

原料含水率对筒仓式反应器堆肥氮素转化的影响

徐鹏翔^{1,2} 沈玉君^{1,2} 周海宾^{1,2} 孟海波^{1,2} 李季^{3*} 段崇东⁴

(1. 农业农村部规划设计研究院,北京 100125;

2. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点实验室,北京 100125;

3. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193;

4. 北京沃土天地生物科技股份有限公司,北京 100193)

摘要 为研究原料含水率对工程规模筒仓式反应器堆肥过程中氮素转化的影响,提高堆肥产品中有效氮养分含量,以污泥和稻糠为主要原料,设置堆肥起始物料含水率(质量比)为57%、60%、63%和66%,分析堆肥过程中温度与种子发芽指数等基础指标和不同形态的氮素指标变化。结果表明:原料含水率为60%~63%时,堆肥物料在反应器内升温较快,堆体温度可达60℃以上且在不同物料深度分布较均匀,种子发芽指数达到80%以上。随着原料含水率的增加,总氮和硝态氮含量先增加后减少,铵态氮含量逐渐下降,有机态氮和酰胺及氰氨态氮含量逐渐增加。原料含水率为63%时总氮养分含量最高(14.20 g/kg),原料含水率为60%时有效态氮养分含量最高(9.53 g/kg)。综上,筒仓式反应器堆肥过程中原料含水率为60%~63%时有利于提高堆肥物料中氮养分含量。

关键词 含水率; 污泥; 反应器堆肥; 氮素转化

中图分类号 X713

文章编号 1007-4333(2021)11-0180-09

文献标志码 A

Effects of the moisture content of raw material on nitrogen transformation during composting in silo reactor

XU Pengxiang^{1,2}, SHEN Yujun^{1,2}, ZHOU Haibin^{1,2}, MENG Haibo^{1,2}, LI Ji^{3*}, DUAN Chongdong⁴

(1. Academy of Agricultural Planning and Engineering of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

2. Key Laboratory of Technology and Model for Cyclic Utilization from Agricultural Resources of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

4. Beijing VOTO Biotechnology Co. Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract The initial moisture content (MC) of raw materials has a significant effect on the temperature change and nutrient transformation during composting. In order to evaluate the effects of initial moisture on nitrogen conversion during composting, this study was carried out in an industrial silo composting reactor, using sewage sludge and rice chaff as raw materials. The initial MC (mass ratio) of the feedstocks were adjusted to 57% (MC57), 60% (MC60), 63% (MC63) and 66% (MC66), respectively, and the temperature, germination index (GI) and different forms of nitrogen were investigated. The results demonstrated that when the MC of raw material is between 60% and 63%, the fermentation temperature increases rapidly in silo reactor which can reach above 60℃ and is evenly distributed in different layer, the germination index values are higher than 80% that have met the requirements of composting standard. With the increasing MC of raw materials, the contents of total nitrogen and nitrate nitrogen increased firstly then decreased, the contents of ammonium nitrogen decreased gradually, and the contents of organic nitrogen, amide and cyanamide nitrogen increased gradually during the sewage sludge composting in silo reactor. At the end of

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800600);北京市科技新星计划(Z191100001119063)

第一作者: 徐鹏翔,高级工程师,主要从事农业废弃物资源化利用研究,E-mail: xpx527@126.com

通讯作者: 李季,教授,主要从事有机废弃物堆肥研究,E-mail: lijij@cau.edu.cn

composing, the total nitrogen content of the MC63 reached 14.20 g/kg, which is higher than other treatments. On the other hand, the treatment of MC60 has the highest available nitrogen content (9.53 g/kg). The results of this study suggest that an initial MC of raw materials between 60% and 63% is beneficial to improve the nitrogen content of the compost products.

