,采得混合样品。样品风干后置于冰箱中保存已备分析用。5 种鸡粪的基本性质见表 1。

1.3 分析方法

粪肥有机碳的测定采用重铬酸钾氧化法^[11],粪肥中重金属的形态分级采用 Tessier 方法,即通过不同

表 1 鸡粪的基本性状					
Table 1 The primary characteristics of chicken manures					
基本性状	鸡粪种类				
	M1	M2	M3	M4	M5
Cu/mg·kg ⁻¹	485.9	418.6	726.7	385.5	119.1
Zn/mg·kg ⁻¹	502.7	830.9	1 576.6	1 124.8	470.4
C/g·kg ⁻¹	454.3	459.5	431.7	434.5	453.7
Cu/Zn	0.97	0.50	0.46	0.34	0.25
C/N	16.7	18.5	17.3	16.5	17.9

化学试剂连续浸提依次把铜锌分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机态和残渣态 5 种形态^[12]。所有试验结果重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 粪肥腐解过程重金属含量变化

在好氧高温堆肥处理过程中,粪肥中 Cu、Zn 的总浓度显著升高(见表 1 和表 2)。与堆肥前相比,腐解 15 d 时,M1、M2、M3、M4 和 M5 5 种粪肥样品中 Cu 的浓度分别增加了 33.1%、33.0%、33.2%、33.0% 和 22.2%,平均增加了 30.9%;Zn 的浓度分别增加了 33.0%、33.1%、32.1%、32.8% 和 32.2%,平均增加了 32.6%;腐解 30 d 时,5 种粪肥样品中 Cu 的浓度分别增加了 91.0%、90.2%、90.6%、90.0% 和 74.6%,平均增加了 87.2%,Zn 的浓度分别增加了 84.0%、81.7%、80.1%、82.2% 和 80.0%,平均增加了 81.6%。腐解 30 d 时与腐解 15 d 时相比,5 种粪肥样品中 Cu 的浓度平均增加了 43%,Zn 浓度平均增加了 37%。重金属是不能降解的灰分物质,随着堆肥过程中有机物的降解,堆肥重量减少,重金属会出现“相对浓缩”现象,因此堆肥过程中重金属的浓度升高。

2.2 粪肥腐解过程重金属各形态分布变化

各重金属形态的量占其总量的比例(分配系数)是评价重金属环境风险的一项指标。从各种形态的分

表 2 堆肥过程鸡粪中铜锌浓度变化						
Table 2 The concentrations of Cu and Zn in chicken manures during decomposition						
腐解时间/d	铜锌浓度变化	鸡粪种类				
		M1	M2	M3	M4	M5
15	Cu/mg·kg ⁻¹	646.6±12.9	556.8±11.1	967.7±19.4	512.6±10.2	145.5±2.9
	Zn/mg·kg ⁻¹	668.6±20.1	1 106.3±33.2	2 083.5±62.5	1 494.2±44.9	621.9±18.7
	Cu/Zn	0.97	0.50	0.46	0.34	0.23
30	Cu/mg·kg ⁻¹	928.3±18.6	796.4±16.0	1385.2±27.7	731.6±14.6	208.5±4.1
	Zn/mg·kg ⁻¹	925.4±27.8	1 510.2±45.3	2 840.5±85.2	2 050.4±61.5	847.2±25.4
	Cu/Zn	1.00	0.53	0.49	0.36	0.45

表 3 腐解过程重金属各形态的浓度变化(mg•kg⁻¹)

Table 3 The concentrations of heavy Metals during composting process(mg•kg⁻¹)

