

四环素和土霉素对羊粪好氧堆肥过程的影响

温增欣, 索全义, 万宇宸, 王艳红

引用本文:

温增欣, 索全义, 万宇宸, 王艳红. 四环素和土霉素对羊粪好氧堆肥过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1397–1405.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0956>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源菌剂对猪粪堆肥质量及四环素类抗生素降解的影响

肖礼, 黄懿梅, 赵俊峰, 周莉娜

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 172–178 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.023>

青菜对三种土壤中典型抗生素的累积规律研究

王莉莉, 孙浩, 汪浪浪, 李学德

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1887–1896 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0215>

天津市家庭养殖环境中抗生素污染特征与风险评估

阮蓉, 张克强, 杜连柱, 丁工尧, 王素英, 支苏丽

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 202–210 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0694>

某规模化猪场废水中抗生素污染特征及生态风险评估

李盟军, 申健, 姚建武, 宁建凤, 王荣辉, 周凯军, 艾绍英

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 884–893 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1166>

生物炭对四环素污染土壤微生物群落结构的影响及环境因子关联的剂量效应分析

李慧君, 卫婷, 黄枫城, 陈艺杰, 李高洋, 张伟健, 吴伟健, 蔺中, 甄珍

农业环境科学学报. 2023, 42(1): 101–111 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0430>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

温增欣, 索全义, 万宇宸, 等. 四环素和土霉素对羊粪好氧堆肥过程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1397–1405.

WEN Z X, SUO Q Y, WAN Y C, et al. Effects of tetracycline and oxytetracycline on aerobic composting process of sheep dung [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1397–1405.

四环素和土霉素对羊粪好氧堆肥过程的影响

温增欣, 索全义*, 万宇宸, 王艳红

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要:为研究不同四环素类抗生素对畜禽粪污堆肥化学性质及酶学指标的影响,本试验共设置3个处理,即CK(不添加抗生素,纯羊粪)、TC(添加含 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 四环素的羊粪)和OC(添加含 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土霉素的羊粪),并将不同处理的羊粪进行好氧堆肥处理(使用玉米秸秆调节C/N约为30)。结果表明:TC和OC处理堆体高温期持续时间缩短,与CK相比,TC处理堆体总积温显著降低 $49.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($P<0.05$)。抗生素的添加使堆体pH、电导率与有机质分解速率受到一定程度影响。TC与OC处理使堆体过氧化氢酶活性显著降低 $0.24\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.13\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,脲酶活性显著增加 $17.38\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $20.94\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。研究表明,四环素类抗生素改变了堆肥过程中的化学性质和酶学指标,且不同种类抗生素影响的程度有差异,因此在堆肥发酵过程中要充分考虑到这种影响,合理控制发酵条件,保证堆肥发酵的腐熟度。

关键词:抗生素;堆肥;脲酶;过氧化氢酶

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2023)06-1397-09 **doi:**10.11654/jaes.2022-0956

Effects of tetracycline and oxytetracycline on aerobic composting process of sheep dung

WEN Zengxin, SUO Quanyi*, WAN Yuchen, WANG Yanhong

(College of Grassland and Resource Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China)

Abstract: Aerobic composting is the principal technique to ensure the resource and safety of livestock and poultry manure. Nevertheless, the residual antibiotics in the manure can affect the composting process as resistant drugs. In this study, the effects of different tetracycline antibiotics on the chemical properties and enzymatic indexes during composting were analyzed, in order to establish theoretical basis and technical resource for the regulation of the aerobic composting process of livestock and poultry manure. Three treatments were considered for the test as follows: CK (sheep manure without antibiotics), TC (sheep manure with tetracycline $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and OC (sheep manure with oxytetracycline $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). The different treatments of sheep manure were subjected to aerobic composting (C/N was adjusted to approximately 30/1 using corn straw). The results show that the high temperature period of TC and OC treatments were decreased. Compared with CK, the total accumulated temperature of TC treatment was significantly reduced by $49.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($P<0.05$). The addition of antibiotics slightly affected the potential of hydrogen, electrical conductivity and organic matter decomposition rate. Furthermore, TC and OC treatments significantly decreased and increased catalase and urease activities by $0.24\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ and $0.13\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, and by

收稿日期:2022-09-27 录用日期:2023-02-02

作者简介:温增欣(1997—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事农作物营养研究。E-mail:wenzengxin999@163.com

*通信作者:索全义 E-mail:paul98@sina.com

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2019MS03063)

Project supported: The Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China (2019MS03063)

17.38 mg·g⁻¹·d⁻¹ and 20.94 mg·g⁻¹·d⁻¹, respectively. From the above results, one can infer that tetracycline antibiotics alter the chemical properties and enzymatic indexes in the composting process, and the influence of different kinds of antibiotics varies. Thus, this effect should be fully considered in the composting process, and the conditions of fermentation should be highly considered to ensure complete decomposition.

