



史风梅,高洪生,裴占江,等.牛粪和农作物秸秆堆肥参数关系研究[J].黑龙江农业科学,2023(12):75-81.

# 牛粪和农作物秸秆堆肥参数关系研究

史风梅<sup>1</sup>,高洪生<sup>1</sup>,裴占江<sup>1</sup>,姜 兵<sup>2</sup>,王 粟<sup>1</sup>,李鹏飞<sup>1</sup>,罗一飞<sup>1</sup>,刘 杰<sup>1</sup>

(1.黑龙江省黑土保护利用研究院/农业农村部种养殖循环重点实验室/黑龙江省秸秆能源化重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150086; 2.黑龙江省环境科学研究院,黑龙江 哈尔滨 150056)

**摘要:**堆肥是处理畜禽粪污、农作物秸秆等农业废弃物的传统技术之一,但目前关于堆肥参数之间的关系尚缺乏系统研究。因此,以牛粪为主要堆肥物料,研究了含水率(WC)、碳氮比(C/N)以及农作物秸秆种类对堆肥过程中的堆肥物理化学性质的影响,并对各参数之间的内在关系进行了系统研究。结果表明,N25处理(堆肥物料为牛粪和玉米秸秆,碳氮比为25:1,含水率为65%)在堆肥初期的有机物降解速率高。N30处理(堆肥物料为牛粪和玉米秸秆,碳氮比为30:1,含水率为65%)在堆肥初期升温速度快,初期之后更容易保持高温。有机物降解速率( $R$ )与堆肥时间( $t$ )和可挥发有机物(VS)在 $\alpha=0.01$ 水平上显著相关,与堆肥含水率(WC)、堆体温度( $T$ )、电导率(EC)和有机物降解速率( $R_d$ )在 $\alpha=0.05$ 水平上显著相关。有机物降解速率与其他参数之间符合公式 $R=0.533\ 31t-0.133\ 08WC-1.763\ 22VS-16.591\ 39pH-0.008\ 03EC+5.409\ 73R_d+0.533\ 1T+313.008\ 4$ 。该研究可为寒区畜禽粪污堆肥进程的判定提供一定的参考。

**关键词:**低温;堆肥;牛粪;作物秸秆

中国每年产生大量畜禽粪便、农作物秸秆等有机废弃物。2019年,全国畜禽粪污和农作物秸秆产生量分别为30.5亿t和8.7亿t<sup>[1]</sup>。按照畜禽粪污综合利用率76%,农作物秸秆综合利用率88%进行估算,仍有7.32亿t禽畜粪便和1.044亿t农作物秸秆需要得到妥善处理<sup>[2]</sup>。通过堆肥处理后还田一直是该类废弃物的主要处理方式<sup>[3-5]</sup>。废弃物中可被微生物降解的有机物在堆肥过程通过微生物的代谢作用转化为稳定的腐殖质。该过程受碳氮比、温度、含水率等因素的影响<sup>[6-8]</sup>。Huang等<sup>[9]</sup>的研究表明碳氮比较低时,肥堆升温慢,最高温度低,pH、电导率值、 $NH_4^+-N$ 和可挥发性固体在整个堆肥过程中也较高,堆肥条件对堆肥物料性影响较大。Díaz等<sup>[10]</sup>的研究表明通气量、水分、颗粒大小、堆肥时间等操作条件会影响蔬菜修剪残渣堆肥过程中温度、pH、 $CO_2$ 释放量以及最终堆肥的理化性质(pH、有机质、凯氏氮、C/N)。为了

更好、更方便地控制堆肥速度和堆肥质量,可通过数学模型建立环境因子与堆肥工艺参数之间的关系,根据环境变化和堆肥进程实时调控堆肥参数<sup>[11-15]</sup>。已有研究者在该方面展开了初步研究。生活垃圾好氧堆肥时,温度( $T$ )与堆肥时长( $t$ )、环境温度( $T_0$ )的关系符合公式 $T=T_0+kt^{B_1}e^{B_2t}$ ,其中, $k$ 、 $B_1$ 和 $B_2$ 均为常数<sup>[11]</sup>。该模型试图通过堆肥温度、时间判定堆肥的完成情况。但堆肥进程不仅受温度的影响,还受物料种类、碳氮比、含水率、供氧量以及堆体大小等众多因素的影响,因此该模型并不能准确描述堆肥过程。王洪涛等<sup>[12]</sup>研发了可用于单一物料或混合物料好氧堆肥的动态模拟计算机软件系统并通过了有效性验证,但该模型涉及的参数众多且需要计算机软件辅助,在一定程度上制约了其应用。王永江等<sup>[13]</sup>则根据堆肥物料中蛋白质、脂肪和糖类的降解速度,将堆肥过程分为了快速、过渡和慢反应3个阶段,建立了猪粪反应器好氧堆肥热量平衡模型 $mc\frac{dT}{dt}=G_iH_i-G_oH_o-UA(T-T_0)+\frac{dw(BVS)}{dt}H_{ci}$ 。

$$G_iH_i-G_oH_o-UA(T-T_0)+\frac{dw(BVS)}{dt}H_{ci}。$$

该模型包含了通风导致的热量散失 $G_iH_i-G_oH_o$ 、反应器散热 $UA$ 和物质降解产生的生物热 $\frac{dw(BVS)}{dt}H_{ci}$ ,但因未考虑热辐射导致的热损失