重金属	腐解时间/d	形态	鸡粪种类				
			M1	M2	M3	M4	M5
Cu	15	Ex	12.0±0.2	15.0±0.3	22.7±0.5	11.9±0.2	5.7±0.1
		C	47.5±0.9	35.9±0.7	41.2±0.8	39.7±0.8	10.2±0.2
		Ox	254.0±5.0	233.5±4.7	393.0±7.9	216.5±4.3	56.2±1.1
		Or	317.5±6.4	259.0±5.2	467.9±9.4	234.5±4.7	68.8±1.4
		Re	15.6±0.3	13.4±0.3	42.9±0.9	10.0±0.2	4.6±0.1
	30	Ex	15.7±0.3	19.6±0.4	29.7±0.6	15.5±0.3	7.4±0.1
		C	67.2±1.3	50.7±1.0	58.0±1.2	56.2±1.1	14.3±0.3
		Ox	335.0±6.7	308.0±6.2	517.0±10.3	285.0±5.7	74.0±1.5
		Or	488.1±9.8	398.7±8.0	719.8±14.4	360.1±7.2	105.8±2.1
		Re	22.0±0.4	19.0±0.4	60.5±1.2	14.2±0.3	6.5±0.1
Zn	15	Ex	4.7±0.1	15.6±0.5	17.3±0.5	12.7±0.4	13.4±0.4
		C	306.3±9.2	457.4±13.7	671.5±20.1	550.4±16.5	229.1±6.9
		Ox	282.4±8.5	406.5±12.2	763.7±22.9	588.5±17.7	230.5±6.9
		Or	66.5±2.0	215.4±6.5	521.6±15.6	277.9±8.3	139.6±4.2
		Re	8.7±0.3	11.4±0.3	108.9±3.3	64.5±1.9	9.3±0.3
	30	Ex	6.5±0.2	21.5±0.6	23.8±0.7	17.5±0.5	18.4±0.6
		C	420.0±12.6	625.0±18.8	918.0±27.5	753.0±22.6	313.0±9.4
		Ox	403.0±12.1	580.0±17.4	1090.0±32.7	840.0±25.2	329.0±9.9
		Or	82.0±2.5	266.3±8.0	644.2±19.3	342.5±10.3	172.6±5.2
		Re	13.5±0.4	17.2±0.5	164.0±4.9	97.0±2.9	14.0±0.4

注:Ex 为 Exchangeable(可交换态);C 为 carbonate(碳酸盐结合态);Ox 为 Oxide(铁锰氧化态);Or 为 Organic(有机结合态);Re 为 Residual(残渣态)。表 4、表 5 同。

配系数可以看出(见表 3、4),粪肥腐解 15 d 时,在 5 个粪肥样品中,可交换态中 Cu 的分配系数在 1.9%~4.0%之间,平均为 2.6%;碳酸盐结合态在 4.3%~7.8%之间,平均为 6.5%;铁锰氧化态在 38.6%~42.2%之间,平均为 40.5%;有机结合态在 45.7%~49.1%之间,平均为 47.4%;残渣态在 1.5%~4.4%之间,平均为 2.5%。在 5 个粪肥样品中,可交换态中 Zn 的分配系数在 0.7%~2.2%之间,平均为 1.2%;碳酸盐结合态在 32.2%~45.3%之间,平均为 38.6%;铁锰氧化态在 36.7%~42.2%之间,平均为 38.4%;有机结合态在 9.9%~25.0%之间,平均为 19.1%;残渣态在 1.0%~5.2%,平均为 2.7%。可见,在铜锌共存的情况下,粪肥中铜锌的形态分布存在很大差异,Cu 以有机态和铁锰氧化结合态为主,两者之和占腐解期全量的 85.8%~88.9%;而 Zn 以碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态为主,两者之和占腐解期全量的 74.9%~78.5%,有相对减少的趋势。

从腐解 15 d 到 30 d,粪肥样品中各形态 Cu、Zn 的含量都有增加(见表 3),这是由于随着腐解进行粪肥中铜锌含量升高所致。与堆肥处理 15 d 时相比,堆腐 30 d 粪肥中有机结合态 Cu 的分配系数有所提高,样品 M1、M2、M3、M4 和 M5 中,有机结合态 Cu 的分配系数平均为 51.0%,比腐解 15 d 时平均增加了

7.5%;铁锰氧化结合态 Cu 的分配系数为 37.6%,与堆腐 15 d 时相比,平均下降了 7.2%;可交换态铜的分配系数有一定降低,而碳酸盐结合和残渣态形态中 Cu 分配系数,和 15 d 时相比没有发生明显变化。