Keywords moisture content; nitrogen transformation; sewage sludge; composting; silo reactor

堆肥原料的含水率对堆肥过程中堆体升温具有重要影响^[1]。原料含水率过高时,堆体孔隙度降低,空气流通受到抑制,导致堆体中产生厌氧区,限制了微生物对氧气的利用^[2]。堆肥原料类型、工艺和环境等条件不同,对堆体的起始含水率要求也不同,决定着堆体是否能够顺利发酵。如 Haug^[3]推荐堆体含水率为 40%~60%,Guo 等^[4]推荐堆体含水率为 65%~75%,Liang 等^[5]认为堆肥过程中保证微生物生长活性所需要的最低含水率为 50%,Ahn 等^[6]推荐堆体最佳含水率为 60%~80%。堆肥过程中含水率低于 40%时将限制微生物活性,含水率过高又会导致厌氧环境的产生^[7]。传统堆肥工艺中物料为静态或水平移动,推荐堆肥原料含水率调节为 50%~70%^[8];筒仓式反应器堆肥过程中物料自上而下动态位移,原料含水率对堆体升温、养分转化和水分去除影响较大^[9],是决定物料是否能顺利发酵的重要因素。

堆肥过程中, NH_3 的挥发是氮养分损失的主要途径,因此了解氮素转化的过程与影响因素不仅有利于堆肥工艺的优化,而且可实现堆肥产品增值。堆肥环境、原料性质以及工艺控制参数是影响堆肥过程中微生物活性的主要因素,从而也影响了氮素的转化。污泥堆肥过程中,氨化作用、硝化作用、反硝化作用和氨气的同化等不同形态氮的转化过程可同时发生^[10]。堆体含氧量、发酵温度、含水率、pH 以及铵态氮含量都能影响氮的硝化作用^[11]。堆肥高温好氧发酵阶段是生物降解最强烈的时期,原料中的蛋白质类物质被微生物分解并释放出铵态氮,随之开始氨化作用^[12]。当堆体温度大于 65℃、原料 pH 达到 8.4 以上时,发酵物料中的氮将以 NH_3 的形式蒸发损失^[13],氮在高温发酵阶段的损失量可占总氮量的 40%~70%^[14]。Koyama 等^[15]研究发现,堆肥物料在 60 和 70℃环境中 NH_3 排放量分别为总氮量的 14.7%和 15.6%,氮素平衡分析说明高温促进了非溶解态氮的溶解,促进了铵态氮向 NH_3 的转化。

与传统条垛式和槽式堆肥不同,反应器堆肥是

一种密闭式快速堆肥工艺,可分为滚筒式反应器堆肥、筒仓式反应器堆肥和箱式反应器堆肥等,具有占地面积小、发酵周期短、堆体温度高和臭气控制好等特点,在有机废弃物就地处理方面具有较好的应用前景。由于反应器堆肥设备的特殊环境,物料在反应器中的发酵过程和氮养分转化过程也与传统堆肥不同。在密闭式反应器堆肥系统中,由于发酵过程中产生的水蒸气不断冷凝和收集,促进堆体水分含量快速下降,在此环境条件下堆体中的硝化作用反而得到加强^[16]。Petric 等^[17]研究了小型反应器中不同含水率对畜禽粪便和秸秆混合堆肥指标的影响,发现物料含水率较高时可以导致氨损失。筒仓式反应器近年来在我国有机固体废弃物处理行业得到快速推广,但反应器堆肥工艺过程的控制和参数的选择一直以来都缺少科研数据支撑。因此,为优化筒仓式反应器堆肥工艺,揭示不同含水率原料在筒仓式反应器堆肥中的氮素转化特征,该研究拟以污泥和稻糠为主要原料,分析不同含水率的污泥在筒仓式反应器堆肥中的发酵效果和氮素形态转化过程,以期对污泥反应器堆肥工艺和肥料化利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验原料为脱水污泥和稻糠,均取自某城市污水处理厂。堆肥原料基本性质见表 1。

1.2 试验装置

本试验在筒仓式反应器中进行,反应器设备示意图见图 1。筒仓式反应器装置包括进料系统、发酵筒仓、搅拌系统、曝气系统、排气系统、出料系统和自动控制系统,筒仓容积 86 m³,处理量 5~8 m³/d。

1.3 试验设计

综合考虑污泥和秸秆原料的 C/N 和含水率范围,本研究将筒仓式反应器堆肥进料含水率调为 57%,并以此为基础按梯度增加水分含量以确定污泥原料在筒仓式反应器中堆肥所需要的最适含水率。试验共设 4 个处理,各处理含水率调节为 57%、