收稿日期:2023-09-10

**基金项目:**国家自然科学基金(U21A20162);黑龙江省揭榜挂帅项目(2022ZXJ08B02,2022ZXJ05C02-03);黑龙江省省属科研院所科研业务费(CZKYF2022-1-B029,CZKYF2022-1-C002);黑龙江省农业科学院创新工程(CX23ZD06,CX22YQ035);黑龙江省环境科学研究院科研项目(HST2022NC001)。

**第一作者:**史风梅(1972—),女,博士,副研究员,从事固体废物处理与资源化研究。E-mail:ocean-water@126.com。

**通信作者:**刘杰(1974—),男,博士,研究员,从事固体废物处理与资源化研究。E-mail:Liujiel677@126.com。

而使模型普适性下降。张军等<sup>[14]</sup>对现有各种模型进行验证后认为 Monod 模型模拟堆肥过程中有机物降解的效果较差。曾海燕等<sup>[15]</sup>研究了堆肥体积和物料配比的热量平衡,当堆肥过程为 12 d 时,只有堆体平均温度与初始物料的温度差大于 20 ℃时,堆肥质量才能得到保证。以上模型计算均过于复杂,不利于便捷监控堆肥过程并对堆肥操作条件进行调整。因此,本文在借鉴前人研究的基础上采用自制堆肥反应器,研究含水率、碳氮比以及辅助堆肥的农作物秸秆对堆肥过程中堆肥

的物理化学性质变化的影响,探讨各参数之间的内在关系,建立相应的关系公式,可依据堆肥的速测参数来判知堆肥进程。研究结果对寒区禽畜粪污堆肥具有一定的参考意义。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料

牛粪、水稻秸秆和玉米秸秆购于科研基地附近的农户。稻草和玉米秸秆均粉碎至 0.5~3.0 cm 备用。各原料基本理化性质见表 1。

表 1 牛粪、稻草、玉米秸秆的基本理化性质

底物名称	含水率/%	全碳/%	全氮/%	碳氮比	灰分/%
牛粪	84.33	39.00	2.06	18.93	15.89
玉米秸秆	15.87	41.18	0.92	44.76	8.57
稻草	7.79	43.14	0.82	52.61	13.95

1.2 方法

试验地点位于黑龙江省农业科学院科研基地进行,以牛粪和玉米秸秆/稻草为堆肥原料,根据不同 C/N、含水率以及添加物料分为 5 个组,实验设计如表 2 所示。将每组配好的堆肥物料混合均匀,装入带有保温层的自制堆肥装置。堆肥试验时长为 49 d,每天间歇供氧 3 次,每次 5 min。本试验堆料水分含量控制在 60%~70%,含水率不足时进行适当补水。堆肥开始前 14 d 每 3 d 翻 1 次堆,之后每天翻 1 次堆。

表 2 试验设计

处理	碳氮比	含水率/%	辅料
N25	25:1	65	玉米秸秆
N30	30:1	65	玉米秸秆
NR25	25:1	65	水稻秸秆
NW60	25:1	60	玉米秸秆
NW70	25:1	70	玉米秸秆

1.3 样品采集及指标测定

堆肥开始后,采用数字温度计于每日 9:00, 13:00 及 17:00 测量、记录和计算平均环境温度(Te)和堆体温度(T)。于 0,10,19,26,36 和 49 d 采集各堆肥反应器中的堆肥鲜样,多层次多点采样并充分混合,部分鲜样在 4 ℃保存并及时测定含水率、pH、EC 等物理化学指标。

取一定质量鲜样置于烘箱中在 105 ℃下烘至

质量恒定,根据前后质量的变化计算含水率。将烘干至恒重的堆肥样品放置于坩埚内,并采用马弗炉内,在 600 ℃条件下灼烧 4 h,通过前后质量的变化计算样品中挥发性固体的含量。依据 NY/T 1121.24-2012、NY/T 88-1988、NY/T 87-1988、LY/T 228-2015、Olsen 法、NY/T 889-2004、NY/T 1121.6-2006 和 LY 1251-1999 分别监测分析样品的全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾(K<sub>2</sub>O)、有机质及盐分。3 次重复,计算平均值。