Keywords: antibiotics; composting; urease; catalase

近年来,我国畜禽养殖业迅速发展,为了预防动物疾病、促进动物生长、提高养殖的经济效益,抗生素被广泛使用^[1-2]。但抗生素很难被动物吸收,有30%~90%的抗生素以原形通过粪便和尿液排出体外,导致抗生素在畜禽粪便中大量残留,造成环境污染^[3-5]。

畜禽粪便可通过好氧堆肥工艺进行资源化利用,堆肥过程是利用好氧微生物来降解有机物的过程,国内外已有许多学者进行了相关研究^[6-7]。梁天等^[8]发现堆肥 C/N 为 35 时的堆肥效果最好,徐宁^[9]的研究指出堆肥 pH 应控制在 5.5~9.0。上述研究表明,适宜的温度与 C/N 是堆肥正常进行的必要条件。抗生素是可以阻止其他活细胞发育的化学物质,它可以改变微生物的种类、数量以及群落结构功能,使堆肥方向发生改变,因此抗生素对堆肥过程的影响引起了关注^[10]。时红蕾等^[11]发现堆肥中存在的抗生素显著抑制了堆体温度的升高,增加了水溶性碳的残留,并阻碍了脱氢酶和脲酶活性。曹永森^[12]也发现抗生素对堆体温度影响较大,且对过氧化氢酶、蛋白酶、脲酶、纤维素酶以及蔗糖酶的活性普遍存在抑制现象。此外,还有研究证明磺胺二甲嘧啶的存在扰乱了堆体微生物多样性,短期内延缓了堆肥进程^[13]。因此,畜禽粪便中残留的抗生素会对堆体理化性质产生影响,但不同类型的抗生素对堆体产生的影响是否相同并不明确。

四环素类抗生素是畜禽养殖业中使用量最大的抗生素之一^[14],但有关四环素类抗生素对堆肥过程影响的研究相对较少,因此本研究将四环素和土霉素分别添加到畜禽粪便中,监测好氧堆肥过程中温度、pH、电导率、C/N、过氧化氢酶、脲酶等决定好氧堆肥良好运行的重要参数,为含四环素类抗生素的畜禽粪便资源化和无害化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥装置

采用自制的保温泡沫箱堆肥反应器,泡沫箱尺寸为 535 mm×395 mm×400 mm,在泡沫箱侧方插入两支水银温度计,并在泡沫箱上打小孔保持通风环境。

1.2 供试材料

供试抗生素为土霉素和四环素,抗生素购于兽药店,四环素规格≥98%,土霉素规格≥50%。

堆肥原料:以风干羊粪为主材料,玉米秸秆为辅材料进行堆料 C/N 的调节。堆肥原料的基本性质见表 1。

表 1 堆肥原料的基本性质(干基)

Table 1 Basic properties of compost materials (dry base)

堆肥原料 Raw materials	含水率 Moisture content/%	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	C/N
羊粪 Sheep manure	5.0	265.99	11.30	23.54
秸秆 Straw	8.7	407.88	4.85	84.10

1.3 试验设计与方法

试验在内蒙古农业大学遮雨棚进行,采用好氧堆肥的方式。每个堆肥反应器中加入 10 kg 风干羊粪,每千克羊粪中加入 218 g 玉米秸秆混合,调整 C/N 约为 30,将初始含水率调整为 60% 左右。四环素类抗生素添加量为 10 mg·kg⁻¹(按照各地区抽样检测平均残留水平添加,具体见表 2)。根据堆肥温度变化进行翻堆。

试验设置添加四环素(TC)、添加土霉素(OC)和不加抗生素(CK)3个处理,每个处理3次重复。试验从 2021 年 7 月 10 日至 8 月 13 日,共堆制 35 d,于堆肥的第 0、3、7、14、24、35 天,在堆体中对角线三点通体取样约 200 g。取得的样品均匀混合,风干后用于各

表 2 各地区抽样检测抗生素残留水平

Table 2 Antibiotic residue levels in all region by sampling

地区 Region	抗生素种类 Types of antibiotics	浓度范围 Range of concentration/ (mg·kg ⁻¹)	参考文献 Reference
吉林 Jilin	土霉素 Oxytetracycline	7.83~20.78	[15]
	四环素 Tetracycline	0~8.20	[16]
北京 Beijing	土霉素 Oxytetracycline	5.60~25.20	[17]
	四环素 Tetracycline	4.60~24.10	
重庆 Chongqing	土霉素 Oxytetracycline	0~11.60	[18]

项指标的分析测定。

1.4 测定项目及方法

温度的测定使用水银温度计,每天 14:00 测定堆体中层偏下点位温度及室内温度;pH 采用 pH 计测定,电导率采用电导率仪测定,水土比均为 10:1;总有机碳采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用凯氏定氮法测定;总腐植酸的测定采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法;酶活性测定参照关松荫^[19]的方法,脲酶采用纳氏比色法,过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法。

积温计算方法如下:

$$\text{高温期积温(温度}\geq 45\text{ }^{\circ}\text{C)}=\sum_{j=2}^7 k$$

$$\text{总积温}=\sum_{j=1}^{35} k$$

式中: k 为堆肥第 j 天时堆体温度。

1.5 数据处理与分析

数据利用 Microsoft Excel 2019 进行基本运算和制图,采用 SAS 通过单因素方差分析法进行相同时间、不同处理间差异显著性检验,以评估 Duncan 多重极差检验在 0.05 水平上的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 四环素类抗生素对堆肥温度的影响

温度是影响堆肥过程的重要因素之一,它影响微生物的代谢活动及有机物的降解速率,并对堆肥的腐殖化程度起着决定性作用^[20]。从图 1 可知,各处理温度变化趋势基本相同,均经历升温期、高温期、降温期和后期 4 个阶段。