腐解过程锌的各形态分配系数变化与铜有所不同,堆肥处理 30 d 时粪肥中铁锰氧化合态的 Zn 分配系数平均为 40.0%,与堆肥处理 15 d 相比,增加了 4.2%;有机结合态中的 Zn 分配系数平均为 17.3%,平均下降了 9.7%,残渣态、碳酸盐结合态和可交换态 Zn 的分配系数变化很小。

铜锌的形态分布变化反映出,铜和锌在有机结合态与铁锰氧化物结合态方面存在竞争关系。随着腐解进行,Cu 元素的有机结合态所占比例进一步增多,铁锰氧化态所占比例有所下降;Zn 元素恰好相反,有机结合态所占比例有一定下降,而铁锰氧化态所占比例上升。

2.3 各形态 Cu/Zn 比变化

在粪肥样品原样中(未腐解),总的 Cu/Zn 比值介于 0.25~1.00,随着堆腐进行,不论是 15 d 还是 30 d, Cu/Zn 比值变化很小(见表 1 和表 2)。

粪肥中各形态的 Cu/Zn 值(见表 5)表明,腐解 15 d 时,在 5 个粪肥样品中,可交换态中 Cu/Zn 比值分

表 4 腐解过程重金属各形态的分配系数

Table 4 The changes of partition coefficient of heavy metals during composting process

重金属	腐解时间/d	形态	鸡粪种类				
			M1	M2	M3	M4	M5
Cu	15	Ex	1.9	2.7	2.3	2.3	4.0
		C	7.3	6.4	4.3	7.8	7.0
		Ox	39.2	41.9	40.6	42.2	38.6
		Or	49.1	46.5	48.3	45.7	47.2
		Re	2.4	2.4	4.4	2.0	1.5
		总浓度(T _{Cu/Zn})	2.4	2.4	4.4	2.0	1.5
	30	Ex	1.7	2.5	2.1	2.1	3.6
		C	1.9	6.4	4.2	7.7	6.9
		Ox	37.3	38.7	37.3	39.0	35.6
		Or	52.6	50.1	52.0	49.3	50.9
		Re	2.4	2.4	4.4	2.0	3.1
		总浓度(T _{Cu/Zn})	2.4	2.4	4.4	2.0	3.1
	15	Ex	0.7	1.4	0.8	0.9	2.2
		C	45.3	41.3	32.2	36.8	36.8
		Ox	42.2	36.7	36.7	39.4	37.1
		Or	9.9	19.5	25.0	18.6	22.4
		Re	1.3	1.0	5.2	4.3	1.5
		总浓度(T _{Cu/Zn})	1.3	1.0	5.2	4.3	1.5
Zn	30	Ex	0.7	1.4	0.8	0.9	2.2
		C	45.4	41.4	32.3	36.7	37.0
		Ox	43.6	38.4	38.4	41.0	38.8
		Or	8.9	17.6	22.7	16.7	20.4
		Re	1.5	1.1	5.8	4.7	1.7
		总浓度(T _{Cu/Zn})	1.5	1.1	5.8	4.7	1.7

注：分配系数是指各形态占总量的百分数。PC 为 partition coefficient(分配系数)。

布范围在 0.43~2.55 之间,平均为 1.24;碳酸盐结合态 Cu/Zn 比值在 0.04~0.16 之间,平均为 0.08;铁锰氧化态 Cu/Zn 比值在 0.24~0.9 间,平均为 0.52;有机结合态 Cu/Zn 比值在 0.49~4.77 间,平均为 1.64;残渣态在 0.16~1.79 间,平均为 0.80。和样品总的 Cu/Zn 值相比,可交换态、有机结合态的 Cu/Zn 比值明显上升,碳酸盐结合态的 Cu/Zn 比值明显下降,铁锰氧化态的 Cu/Zn 值基本不变,残渣态的 Cu/Zn 值无明显变化规律。粪肥由腐解 15 d 到 30 d,可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态和残渣态中 Cu/Zn 变化较小,分别下降了 5.3%、5%、7.7%、6.6%;而有机结合态中 Cu/Zn 值变化较大,平均增加了 24.5%。说明,随腐解进行,铜锌形态竞争的结果使有机结合态铜大量增加。