表1 堆肥原料基本性质
Table 1 Properties of composting materials

原料 Feed stock	含水率/% Moisture content	总碳/% Total carbon	总氮/% Total nitrogen	碳氮比 $m(C) : m(N)$	pH
稻糠 Rice chaff	11.50 ± 0.72	41.03 ± 0.07	0.43 ± 0.02	99.4	7.02 ± 0.03
污泥 Sewage sludge	75.20 ± 0.86	17.36 ± 0.05	2.49 ± 0.03	6.97	7.21 ± 0.04



图1 筒仓式堆肥反应器

Fig. 1 Silo composting reactor

60%、63%和66%，分别用MC57、MC60、MC63和MC66表示。各处理堆肥原料准备方法如下：1)取脱水污泥1000 kg，添加稻糠400 kg，混合均匀，形成含水率57%的混合物料；2)取脱水污泥1000 kg，取稻糠400 kg，取105 kg纯净水与稻糠混匀，再将稻糠与污泥混合均匀，形成含水率60%的混合物料；3)取脱水污泥1000 kg，取稻糠400 kg，取227 kg纯净水与稻糠混匀，再将稻糠与污泥混合均匀，形成含水率63%的混合物料；4)取脱水污泥1000 kg，取稻糠400 kg，取370 kg纯净水与稻糠混匀，再将稻糠与污泥混合均匀，形成含水率66%的混合物料。

筒仓式反应器堆肥为连续动态堆肥工艺，物料在反应器内部自上向下移动，每天进料 8 m^3 、出料 $5 \sim 6 \text{ m}^3$ ，发酵周期9 d。反应器堆肥连续运行后在

反应器下层取样，每个处理连续3天取3次样品。每份样品分为2部分保存，新鲜样品用于测定pH、种子发芽指数(Germination index, GI)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)和酰胺及氰氨态氮，另一份样品自然风干、粉碎后过0.5 mm筛，测定总氮(Total nitrogen, TN)。

1.4 分析方法

采用电子温度计测定温度。酸碱度依据农业行业标准NY 525—2012《有机肥料》中的pH计法测定。种子发芽指数依据农业行业标准NY 3442—2019《畜禽粪便堆肥技术规范》中的方法测定。NY/T 1116—2014硝态氮、铵态氮和酰胺态氮含量依据农业行业标准《肥料 硝态氮、铵态氮、酰胺态氮含量的测定》中的方法测定。总氮采用元素分析仪测定(Elementar Analysensysteme, Hanau, 德国)。

2 结果与分析

2.1 堆肥基本理化指标

2.1.1 堆肥温度

堆肥温度是反映堆肥效果的一个重要指标。在筒仓式反应器内部,堆肥物料从反应器顶部进料,经高温发酵后从反应器底部出料,不同深度物料的发酵温度不同。由图 2 可知,不同含水率的原料发酵温度在反应器内部分布差异较大。当原料含水率 < 63% 时,温度在反应器内部自上而下呈逐渐降低趋势,其中 MC57 处理在物料深度 0.1 m 处发酵温度

最高(70.4 °C)。在物料深度 0.5 m 处,MC57、MC60 和 MC63 处理发酵温度均达到 60 °C。随着发酵物料继续向下移动,原料含水率较低的 MC57 处理发酵温度快速下降,在物料深度 1.0 m 处其温度降低至 55 °C 以下。当原料含水率达到 66% 时,0.5 m 以上物料发酵温度低于 55 °C,随着发酵反应的继续进行,温度逐渐上升至 60 °C,说明原料含水率较高时不利于物料快速升温。整体来看,原料含水率为 60%~63% 时,堆肥物料在反应器内部升温较快,且发酵温度在不同物料深度分布较均匀,有利于快速发酵。

