

微生物异位发酵床技术在生猪养殖废弃物处理中的应用研究

董立婷^{1,2}, 朱昌雄¹, 张丽¹, 马金奉¹, 杨翔华², 耿兵^{1*}

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业清洁领域团队, 北京 100081; 2.辽宁石油化工大学环境与生物工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要:针对传统微生物发酵床技术在实际应用中存在的一些问题,本研究采用微生物异位发酵床技术应用于生猪养殖废弃物的处理,探究了试验过程中填料的基本参数变化及养殖废水的吸纳量,为更好地应用和推广微生物异位发酵床技术提供理论依据。结果表明:发酵床填料最高发酵温度为66℃,在40℃以上维持了48d。试验全过程pH值平均在8左右,处于弱碱性环境下,适宜微生物的好氧发酵。填料含水量保持在50%~65%,适宜微生物的好氧发酵。本研究中每千克填料对生猪养殖废水的吸纳系数为2.53,优于对奶牛养殖废水的吸纳系数。发酵体系微生物以细菌活动为主,填料中的微生物有效地降解、消除废弃物有机物。研究结束时,填料的总养分含量和有机质的质量分数分别为6.19%和56.11%,均达到国家有机肥料关于总养分含量及有机质的质量分数的标准。

关键词:异位发酵床;填料;微生物;废水

中图分类号:X713 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2016)06-0540-07 doi:10.13254/j.jare.2016.0102

引用格式:

董立婷,朱昌雄,张丽,等.微生物异位发酵床技术在生猪养殖废弃物处理中的应用研究[J].农业资源与环境学报,2016,33(6):540-546.

DONG Li-ting, ZHU Chang-xiong, ZHANG Li, et al. Research and Application of Ectopic Microbial Fermentation System in Processing Piggery Waste [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 540-546.

Research and Application of Ectopic Microbial Fermentation System in Processing Piggery Waste

DONG Li-ting^{1,2}, ZHU Chang-xiong¹, ZHANG Li¹, MA Jin-feng¹, YANG Xiang-hua², GENG Bing^{1*}

(1.Agricultural Clear Watershed Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; 2.Institute of Environmental and Biological Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: In order to provide theoretical basis for application of the ectopic microbial fermentation bed, the efficiency and quality of the ectopic microbial fermentation bed in processing piggery waste were evaluated by measuring the changes of physicochemical and environmental factors and the absorption of piggery wastewater. The results showed that the fermentation temperature of the filler maintained above 40 °C for up to 48 days and the highest fermentation temperature was 66 °C. The alkaline environment and the moisture of filler remaining 50%~65% during the fermentation was suitable for aerobic fermentation of microorganisms. The absorption coefficient of piggery wastewater of the filler was 2.53, which was better than that of dairy wastewater. Microbial activity was mainly based on bacteria in the fermentation system and the organic matter was degraded and utilized by microorganisms at the same time. After the fermentation, the total nutrient content and the organic matter mass fraction of the filler was 6.19% and 56.11%, respectively, which met with the national standard for organic fertilizer.

Keywords: ectopic microbial fermentation bed; filler; microorganism; wastewater

收稿日期:2016-03-16

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2013ZX07103-06,2015ZX07103-007,2014ZX07510-001);公益性行业(农业)科研专项课题(201303094-03)

作者简介:董立婷(1990—),女,辽宁鞍山人,硕士研究生,从事农业农村有机废弃物污染控制与资源化循环利用研究。

E-mail:dongliting2015@126.com

*通信作者:耿兵—E-mail:gengbing2000@126.com

随着我国畜禽养殖业规模化的快速发展,畜禽粪便产生的环境污染问题日益严重。《第一次全国污染源普查公报》的数据显示,我国农业面源、生活源和工业源三大主要污染物排放量中农业面源 COD 和总氮排放量分别占全国排放量的 43.7% 和 57.2%, 而农业面源的主要污染来自畜禽养殖业, 其中生猪养殖业污染又占畜禽养殖业污染的 80%~90%^[1]。生猪养殖由散养转向大规模集约化养殖后, 大量未经处理的生猪粪便所造成的环境污染问题已威胁到农业和社会经济的可持续发展^[2]。

近年来, 利用微生物发酵床养殖技术控制和降低畜禽养殖业环境污染得到了较为广泛的研究和应用。该技术在我国部分省市陆续展开试点, 并于 2008 年被国家环境保护部建议推广^[3]。该技术利用养殖垫料中的微生物将畜禽粪尿进行原位分解, 是一种将畜禽饲养及粪尿处理统一在养殖舍内完成的环保型饲养方式^[4-5]。但是, 在实际生产应用中存在一些问题, 例如发酵床制作对垫料原材料的需求量非常大, 导致原料成本较高^[6]; 床体发酵时温度较高, 畜禽直接生长在垫料上, 高温不利于其正常生长; 垫料中可能保留一些生病猪携带的病原菌, 对健康猪造成病害隐患等^[7]。

