

# 高温堆肥对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的作用

张树清, 张夫道, 刘秀梅, 王玉军, 张建峰

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 【目的】规模化养殖畜禽粪中含有多种抗生素药残和重金属元素, 其对畜禽粪在农业中利用的影响已引起广泛的重视。通过试验研究探索对畜禽粪中抗生素降解和重金属钝化的技术途径。【方法】利用高温堆肥方法, 比较不同堆肥处理对畜禽粪中四环素类抗生素 TTC (四环素)、OTC (土霉素) 和 CTC (金霉素) 的降解特点以及对重金属 Cu、Zn、Cr、As 元素水溶态的影响。【结果】不同堆肥处理的 TTC、OTC、CTC 均以 P+S 处理、C+S 处理去除效果最好; 添加专门选择的 BM 菌剂可以促进四环素类抗生素的降解, 添加 BM 菌剂处理对 TTC、OTC、CTC 的降解去除效果好于 P+S + TCs 处理和 C+S + TCs 处理。所有处理对 OTC 降解去除效果较差, C+S + OTC 处理去除率最低为 40.23%。所有堆肥处理降解去除率由大到小的顺序均为: TTC > CTC > OTC。添加风化煤堆肥处理对水溶态 Cu、Zn、Cr、As 的钝化效果显著地好于 P+S 和 C+S 处理。猪粪堆肥添加风化煤钝化剂处理的 Cu、Zn、Cr、As 元素水溶态含量, 堆肥后比堆肥前分别减少了 6.17%、6.40%、4.17% 和 1.83%。鸡粪堆肥添加风化煤钝化剂的处理, 堆肥后比堆肥前分别减少了 7.07%、5.69%、5.50% 和 2.07%。【结论】在不同堆制条件下, 高温堆肥对四环素类抗生素具有不同程度的降解效果, 外源添加有益降解菌剂有助于抗生素药物残留的去除; 高温堆肥也可以降低重金属生物有效性, 风化煤对畜禽粪堆肥中的水溶态重金属元素具有钝化作用。

**关键词:** 高温堆肥; 四环素类抗生素; 重金属; 降解; 钝化

## Degradation of Antibiotics and Passivation of Heavy Metals During Thermophilic Composting Process

ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, WANG Yu-jun, ZHANG Jian-feng

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** 【Objective】The problem that there are various antibiotic medicines and heavy metal elements in excrements of livestock and poultry have been concerned on the farm utilization extensively. The techniques for the antibiotics degradation and heavy metals passivation were studied in the experiments. 【Method】As composting is a new alternative bioremediation technology for treatment of organic pollutants and heavy metals, two experiments were conducted to evaluate the effect of using thermophilic composting to break down the content of tetracyclines(TTC, OTC, CTC) and H<sub>2</sub>O extractible of heavy metals(Cu, Zn, Cr, As). 【Results】The result of TCs degradation test indicated that the degradation of TTC, OTC and CTC using P+S and C+S in all treatments was effective, but in comparison, the addition of BM bacterium for TCs degradation in treatment was more effective, and its biodegradation rate was higher than that of P+S+TCs and C+S+TCs treatment. The biodegradation rate of OTC was the lowest in all treatments, and the rate of C+S+OTC treatment was 40.23%. The order of the three TCs biodegradation rate was TTC > CTC > OTC. The air-slaked coal has a passivation effect on the heavy metal elements in excrements of livestock and poultry. The result of heavy metal passivation test showed that the effect of addition of air-slaked coal to H<sub>2</sub>O extractible content of heavy metals, such as Cu, Zn, Cr and As, were obvious, the passivation effect of ari-slaked coal treatment was better than that of control. The H<sub>2</sub>O extractible content of heavy metals of Cu, Zn, Cr and As, after composting of pig manure, reduced by 6.17%, 6.40%, 4.17% and 1.83%, respectively, meanwhile, the H<sub>2</sub>O extractible contents after composting of chicken manure reduced by 7.07%,

收稿日期: 2004-08-25; 接受日期: 2006-01-04

基金项目: 农业部科技成果转化资金项目 (02EFN216900718)

作者简介: 张树清 (1966-) 男, 山东诸城人, 副研究员, 博士, 研究方向为农业废弃物处理利用与新型肥料。Tel: 010-68918663; E-mail: daividzsq@163.com; 通讯作者张夫道, 男, 研究员, 博士生导师, Tel: 010-68918669, Email: fudaozhang@sohu.com

5.69%, 5.50% and 2.07%, respectively. 【Conclusion】 With the different thermophilic composting conditions, tetracyclines antibiotics can be degraded, and the addition of foreign beneficial bacterium can reduce residues in antibiotic medicine. Thermophilic composting also can lower the effects of heavy metals on plants. Air-slaked coal has passivation function on extractible heavy metals.