3 个处理均经历 1 d 的升温期后进入高温期(表 3),CK、TC 和 OC 处理均在堆肥第 3 天达到最高温度,分别为 56、53、55 $^{\circ}\text{C}$ 。从表 3 可以看出,各处理的高温期持续时间表现出差异,持续时间由长到短排序为 CK>OC>TC,其中,CK 处理与 TC、OC 处理之间差异达到显著水平,由此可知抗生素的添加抑制了堆体温度的上升,缩短了堆体的高温期持续时间。将各处理高温期积温进行比较发现,四环素与土霉素的加入并未显著影响堆肥高温期积温的变化。在降温期与后期,抗生素对温度的影响较小,3 个处理温度基本一致,与 CK 处理总积温相比,TC 处理显著下降 49.3 $^{\circ}\text{C}$ 。由此得知,抗生素主要在堆肥前期对堆

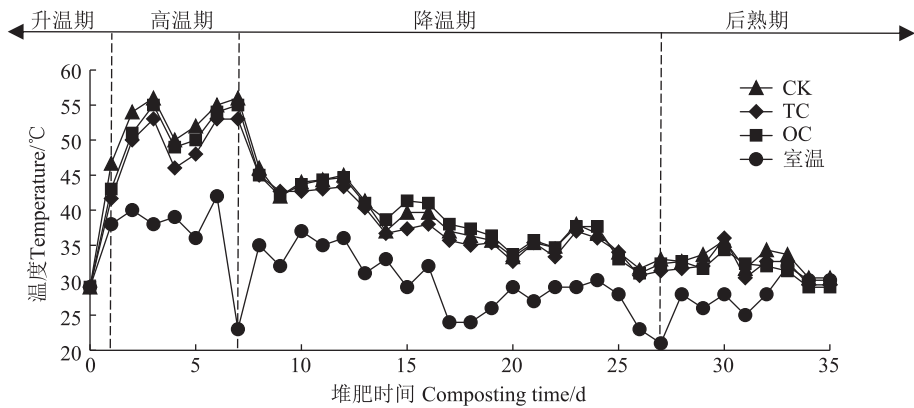


图 1 抗生素对堆肥过程中温度的影响

Figure 1 Effects of antibiotics on temperature during composting

表 3 抗生素对堆体关键温度参数的影响

Table 3 Effects of antibiotics on key temperature parameters of the reactor

处理 Treatment	进入高温期时间 Time to enter high temperature period/d	高温期持续时间 High temperature duration/d	高温期积温 Accumulated temperature in high temperature period/ $^{\circ}\text{C}$	总积温 Total accumulated temperature/ $^{\circ}\text{C}$
CK	1	7.7 $\pm$ 0.5a	322.0 $\pm$ 9.0a	1 365.0 $\pm$ 7.6a
TC	1	6.0 $\pm$ 0.8b	304.6 $\pm$ 10.7a	1 315.7 $\pm$ 7.1b
OC	1	6.3 $\pm$ 0.5b	315.0 $\pm$ 6.3a	1 350.0 $\pm$ 7.5ab

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

体温度产生一定程度的影响,且四环素对堆体温度的影响大于土霉素。

2.2 四环素类抗生素对堆肥过程中化学性质的影响

2.2.1 对pH的影响

pH也是影响堆肥过程的重要因素,表4为3个处理pH的变化趋势。抗生素对pH的影响主要在堆肥的3~14 d,在堆肥第3天时,CK、TC、OC处理的pH分别为8.65、8.60、8.55,相比CK处理,OC处理显著降低了0.10个单位,TC处理pH有所降低,但并未达到显著水平。随着堆肥的进行,各处理pH开始上升,在堆肥第7天时,CK、TC、OC处理的pH分别达到8.73、8.65、8.68,与CK处理相比,添加抗生素处理的pH相对较低。在堆肥第14天时各处理pH达到峰值,分别为9.15、9.10、8.99。与CK、TC处理相比,OC处理显著降低,降幅为0.11~0.16个单位。14 d后各处理间pH差异逐渐缩小,至堆肥结束时CK、TC和OC处理的pH分别为8.77、8.73、8.78。上述结果表明,土霉素的添加能够轻度降低堆体的pH。

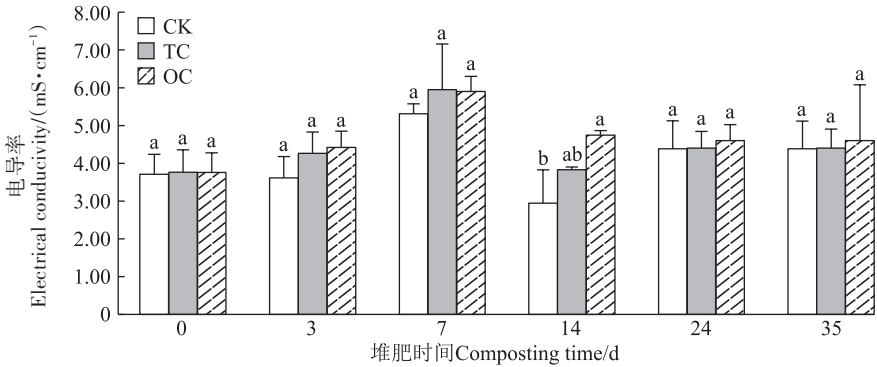
2.2.2 对电导率的影响

电导率反映了堆肥浸提液中可溶性盐的含量,与堆肥原料性质及发酵过程相关^[21]。由图2可知,3个处理的堆体电导率均呈现先上升后下降的趋势,0~7 d堆体电导率上升,14~35 d堆体电导率下降。抗生

