

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.020

调理料对猪粪好氧堆肥特性的影响试验*

袁巧霞¹ 田纯焱¹ 陈钢² 钟辉¹ 林贵英¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 武汉市农业科学研究所, 武汉 430052)

【摘要】 以猪粪为原料, 添加质量分数为10%、15%、20%的小麦秸秆、玉米秸秆、木屑3种调理料进行好氧堆肥试验, 5d人工翻堆一次。结果表明: 以小麦秸秆和玉米秸秆为调理料的堆置效果比其他调理料效果更好。提高经过处理的玉米秸秆比例能获得更好的堆肥效果, 当增至20%, 能获得比以小麦秸秆为调理料更佳的堆肥效果; 而以小麦秸秆为调理料的好氧堆肥的最佳比例为15%; 小比例的木屑堆肥效果相对次之。

关键词: 猪粪 好氧堆肥 调理料

中图分类号: X705; S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)01-0108-07

Effects of Different Materials Addition on the Aerobic Composting

Yuan Qiaoxia¹ Tian Chunyan¹ Chen Gang² Zhong Hui¹ Lin Guiying¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Wuhan Institute of Agricultural Sciences, Wuhan 430052, China)

Abstract

Wheat straw, corn stover, and saw dust were added into the main composting material, swine manure, respectively to study the effects on the aerobic composting. Dry weight of each material was 10%, 15% and 20% of the total dry weight respectively. The piles were turned over once every 5 days by labor. By the comprehensive research, the composting with materials of wheat straw and corn straw were better than others. The result showed adding more corn straw could get better effect, increasing the proportion of corn straw (when the proportion of corn straw reached 20%) can gain better composting effect than adding wheat straw, while the best proportion of wheat straw was 15%, under that condition, the best effect of composting could be obtained. The composting with litter ration of saw dust was relatively poor.

Key words Swine manure, Aerobic composting, Additional material

引言

随着我国畜禽养殖业向规模化、集约化方向的发展, 畜禽粪便对环境的污染日趋严重。为有效解决这些污染问题, 在畜禽养殖场推行“干清粪, 粪便堆肥, 污水厌氧处理达标、循环利用”的清洁处理工艺势在必行。在这个处理工艺中, 粪便的好氧堆肥由于具有无害化、资源化的特点而备受关注并得到广泛应用^[1-4], 但其堆肥技术关键决定了产品品质、生产周期、生产成本及商品价值, 直接影响到该工艺技术的推广应用。

国内外学者从好氧堆肥工艺^[5-9]、保氮效果^[10]以及碳、养分和质量在玉米秸秆和猪粪混合堆肥中的损失^[11]等方面进行了很多对堆肥特性的研究。在新鲜粪便堆肥过程中, 由于初始含水率高, 孔隙度低, 通透性差, 溶氧量不足, 使堆肥效果较差, 须选择添加合适的原料来调节初始含水率, 提高通透性。不同填充及填充比例, 对于畜禽粪便堆肥效果及品质的影响十分关键。农作物秸秆可作为调理料^[12], 在鸡粪堆肥中, 常采用小麦秸秆^[13-14]; 猪粪堆肥中常添加小麦秸秆^[9]、玉米秸秆^[5]和木屑。在以往试验研究^[15-19]中一般将初始水分调整到适宜的含水

收稿日期: 2011-03-09 修回日期: 2011-05-11

* 武汉市科技攻关计划资助项目(200920222083)和湖北省教育厅产学研合作重大项目(C2010009)

作者简介: 袁巧霞, 教授, 博士, 从事农业生物环境与能源工程研究, E-mail: qxyuan@mail.hzau.edu.cn

率,并添加微生物菌剂,但在实际堆肥中常受到条件及成本的限制而少采用。针对这种情况,本文根据湖北省资源状况,采用小麦秸秆、玉米秸秆和软木屑作为调理料,在不采用其他方式调节初始水分情况下,研究不同调理料及对比对猪粪堆肥有关堆肥温度、含水率、有机质、总氮、粗纤维素、木质素、总磷、总钾等指标的影响特性,以期为畜禽粪便实际堆肥处理提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