假定在堆肥过程  $t_1$ 、 $t_2$  时堆肥的含水率为  $WC_1$ 、 $WC_2$ ,挥发性固体含量为  $VS_1$ 、 $VS_2$ ,无机物的量保持不变,为  $m$ ,则堆肥固体含量分别为  $M_1 = m/(1-VS_1)$ ,  $M_2 = m/(1-VS_2)$ 。

则  $t_1$  至  $t_2$  时间段内堆体中有机物的累积降解速率( $R$ )和日平均降解速率( $R_d$ )公式如下:

$$R(\%) = (1 - \frac{1 - VS_1}{1 - VS_2}) \times 100 \tag{1}$$

$$R_d(\%) = (1 - \frac{1 - VS_1}{1 - VS_2}) / (t_2 - t_1) \times 100 \tag{2}$$

式中, $t_1$ 、 $t_2$ 为堆肥时间(d); $WC_1$ 、 $WC_2$ 为堆肥时间  $t_1$ 、 $t_2$ 时的堆肥含水率(%); $VS_1$ 、 $VS_2$ 为堆肥时间  $t_1$ 、 $t_2$ 时的堆肥挥发性固体含量(%); $M_1$ 、 $M_2$ 为堆肥时间  $t_1$ 、 $t_2$ 时的堆肥固体物质含量(kg); $m$ 为堆肥中无机物的质量(kg)。

### 1.4 相关性分析

采用 Excel 2019 处理数据,然后利用 Origin 2019 作图。采用 SPSS 20.0 软件进行相关性研究。首先对数据进行正态分布检验,如果数据通过正态分布检验,则采用 Pearson 法研究相关性,否则采用 Spearman 法。通过多元回归建立各物理化学指标之间的联系,采用单因素方差(ANOVA)来分析多元线性回归公式的可靠性。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆体温度的变化

由图 1 可知,各堆肥处理的温度曲线均是多峰的,据温度变化可将堆肥过程分为升温、高温、降温和后腐熟阶段。因堆肥反应器较小,堆体温度受环境影响较大,高温阶段持续时间短,最高温度均低于 50℃。在堆肥初期(0~3 d),N30 的温度比其他处理的高,可能因秸秆较多且导热性能较鲜牛粪差导致的。N25 在 3~10 d 内堆体温度高于其他处理,未表现出环境降温的影响。在 10~14 d 内,各处理的堆体温度变化差异不大,自 16 d 后,N25 处理的堆体温度明显低于其他处理。与 N30 相比,N25 中玉米秸秆添加量相对较少,牛粪含量较多,因此,含有易被生物降解的蛋白质、淀粉等的量比较高,并且,65%的含水量不会抑制微生物的代谢活动,因此,N25 在 3~10 d 内温度较高。与玉米秸秆相比,稻草中无机物和木质纤维含量更高,而易于被生物降解的蛋白质、脂肪和淀粉等的含量相对较低,所以虽然 NR25 与 N25 的碳氮比和含水率相同,但是由于水稻秸秆和玉米秸秆中木质纤维素、淀粉、蛋白质以及矿物质等含量的差异,导致 NR25 堆肥启动落后于玉米 N25,但后续 NR25 中的木质纤维素的降解令 NR25 堆体的温度比 N25 的高。由于含水量对可降解物质的溶解及堆肥过程中有氧条件的影响,所以辅料同为玉米秸秆,碳氮比均为 25,含水率不同的 NW60 和 NW70 堆体温度变化差异明显。从整个堆肥结果来看,N30 含水率 65%处理组是最为安全卫生的,在与 N25 处理相同体积的条件下,其堆肥温度最高,达到了 50℃,可以杀灭堆肥材料中含有的草籽、寄生虫卵和病原体等。各处理在 28 d 后,进入快速降温阶段,在 38 d 以后,基本接近环境温度。