Key words: Composting; TCs antibiotics; Heavy metal; Degradation; Passivation

## 0 引言

【本研究的重要意义】堆肥法 (composting) 作为处理固体有机废物 (包括畜禽粪便、污水、污泥和城市生活垃圾等), 使之无害化、资源化的一种有效手段, 长久以来在国内外广泛地被研究和应用<sup>[1]</sup>。随着中国规模化畜禽养殖业的快速发展, 源于饲料重金属添加剂和兽药残留污染的畜禽粪大量产生, 并在农田中推广施用, 这将会造成生态环境风险和土壤质量退化, 进而有可能导致农产品质量下降。【前人研究进展】目前, 堆肥技术研究内容主要集中在堆肥物料的成分变化 (如重金属、有机污染物、可溶性有机物、氮、磷、钾、碳等)、温度、湿度和过程控制、堆肥中微生物的变化、臭味的产生和控制、堆肥腐熟度的评价、堆肥调理剂、堆肥利用等方面<sup>[1-13]</sup>。【本研究切入点】在人工控制条件下进行高温堆肥, 利用复合微生物或非金

属矿物对畜禽粪中兽药残留降解和重金属钝化控制的研究国内尚属空白, 因此, 作者试图通过采用高温堆肥方法, 外源添加微生物菌剂和风化煤分别降解畜禽粪中兽药残留和钝化重金属元素。【拟解决的问题】本试验研究比较了堆肥中四环素类抗生素 (TTC、OTC、CTC) 及重金属 (As、Cr、Cu、Zn) 的降解和钝化特点, 以便为今后规模化养殖畜禽粪无害化、资源化、产业化提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 堆肥材料及制作

堆肥原料采用新鲜的猪粪、鸡粪及麦秸, 来源于北京市农业局土肥站大兴畜禽粪有机肥产业化示范工厂。堆肥原材料性质、四环素类 (TTC、OTC、CTC) 抗生素及重金属 (As、Cr、Cu、Zn) 含量见表 1、表 2。

表 1 堆肥原材料性质

Table 1 Physical and chemical properties of raw materials for composting

堆肥材料 Composting materials	有机碳 Org.C (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	C/N	全磷 Total P (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K (g·kg <sup>-1</sup> )	pH	含水量 Water content (%)
麦秸 Wheat straw	325.0	4.10	79.3	0.86	3.14	/	8.70
猪粪 Pig manure	468.2	24.46	19.14	21.25	14.53	7.60	69.8
鸡粪 Chicken manure	348.5	20.30	17.16	16.58	19.32	7.80	62.1

表 2 堆肥原料中四环素类抗生素及重金属含量

Table 2 Content of TCs antibiotics and heavy metals in composting materials

堆肥材料 Composting materials	四环素 TTC(mg·kg <sup>-1</sup> )	土霉素 OTC(mg·kg <sup>-1</sup> )	金霉素 CTC(mg·kg <sup>-1</sup> )	砷 As (mg·kg <sup>-1</sup> )	铬 Cr (mg·kg <sup>-1</sup> )	铜 Cu (mg·kg <sup>-1</sup> )	锌 Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )
麦秸 Wheat straw	/	/	/	0.34	3.25	15.10	18.82
风化煤 Air-slaked coal	/	/	/	0.62	5.21	18.65	54.32
猪粪 Pig manure	19.34	12.45	15.66	4.25	18.82	134.40	418.54
鸡粪 Chicken manure	9.87	4.23	3.74	1.26	9.67	150.35	350.38