主体原料为采自武汉市江夏区郑店养猪场新鲜猪粪,小麦秸秆(处理 A)和玉米秸秆(处理 B)来自于华中农业大学附近农田,都经过晾干处理,然后将 A、B 用铡草机将其轧制成 20 ~ 50 mm 小段。对玉米秸秆还进行搓碎处理,并与干燥粉碎的玉米叶一起混合。木屑(处理 C)来自于华中农业大学修缮中心,大小为 10 ~ 50 mm。添加料质量分数分别设置为 10% (编号 01)、15% (编号 02)、20% (编号 03)。试验材料的理化性质如表 1 所示。

表 1 试验材料成分含量
Tab. 1 Physico-chemical properties of experimental materials %

物料	水分	有机质	全氮	粗纤维素	木质素
小麦秸秆	12.9	95.0	1.0	46.6	12.8
玉米秸秆	11.2	15.0	0.6	44.0	11.6
软木屑	13.3	99.1	0.5	68.6	28.5
鲜猪粪	84.7	82.8	3.1	21.0	16.8

1.2 堆肥试验实施方法

试验装置为直径 0.3 m、高 0.45 m 的塑料桶。为了保温,将塑料桶置于温室并半埋于土中,容器周围填充稻草,上方加盖塑料小棚。考虑到经济实用及操作的可行性,仅采用添加料调节含水率,由于将添加比例作为 1 个因素,各组别初始含水率存在一定差异。根据实测值未调节初始 pH 值。

每天 16:00 时测定各组别堆体的中心温度,在测温以后 5 d 人工翻堆 1 次。为尽可能降低小体积对堆肥的影响,每 10 d 采用多点法进行取样,并混合,鲜样立即进行含水率、pH 值的测定,另取样品风干 1 周后粉碎,过 80 ~ 100 目筛后备用。

1.3 测试方法

采用数显式热电耦温度计测量堆体中心温度;采用 PHB-4 型数字式酸度计测定 pH 值;含水率采用 105℃ 干燥 6 h 以上进行测定^[20];有机质(OM)采用马弗炉 550℃ 灼烧 6 h 以上测定^[20];根据有机肥

农业行业标准测试方法,总氮、总磷、总钾均采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化^[21],前两项采用 FIAStar-5000 Analyzer 型流动注射仪测定;后者采用火焰光度计测定。粗纤维素采用 weende 检测法、木质素采用酸性洗涤木质素法,用纤维素仪(意大利 VELP Fiwe 3/6 型)测定。

根据测得的有机质含量,有机碳的相对含量为^[20]

$$C = \frac{R_{OM}}{1.72} \times 100\%$$

式中 R_{OM}——有机质质量分数, %

2 试验结果与分析

2.1 调理料及对比对堆肥升温的影响

堆肥过程的温度影响各种不同微生物活性。这些微生物在一定条件下都可以对有机质进行分解,但不同堆肥时期各种微生物的活性有所差异,其所降解的物质亦有所不同,从而对堆料特性产生动态影响^[22-23]。

一般情况下,堆肥分为升温期(小于 45℃)、中温期(45 ~ 50℃)、高温期(大于 50℃)、腐熟期 4 个阶段^[13-19,22,24]。本试验中,由于堆体较小,堆体中心温度的高温为 50 ~ 55℃,高温持续时间分别为(图 1):B02 在第 17 ~ 29 天共 13 d, A02、B03 在第 18 ~ 29 天共 12 d, B01 在第 18 ~ 28 天, A03 在第 17 ~ 27 天共 11 d, A01 在第 20 ~ 29 天共 10 d, C01 在第 19 ~ 27 天共 9 d, C02、C03 在第 20 ~ 27 天共 8 d, 都能满足粪便无害化卫生标准^[25]要求。A、B 的升温期都为 12 d, C01、C02 为 16 d, C03 为 18 d, 与一般堆肥相比,升温期较长。堆体难以快速升温的主要原因一方面是堆体太小,在微生物数量上的积累耗费了较多时间;另一方面是高含水率影响了堆体的透气性;其次跟混合后的堆体初始碳氮比值较低(均在 20 以下)也有关系。同一种调理料采用不同对比对升温期影响不大。而不同调理料之间, A、B 差异不大,为 12 d, 比 C01、C02 的升温时间要短 4 d, 而比 C03 短 6 d。各堆肥进入到第 29 ~ 32 天(高温末期)都出现温度突降,原因是外界的突然降温。第 32 天之后各处理组温度降至最低点后开始回升,其变化特征与第 1 ~ 32 天基本相同。从整体上来看此阶段应属于堆肥的腐熟期。不同调理料之间温度变化有显著差异,玉米秸秆作为调理料能较好地满足堆肥期间升温的要求,小比例的软木屑作为调理料时次之。