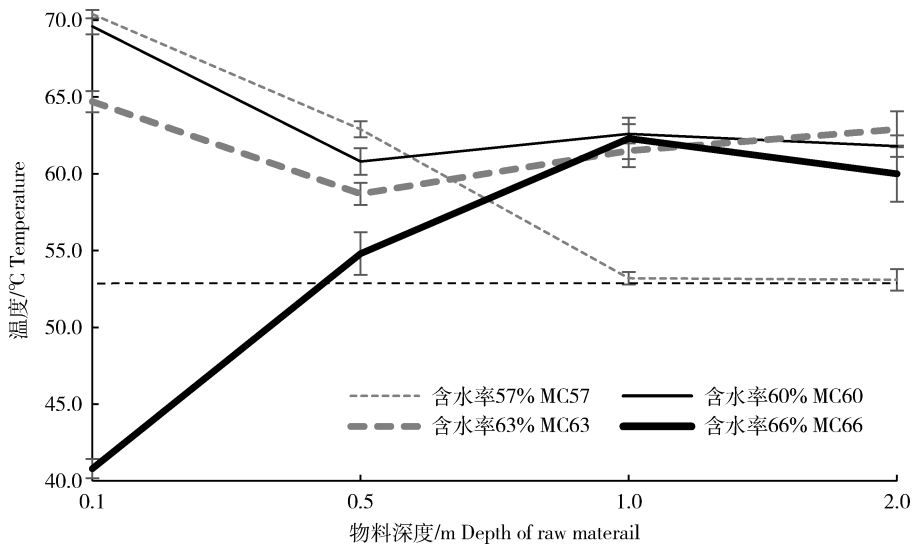


图 2 不同含水率条件下筒仓式反应器内不同物料深度堆肥温度变化

Fig. 2 Changes of temperature during sewage sludge composting in silo reactor under different moisture content

2.1.2 种子发芽指数(GI)

不同含水率条件下污泥反应器堆肥过程中 GI 指标如图 3 所示。《畜禽粪便堆肥技术规范》(NY/T 3442)中将 GI 作为堆肥产物质量评价指标^[18],要求 $GI \geq 70\%$ 。由图 3 可知,各处理 GI 值均大于 79%,达到了堆肥腐熟条件。原料含水率为 60% 的 MC60 处理 GI 值最大,达到 92.01%;其次为原料含水率为 57% 的处理 MC57,GI 值为 90.06%。原料含水率为 66% 的 MC66 处理 GI 值相对其他处理较低,为 79.14%,与 GI 值最高的 MC60 处理之间差异显著($P < 0.05$),其他处理之间差异不显著。数据分析结果表明,当原料含水率介于 57%~66% 时,原料含水率较低的堆肥物料发酵结束时 GI 值较大。

2.2 氮养分指标

2.2.1 总氮变化

不同含水率条件下污泥反应器堆肥过程中氮养分指标变化如表 2 所示。由表 2 可知,原料含水率为 63% 的 MC63 处理总氮(TN)含量最大(14.20 g/kg),原料含水率为 57% 的 MC57 处理 TN 含量最小(11.30 g/kg),MC63 处理与其他处理之间差异显著($P < 0.05$)。结果表明原料含水率过高或过低都不利于 TN 的留存,原料含水率介于 60%~63% 时,有利于提高堆肥物料中 TN 含量。

2.2.2 有机态氮变化

由表 2 可知,原料含水率较高时,堆肥物料中有机态氮含量较高。原料含水率为 66% 的 MC66 处理有机态氮含量最大(6.56 g/kg),且与其他处理之

间差异显著($P<0.05$);其次为原料含水率为63%的MC63处理,有机态氮含量为5.72 g/kg,比MC60处理高39.3%,且与其他处理之间差异显著($P<0.05$);原料含水率为57%的MC57处理有机

态氮含量最小(2.56 g/kg),比MC66处理低60.9%,且与其他处理之间差异显著($P<0.05$)。数据分析结果表明,反应器堆肥过程中原料含水率较低时能够促进有机态氮的分解。

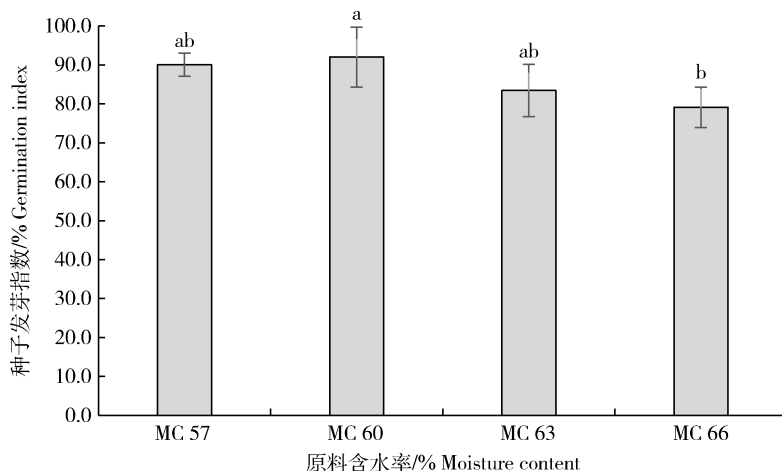


图3 不同含水率条件下污泥反应器堆肥GI值变化

Fig. 3 Changes of GI during sewage sludge composting in silo reactor under different moisture content