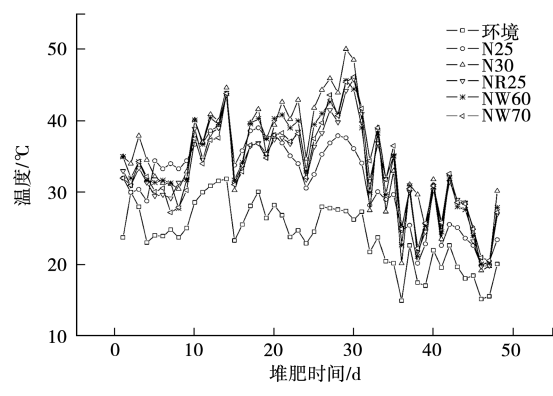


图 1 牛粪不同处理堆体温度的变化

### 2.2 堆肥速测指标的变化

由图 2a 可知,各堆肥处理的含水率(WC)均在 1~25 d 内随着堆肥时间的增加而降低,在第 25 天含水率基本降至 50%以下。由于水分含量较低,抑制了肥堆中微生物的新陈代谢活动,微生物产生的热量减少,难以抵消反应器向环境的热量损失,导致堆体温度大幅度降低。对各处理补水后,堆体中微生物再一次活跃,产生的生物热量大于反应器的热损失和堆体物料升温所需要的热量,堆体温度相应增加,WC 会再一次随着堆肥时间的增加而降低,至堆肥结束,WC 在 40.0%~53.9%范围内变化。由图 2b 可知,各堆肥处理的 pH 均表现出升高-降低-升高的变化趋势。pH 在堆肥结束时的值在 8.0~8.4 之间,略呈碱性。还田利用时需要考虑其对土壤和作物生长发育的影响。因堆肥物料中许多盐类或金属氧化物,在水中的溶解度受 pH 影响,低 pH 利于该类物质从堆肥物料中溶出和溶解。因此,各个堆肥处理 EC 的变化趋势均与 pH 变化相反,呈现降-升-降的变化规律,至堆肥结束时,EC 值在 1 278~2 020  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  范围内变化(图 2c)。VS 则是随着堆肥进行持续降低的(图 2d)。根据公式(1)和(2)计算各取样时间段的有机物日平均降解速率  $R_d$ (图 2e)和有机物累积降解速率  $R$ (图 2f)可知,N25、NW60 和 NW75 的  $R_d$  在 0~10 d 时间段内值最大,由大到小依次为  $\text{N25} > \text{NW60} > \text{NW75}$ (图 2e)。随着堆肥过程的进行,含水率下降导致堆肥过程受到抑制,在 25 d 补水后,肥堆得以继续进行,因此,  $R_d$  在 25~35 d 阶段再次出现峰值。据此,在寒区尤其是冬季或其他低温时段堆肥时,可以采用

N25 堆肥条件,能够在短时间内产生大量的热,保证堆肥初期有较好的升温效果。处理组 N25、NW60 和 NW70 的碳氮比均为 25:1,含水率分别为 65%、60%和 70%。因而,对于玉米秸秆和肉牛粪堆肥的适宜含水率为 65%。由于 NR25 中含有不易被生物降解的成分较 N25 中的高,所以

其  $R_d$  峰明显滞后于其他处理组,且最终  $R$  仅高于 NW70。由此可见,堆肥处理结果除受含水率、温度、碳氮比之外,还受堆肥物料的易降解组分含量的影响,它们决定了堆肥启动速度、堆体温度以及最后堆肥的质量。