2.2 调理料及对比对堆肥含水率及 pH 值变化的影响

微生物对有机生物质的降解能力与微生物的生

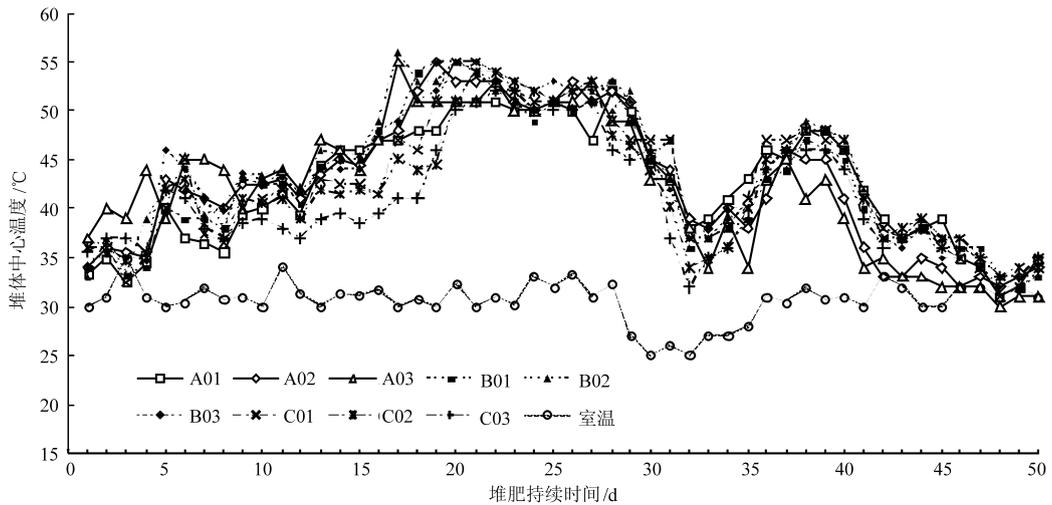


图1 不同处理的堆肥温度变化曲线

Fig. 1 Changes of composting temperature under different treatments

长及代谢能力有关。微生物能否在堆体物料上生长及活性大小取决于该堆体的水分活度,而水分活度与含水率有关。高的水分活度降低空隙率,阻碍气体的扩散,影响微生物的生长,进而影响降解率;而水分活度太低,微生物活性也随之下降。一般而言,细菌要求水分活度在 0.90 ~ 0.99 之间,大多数酵母菌要求水分活度在 0.80 ~ 0.90;真菌及少数酵母菌要求水分活度在 0.60 ~ 0.70;适合好氧微生物生长及有机物质降解的堆体含水率在 55% ~ 70%。

新鲜畜禽粪便含水率较高(大于 80%),远高于堆肥适宜值(55% ~ 70%)。实际生产中为了不增加处理成本,对新鲜粪便含水率不作特别调节,本试验中仅利用干调理料调整含水率和孔隙度。堆肥过程的含水率变化如图 2 所示。经过调理料调节后堆体的实测初始含水率:A 为 76.6% ~ 77.2%;B 为 77.9% ~ 79.3%;C 为 78.1% ~ 80.2%。初始含水率高于堆肥所需的适宜含水率,但随着堆肥过程的进行,含水率不断下降,各处理中含水率的总降幅较大的有:A03 为 21.1%、A02 为 19.2%、B03 为 14.7%、A01 为 14.4%、B01 为 13.8%。A03、A02 在整个过程保持下降;后 3 个处理在堆肥前 40 天降幅较大,40 d 后随着堆肥温度降至 40℃ 以下,含水率降幅减小。其他组别降幅较小,并且主要在前 30 天空气温度出现强降温之前含水率有所下降。29 d 之后,B02 的含水率几乎不再变化,总降幅仅为 10%。C 在经过第 30 ~ 40 天的温度恢复后,虽稍有下降,但总降幅小,这与其高温时间较短有关。最后产品的含水率在 60% ~ 70%,仍然很高。