将切成 5 cm 左右的麦秸与畜粪按 C/N 比为 20~25 的比例均匀地混合, 分别装填在堆肥发酵桶内 (其规格为 1 m×φ0.8 m), 堆制 35 d。发酵期水分控制在 60%~65%。堆肥进程中, 根据堆体温度变化, 采取调节供气量和翻堆措施, 尽可能延长最佳发酵时间。

供气方式采用静态强制通风, 从发酵池底部供气, 前期的通气量为 30 L·min<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>(堆体), 中前期减半, 后期停止供气。根据堆体温度变化, 分别在堆制第 3 天和第 10 天进行翻堆。在堆肥发酵过程中, 试验处理添加 BM 菌剂 (一种芽孢杆菌生物复合制剂) 增强四环

素类抗生素生物降解作用；畜禽粪中添加风化煤增强重金属元素钝化效果。

## 1.2 堆肥试验方案

本试验共设置 2 组方案，每组方案设 6 个处理。

具体方案如下：

方案 I：抗生素降解试验

处理 1 猪粪+麦秸 (P+S)

处理 2 猪粪+麦秸+四环素类抗生素 (TTC、OTC、CTC 各添加  $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，下同；P+S+TCs)

处理 3 猪粪+麦秸+四环素类抗生素+1%BM 菌剂 (P+S+TCs+BM)

处理 4 鸡粪+麦秸 (C+S)

处理 5 鸡粪+麦秸+四环素类抗生素 (C+S+TCs)

处理 6 鸡粪+麦秸+四环素类抗生素+1%BM 菌剂 (C+S+TCs+BM)

方案 II：重金属钝化试验

处理 1 猪粪+麦秸 (P+S)

处理 2 猪粪+麦秸+10%风化煤 (P+S+FA)

处理 3 鸡粪+麦秸 (C+S)

处理 4 鸡粪+麦秸+10%风化煤 (C+S+FA)

## 1.3 测定项目方法

每个堆肥处理在堆制的第 0、10、20、30、35 天采集混合样，共采样 5 次。每日测定堆体温度和气温变化。有机碳采用重铬酸钾法；全氮采用凯氏定氮法；全磷采用钒钼黄比色法；全钾采用火焰光度计法；pH 值采用电导法；含水量采用质量法测定。四环素类抗生素采用 MCI-Vaine- $\text{Na}_2\text{EDTA}$  缓冲液提取，用草酸甲醇洗脱净化，美国惠普 HP-1100 型高效液相色谱仪测定。铬、铜、锌全量采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  消化，原子吸收分光光度计测定；砷全量测定采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  消化，二乙基二硫代氨基甲酸银比色法。水溶态砷、铬、铜、锌用蒸馏水提取测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆制过程基本理化性质的变化

堆肥初期，物料中易分解的有机物质在好氧微生物的作用下迅速分解，碳氮比降低，并释放热能，导致第 2 天堆肥温度迅速升至  $72^\circ\text{C}$ 。此后，由于供气充足，水分蒸发较盛，带走大量热量，导致第 3 天堆肥温度迅速下降，此时，进行第 1 次翻堆。供气量减半后并重新调回含水量，堆肥温度又快速回升至  $60^\circ\text{C}$  左右， $\text{NH}_3$  的释放增加，pH 值降低，进入一个动态平衡，

堆肥进行到第 10 天，堆肥温度又以较快的速度下降，此时进行第 2 次翻堆。此后堆肥温度自然降低，并没有出现增温 ( $60\sim 70^\circ\text{C}$ ) 现象，到第 35 天堆肥发酵基本结束，达到腐熟、稳定期。此时，堆肥不再吸引蚊蝇，令人讨厌的臭味消失，由于真菌的生长堆肥出现了白色或灰白色的斑点，堆肥产品呈现疏松的团粒结构。