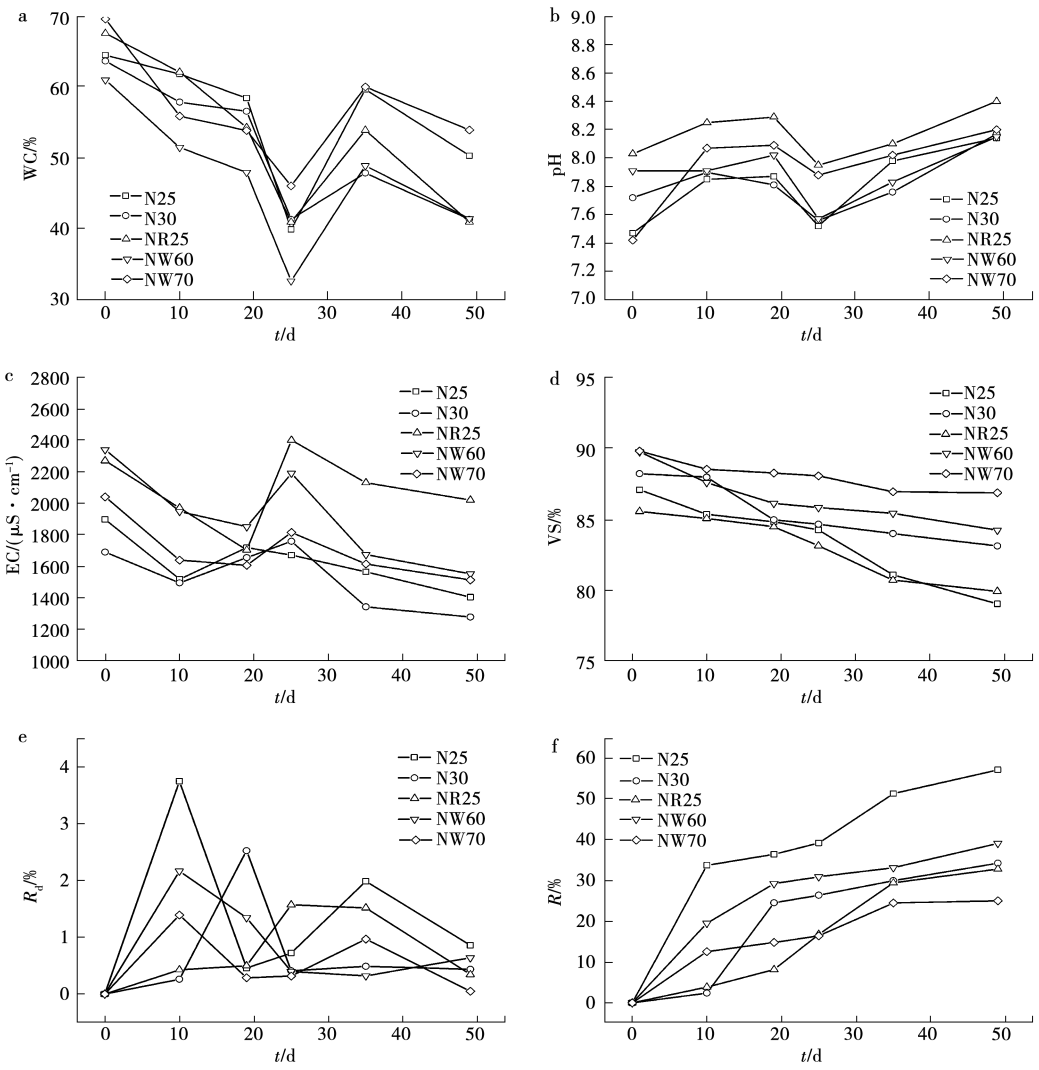


图 2 堆肥物理化学性质的变化

2.3 各参数之间的相关性研究

鉴于所有数据在  $\alpha=0.05$  水平上均通过了正态分布验证,所以采用 Pearson 法研究各参数之间及与  $R$ 、 $R_d$  之间的关系,结果如表 3 所示, $R$  与  $t$  和 VS 在  $\alpha=0.01$  水平上分别呈极显著正相关和极显著负相关,在  $\alpha=0.05$  水平上与 WC、T 和 EC 呈显著负相关的,与  $R_d$  显著正相关。VS 则与  $t$  和  $R$  在  $\alpha=0.01$  水平上极显著负相关,与

WC 和 T 在  $\alpha=0.05$  水平上显著正相关,与堆体物料 pH 在  $\alpha=0.05$  水平上显著负相关。T 在  $\alpha=0.01$  水平上与  $t$  极显著负相关,与 VS、 $R$  在  $\alpha=0.05$  水平上分别呈显著正相关和显著负相关。堆肥的 pH 与堆肥时间  $t$  和 VS 在  $\alpha=0.05$  水平上分别呈显著正相关和显著负相关。堆肥的 EC 与堆肥时间  $t$  和  $R$  在  $\alpha=0.05$  水平上均为显著负相关。



表 3 堆肥物理化学性质之间的相关系数及显著性

项目	<i>t</i>	WC	VS	T	pH	EC	<i>R</i> <sub>d</sub>	<i>R</i>
<i>t</i>	1							
WC	-0.62814 **	1						
VS	-0.67864 **	0.40359 *	1					
T	-0.57945 **	-0.03939	0.39812 *	1				
pH	0.46014 *	-0.06833	-0.39008 *	-0.32732	1			
EC	-0.43095 *	0.05883	0.13762	0.31018	-0.12681	1		
<i>R</i> <sub>d</sub>	0.01482	0.01363	-0.24416	0.13976	0.06246	-0.12018	1	
<i>R</i>	0.77570 **	-0.53356 *	-0.71776 **	-0.39003 *	0.16546	-0.44634 *	0.38123 *	1

注: \*\* 和 \* 分别表示在  $\alpha=0.01$  和  $\alpha=0.05$  水平显著相关。

以 *R* 为因变量,其他指标为变量,进行线性回归,得到 *R* 与其他参数之间的关系为: $R=0.533\ 31t-0.133\ 08WC-1.763\ 22VS-16.591\ 39pH-0.008\ 03EC+5.409\ 73R_d+0.533\ 1T+313.008\ 4$ , $R^2=0.789\ 93$ 。对该公式进行 ANOVA 检验, $F_{\text{value}}=16.57837$ , $Prob>F=1.976E-7$ ,表明可以利用该公式来阐述堆肥过程中这几个指标之间的关系。

因 *R* 与 pH 并不相关,因此去掉 pH 这个变量,再进行多元线性回归,得到 *R* 与其他参数之间的关系为: $R=0.266\ 83t-0.402\ 27WC-1.687\ 58VS-0.011\ 14EC+5.329\ 53R_d+0.266\ 83T+208.623\ 76$ , $R^2=0.743\ 07$ 。对该公式进行 ANOVA 检验, $F_{\text{value}}=14.98$ , $Prob>F=6.33E-7$ ,表明可以利用该公式来描述堆肥过程中这几个指标之间的关系。