从理论上讲,希望高含水率新鲜粪便在堆肥过程中前 2 ~ 3 天含水率快速降低到 70% 左右,然后缓慢降湿,使堆肥前 1 个月含水率维持在 55% ~ 70% 之间。本试验中堆体含水率降幅小的原因有 3 个

方面:堆肥在温室中进行,由于温室内相对湿度大,水蒸气分压力高,降低了堆体的水分蒸发速率。堆体太小,初始含水率太高,影响物料升温速率,使水分蒸发推动力降低。堆肥容器为塑料桶,水分蒸发面只有上表面,影响蒸发速率。

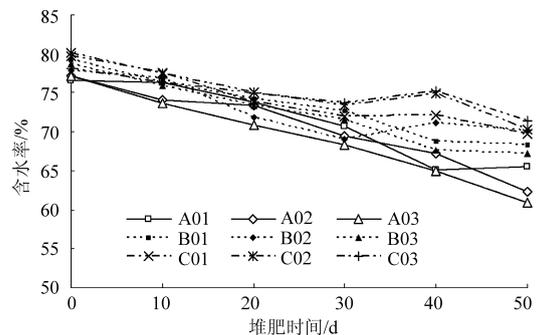


图2 不同处理含水率随时间变化曲线

Fig. 2 Changes of moisture over time under different treatments

试验中物料没有进行初始 pH 值调节,各处理在前 30 天 pH 值均有波动(图 3)。C03 在第 10 天下降到 7.0 以下,B03 在第 20 天降至 7.0。第 1 ~ 30 天内,其他组别都保持在 7.0 ~ 8.6。第 30 ~ 40 天为温度恢复期,pH 值几乎没有变化;40 d 以后明

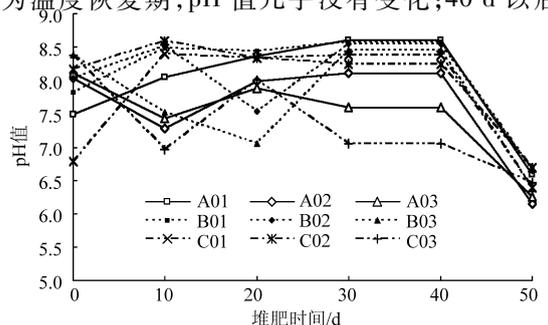


图3 不同处理 pH 值随时间变化曲线

Fig. 3 Changes of pH value over time under different treatments

显降低,堆肥结束后 pH 值一般降至 6.5 左右。

2.3 调理料及配比对有机质降解和全氮损失的影响

堆肥期间有机质(OM)含量一般呈连续下降的趋势^[26-27]。本试验各处理初始有机质含量在 76%~81% 之间(图 4)。随着堆肥时间的进行,A02、A03、B03 处理的有机质降解率较高,呈线性显著下降(R^2 为 0.98~0.99),其降解率分别为 24.9%、24.7%、22.8%。而其他组别一般在第 30 天之后降解减缓。从不同调理料比较,A 处理有机质降解率最高,B 次之,而 C 降解率都较低,其中 C01 最高也只有 10.6%。升温及中温期,微生物能迅速利用易降解的有机物;高温期只有部分微生物能利用难于降解的纤维素和木质素继续降解,进入腐熟期后部分嗜温细菌还能再次繁殖最后降解。因而有机质的降解跟原料的自身特性有一定关系。软木屑的粗纤维、木质素含量远高于其他材料,这是 C 难以很快降解升温的主要原因。另外,干物质含量、pH 值与有机质含量也有一定相关性^[28]。

TN 的损失是堆肥中不可避免的,不同有机氮形态及其相对含量^[29]、pH 值的变化都会影响氮的挥发损失^[24,30]。如图 5 所示,本试验中在 10 d 之前 TN 降低最快,前 30 天 TN 损失最多,其中 TN 损失最多的 3 个处理分别为:C03 为 21.3%,A03 为 20.6%,B03 为 20.2%;TN 损失率最小的依次是 A01、B01、C02。可见调理料比例越高,TN 损失越大。在第 1~30 天 pH 值的波动变化也影响氮的挥发损失。