### 2.2 不同堆肥处理对四环素类抗生素的降解效果

不同堆肥处理试验结果表明 (图 1~6)，不添加四环素类抗生素、添加四环素类抗生素及增加 BM 菌剂的 3 个不同堆肥处理对四环素类抗生素的降解效果不同，但总体去除残留的趋势一致。由于堆肥原料中猪粪、鸡粪含有的四环素种类和数量有所差异，所以猪粪、鸡粪堆肥相关处理的初始降解的残留量差异不明显。随着堆制时间的延续，不同种类的四环素抗生素去除率增加。相比而言，猪粪的降解效果好于鸡粪。由图 1~6 可以看出，无论猪粪、鸡粪，不同堆肥处理的 TTC、OTC、CTC 均以 P+S 处理、C+S 处理去除效果最好，其次是添加 BM 菌剂处理。其降解去除率由大到小的顺序均为：TTC>CTC>OTC。P+S 处理对 TTC、OTC、CTC 的去除率分别为 85.97%、84.46%、75.60%；C+S 处理的去除率分别为 66.56%、82.44% 和 72.95%。均高于 P+S+TCs 处理、C+S+TCs 处理、P+S+TCs+BM 处理及 C+S+TCs+BM 处理。相比而言，所有处理对 OTC 降解去除效果较差，C+S+OTC 处理去除率最低为 40.23%。