将 *R*<sub>d</sub> 和 EC 去掉,则多元线性行回归得到  $R=0.523\ 2t-0.080\ 89WC-2.050\ 97VS+0.523\ 2T+182.598$ , $R^2=0.624\ 1$ 。对该公式进行 ANOVA 检验, $F_{\text{value}}=13.04$ , $Prob>F=7.19E-7$ ,表明可以利用该公式来阐述堆肥过程中这几个指标之间的关系。通过参数之间的个数与各个公式的决定系数 *R*<sup>2</sup> 数值的变化,可以看出,参数越多,得到公式的 *R*<sup>2</sup> 就越准确。

这 3 个公式都可以用来估算小体积低温堆肥过程中参数之间的关系。因此,可根据自己实验所能得到的数据选择合适的公式估算 *R* 值,当 *R* 值接近 60% 时基本可以判定堆肥结束,但如果堆体内部温度低时,还需要考虑堆肥中病原体、虫卵等指标,保证堆肥使用时的安全卫生。

3 讨论

已有研究表明,稻草中粗蛋白、粗纤维、无氮浸出物的含量分别为 2.6%~3.2%、21%~33%

和 38%~49%,脂肪含量大于 1.7%,灰分含量高于 10%,而风干玉米秸秆中粗蛋白、粗纤维、粗脂肪、无氮浸出物和灰分的含量分别为 4%~7%、29%~35%、2.1%、44%~51% 和 4.5%~7.32%<sup>[16-18]</sup>。畜禽粪污好氧堆肥需要关注碳氮比、含水率、pH、物料的颗粒度和堆肥的供氧量等有关物料参数,相应的最佳值分别为碳氮比 25:1~30:1、含水率 55%~65%、pH6.5~7.5、粒径 0.3~1.3 cm 和供氧量 0.1~0.2 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup><sup>[19-20]</sup>。在本研究中,如需要维持堆肥高温,则玉米秸秆和牛粪混合物料比较适宜的堆肥条件为碳氮比为 30:1,含水率为 65%,如需要快速完成堆肥过程,则堆肥的碳氮比为 25:1,含水率为 65%。含水率和碳氮比均符合畜禽粪污堆肥的最佳条件。

在堆肥过程中需要检测温度、含水率、酸碱度、有机物降解、电导率、发芽率(GI)等参数<sup>[21]</sup>。在堆肥过程中,无论堆肥温度曲线是单峰还是多峰的,都可划分为升温、高温和降温阶段<sup>[22-23]</sup>。因物料性质、通气等参数不同,本研究温度曲线峰的个数较文献<sup>[23]</sup>的多,但仍存在升温、高温和降温 3 个阶段。含水率、有机质含量的变化规律也与其他研究者的结果一致<sup>[23-24]</sup>。pH 则由于堆肥物料中氨及有机酸产量多少而表现为升降<sup>[25]</sup>、升降-升<sup>[26-27]</sup>或是降-升-降的变化规律<sup>[20]</sup>。本研究因含水量太低然后又补水影响了微生物的活动,导致 pH 升降-升变化,与史向远等<sup>[26]</sup>和王友玲等<sup>[28]</sup>的试验结果一致。麦旭东等<sup>[22]</sup>发现玉米秸秆和生活污泥好氧堆肥的 EC 随着堆肥的进行不断增加。碳氮比为 30:1 的牛粪和玉米秸秆好氧堆肥的 EC 是升降-升的,碳氮比为 25:1 的堆体则是下降的<sup>[26]</sup>。本研究中,因含水量变化使 pH 升降-升变化,导致盐类溶出量的变化令堆肥处理的 EC 呈降-升-降变化。

近来,在气候变暖和“双碳”背景下,堆肥过程中二氧化碳、甲烷、硫化氢、氨气以及 NO<sub>x</sub> 等释放以及重金属和抗性基因的变化情况受到关注<sup>[23,29-32]</sup>。因此下一步需要对寒区堆肥过程中的碳排放、抗性基因和重金属的情况进行深入研究。

在堆肥过程和监控方面,当前主要是通过一级反应模型、Monod 模型来描述堆肥过程中的有机物降解和堆肥时间之间的关系<sup>[12-14]</sup>。有机物降解一级反应模型的反应速率常数  $k$  受温度、堆体中氧气含量、有机物组成、含水量以及孔隙率等因素的影响,需要通过各种方法对  $k$  进行校正,Monod 模型对有机物降解和微生物生长均有涉及<sup>[33]</sup>。黄圆萍等<sup>[34]</sup>利用近红外光谱(NIRS)和 local 偏最小二乘算法(PLS)模型可以很好地预测规模化槽式和膜覆盖好氧堆肥全过程的主要工艺关键参数。但是,这几种方法求解过程复杂阻碍了其实际应用。且目前还未有牛粪的相关堆肥模型,因此本研究试图在试验的基础上建立牛粪堆肥有机物降解和其他参数的关系模型来指导牛粪堆肥实际生产,下一步将开展模型的实际生产验证。