表2 不同含水率条件下污泥反应器堆肥氮养分变化

Table 2 Changes of nitrogen nutrient during sewage sludge composting in silo reactor under different moisture content

处理 Treatment	总氮 Total nitrogen	有机态氮 Organic nitrogen	铵态氮 Ammonia nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	酰胺及氰胺态氮 Amide and cyanamide nitrogen
MC57	11.30±0.72 c	2.56±0.51 d	6.11±0.62 a	1.11±0.04 b	1.52±0.21 b
MC60	13.00±0.62 b	3.47±0.41 c	6.50±0.49 a	1.36±0.07 a	1.67±0.18 b
MC63	14.20±0.36 a	5.72±0.54 b	4.69±0.70 b	1.29±0.05 a	2.50±0.24 a
MC66	12.40±0.35 b	6.56±0.31 a	2.34±0.54 c	1.17±0.04 b	2.33±0.19 a

2.2.3 铵态氮变化

由表2可知,原料含水率为60%的MC60处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最大(6.50 g/kg),其次为原料含水率为57%的MC57处理(6.11 g/kg),二者之间差异不显著($P>0.05$)。与MC60处理相比,原料含水率为63%的MC63处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量减少27.8%,原料含水率为66%的MC66处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量减少64.0%,MC60与MC63之间差异显著($P<0.01$),MC63与MC66之间差异显著($P<0.01$)。数据分析结果表明,反应器堆肥过程中原料含水率介于57%~60%时,有利于提高堆肥物料中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量。

2.2.4 硝态氮变化

由表2可知,原料含水率为60%的MC60处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最大(1.36 g/kg),其次为原料含水率为63%的MC63处理(1.29 g/kg),二者差异不显著。MC60处理与MC57处理、MC66处理相比差异显著($P<0.01$),说明原料含水率较低或较高时不利于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形成。数据分析结果表明,反应器堆肥过程中原料含水率为60%时,有利于提高堆肥物料中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。

2.2.5 酰胺及氰胺态氮变化

由表2可知,原料含水率为63%的MC63处理

酰胺及氰氨态氮含量最大(2.50 g/kg),其次为原料含水率为 66%的 MC66 处理(2.33 g/kg),二者差异不显著。MC63 处理与 MC60 处理、MC57 处理相比,差异显著($P < 0.01$),说明原料含水率较低时不利于酰胺及氰氨态氮的形成。数据分析结果表明,反应器堆肥过程中原料含水率介于 63%~66%时,有利于提高堆肥物料中酰胺及氰氨态氮含量。

2.3 氮素转化分析

2.3.1 氮素形态分布

不同含水率条件下污泥反应器堆肥过程中氮素形态分布如图 4 所示。由图 4 可知,原料含水率对不同形态的氮素影响效果不同;随着原料含水率的增加,铵态氮含量逐渐下降,硝态氮含量先增加后下降,酰胺及氰氨态氮含量逐渐增加,有机态氮含量逐渐增加,总氮含量先增加后减少,氮损失量先减少后

增加。从氮养分留存角度分析,原料含水率为 63%的 MC63 处理氮素损失量最少,有利于氮养分的保存。从有效态氮(铵态氮+硝态氮+酰胺及氰氨态氮)含量角度分析,原料含水率为 60%的 MC60 处理有效态氮养分含量最高(9.53 g/kg),与 MC57 和 MC63 处理比差异不显著,与 MC66 处理比差异显著($P < 0.01$)。Chen 等以鸡粪和玉米秸秆为原料进行堆肥时,含水率 63%的堆体发酵过程中具有较明显的硝化作用发生^[19]。Sun 等^[20]研究了原料含水率与硝化作用之间的关系,认为堆肥发酵在密闭环境中时更容易形成冷凝水,当及时排出水分时由于增加了堆体中的氧气含量,因此促进了硝化反应的进行。本研究数据分析结果表明,反应器堆肥过程中原料含水率介于 60%~63%时,有利于提高堆肥物料中有效态氮含量和减少氮养分的损失。