素对堆体电导率的影响主要在堆肥第14 d时,此时,CK、TC、OC处理的电导率分别为2.94、3.83、4.74 mS·cm⁻¹,受四环素类抗生素影响,堆体第14天时的电导率有所增加,与CK处理相比,OC处理电导率增加较为明显,显著高于CK处理1.80 mS·cm⁻¹(*P*<0.05),而TC处理电导率增加了0.89 mS·cm⁻¹,并未达到显著水平。堆肥14 d后,3个处理电导率差异开始减小,直至堆肥结束时,CK、TC、OC处理的电导率分别为4.38、4.40、4.60 mS·cm⁻¹。

2.2.3 对C/N的影响

碳氮元素是微生物的重要能源物质,许多研究将C/N的变化作为堆肥过程中的重要指标。四环素与土霉素的添加对堆肥过程中C/N的影响见图3,整个堆肥过程中3个处理的变化趋势相同,即先降低趋于稳定并在后期有短暂上升的趋势。抗生素对堆体C/N的影响主要在堆肥的3~14 d,在堆肥3~7 d时,CK、TC与OC的C/N分别从26.5、27.7、27.2降至22.5、25.2、24.4,分别下降15.1%、9.0%、10.3%。在堆肥第14天时,CK、TC、OC处理的C/N分别为18.6、20.1、20.4,与CK处理相比,四环素与土霉素的添加使堆体的C/N增高。在堆肥第24天时CK、TC、OC处理的C/N达到最低值,其比值均降至20以下,分别为16.9、18.7、18.1。上述结果说明抗生素的添加使堆体有机



不同小写字母表示处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments(*P*<0.05). The same below.

图2 抗生素对堆体电导率的影响

Figure 2 Effects of antibiotics on electrical conductivity of pile

表4 抗生素对堆体pH的影响

Table 4 Effects of antibiotics on heap pH

处理 Treatment	0 d	3 d	7 d	14 d	24 d	35 d
CK	8.70±0.03a	8.65±0.04a	8.73±0.03a	9.15±0.02a	8.91±0.02a	8.77±0.01a
TC	8.70±0.03a	8.60±0.06a	8.65±0.02b	9.10±0.02a	8.92±0.11a	8.73±0.09a
OC	8.68±0.04a	8.55±0.02b	8.68±0.02ab	8.99±0.01b	8.93±0.04a	8.78±0.05a

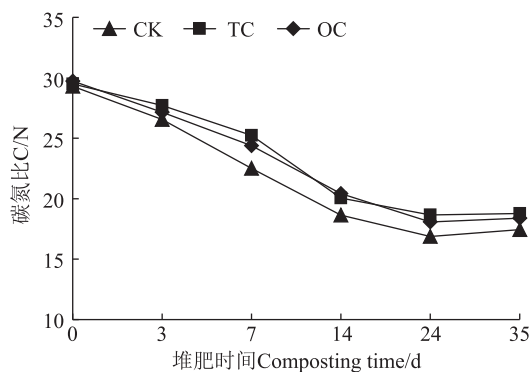


图3 抗生素对碳氮比的影响

Figure 3 Effects of antibiotics on C/N

质分解速率减慢。

2.2.4 对腐植酸含量的影响

腐植酸及其各组分是腐殖化过程中生成的最具代表性的次生产物,其变化与堆肥的稳定性与腐熟程度密切相关。如图4所示,CK、TC、OC 3个处理总腐植酸含量均呈现先下降后短暂上升的趋势,说明堆料中原本存在的腐植酸并不稳定,在前期会大量矿化分

解,后期才能形成稳定的腐植酸。在整个堆肥过程中抗生素的添加并未对总腐植酸含量产生显著影响,但在堆肥前期,添加抗生素处理的总腐植酸含量相对较高,证明TC与OC处理腐植酸矿化分解较弱。在堆肥后期各处理差异逐渐减小,至堆肥结束时,腐植酸含量分别为11.5%、10.3%、11.9%。

2.3 四环素类抗生素对堆肥过程中酶活性的影响

2.3.1 过氧化氢酶

过氧化氢酶是好氧堆肥过程中的重要酶之一,与堆肥中有机质(主要为木质素)的转化速度密切相关。从图5可以看出,在整个堆肥过程中,抗生素对过氧化氢酶产生影响的时期主要在7~24 d。在堆肥第7天时,添加抗生素处理组的酶活性相对较低,其中TC处理的过氧化氢酶活性为 $3.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,与CK相比显著降低 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。CK、TC和OC处理在堆肥第14天时的过氧化氢酶活性分别为3.41、3.17、 $3.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,相比CK处理,TC和OC处理分别降低7.0%、3.8%,显著抑制了堆体的过氧化氢酶活性($P < 0.05$)。在堆肥第24天时,CK、TC、OC处理的过氧