2.4 各形态 Cu/Zn 值与粪肥总的 Cu/Zn 值的关系

各形态 Cu/Zn 比值与粪肥的 Cu/Zn 比值进行相关分析(见表 6),结果表明,腐解 15 d 时,除去残渣态的 Cu/Zn 比值外,各形态的 Cu/Zn 比值与未腐解粪肥原样或腐解样品的 Cu/Zn 比成显著或极显著正相关。腐解 30 d 时,各形态的 Cu/Zn 比值与未腐解粪肥原样的 Cu/Zn 比值呈显著或极显著相关,而与腐解样品的 Cu/Zn 比值,除去残渣态的 Cu/Zn 比值达不到显著

表 5 不同形态的 Cu/Zn

Table 5 The ratio of Cu to Zn in different fractions

腐解时间/d	形态	鸡粪种类				
		M1	M2	M3	M4	M5
15	Ex	2.55	0.96	1.31	0.94	0.43
	C	0.16	0.08	0.06	0.07	0.04
	Ox	0.90	0.57	0.51	0.37	0.24
	Or	4.77	1.2	0.9	0.84	0.49
	Re	1.79	1.18	0.39	0.16	0.49
	总浓度(T _{Cu/Zn})	0.96	0.5	0.46	0.34	0.23
30	Ex	2.42	0.91	1.25	0.89	0.4
	C	0.16	0.08	0.06	0.07	0.05
	Ox	0.83	0.53	0.47	0.34	0.22
	Or	5.95	1.5	1.12	1.05	0.61
	Re	1.63	1.1	0.37	0.15	0.46
	总浓度(T _{Cu/Zn})	1.00	0.53	0.49	0.36	0.25

表 6 各个形态 Cu/Zn 与粪肥总的 Cu/Zn 的相关系数

Table 6 The correlation coefficients of the Cu/Zn ratios in every fraction and the total Cu/Zn ratios of the raw materials or the composts

腐解时间/d		形态				
		Ex	Ca	Ox	Or	Re
15	D-Cu/Zn	0.973 3**	0.968 6**	0.987 2**	0.966 7**	0.879 0*
	F-Cu/Zn	0.970 5**	0.969 9**	0.983 7**	0.971 8**	0.887 3*
30	D-Cu/Zn	0.972 6**	0.966 2**	0.988 3**	0.964 9**	0.871 3
	F-Cu/Zn	0.970 2**	0.969 4**	0.983 8**	0.971 8**	0.878 8*

注：D-Cu/Zn 为腐解粪肥样品的 Cu/Zn 比；F- Cu/Zn 为未腐解粪肥的 Cu/Zn 比；n-2=3,r_{0.01}=0.959;r_{0.05}=0.878。

相关外,其他各形态的 Cu/Zn 比值均与腐解样品的 Cu/Zn 比值呈显著或极显著正相关。

3 讨论

鸡粪经好氧高温堆腐处理后,粪肥中重金属总浓度普遍升高,表现为明显的“浓缩效应”现象^[10,13]。堆肥过程随着物质组成的分解和转化,会影响到重金属形态分布。粪肥腐解过程一方面会产生有机酸的小分子物质,增强碳酸盐或铁锰氧化物的溶解性,另一方面也次生成成高分子的腐殖物质——胡敏酸、富里酸和胡敏素等^[14,15]。腐殖物质既可以与铜锌等重金属直接络合形成络合物或螯合物,减少铜锌与其他矿物质结合,又可以通过掩盖、竞争一些吸附位等,阻止重金属等被其他矿物质所吸附。因此,粪肥腐解过程有机物质对重金属形态具有重要的调控功能。研究表明,在铜锌共存的情况下,有机结合态铜的分配系数明显