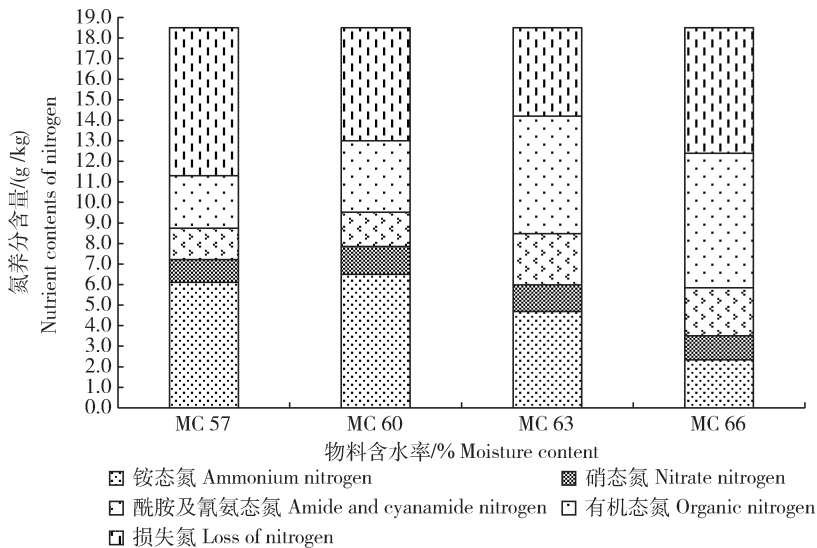


图 4 不同含水率条件下污泥反应器堆肥氮素形态分布

Fig. 4 Distribution of nitrogen forms during sewage sludge composting in silo reactor under different moisture content

2.3.2 原料含水率与氮素形态的相关分析

原料含水率与各氮素形态之间的相关分析结果如表 3 所示。由表 3 可知,当原料含水率为 57%~66%时,含水率与铵态氮之间呈负相关($r_s = -0.820$),与有机态氮之间呈正相关($r_s = 0.941$),与酰胺及氰氨态氮之间呈正相关($r_s = 0.756$),在置信度为 0.01 时以上相关性是显著的。数据分析表明,原料含水率与全氮、硝态氮之间无相关性。

3 讨论

在传统条垛式和槽式堆肥过程中,堆体含水率随堆肥时间的增加逐渐降低,高温堆肥结束时含水率由 60%左右降至 45%以下。与传统条垛式和槽式堆肥环境相比,筒仓式反应器内部堆肥温度最高可达 80℃以上,堆肥周期可缩短至 7~10 d,水分去除效率更高,堆肥结束时下层出料含水率可降至 40%

表3 原料含水率与氮素形态相关分析

Table 3 Correlation analysis between water content of raw materials with nitrogen forms during reactor composting

参数 Parameter	全氮 Total nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	有机态氮 Organic nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	酰胺及氰氨态氮 Amide and cyanamide nitrogen
相关系数 r_s Correlation coefficient	0.433	-0.820 **	0.941 **	0.119	0.756 **
P 值 P value	0.160	0.001	0.000	0.713	0.004

注： r_s ，相关系数，采用 Spearman 分析法；**，在置信度(双侧)为 0.01 时，相关性是显著的。

Note: r_s , correlation coefficient which is analyzed by Spearman method. **, significant at probability level $P < 0.01$.

以下。筒仓式反应器堆肥过程中，在烟囱效应作用下，水汽由下向上蒸发，反应器上层物料始终处于高湿状态，因此原料含水率对堆肥过程影响较大。当原料含水率过高时，不利于反应器内部快速升温；当原料含水率较低时，由于辅料用量的增加会导致处理量的减少和处理成本的增加。本文研究结果表明，当污泥原料含水率高于 63% 时，反应器内部堆体温度开始下降，不利于堆体的快速升温和水分的去除。