## 4 结论

本研究对不同含水率、碳氮比以及堆肥辅料在堆肥过程中的物理化学性质变化进行分析,并对各参数之间的内在关系进行研究得出,堆肥处理结果除受含水率、温度、碳氮比影响之外,还受堆肥物料具体成分如淀粉、蛋白质、脂肪、纤维素、半纤维素和木质素含量的影响,它们共同决定堆肥启动的速度、堆肥温度的高低以及最后堆肥的质量。对于牛粪堆肥,快速堆肥可采用碳氮比 25:1,含水率为 65%。对堆肥量较小、环境温度低、堆肥速度要求不高时,可以采用碳氮比 30:1,含水率为 65%的堆肥条件。 $R$  则与  $t$  和 VS 在  $\alpha=0.01$  水平上显著相关,在  $\alpha=0.05$  水平上与 WC、T、EC 和  $R_d$  显著相关。 $R$  与其他参数之间的关系为: $R=0.533\ 31t-0.133\ 08WC-1.763\ 22VS-16.591\ 39pH-0.008\ 03EC+5.409\ 73R_d+0.533\ 1T+313.008\ 4$ ,该公式通过了 ANOVA 检验,可以利用该公式来阐述堆肥过程中这几项指标之间的关系。

## 参考文献:

- [1] 科技教育司. 农业农村部关于贯彻实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的意见(农科教发〔2021〕8号)[EB/OL]. (2021-08-30)[2023-05-10]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202108/t20210830\\_6375173.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202108/t20210830_6375173.htm).
- [2] 李晓晴. 秸秆还田生态效益逐步显现:全国秸秆综合利用率超 88% [N/OL]. 人民日报(海外版), 2022-10-13(004). (2021-10-13)[2023-05-10]. <http://jx.people.com.cn/n2/2022/1013/c186330-40158932.html>.
- [3] LEI L S, GU J, WANG X J, et al. Microbial succession and molecular ecological networks response to the addition of superphosphate and phosphogypsum during swine manure composting[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279: 111560.
- [4] GREFF B, SZIGETI J, NAGY Á, et al. Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302: 114088.
- [5] 张胜利, 刘晓旺, 李鸿志, 等. 不同堆肥模式处理畜禽粪便的优劣[J]. 北方牧业, 2021(10): 27.
- [6] 蔡建成. 堆肥工程与堆肥工厂[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [7] 郜斌斌, 王选, 常瑞雪, 等. 黏土矿物和化学添加剂对牛粪堆肥过程氮素固持的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 250-257.
- [8] 秦维, 蒋心茹, 刘明刚, 等. 辅料配比及通风速率对污泥气流膜堆肥过程氮素迁移的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1357-1367.
- [9] HUANG G F, WONG J W C, WU Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. Waste Management, 2004, 24(8): 805-813.
- [10] DÍAZ M J, Eugenio M E, LÓPEZ F, et al. Neural models for optimizing lignocellulosic residues composting process[J]. Waste and Biomass Valorization, 2012, 3(3): 319-331.
- [11] 彭新华, 陆才正, 杨瑛. 快速堆肥的可控技术及温控模型研究[J]. 华东工学院学报, 1992(2): 80-84.
- [12] 王洪涛, 李雨松. 动态好氧堆肥模拟模型研究与应用[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3): 240-244.
- [13] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳. 猪粪好氧堆肥过程有机质降解和热量平衡模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 121-124, 115.
- [14] 张军, 李世好, 刘孟子, 等. 城市污泥好氧堆肥过程中有机质降解模型[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(2): 348-351.
- [15] 曾海燕, 杨钊. 污泥秸秆动态容器好氧发酵堆肥热量平衡实验[J]. 四川环境, 2019, 38(2): 20-23.
- [16] 邢廷铤. 农作物秸秆饲料加工与应用[M]. 修订版. 北京: 金盾出版社, 2008.
- [17] 刘海燕, 祁宏伟, 邱玉郎, 等. 吉林省不同地区玉米秸秆营养成分分析[J]. 中国奶牛, 2014(6): 6-8.
- [18] 杨耀刚, 田瑞华. 内蒙古不同地区玉米秸秆营养成分分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(21): 115-116.