从试验结果可知，单纯的猪粪、鸡粪堆肥和添加专门选择的 BM 菌剂可以促进四环素类抗生素的降

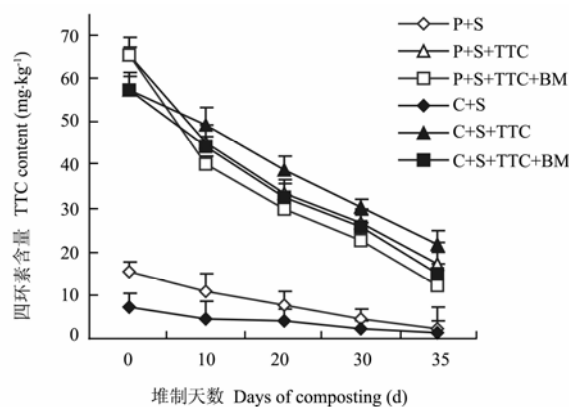


图 1 不同堆肥处理对四环素的降解效果

Fig.1 Effect of TTC degradation in different treatments of composting

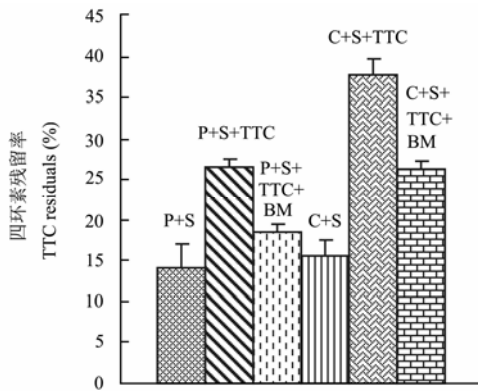


图 2 不同堆肥处理四环素残留率

Fig.2 Percentage of TTC residuals in different treatments of composting

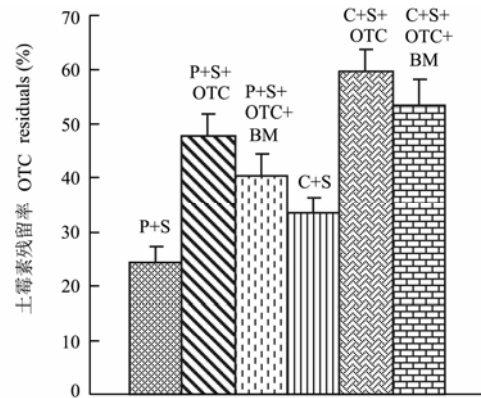


图 4 不同堆肥处理土霉素的残留率

Fig.4 Percentage of OTC residuals in different treatments of composting

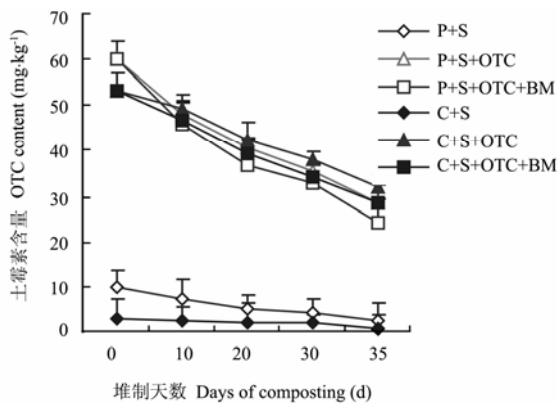


图 3 不同堆肥处理对土霉素的降解效果

Fig.3 Effect of OTC degradation in different treatments of composting

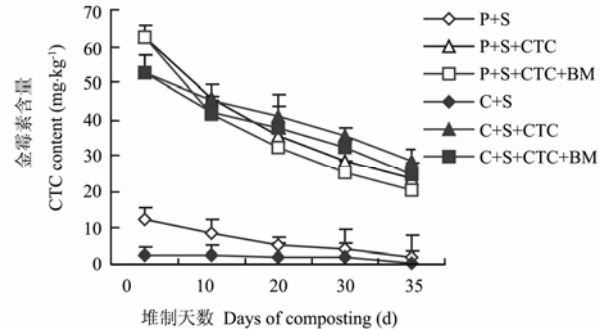


图 5 不同堆肥处理对金霉素的降解效果

Fig.5 Effect of CTC degradation in different treatments of composting

解, 均对 TTC、OTC、CTC 的降解去除效果好于添加秸秆处理 (P+S+TCs 处理和 C+S+TCs 处理), 其对猪粪堆肥 TTC、OTC、CTC 去除率分别为 81.46%、59.36%和 66.85%。对鸡粪堆肥 TTC、OTC、CTC 去除率分别为 73.73%、46.62%和 53.02%。

### 2.3 不同堆肥处理对重金属元素的钝化效果

一般来说, 堆肥化对重金属的含量没有任何明显的影响, 但对其存在形态或者活性可能有所影响。重金属的生物有效性与重金属的形态有密切关系<sup>[2,4,5]</sup>。由表 3 可见所有处理堆肥中重金属全量变化, Cu、Zn、Cr 及 As 的全量显著低于原猪粪、鸡粪。从表 4 可以看出, 无论猪粪还是鸡粪堆肥, 不同处理中 Cu、Zn、Cr、As 元素水溶态含量堆肥后均较堆肥前下降。比较

4 种重金属元素水溶态含量占总量的百分含量在堆肥前后的变化: 对猪粪堆肥来说, Cu、Zn、Cr、As 元素在对照在猪粪+麦秸 (P+S) 处理中的水溶态含量, 堆肥后比堆肥前分别减少了 5.09%、6.13%、2.92%和 1.11%, 而添加风化煤钝化剂 (P+S+FA) 的处理, 堆肥后比堆肥前分别减少了 6.17%、6.40%、4.17%和 1.83%。对鸡粪堆肥来说, Cu、Zn、Cr、As 元素在鸡粪+麦秸 (C+S) 处理中水溶态含量, 堆肥后比堆肥前分别减少了 5.90%、5.50%、3.65%和 1.47%, 而添加风化煤钝化剂 (C+S+FA) 的处理, 堆肥后比堆肥前分别减少了 7.07%、5.69%、5.50%和 2.07%。由此可见, 风化煤对畜禽粪堆肥中的 Cu、Zn、Cr、As 元素水溶态具有钝化作用。

由表 4 可以看出, 各处理对水溶态重金属都起到了钝化作用, 且各处理之间对重金属的钝化效果差异

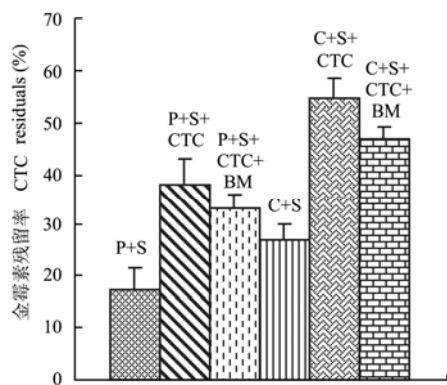


图 6 不同堆肥处理金霉素的残留率

Fig.6 Percentage of CTC residuals in different treatments of composting

不同。对 Cu、Cr 来说，以 C+S+FA 处理的钝化效果最好，明显好于其它处理；对 Zn 来说，以 P+S+FA 处理钝化效果最好；对 As 来说，以 C+S+FA 处理的钝化效果最好，与其它处理差异较显著；与 Cu、Zn、Cr 比较，As 的钝化效果较差，这可能与 As 是类金属的性质有关。