在堆肥原料中，氮主要以有机态氮形态存在；随着堆肥发酵反应的进行，有机态氮被分解转化为其它形态的氮，同时其它形态氮也能再次合成为有机态氮^[21]。研究表明，堆肥过程中氮的转化包括氨化作用、硝化作用、反硝化作用、氨气的损失和氮的同化等过程^[22]，氮的主要损失途径是氨气的形成与释放，可占到原料中总氮量的 24.0%~77.4%。堆肥原料含水率对堆体温度具有直接影响，而堆体温度又是影响铵态氮转化的重要因素。在堆肥高温发酵阶段，物料中的有机态氮被分解开始形成铵态氮(NH₄⁺-N)。Pardo 等^[23]研究认为，堆肥原料含水率较低时有利于形成好氧环境，促进好氧微生物的生长，从而促进 NH₄⁺-N 的形成。马丽红^[24]等研究牛粪堆肥中氮素形态的转化发现氨气的挥发占氮总损失的 63%，其中堆肥高温期氨气的挥发量占总挥发量的 69%。本研究中含水率为 57% 的处理堆体上层温度始终保持在 70℃ 以上，堆肥结束时损失态氮占总氮的 48.6%；而含水率为 63% 的处理堆体上层温度维持在 65℃ 左右，堆肥结束时损失态氮占总氮的 29.0%。

在氮素形态分布方面，筒仓式反应器堆肥过程

中的氮素转化及分布与传统堆肥工艺不同。含水率 60% 的牛粪反应器静态堆肥过程中氮素转化研究结果表明，堆肥降温期铵态氮、硝态氮和有机态氮分别占总氮含量的 6.6%、0.6% 和 74.0%^[24]，而本研究中含水率为 60% 的处理堆肥结束时铵态氮、硝态氮和有机态氮分别占总氮含量的 35.1%、7.3% 和 27.8%。由此可知，筒仓式反应器堆肥环境有利于提高堆体中铵态氮和硝态氮的含量，这可能是由于筒仓式反应器具有发酵温度高、堆肥周期短的工艺特征，在较短时间内完成高温堆肥过程有利于提高堆肥产品中氮素养分含量。

4 结论

1) 污泥反应器堆肥原料含水率对堆体升温和各层温度分布具有直接影响。原料含水率为 60%~63% 时，反应器内堆体温度上升较快，堆体温度可达到 60℃ 以上且在不同深度分布较均匀。种子发芽指数 GI 随原料含水率的增加呈下降趋势，含水率为 60% 的堆体 GI 值最大，各处理 GI 值均达到了堆肥标准要求。

2) 污泥原料含水率对反应器堆肥中的氮素转化具有较大影响。随着污泥原料含水率的增加，堆肥结束时堆体中的总氮、铵态氮、硝态氮和酰胺及氰氨态氮含量先升高后下降，有机态氮含量逐渐升高。原料含水率为 60% 的堆体铵态氮和硝态氮含量最高，分别为 6.50 g/kg 和 1.36 g/kg；原料含水率为 63% 的堆体总氮含量和酰胺及氰氨态氮含量最高，分别为 14.20 g/kg 和 2.50 g/kg。原料含水率为 57%~60% 时，堆体中有机态氮分解率较大。

3) 原料含水率可影响反应器堆肥中不同形态氮

素的分布。含水率为 63% 的堆体氮素损失量最少, 有利于氮养分的保存。从有效态氮含量角度分析, 原料含水率为 60% 的堆体有效态氮养分含量最高 (9.53 g/kg)。原料含水率与铵态氮之间呈负相关, 与有机态氮和酰胺及氰氨态氮之间呈正相关, 与全氮、硝态氮之间无相关性。整体来看, 反应器堆肥过程中原料含水率介于 60%~63% 时有利于提高堆肥物料中氮养分含量。