本研究改变了传统微生物发酵床养殖技术, 采用异位微生物发酵床模式, 即发酵床与畜禽养殖分离的模式对养殖废弃物进行处理, 并应用到生猪养殖场中, 并针对性地处理生猪养殖场废水。试验通过微生物发酵升温蒸发水分的原理, 解决生猪养殖场过多废水污染的问题; 在对异位发酵床填料基础参数测定的基础上, 探究生产实践中异位发酵床运行的工艺参数变化规律及对污染的吸收和处理效果, 分析异位发酵床运行的机制, 从而为异位发酵床的推广应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验在北京顺义某生猪养殖场进行。异位发酵床与养殖区同时建设, 如图 1 和图 2 所示, 异位发酵床规格为 300 cm×100 cm×90 cm, 对应养殖区域为异位发酵养殖区, 共养殖生猪 5 头, 养殖时间从 2015 年 5 月 29 日开始, 到 2015 年 7 月 22 日结束, 共计 55 d。

1.2 试验材料

本研究选择的菌剂为开创阳光猪场垫料发酵剂零污染 I 号, 用量为 1 500 g。该菌剂以芽孢杆菌为主, 有益菌数 >10⁹ 个·g⁻¹, 填料为玉米秸秆, 用量为 280

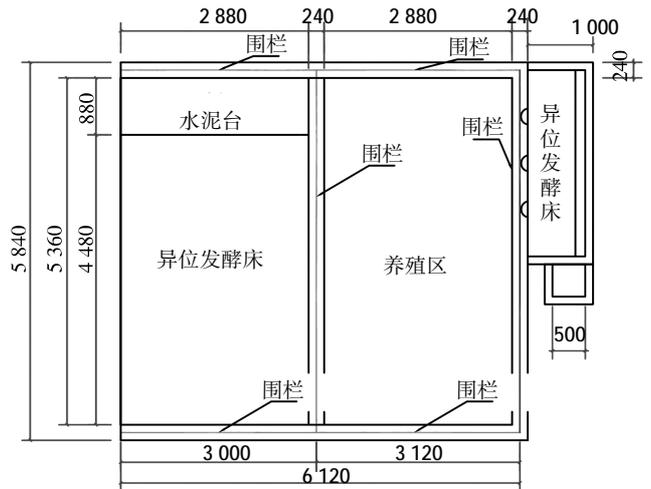


图 1 异位发酵床俯视图(1:100, mm)

Figure 1 Planform of ectopic microbial fermentation bed (1:100, mm)

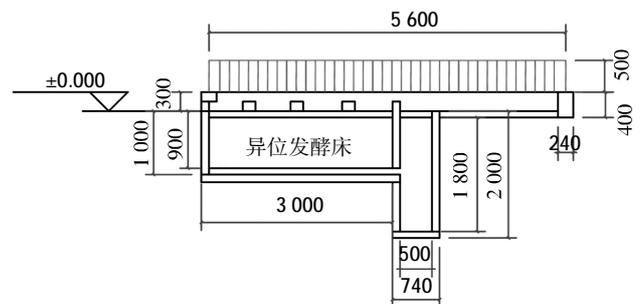


图 2 异位发酵床剖面图(1:100, mm)

Figure 2 Profile of ectopic microbial fermentation bed(1:100, mm)

kg。将玉米秸秆粉碎成 0.5~2 cm 小段后与菌剂混合均匀, 调节含水量至约 50%, 倒入发酵床内进行发酵床的制作, 预发酵 4 d, 之后开始试验。试验选择的仔猪为 40 kg 左右的小黑猪, 并依据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》计算每日每头猪产生的粪便量和尿液量。

1.3 试验设计及样品采集

为保证发酵床填料的含水量维持在 50%~60%, 试验过程中严格控制养殖区域的用水量, 大约每 10 d 冲洗养殖区域 1 次, 控制冲水量 20 kg 左右。冲洗后废水沿养殖区(倾斜角度 5°)由排污孔直接排放到异位发酵床体中, 然后采用手推自走式小型翻堆机(2.2 kW 电机, 220 V 电压)对填料进行深度机械翻堆。每日采用人工清粪的方式将粪污推送至发酵床表面, 并进行简单机械翻堆。

分别在试验的第 0、1、4、7、13、20、27、34、42、55 d

采集发酵床上层(0~20 cm)、中层(20~30 cm)及下层(30~50 cm)处的填料样品各约 400 g,并将其混合均匀,取 60 g 样品直接用来测定 pH 值、含水量、微生物数量,其余样品自然风干粉碎后测定总氮、C/N 比、有机质、总钾、总磷。