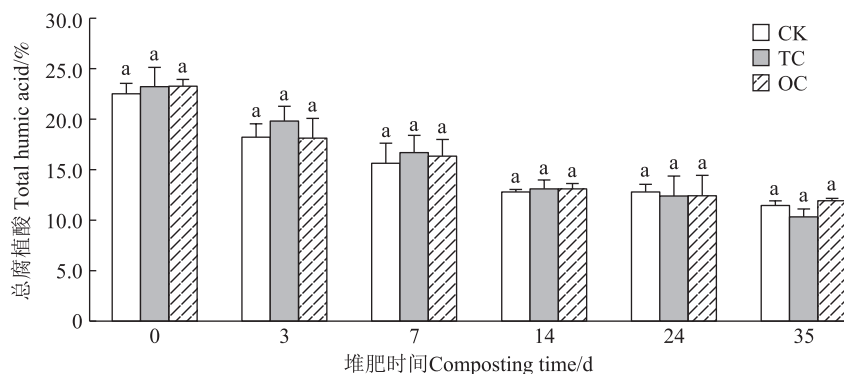


图4 抗生素对总腐植酸的影响

Figure 4 Effects of antibiotics on total humic acid

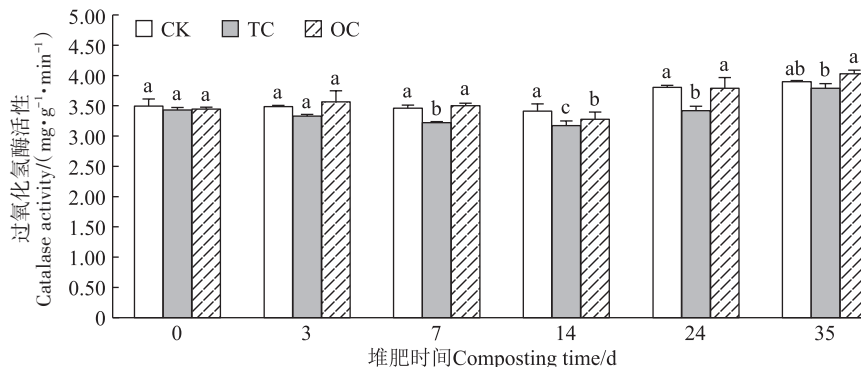


图5 抗生素对过氧化氢酶活性的影响

Figure 5 Effects of antibiotics on catalase activity

化氢酶活性分别为3.80、3.42、3.79 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,证明过氧化氢酶活性受到了四环素与土霉素抑制,但TC和OC处理影响程度不同,其中TC处理显著低于CK处理,降低了10.0%,而OC处理降低幅度较小,未达到显著水平。

堆肥结束时,添加抗生素处理与CK处理未产生显著变化,但TC处理与OC处理产生差异,TC处理显著低于OC处理0.24 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ($P < 0.05$),抑制了堆体的过氧化氢酶活性。总体来看,四环素类抗生素的添加抑制了堆肥过程中过氧化氢酶活性,且四环素和土霉素对过氧化氢酶活性的影响表现出差异,过氧化氢酶活性受四环素的影响较大。

2.3.2 脲酶

脲酶作为水解酶是堆肥过程中含氮有机物矿化的关键酶,与堆肥过程中的氮元素密切相关,其活性可以表明含氮有机物降解的速度与强度^[22]。在发酵前期各处理间脲酶活性差异较小,主要在堆肥第14天和第35天时有显著影响。在堆肥第14天时,CK处理和OC处理的脲酶活性分别为43.73、42.12 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,TC处理脲酶活性最高,达到62.12 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,此时,TC处理脲酶活性显著高于CK处理18.39 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ($P < 0.05$),促进了堆体脲酶活性,OC处理与CK相比未达显著水平,但与TC处理相比产生差异,TC处理脲酶活性显著高于OC处理,证明不同种类抗生素对堆体脲酶活性的影响有所差异。

堆肥结束时,CK、TC和OC处理的脲酶活性分别为22.80、40.18、43.74 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,说明四环素类抗生素的添加促进了堆体脲酶活性,与CK相比,TC和OC处理分别显著增加17.38、20.94 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ($P < 0.05$)。综上所述,四环素类抗生素的添加促进了堆体脲酶活性。

3 讨论

温度的变化反映了堆肥进程,是堆肥过程中需要监测的重要指标。本试验结果表明,抗生素对堆体温度的影响主要表现在堆肥前期,四环素和土霉素的添加缩短了堆肥高温期持续时间,添加抗生素并未对高温期积温产生显著影响,但3个处理堆体的总积温表现出差异,其中CK处理总积温高于TC和OC处理,且与TC处理达到显著差异水平。证明四环素和土霉素的添加均能抑制堆体温度的升高。这与马骏^[23]的研究结果一致,但马骏的研究中添加抗生素组温度下降得较为明显,而在本试验中抗生素组温度下降幅度较小,这可能是马骏的研究中抗生素添加量较大的原因。在堆肥后熟期所有处理均达到一个相对稳定的温度并逐渐接近室温,Sun等^[24]的研究也得到相同的结果。这是由于随着堆肥过程的进行,抗生素逐渐降解,浓度减小,对微生物活动的抑制作用减弱^[25]。杨振边^[26]曾指出抗生素的降解主要发生在堆肥高温期,且经过50 d堆肥处理,抗生素的去除率高达92%;Selvam等^[27]也发现四环素类抗生素较喹诺酮类抗生素更容易被降解,21 d内四环素类抗生素的去除率高达100%,这为本试验结果提供了理论支撑。

试验前期pH出现短暂的下降趋势,这是由于微生物的代谢将堆料中的糖类、淀粉等物质分解为小分子的脂肪酸,导致堆料在最初几天产生了酸化现象^[28]。本研究结果表明添加抗生素处理组相比CK处理pH上升幅度慢,这可能是由于加入的抗生素抑制了微生物分解含氮有机物,因此产生的氨相比CK处理较少。Liu等^[29]曾报道过抗生素可以抑制氨的释放,因此pH上升幅度低于对照处理,这与本试验结果一致。不同时期的结果表明四环素和土霉素的添加