参考文献 References

- [1] Kim E, Lee D H, Won S, Ahn H. Evaluation of optimum moisture content for composting of beef manure and bedding material mixtures using oxygen uptake measurement [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2016, 29 (5): 753-758
- [2] Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Microbial activities during composting of spent pig-manure sawdust litter at different moisture contents [J]. *Bioresource Technology*, 1996, 55(3): 201-206
- [3] Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering* [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993
- [4] Guo R, Li G X, Jiang T, Schuchardt F, Chen T B, Zhao Y Q, Shen Y J. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112(58): 171-178
- [5] Liang C, Das K C, McClendon R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(2): 131-137
- [6] Ahn H K, Richard T L, Glanville T D. Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials[J]. *Waste Management*, 2008(8), 28: 1411-1416
- [7] Bertoldi M D, Vallini G, Pera A. The biology of composting: a review[J]. *Waste Management & Research*, 1983, 1(2): 157-176
- [8] Onwosi C O, Igbokwe V C, Odimba J N, Eke I E, Nwankwoala M O, Iroh I N, Ezeogu L I. Composting technology in waste stabilization; on the method, challenges and future prospects[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190(APR. 1): 140-157
- [9] 徐鹏翔. 反应器堆肥过程中氮素的转化特征及工艺优化研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2019
- Xu P X. Study on nitrogen conversion characteristics and process optimization during composting in reactors [D]. Beijing: China Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [10] Meng L Q, Li W G, Zhang S M, Wu C D, Lv L Y. Feasibility of co-composting of sewage sludge, spent mushroom substrate and wheat straw [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 226: 39-45
- [11] Sims J T, Wolf D C. Poultry waste management: Agricultural and environmental issues[J]. *Advances in Agronomy*, 1994, 52: 1-83
- [12] 陈雅娟, 霍培书, 程旭艳, 尚晓瑛, 李季, 王小兰. 物料 C/N 对鸡粪锯末高温堆肥腐熟过程主要指标的影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 17(5): 118-123
- Chen Y J, Huo P S, Cheng X Y, Shang X Y, Li J, Wang X L. Effects of different C/N of composting materials on main indexes of high-temperature aerobic composting of chicken manure and sawdust [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 17(5): 118-123
- [13] Chowdhury M A, De Neergaard A, Jensen L S. Composting of solids separated from anaerobically digested animal manure: Effect of different bulking agents and mixing ratios on emissions of greenhouse gases and ammonia[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 124: 63-77
- [14] Nigussie A, Kuyper T W, Bruun S, Neergaard A. Vermicomposting as a technology for reducing nitrogen losses and greenhouse gas emissions from small-scale composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139(DEC. 15): 429-439
- [15] Koyama M, Nagao N, Syukri F, Rahim A A, Kamarudin M S, Toda T, Mitsuhashi T, Nakasaki K. Effect of temperature on thermophilic composting of aquaculture sludge: NH₃ recovery, nitrogen mass balance, and microbial community dynamics[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 207-213
- [16] Wang K, Li W G, Li X K, Ren N Q. Spatial nitrifications of microbial processes during composting of swine, cow and chicken manure[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 1-8
- [17] Petric I, Sestan A, Sestan I. Influence of initial moisture content on the composting of poultry manure with wheat straw [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(1): 125-134
- [18] NY/T 3442—2019, 畜禽粪便堆肥技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019
- NY/T 3442—2019, Technical specification for animal manure composting[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2019 (in Chinese)

- [19] Chen W, Liao X D, Wu Y B, Liang J B, Mi J D, Huang J J, Zhang H, Wu Y, Qiao Z F, Li X, Wang Y. Effects of different types of biochar on methane and ammonia mitigation during layer manure composting [J]. *Waste Management*, 2017, 61: 506-515
- [20] Sun Z Y, Zhang J, Zhong X Z, Tan L, Tang Y Q, Kida K. Production of nitrate-rich compost from the solid fraction of dairy manure by a lab-scale composting system [J]. *Waste Management*, 2016, 51: 55-64
- [21] Caceres R, Malinska K, Marfa O. Nitrification within composting: A review [J]. *Waste Management*, 2018, 72: 119-137
- [22] Zeng Y, Guardia A D, Ziebal C, Macedo F J D, Dabert P. Nitrification and microbiological evolution during aerobic treatment of municipal solid wastes [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 144-152
- [23] Pardo G, Moral R, Aguilera E, Pardo A D. Gaseous emissions from management of solid waste: a systematic review [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21: 1313-1327
- [24] 马丽红, 黄懿梅, 李学章, 祁金花, 赵振振, 李萍. 牛粪堆肥化氮素形态与微生物生理群的动态变化和耦合关系 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2674-2679
- Ma L H, Huang Y M, Li X Z, Qi J H, Zhao Z Z, Li P. Changes of nitrogen forms and microbial physiological group diversity and their relations during composting of cow manure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2674-2679

责任编辑: 杨爱东