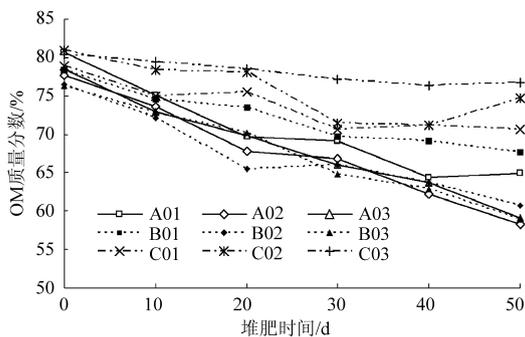


图 4 不同处理 OM 含量随时间变化曲线

Fig. 4 Changes of OM content over time under different treatments

在整个堆肥过程中各处理碳氮比为 15~20,且变化较小。其中 B01、A02、A03、C01 处理碳氮比为 18 左右,B02、B03 处理碳氮比为 15 且几乎不变;而 C03 不降反升,主要原因是它们有较大的 TN 损失过程。碳氮比值在此次小堆体试验中不宜作为评价腐熟度的指标^[31]。其碳氮比均小于 20,对 TN 的损失也造成了影响,这符合较低的碳氮比值(9~12)是堆肥 N 损失的关键因素的观点^[11]。

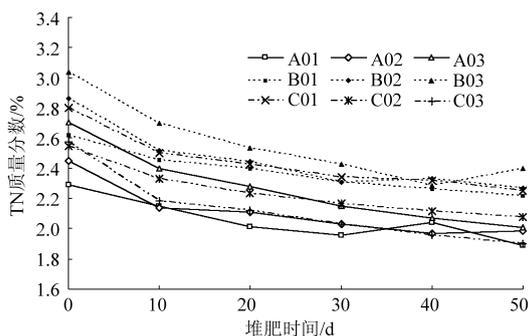


图 5 不同处理的 TN 含量随时间变化曲线

Fig. 5 Changes of TN content over time under different treatments

2.4 调理料及配比对粗纤维素、木质素降解的影响

粗纤维素包括纤维素和半纤维素。由于材料本身特性,处理组 C 粗纤维素含量最高。从图 6 中看出,在堆肥期间纤维素相对含量整体呈 S 下降的趋势,第 1~20 天降低较快,第 20~30 天相对稳定,第 30 天之后继续降低。第 1~20 天,纤维素相对含量降低从大到小依次为 B03、B01、A03,降幅达到 47.4%~50.9%。根据微生物降解粗纤维和木质素的理论,其真菌的降解作用最强,而真菌的最佳的生长温度是 25~30℃^[23]。中温时期降解较快,而第 20~30 天的高温期抑制了真菌的繁殖,存在的高温细菌的降解能力比真菌要差。C01 处理在 1~20 d 的变化率能达到 31%,总降解率可达 52.4%。而 C02、C03 处理的降解率都不大,可见木屑的添加比例不宜过大。A01、A02 处理小幅度连续下降,但 A 处理的总体降解幅度要比 B 处理略差。小堆体较长时间的升温,在一定程度上促进了粗纤维的降解。

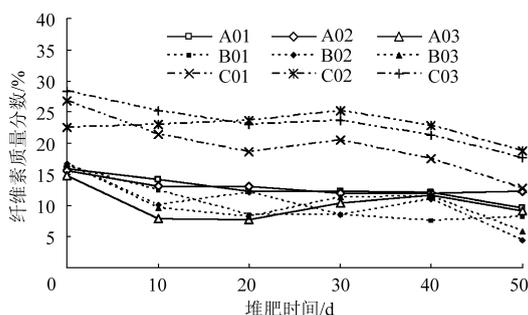


图 6 不同处理纤维素含量随时间变化曲线

Fig. 6 Changes of cellulose content over time under different treatments

好氧堆肥过程中木质素很难降解。本次试验结果显示出木质素的相对含量呈上升的趋势(图 7),其原因是由于有机质的降解使总固体含量下降,木质素相对总固含量的比值或多或少升高。有机质的降解一般主要集中在第 1~30 天,在 30 d 后部分处理会继续降解,这与木质素总体在第 10~30 天或