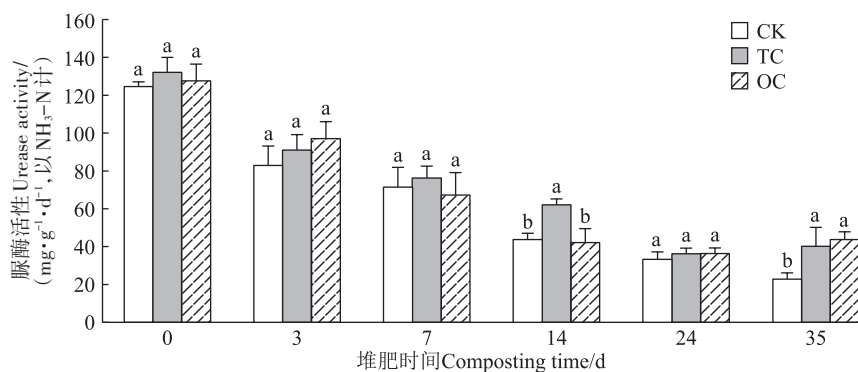


图6 抗生素对脲酶活性的影响

Figure 6 Effects of antibiotics on urease activity

使堆体可溶性盐含量增加,推测其原因可能是由于抗生素的添加促进了硝化细菌的增殖,使堆体物料不断矿化,生成大量的 NO_3^- 促使堆体电导率增加^[30]。这与李金津等^[31]报道的不同添加量的抗生素并未显著影响好氧堆肥电导率变化趋势的结论相反,这可能是由堆肥材料不同导致的,李金津等采用的是蚯蚓好氧堆肥,王亚飞等^[32]曾报道不同材料的畜禽粪便在堆肥过程中的各项指标变化存在明显不同。C/N与总腐植酸的结果表明,抗生素的加入使堆体有机物分解速率减慢,并随着时间的推移影响逐渐减弱。这与李维华等^[33]的研究结果相同。这与抗生素的加入使堆体中微生物代谢受到影响有关。林辉等^[34]的研究表明磺胺类抗生素的添加抑制了堆体早期微生物代谢,但在14 d内抗生素降解率高达100%,因此,抑制作用会随着时间的延长而减弱。郭梦婷等^[35]的研究表明抗生素不利于堆肥过程中水分的散失,造成堆肥结束后堆体高含水率。这为本研究结果的解释提供了理论支撑。

好氧堆肥中酶促反应的速度可以揭示堆肥过程中营养物质的转化程度。从过氧化氢酶活性的结果来看,抗生素的添加抑制了堆体过氧化氢酶活性,这可能是由于抗生素抑制了微生物分泌相关酶,进而抑制了过氧化氢酶活性。本试验结果与李亚宁等^[36]报道的磺胺类抗生素浓度的增加使过氧化氢酶活性显著降低的研究结果相似。而李敏清等^[37]发现过氧化氢酶活性与放线菌群有显著正相关,因此,可能是抗生素的添加抑制了堆体中放线菌群的活性,使得过氧化氢酶活性降低,这也与Chessa等^[38]报道的外源四环素的添加会对土壤微生物活性产生不利影响的研究结果一致。徐晨光等^[39]发现无论较高含量($>10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)还是较低含量($<1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的抗生素均会显著抑制微生物活性,使微生物群落结构发生变化。添加抗生素处理的脲酶活性要高于CK组,这可能是由于抗生素的添加刺激了有利于含氮有机物降解的微生物。这与张凯煜等^[40]报道的低浓度抗生素的添加可以促进脲酶活性的研究结果相似。综上所述,四环素类抗生素的添加对堆体内物化指标产生了较为复杂的影响,物化指标与微生物活性密切相关。李文兵等^[41]的研究表明评价细菌群落丰富度的Chao1指数与腐熟度指标之间存在较强的相关性,因此,四环素类抗生素的存在可能会对堆体腐熟度与品质造成影响,王桂珍等^[42]曾报道当抗生素含量高于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时会抑制堆肥过程顺利进行并影响堆体腐熟度。因此,堆体中

物化指标的变化与抗生素削减规律及堆料腐熟度的关系值得进一步研究。

4 结论

畜禽粪便中 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 四环素和土霉素的存在会显著影响堆肥过程中各项指标的变化,四环素的添加使堆体总积温显著下降 49.3°C ,有机质分解速率及矿质化过程受到一定程度影响,最高使过氧化氢酶活性降低10.0%,并促进脲酶活性增加76.2%,相比之下,土霉素对好氧堆肥过程中物化指标影响较小。因此,不同抗生素对堆肥过程产生的影响表现出差异,在堆肥过程中要严格监控堆肥指标变化情况,合理控制堆肥条件,保证堆肥发酵质量。在人为控制和管理的基础上实现预期的堆肥效果。

参考文献:

- [1] 杨硕. 畜禽养殖废水的抗生素污染现状及检测方法[J]. 农业与技术, 2020, 40(21): 107-108. YANG S. Status and detection methods of antibiotic pollution in livestock wastewater[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(21): 107-108.
- [2] 王晓娟, 年夫照, 夏运生, 等. 抗生素使用现状及其在生态环境系统的行为研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 286-292. WANG X J, NIAN F Z, XIA Y S, et al. Current status of antibiotic use and its behavior in ecological system[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020(6): 286-292.
- [3] 蔡峥, 齐越, 李芳, 等. 畜牧场土壤中重金属与抗生素抗性基因的分布规律研究[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(1): 204-214. QI Z, QI Y, LI F, et al. Distribution of heavy metals and antibiotic resistance genes in the soil of livestock farms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2021, 16(1): 204-214.
- [4] ARENAS N E, MELO V M. Livestock production and emergency antibiotic resistance in Colombia: systematic review[J]. *Infection*, 2018, 22(2): 110-119.
- [5] 于晓雯, 索全义. 畜禽粪便中四环素类抗生素的残留及危害[J]. 北方农业学报, 2018, 46(3): 83-88. YU X W, SUO Q Y. Residues and hazards of tetracycline antibiotics in livestock and poultry manure[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018, 46(3): 83-88.
- [6] MKA A, HC A, SKA A, et al. Application of metagenomic analysis for detection of the reduction in the antibiotic resistance genes (ARGs) by the addition of clay during poultry manure composting[J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 137-145.
- [7] ZHANG J, LIN H, MA J, et al. Compost-bulking agents reduce the reservoir of antibiotics and antibiotic resistance genes in manures by modifying bacterial microbiota[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 649: 396-404.
- [8] 梁天, 张晓东, 张玉, 等. 不同C/N条件下菌酶制剂对牛粪堆肥进程的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(31): 77-82. LIANG T, ZHANG X D, ZHANG Y, et al. Effect of bacterial enzyme preparation on com-

- posting of cow manure under different C/N conditions[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(31):77-82.
- [9] 徐宁. 畜禽粪便堆肥无害化技术要点[J]. 现代畜牧科技, 2020(8):81-82. XU N. Technical points of harmless livestock manure composting[J]. *Technical Advisor for Animal Husbandry*, 2020(8):81-82.
- [10] 曾庆军. 抗生素在生态环境中的污染转归以及应对措施[J]. 湖南畜牧兽医, 2017(5):49-52. ZENG Q J. Pollution transformation of antibiotics in ecological environment and countermeasures[J]. *Hunan Journal of Animal Science & Veterinary Medicine*, 2017(5):49-52.
- [11] 时红蕾, 王晓昌, 李倩. 四环素对人粪好氧堆肥过程中酶活性及腐熟的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(2):209-215. SHI H L, WANG X C, LI Q. Effects of tetracycline in human feces on its aerobic composting process: enzyme activities and compost maturity[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(2):209-215.
- [12] 曹永森. 金霉素和重金属对堆肥过程的影响及添加石灰效果研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017. CAO Y S. Effects of chlortetracycline and heavy metals on swine manure composting process and the impact of lime[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [13] 张凯煜. 土霉素和磺胺二甲嘧啶对堆肥过程中微生物群落多样性及抗性基因的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015. ZHANG K Y. Effects of OTC and SM₂ on the diversity of microbial community and antibiotic resistance genes during composting[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [14] 唐小月, 陈涛, 王微, 等. 畜禽源四环素类抗生素抗性基因的归趋及影响因素[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022(19):31-35. TANG X Y, CHEN T, WANG W, et al. Trend influencing factors of tetracycline resistance genes from livestock and poultry[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2022(19):31-35.
- [15] 段丽杰, 林丽红. 吉林省畜禽养殖场粪便中抗生素污染特征[J]. 中国科技信息, 2022(6):100-102. DUAN L J, LIN L H. Pollution characteristics of antibiotics in livestock manure in Jilin Province[J]. *China Science and Technology Information*, 2022(6):100-102.
- [16] 白金顺, 王伟红, 李艳丽, 等. 我国猪粪中四环素类抗生素残留及好氧堆肥消减研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3):231-238. BAI J S, WANG W H, LI Y L, et al. Advances in residues of tetracyclines and its degradation by aerobic composting in pig manure in China[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(3):231-238.
- [17] 夏天骄, 夏训峰, 徐东耀, 等. 基于固相萃取-高效液相色谱法的畜禽粪便中四环素类抗生素残留量检测[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2):121-125. XIA T J, XIA X F, XU D Y, et al. Determination of the residual tetracycline antibiotics in the manure of livestock via the solid-phase extraction-high performance liquid chromatography method[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(2):121-125.
- [18] 彭秋, 王卫中, 徐卫红. 重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41(10):4757-4766. PENG Q, WANG W Z, XU W H. Ecological risk assessment of tetracycline antibiotics in livestock manure and vegetable soil of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10):4757-4766.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:中国农业出版社, 1983:260-339. GUAN S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1983:260-339.
- [20] LIU H, HUANG Y, DUAN W, et al. Microbial community composition turnover and function in the mesophilic phase predetermine chicken manure composting efficiency[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 313:123658.
- [21] 吴丹. 北京地区禽场粪便中抗生素及抗性基因污染特性与好氧堆肥实验研究[D]. 北京:北京化工大学, 2018. WU D. Contamination characteristics and aerobic compost study of antibiotics and resistance genes in poultry manure of Beijing area[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [22] 徐超, 李兵, 俞雯雯, 等. 快速启温好氧堆肥过程中关键酶活性变化规律研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(2):16-22. XU C, LI B, YU W W, et al. Study on variations of key enzyme activity in quick start-up aerobic composting process[J]. *Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition)*, 2019, 32(2):16-22.
- [23] 马骏. 四环素在堆肥过程中的降解及其对堆肥中微生物群落功能多样性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016. MA J. Degradation of tetracycline and its effect on the functional diversity of microbial communities during composting[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [24] SUN J, QIAN X, GU J, et al. Effects of oxytetracycline on the abundance and community structure of nitrogen-fixing bacteria during cattle manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216:801-807.
- [25] KAKIMOTO T, OSAWA T, FUNAMIZU N. Antibiotic effect of amoxicillin on the feces composting process and reactivation of bacteria by intermittent feeding of feces[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(18):3555-3560.
- [26] 杨振边. 堆肥去除畜禽粪便中抗生素残留的研究进展[J]. 贵州畜牧兽医, 2019, 43(1):63-66. YANG Z B. Advances in research on composting to remove antibiotic residues in livestock manure[J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 43(1):63-66.
- [27] SELVAM A, ZHAO Z, WONG J. Composting of swine manure spiked with sulfadiazine, chlortetracycline and ciprofloxacin[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 126(12):412-417.
- [28] 张爱生, 曲俊蓉, 许斌, 等. 环境温度对污泥堆肥过程中抗生素抗性基因的影响[J]. 环境工程, 2021, 39(5):104-110. ZHANG A S, QU J R, XU B, et al. Effect of ambient temperature on antibiotic resistance genes during sludge composting[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(5):104-110.
- [29] LIU B, LI Y, ZHANG X, et al. Effects of composting process on the dissipation of extractable sulfonamides in swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175:284-290.
- [30] 李宇航, 邢泽炳, 马玮键, 等. 生物炭对鸡粪好氧堆肥过程的影响[J]. 农业工程, 2021, 11(8):53-58. LI Y H, XING Z B, MA W J, et al. Effects of biochar on aerobic composting of chicken manure[J]. *Agricultural Engineering*, 2021, 11(8):53-58.
- [31] 李金津, 史静怡, 文婷, 等. 不同四环素浓度对好氧堆肥和蚯蚓堆肥过程影响的对比研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4):259-267. LI J J, SHI J Y, WEN T, et al. Comparative study on the effects of dif-