- [19] 常远,李若琪,李珺,等. 好氧堆肥腐殖酸形成机制及促腐调控技术概述[J/OL]. 中国环境科学. (2023-05-29)[2023-08-09]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230529.003>.
- [20] 王杯中,李开荣,朱荣生,等. 畜禽粪污好氧堆肥发酵参数探讨[J]. 山东畜牧兽医,2020,41(3):37-39.
- [21] 王铭泽. 羊粪好氧堆肥技术参数的优化研究[D]. 南京:南京农业大学,2020.
- [22] 麦旭东,谭军利,王西娜,等. 辅料及工艺参数对干旱地区污泥堆肥物理指标动态变化的影响[J]. 环境工程学报,2022,16(8):2682-2690.
- [23] 刘中军,李美潇,王建波,等. 畜禽粪便堆肥过程中各参数变化规律研究[J]. 当代化工研究,2023(1):36-38.
- [24] 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.
- [25] DUAN H Y,JI M H,CHEN A,et al. Evaluating the impact of rice husk on successions of bacterial and fungal communities during cow manure composting[J]. Environmental Technology & Innovation,2021,24:102084.
- [26] 史向远,王秀红,周静,等. 牛粪联合玉米秸秆好氧堆肥理化性状分析[J]. 山西农业科学,2019,47(7):1217-1221.
- [27] 李忠徽,王旭东. 不同发酵辅料下牛粪腐解过程温度和养分的变化规律[J]. 农业环境科学学报,2014,33(3):471-477.
- [28] 王友玲,邱慧珍,李孟婵,等. 不同通风方式下牛粪堆肥过程中微生物群落演替及其对环境因子的响应[J]. 环境科学学报,43(8):189-201.
- [29] 胡婷. 农业废弃物肥料化过程中功能基因和抗生素抗性基因变化机理研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [30] LU X M,LU P Z. Synergistic effects of key parameters on the fate of antibiotic resistance genes during swine manure composting [J]. Environmental Pollution, 2019, 252: 1277-1287.
- [31] ZHANG M,HE L Y,LIU Y S,et al. Variation of antibiotic resistome during commercial livestock manure composting [J]. Environment International,2020,136:105458.
- [32] SARDAR M F,ZHU C X,GENG B,et al. The fate of antibiotic resistance genes in cow manure composting: shaped by temperature-controlled composting stages[J]. Bioresource Technology,2021,320: 124403.
- [33] 高定,张军,陈同斌,等. 好氧生物堆肥过程中有机质降解模型的研究进展[J]. 中国给水排水,2010,26(11):153-156.
- [34] 黄圆萍,沈广辉,廖科科,等. 基于 NIRS 和 Local PLS 算法的堆肥关键参数实时动态分析[J]. 农业工程学报,2020,36(13):195-202.

## Parameters Relationship Between Cow Manure and Crop Straws During Composting Process

SHI Fengmei<sup>1</sup>, GAO Hongsheng<sup>1</sup>, PEI Zhanjiang<sup>1</sup>, JIANG Bing<sup>2</sup>, WANG Su<sup>1</sup>, LI Pengfei<sup>1</sup>, LUO Yifei<sup>1</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>

(1. Heilongjiang Academy of Black Soil Conservation and Utilization/Key Laboratory of Combining Farming and Animal Husbandry, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Energy Utilization of Main Crop Straw Resources, Harbin 150086, China; 2. Heilongjiang Academy of Environmental Sciences, Harbin 150056, China)

**Abstract:** Composting is often used to deal with agricultural wastes such as crop straws and animal manure. Moreover, the changes of physi-chemical properties and relationships between compost parameters during composting process still need further study. Hence, the effect of C/N, water content, crop wastes on the compost parameters were studied using cow manure with rice straw and corn stalk as composting substrates. The N25 (cow manure and corn stalk as composting substrate with 25:1 of C/N and 65% of water content) showed the highest rate of organic matter degradation than the others in the early stages of composting. The N30 (cow manure and corn stalk as composting substrate with 30:1 of C/N and 65% of water content) showed a faster heating rate in the early stage of composting, and was easier to maintain high temperature after the initial composting stage. The degradation rate of organic matter ( $R$ ) was significantly related with composting time  $t$ , and VS at  $\alpha=0.01$  level, significantly related with water content (WC), composting temperature ( $T$ ), electricity conductivity (EC) and daily average degradation rate of organic matter ( $R_d$ ) at  $\alpha=0.05$  level. The relationship between  $R$  and the other parameters could be described with the formula:  $R=0.533\ 31t-0.133\ 08WC-1.763\ 22VS-16.591\ 39pH-0.008\ 03EC+5.409\ 73R_d+0.533\ 1T+313.008\ 4$ , which can provide support to estimate the composting process of livestock manure wastes in cold region.

**Keywords:** low temperature; composting; cow manure; crop straws