### 3 讨论

本试验研究着重在探讨高温堆肥条件下，利用复合微生物菌剂或外源添加物对堆肥材料中残留抗生素和重金属进行降解和钝化的技术方法。试验中采用的抗生素品种均为四环素类抗生素（TCs），其在化学结构上都属于氢化并四苯环衍生物，由放线菌属产生。TCs 母核由 A、B、C、D 4 个环组成，主要官能团包

表 3 不同堆肥处理对铜、锌、铬和砷全量和水溶态含量的影响

Table 3 Effect of different composts on total content and H<sub>2</sub>O extractible Cu, Zn, Cr and As

处理 Treatments		水溶态 H <sub>2</sub> O extractible (mg·kg <sup>-1</sup> )		全量 Total content (mg·kg <sup>-1</sup> )	
		堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting	堆肥前 Before composting	堆肥后 After composting
Cu	P+S	10.83	5.35	110.54	113.75
	P+S+FA	9.65	2.78	112.41	115.53
	C+S	12.34	5.58	116.55	118.78
	C+S+FA	10.88	2.56	118.42	120.66
Zn	P+S	28.51	7.79	338.60	339.83
	P+S+FA	26.34	4.21	344.03	345.67
	C+S	20.33	5.64	267.49	269.04
	C+S+FA	19.69	4.09	272.92	274.36
Cr	P+S	1.45	1.01	15.71	16.00
	P+S+FA	1.21	0.56	16.23	16.98
	C+S	0.83	0.58	8.07	8.73
	C+S+FA	0.74	0.28	8.59	9.01
As	P+S	0.31	0.28	3.47	3.68
	P+S+FA	0.27	0.21	3.53	3.81
	C+S	0.09	0.08	1.03	1.10
	C+S+FA	0.09	0.07	1.09	1.13

表 4 不同堆肥处理水溶态重金属含量变化差值

Table 4 Difference of the contents of H<sub>2</sub>O extractible heavy metals in different compost treatments

处理 Treatments	Cu (%)	Zn (%)	Cr (%)	As (%)
P+S	5.09Cd	6.13Bb	2.92Dd	1.11Ad
P+S+FA	6.17Bb	6.40Aa	4.17Bb	1.83Ab
C+S	5.90Bc	5.50Cd	3.65Cc	1.47Ac
C+S+FA	7.07Aa	5.69Cc	5.50Aa	2.07Aa

不同大小写字母分别表示  $P<0.01$  和  $P<0.05$  显著水平

Different capital and small letter means significant at  $P<0.01$  and  $P<0.05$  level

括 C<sub>4</sub> 位的二甲氨基、C<sub>2</sub> 位的酰胺基、C<sub>10</sub> 位的酚羟基等。TTC、OTC、CTC 具有相似的理化性质，均为黄色结晶粉末，味苦，难溶于水，属于酸碱两性物质<sup>[14]</sup>。以往的兽药机理研究也证明，TCs 不稳定的 A 环手性原子 C<sub>4</sub> 和 C 环 C<sub>6</sub> 的羟基易发生差向异构和降解反应<sup>[14]</sup>。从本试验结果中可以看出，不同堆肥处理的 TTC、OTC、CTC 均以 P+S 处理、C+S 处理去除效果最好，其降解去除率的多少顺序均为：TTC>CTC>OTC。由此可以说明四环素类抗生素的降解性能的强弱主要取决于其本身的结构和理化性质。P+S 处理对 TTC、OTC、CTC 的去除率分别高于 P+S+TCs 处理和 P+S+TCs+BM 处理；C+S 处理的去除率分别高于 C+S+TCs 处理和 C+S+TCs+BM 处理。究其原因可能是外源添加四环素类抗生素量较多，抑制了堆肥中微生物的繁殖和活力，产生了毒害作用，从而导致对四环素类抗生素降解能力的下降。但在相同条件下，P+S+TCs+BM 处理和 C+S+TCs+BM 处理降解效果相应地好于 P+S+TCs 处理和 C+S+TCs 处理，可见外源添加有益降解菌剂有助于抗生素药物残留的去除。