- ferent tetracycline content on aerobic composting and vermicomposting processes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(4): 259–267.
- [32] 王亚飞, 李梦婵, 邱慧珍, 等. 不同畜禽粪便堆肥的微生物数量和养分含量的变化[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(3): 37–45. WANG Y F, LI M C, QIU H Z, et al. Changes of microbial quantity and nutrient content in different composting of livestock manure[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2017, 52(3): 37–45.
- [33] 李维华, 赵君, 车畅. 四环素类抗生素对堆肥腐熟度的影响[J]. 黑龙江医药, 2013, 26(2): 244–246. LI W H, ZHAO J, CHE C. Influence of tetracycline for composting[J]. *Heilongjiang Medicine Journal*, 2013, 26(2): 244–246.
- [34] 林辉, 汪建妹, 孙万春, 等. 磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1993–2002. LI H, WANG J M, SUN W C, et al. Interaction between sulfonamide antibiotics fates and chicken manure composting[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1993–2002.
- [35] 郭梦婷, 邓友华, 冯小晏, 等. 土霉素残留对猪粪堆肥过程中理化性质的影响[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 50–54. GUO M T, DENG Y H, FENG X Y, et al. Effects of residual oxytetracycline on the physical and chemical properties of pig manure during composting[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(2): 50–54.
- [36] 李亚宁, 盛红坤, 王斌, 等. 磺胺类抗生素对根际微域土壤酶活性的影响[J]. 应用化工, 2021, 50(6): 1559–1568. LI Y N, SHENG H K, WANG B, et al. Effects of sulfonamides (SAs) on rhizosphere soil enzyme activities[J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(6): 1559–1568.
- [37] 李敏清, 袁英英, 杨江舟, 等. 畜禽粪便堆肥过程中酶活性及微生物数量的变化研究[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(11): 56–60. LI M Q, YUAN Y Y, YANG J Z, et al. Changing of enzymes activity and microbe quantity in animal manure during composting[J]. *China Biotechnology*, 2010, 30(11): 56–60.
- [38] CHESSA L, PUSINO A, GARAU G, et al. Soil microbial response to tetracycline in two different soils amended with cow manure[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2016, 23(6): 5807–5817.
- [39] 徐晨光, 张奇春, 侯昌萍. 外源抗生素对茶园土壤微生物群落结构的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2014, 40(1): 75–84. XU C G, ZHANG Q C, HOU C P. Effect of exogenous antibiotics on soil microbial community structure in tea garden[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2014, 40(1): 75–84.
- [40] 张凯煜, 谷洁, 赵昕, 等. 土霉素和磺胺二甲嘧啶对堆肥过程中酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3927–3936. ZHANG K Y, GU J, ZHAO T, et al. Effects of OTC and SM₂ on the enzyme activities and the functional diversity of microbial community during pig manure composting[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12): 3927–3936.
- [41] 李文兵, 毕江涛, 刘鹏, 等. 牛粪好氧堆肥发酵微生物群落结构演替与环境因子和腐熟度的相关性[J]. 环境工程, 2022, 40(1): 69–77. LI W B, BI J T, LIU P, et al. Correlation between the succession of microbial community structure and environmental factors and maturity of cattle manure aerobic composting[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(1): 69–77.
- [42] 王桂珍, 李兆君, 张树清, 等. 土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 795–803. WANG G Z, LI Z J, ZHANG S Q, et al. Degradation of oxytetracycline in chicken feces aerobic-composting and its effects on their related parameters[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 795–803.