高于有机结合态锌的分配系数,且随着腐解时间的延长,有机结合态铜分配系数进一步提高,而有机结合态锌分配系数下降。这一方面与铜锌共存的情况下,腐殖物质一般与铜的络合强度大于与锌的络合强度有关^[6];另一方面也与随着腐解进行腐殖质的结构越来越复杂有关。过去研究表明,随着腐殖物质芳构化度增大,腐殖物质与铜的络合进一步加强,会进一步促进有机结合态铜的形成^[7]。有机结合态的 Cu/Zn 比升高也进一步说明了这一现象。对于铜而言,随着有机结合态铜的大量形成和增加,不利于碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态的形成,因此,这两种形态的分配系数有一定程度的减小。相反,对于锌而言,有机结合态锌受到铜的竞争分配系数反而降低,不利于有机结合态新的形成,从而使锌较多的向氧化物结合态和碳酸盐结合态转化。铜锌之间的竞争除与铜锌离子本身的特性有关外,也与铜锌的数量、浓度多少有关,因此,大部分形态的 Cu/Zn 比与粪肥本身的 Cu/Zn 比呈显著或极显著正相关。

随着腐解进行,交换态铜的分配系数有所降低,有机结合态铜的分配系数有所升高。对于铜而言,交换态铜属于生物可利用铜,有效性或毒性高;有机结合态铜因为稳定性过高、结构过于复杂而生物有效性较低^[18,19]。因此,从铜的生物毒性考虑,适当延长粪肥的腐解期,促进有机结合态铜的形成,能够降低铜的生物毒性和环境危害;而从铜的生物有效性考虑,粪肥则不易堆腐时间过长,否则铜的生物有效性降低。

参考文献:

- [1] Cang L, Wang Y J, Zhou D M, et al. Study of heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu province[J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(3): 371–374.
- [2] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392–397.
- LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(2): 392–397.
- [3] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales[J]. *Biore-source Technology*, 1999, 70(2): 23–31.
- [4] Hsu J H, Lo S L. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure[J]. *Environ Pollut*, 2001, 114(1): 119–127.
- [5] 张 姝. 饲料污染对生态环境和人类健康的影响及控制对策[J]. 饲

料工业, 2002, 23(3): 42–45.

ZHANG Mei. Feed pollution has influence on ecological environment and human health and control measure[J]. *Feed Industry*, 2002, 23(3): 42–45.

- [6] Meek B D. The effect of large application of manure on movement of nitrates and carbon in an irrigated desert soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1974, 21(3): 253–258.
- [7] Donahue R L. An Introduction to Soils and Plant Growth. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1977.
- [8] Reinikainen O, Herranen M. Different methods for measuring compost stability and maturity[C]//Proceedings of the international symposium on composting of organic matter. Belgium; International Society for Horticultural Science, 2001, 27(3): 99–102.
- [9] Perez-Cid B, Fernandez A, Fernandez G E, et al. Use of microwave single extractions for metal fractionation in sewage sludge samples [J]. *Anal Chim Acta*, 2001, 431(2): 209–218.
- [10] 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.
- ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, GAO Ding, 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.
- [11] 鲍士旦主编. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- BAO Shi-dan. Soil analyze of Agriculture and chemistry[M]. China agricultural Publisher, 2005.
- [12] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Anal Chem*, 1979, 51(7): 844–851.
- [13] 李国学, 张 福. 固体废弃物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 113–121.
- LI Guo-xue, ZHANG fu. The solid reject compostion and organic duplicate mixes production[M]. Beijing: Chemistry and Industry publisher, 2000. 113–121.
- [14] Shoko Inaba, Chisato Takenak . Effects of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability for lettuce sprouts[J]. *Environment International*, 2005, 206(31): 603–608.
- [15] 王旭东, 关文玲. 纯有机物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, 2001, 29(5): 88–91.
- WANG Xu-dong, GUAN Wen-ling. Property changes of humic substances from organic materials in different decomposing period[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2001, 29(5): 88–91.
- [16] Stevenson F J. Humus chemistry: genesis composition reaction[J]. *John Wiley & Sons, New York*, 1982, 23(6): 53–67.
- [17] Antoniadis V, Alloway B J. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils[J]. *Environ Pollut*, 2002, 117(3): 515–521.
- [18] Wang Jing-Guo. Plant nutrition soil chemistry[J]. *Beijing Agricultural College Publisher*, 1995, 56(4): 142–158.
- [19] DanLevanon, Danied Pluda. Chemical physical and biological criteria for maturity in composts for organic farming[J]. *Compost Science & Utilization*, 2002, 10(4): 339–347.