堆肥中重金属的存在形态可分为：水溶态（H<sub>2</sub>O 可提取态），交换态（CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>、KNO<sub>3</sub>、NaAc 等），有机结合态（Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 或 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等），碳酸盐和硫化物结合态（EDTA 或 DTPA 等）及残渣态（HNO<sub>3</sub>、HF、HClO<sub>4</sub> 或混合酸可提取态）等，其中前 3 种形态重金属的生物有效性较高，而后 2 种的生物有效性很低<sup>[1,2,4,5]</sup>。水溶态是重金属中移动性最强的形态，是植物最易吸收也是对食物链污染潜力最大的形态<sup>[1]</sup>。故本试验研究了重金属在堆肥前后的变化和添加风化煤作为重金属钝化剂对畜禽粪中 Cu、Zn、Cr、As 水溶态的影响。堆肥试验结果表明，所有处理中的 Cu、Zn、Cr 及 As 重金属含量均低于原猪粪、鸡粪背景值，这是由于堆肥过程中加入了麦秸或风化煤所起的稀释作用。堆肥后上述 4 种重金属的浓度均比开始时略有增加，这可能是由于水分散失，CO<sub>2</sub> 及挥发性物质挥发损失，以及堆体变小引起堆料中重金属浓缩所致。无论猪粪还是鸡粪，不同处理中 Cu、Zn、Cr、As 元素水溶态含量堆肥后均较堆肥前下降；添加风化煤钝化剂处理的 4 种重金属水溶态含量比不加风化煤处理的减少得多，说明风化煤对畜禽粪堆肥中重金属元素水溶态具有钝化作用。其原因可能是在所有的堆肥处理中都伴随着堆肥过程发生重金属形态的转化，水溶态重金属可能转化成有机结合态、硫化物结合态、铁锰

氧化物态。风化煤的加入促进了腐殖质的形成，从而加快了重金属元素水溶态的转化。同时这也说明了重金属的钝化效果不能单纯地看其水溶态含量的变化，必须考虑重金属其它形态，并且结合生物效应试验来确定。在实际生产应用中，需要借助材料学科的发展，筛选资源好、效果佳、价格低的钝化剂，避免畜禽粪使用造成农田二次污染的发生，在这些方面还有待于进一步研究。

## 4 结 论

4.1 在猪粪、鸡粪和麦秸分别混合堆制条件下，高温堆肥对四环素类抗生素主要种类具有不同程度的降解效果。不同堆肥处理的 TTC、OTC、CTC 均以 P+S 处理、C+S 处理去除效果最好，其次是添加 BM 菌剂处理，其降解去除率由大到小的顺序均为：TTC>CTC>OTC，说明四环素类抗生素的降解性能的强弱与其本身的结构和理化性质有关。所有处理对 OTC 降解去除效果较差，C+S+OTC 处理去除率最低为 40.23%。外源添加有益降解菌剂有助于抗生素药物残留的去除。

4.2 由于规模化养殖畜禽粪中富含重金属元素，所以其农业利用是一个更应该引起广泛重视的问题。通过高温发酵使其中的重金属生物有效性降低，添加钝化剂对堆肥中重金属 Cu、Zn、Cr、As 元素形态的影响显著。无论猪粪还是鸡粪，添加风化煤堆肥处理对水溶态 Cu、Zn、Cr、As 的钝化效果显著地好于 P+S 和 C+S 处理。从对水溶态重金属的钝化效果来说，风化煤目前是一种有效的钝化剂。

## References

- [1] 李国学, 张福锁. 固体废弃物堆肥化与有机复混肥生产. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- Li G X, Zhang F S. *Solid Wastes Composting and Organic Compound Fertilizers Production*. Beijing: Chemical Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 温琰茂, 鲁艳兵. 施用城市污泥的土壤重金属生物有效性. 中山大学学报(自然科学版), 1999, 38(4): 97-101.
- Wen Y M, Lu Y B. Study on availability control of heavy metals in soil applied with municipal sewage sludge. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1999, 38(4): 97-101. (in Chinese)
- [3] 张增强, 唐新保. 污泥堆肥化处理对重金属形态的影响. 农业环境保护, 1996, 15(4): 188-190.