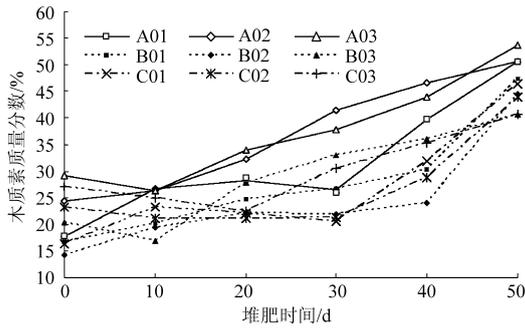


图7 不同处理木质素含量随时间变化曲线

Fig. 7 Changes of lignin content over time under different treatments

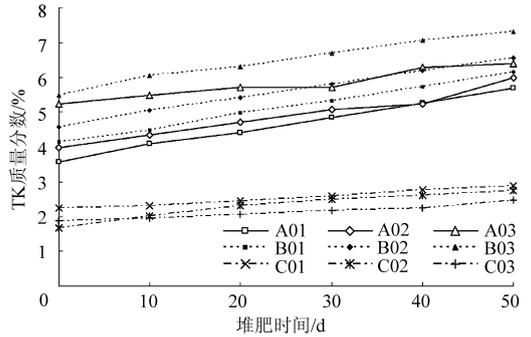


图9 不同处理TK随时间变化曲线

Fig. 9 Changes of TK content over time under different treatments

10~40天上缓慢相关。

2.5 调理料及配比对全磷、全钾变化的影响

全磷(TP)、全钾(TK)的含量变化如图8、9所示。TP呈下降的趋势,而TK则呈上升的趋势,表明TP在堆肥过程中仍然容易损失,而TK不易损失。目前已有针对堆肥过程中P损失的研究^[32],并建议添加无机磷能提高产品有机磷的含量。在变化趋势上,各组别差异性并不明显,但在相对数值上有差异。它们的相对含量与调理料直接相关。

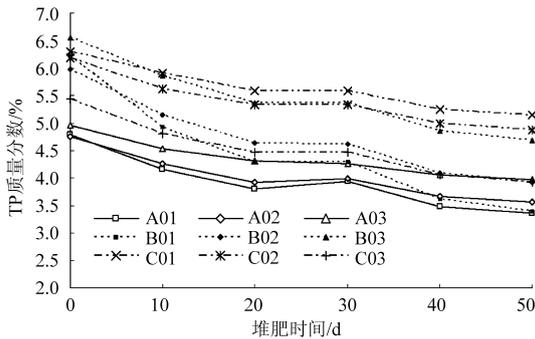


图8 不同处理TP随时间变化曲线

Fig. 8 Changes of TP content over time under different treatments

3 结论

(1)升温期长达12~18d,高温持续时间8~13d。A、B的升温期时间最短,且具有较高高温持续时间,15%的配比处理的高温持续时间最高,B处

理比A处理略强。小堆体在高温期易受到环境温度突降的影响,应做好保温措施。

(2)不同处理的含水率下降与有机质降解有较强的相关性。初始含水率76%~78%时相对获得较大降解率,但最后含水率仍较高,这与在温室高湿环境中堆肥以及堆肥容器自由蒸发面小有关。A处理相对B处理有机质变化更大,添加10%调理料处理有机质降解较慢。但15%~20%的配比中,较低配比处理的有机质降解快。

(3)堆体的温度变化特征与粗纤维素的变化特征有一定相关性。温度在高温期,粗纤维素降解率小,而在45℃下降解率较高。混合堆肥后,经过搓碎的玉米秸秆有较高的降解率,其次是小比例的软木屑,小麦秸秆的降解率比较小。而木质素整体都很难降解。

(4)pH值在升温至高温时先下降后回升,其波动影响TN的损失。配比较高的调理料更容易造成TN的损失。

(5)TP在堆肥中也有一定损失,但是各组别间并不显著。TK、木质素是堆肥中不易变化的物质,因堆肥总物质的下降,其相对含量上升。

(6)综合堆肥特性,以A和B堆肥效果更好,其中15%小麦秸秆添加料最佳,玉米秸秆经过处理后作为添加料可以加大配比至20%。而木屑仅适合小比例填充混合。

参考文献

- 孔源,韩鲁佳. 我国畜牧业粪便废弃物的污染及其治理对策的探讨[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(6): 92~96.
Kong Yuan, Han Lujia. Environmental contamination from animal faeces in China and control countermeasures[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(6): 92~96. (in Chinese)
- Shaema V K, Canditelli M, Fortuna F, et al. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review [J]. Energy Convers. Mgmt., 1997, 38(5): 453~478.
- Maleena Imbeah. Composting piggery waste: a review [J]. Bioresource Technology, 1998, 63: 197~203.
- Bhamidimarri S M R, Pandey S P. Aerobic thermophilic composting of piggery solid wastes [J]. Water Science and Technology, 1996, 33(8): 89~94.

- 5 Zhu Nengwu. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(15):1 870 ~ 1 875.
- 6 李秀金,董仁杰. 粪草堆肥特性的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2002,7(2):31 ~ 35.
Li Xiujin, Dong Renjie. Characteristics of cattle manure and rice straw composting [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(2):31 ~ 35. (in Chinese)
- 7 Fenandes L, Sarta J M. Comparative study of static pile composting: using natural, forced and passive aeration methods [J]. *Compost Science and Utilization*, 1997, 5(4) : 65 ~ 67.
- 8 胡天觉. 城市固体废弃物仓式好氧堆肥工艺改进及理论研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
Hu Tianjue. The research on theory and technology improvement for municipal organic solid waste biodegradation in aerobic vessel composting system [D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)
- 9 吕黄珍,韩鲁佳,杨增玲. 猪粪麦秸反应器好氧堆肥工艺参数优化[J]. 农业机械学报, 2008,39(3):101 ~ 105.
Lü Huangzhen, Han Lujia, Yang Zengling. Optimization of aerobic composting parameters on pig slurry-wheat straw reactor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(3):101 ~ 105. (in Chinese)
- 10 Eklind Y, Kirchmann H. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments 2: nitrogen turnover and losses[J]. *Bioresouse. Technol.*, 2000, 74(2) : 125 ~ 133.
- 11 Tiquial S M, Richard T L, Honeyman M S. Carbon, nutrient, and mass loss during composting [J]. *Nutrient Cycling in Agroeco Systems*, 2002, 62: 15 ~ 24.
- 12 张晓文,赵改宾,杨仁全,等. 农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J]. 农业工程学报, 2006,22(增刊1):107 ~ 109.
Zhang Xiaowen, Zhao Gaibin, Yang Renquan, et al. Comprehensive utilization of agricultural straws in recycle economy [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(Supp.1):107 ~ 109. (in Chinese)
- 13 Ivan Petrica, Almir Sestanc, Indira Sestanc, et al. Influence of wheat straw addition on composting of poultry manure[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2009, 80: 1 ~ 7.
- 14 李国学. 不同通气方式和秸秆切碎程度对堆制效果和养分转化的影响[J]. 农业环境保护, 1999,18(3):106 ~ 110.
Li Guoxue. Influence of ventilating and mincing of straw on effects of composting and transformation of nutrients [J]. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(3):106 ~ 110. (in Chinese)
- 15 倪梅娣,陈志银,程绍明. 不同添加剂对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 204 ~ 208.
Ni Meidi, Chen Zhiyin, Cheng Shaoming. Effect of different bulking agents on aerobic composting of swine feces [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(Supp.): 204 ~ 208. (in Chinese)
- 16 程绍明,马杨琿,姜雄晖. 不同木屑含量对猪粪好氧堆肥过程的影响研究[J]. 江西农业大学学报, 2009,31(5): 833 ~ 836.
Cheng Shaoming, Ma Yanghui, Jiang Xionghui. The effects of different wood contents on composting process of pig manure [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, 31(5): 833 ~ 836. (in Chinese)
- 17 李玉红,王岩,李清飞. 不同原料配比对牛粪高温堆肥的影响[J]. 河南农业科学, 2006,11:25 ~ 27.
Li Yuhong, Wang Yan, Li Qingfei. Effect of different material ratio on high temperature composting of dairy manure[J]. *Henan Agricultural Science*, 2006, 11:25 ~ 27. (in Chinese)
- 18 康军,张增强,张维,等. 玉米秸秆添加比例对污泥好氧堆肥质量的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010,32(2):172 ~ 176.
Kang Jun, Zhang Zengqiang, Zhang Wei, et al. Influence of different proportions of sludge to maize straw ratio on the quality of sludge compost [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(2):172 ~ 176. (in Chinese)
- 19 邵淼,杨淑英,张增强,等. 不同处理对高含水率奶牛粪便好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报 2010,29(5): 982 ~ 989.
Shao Miao, Yang Shuying, Zhang Zengqiang, et al. Effect of different treatments on composting of high water content dairy manure [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2010, 29(5): 982 ~ 989. (in Chinese)
- 20 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,1999.
- 21 中国标准出版社第一编辑室. 中国农业标准汇编土壤肥料卷[S]. 2 版. 北京:中国标准出版社,2002:463 ~ 489.
- 22 李国学,黄懿梅,姜华. 不同堆肥材料及引入外源微生物对高温堆肥腐熟度影响的研究[J]. 应用与环境生物学报, 1999,5(增刊1):139 ~ 142.
Li Guoxue, Huang Yimei, Jiang Hua. Effect of different materials and inoculating microbes on compost maturity [J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 1999, 5(Supp.1):139 ~ 142. (in Chinese)
- 23 席北斗,刘鸿亮,白庆中,等. 堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(3):19 ~ 23.