- Zhang Z Q, Tang X B. Effect of sewage sludge composting to heavy metals form. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4):188-190. (in Chinese)
- [4] 蔡全英, 曾巧云, 莫测辉, 吴启堂, 蒋成爱. 城市污泥与稻草堆肥中铜锌的形态分布研究. *农业环境科学学报*, 2003, 22: 458-462.
- Cai Q Y, Zeng Q Y, Mo C H, Wu Q T, Jing C A. Distribution of forms for copper and zinc in composition of municipal sludge with rice straw. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22: 458-462. (in Chinese)
- [5] 李国学, 孟凡乔, 姜华, 史雅娟. 添加钝化剂对污泥堆肥处理中重金属(Cu, Zn, Mn)形态影响. *中国农业大学学报*, 2000, 5(1): 105-111.
- Li G X, Meng F Q, Jang H, Shi Y J. Studies on the effect of stabilizing materials to the status of heavy metals (Cu, Zn, Mn) during composting of sewage sludge. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(1): 105-111. (in Chinese)
- [6] 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂, 王伯光. 城市污泥堆肥处理过程中有机污染物的变化. *农业环境保护*, 2001, 20(3): 186-189.
- Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, Wang P G. Variation of organic pollutants in treatment of sewage sludge during composting. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(3): 186-189. (in Chinese)
- [7] 朴哲, 崔宗均, 苏宝林. 高温堆肥的物质转化与腐熟进度关系. *中国农业大学学报*, 2001, 6(3):74-78.
- Piao Z, Cui Z J, Su B L. Relationship between the converse characteristics of substances and the decompose process in quick fermentation in compost system. *Journal of China Agricultural University*, 2001, 6(3): 74-78. (in Chinese)
- [8] 朴哲, 崔宗均, 温耀伟, 苏宝林. 高温堆肥体系中主要营养元素的动态变化. *中国农学通报*, 2001, 17(1): 17-19.
- Piao Z, Cui Z J, Wen Y W, Su B L. Dynamic change of major nutrition elements in fermentation and compost system. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, 17(1): 17-19. (in Chinese)
- [9] 丁文川, 李宏, 郝以琼, 曾晓岚. 污泥好氧堆肥主要微生物类群及其生态规律. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2002, 25(6): 113-116.
- Ding W C, Li H, Hao Y Q, Zeng X L. Research on main micro organism groups and their ecological law in aeration sludge composting process. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, 25(6): 113-116. (in Chinese)
- [10] 李承强, 魏源送, 樊耀波, 王敏健. 不同填充料污泥好氧堆肥的性质变化及腐熟度. *环境科学*, 2001, 22(3): 60-65.
- Li C Q, Wei Y S, Fan Y B, Wang M J. The character changes and maturity of sewage sludge aerobic composting with various bulking agents. *Environmental Science*, 2001, 22(3): 60-65. (in Chinese)
- [11] 黄国锋, 钟流举, 张振钿, 吴启堂. 有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价. *应用生态学报*, 2003, 14: 813-818.
- Huang G F, Zhong L J, Zhang Z T, Wu Q T. Physicochemical changes and maturity evaluation of solid organic waste compost. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14: 813-818. (in Chinese)
- [12] 袁月祥, 廖银章, 刘晓风, 郭鲁宏, 陈耀初. 有机垃圾发酵过程中的微生物研究. *微生物学杂志*, 2002, 22(1): 22-26.
- Yuan Y X, Liao Y Z, Liu X F, Guo L H, Chen Y C. Study on microbes in the fermentation of organic refuse. *Journal of Microbiology*, 2002, 22(1): 22-26. (in Chinese)
- [13] 王岩, 霍晓婷, 杨志丹, 娄新乾. 畜禽粪便堆肥化过程中的生物除臭及展望. *河南农业大学学报*, 2002, 36: 374-379.
- Wang Y, Huo X T, Yang Z D, Lou X Q. Bio-deodorization of offensive odor during composting treatment of livestock wastes and its prospect. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002, 36: 374-379. (in Chinese)
- [14] 李俊锁, 邱月明, 王超. 兽药残留分析. 上海: 上海科学技术出版社, 2002.
- Li J S, Qiu Y M, Wang C. *Analysis of Animal Drug Residues*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)