- Xi Beidou, Liu Hongliang, Bai Qingzhong, et al. Study on current status of lignin and cellulose biodegradation in composting process [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(3):19~23. (in Chinese)
- 24 Emeterio I J, Vicor P G. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I: evolution of temperature, pH, carbon nitrogen ratio and cation-exchange capacity[J]. *Resource, Conservation and Recycling*, 1991, 6(1): 45~60.
- 25 国家质检总局. 粪便无害化卫生标准 GB 7959—1987 [S]. 北京:中国标准出版社,1987.
- 26 高伟,郑国砥,高定,等. 堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征[J]. *环境科学*, 2006, 27(5): 986~990.
Gao Wei, Zheng Guodi, Gao Ding, et al. Transformation of organic matter during thermo-philic composting of pig manure [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(5): 986~990. (in Chinese)
- 27 胡天觉,曾光明,黄国和,等. 仓式好氧堆肥中影响有机物发酵降解的主要因素[J]. *湖南大学学报*, 2004, 30(5): 31~35.
Hu Tianjue, Zeng Guangming, Huang Guohe, et al. Factors influencing the organic solid waste biodegradation in aerobic vessel compost system [J]. *Journal of Hunan University*, 2004, 30(5): 31~35. (in Chinese)
- 28 王晓燕,黄光群,韩鲁佳. 鸡粪工厂化堆肥过程中有机质含量预测模型[J]. *农业机械学报*,2010,41(1): 101~105.
Wang Xiaoyan, Huang Guangqun, Han Lujia. Prediction model for organic matter content in chicken manure during plant-filed composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(1): 101~105. (in Chinese)
- 29 鲍艳宇,周启星,颜丽,等. 不同畜禽粪便堆肥过程中有机氮形态的动态变化[J]. *环境科学学报*, 2008,28(5):930~936.
Bao Yangyu, Zhou Qixing, Yan Li, et al. Dynamic changes of organic nitrogen forms during the composting of different manures [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5):930~936. (in Chinese)
- 30 Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J. Denitrification losses of N from fresh and composted manures [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 12(4):39~43.
- 31 Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment (a review) [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5444~5453.
- 32 赵素芬. 猪粪好氧堆肥过程中磷元素变化规律的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
Zhao Sufen. Study on the phosphorus during the aerobic composting process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- 33 王永江,黄光群,韩鲁佳. 自由空域对猪粪麦秸好氧堆肥的影响实验分析[J]. *农业机械学报*,2011,42(6):122~126.
Wang Yongjiang, Huang Guangqun, Han Lujia. Effects analysis of free airspace to pig slurry wheat straw aerobic composting in laboratory reactor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6):122~126. (in Chinese)