1.4 试验方法

1.4.1 温度

每日上午 9 点左右测定填料 30 cm 深度点的温度及环境温度。

1.4.2 填料 pH 值

将样品用四分法缩至 5 g 后,加入 45 mL 的无菌水,用振荡器在室温下连续振荡 30 min,静置 30 min 后用 pH 计测其上清液的 pH 值。

1.4.3 填料含水量及废水吸纳能力

将样品用四分法缩至 50 g,用恒温干燥箱在 105 °C 下干燥 4 h,取出后冷却 30 min,测定其含水量;将添加的废水重量与填料初始质量相比,其比值即为发酵过程中填料的废水吸纳能力。

1.4.4 填料中可培养的微生物数量

采用稀释涂布平板法培养填料中的微生物。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基分离培养,培养 1~2 d;真菌采用改良高氏一号培养基分离培养,培养 3~4 d。

1.4.5 填料的总氮、C/N 比、有机质、总钾、总磷测定

采用有机肥标准 NY 525—2012 中的相关方法进行测定。

2 结果与讨论

2.1 温度

微生物发酵床的温度是最能直接反映床体发酵效率的参数,温度的变化可以反映填料中微生物活性的变化^[9]。试验期间室内温度和填料温度的变化情况

如图 3 所示。从图 3 可以看出,室温的变化范围较小,在 18~31 °C 之间。填料温度在试验的第 0 d 与室温接近,而试验的第 1 d 填料温度骤然上升,升至 57.8 °C。这个期间,由于填料中的微生物快速分解生猪废弃物及填料中大量易分解的有机物,释放大热量,引起床体温度上升,发酵床发酵成功。一般来讲,35~50 °C 为发酵床微生物生活的适宜温度,床体的温度过高或者过低都不利于微生物发酵床的运行,进而影响对生猪养殖废弃物的处理效果^[9-10]。发酵工程上,堆肥温度一般要求控制在菌种生活的最适宜温度范围的上限:50~60 °C,所以在使用原位发酵床养殖技术时,通常会因床体温度过高而导致不利于畜禽的生长,因此,要经常注意通风、翻耙等^[11]。此次试验利用异位发酵床技术,将床体与养殖过程分离来处理生猪养殖的废弃物,可以有效地解决传统微生物发酵床在此方面的问题。试验初期,床体温度至少 3 d 保持在 55 °C 以上,从而可以杀灭填料中有害微生物,确保了填料的卫生指标合格^[12]。整个发酵过程中填料温度一般在 35~60 °C 间,最高发酵温度为 66 °C,发酵床的温度在 40 °C 以上维持了 48 d。填料温度变化呈现为先升高后下降的重复过程,而整体呈下降的趋势。在试验初期,大量易分解的有机物及废弃物被填料中的本土微生物及菌剂微生物快速分解产热,温度上升;随着填料的消耗,微生物活性降低,导致温度略有下降^[13];但是,每日生猪的新鲜排泄物不断地填入发酵床内,并定时采取人工翻堆的方式使填料与废弃物混合均匀,使得填料温度上升;随着营养成分的消耗,温度又一次略有降低,从而填料温度呈上下浮动的重复变化。整个试验为不断消耗能量直至床体“老化”的过程,因此,填料温度缓慢下降,直至第 55 d 床体温度降至与室温接近,发酵结束。

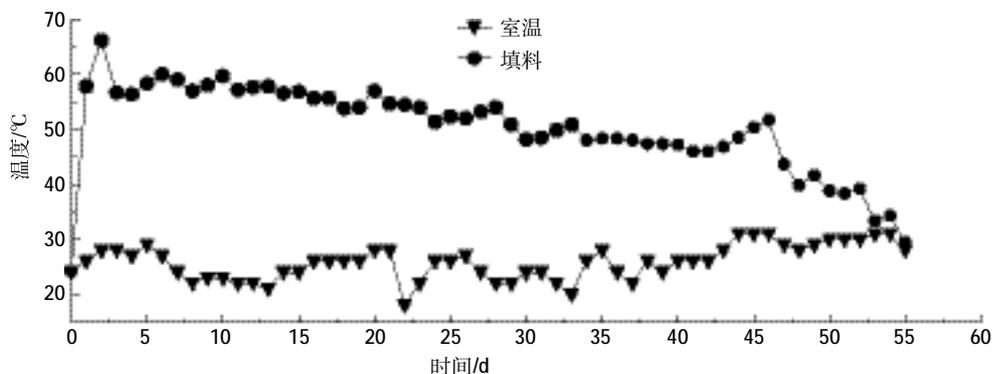


图 3 发酵过程中室温与填料温度的变化

Figure 3 Temperature changes of air and the filler during the fermentation

2.2 填料 pH 值

pH 值是影响微生物活性的重要理化性质之一。异位发酵床的发酵过程主要依靠微生物的作用,将废弃物分解和转化,因此,只有在适宜的 pH 值条件下,微生物才可以有效地发挥作用,通常认为 6.5~8.5 为微生物好氧发酵的适宜 pH 值范围^[14-15]。试验初期,填料中大量微生物迅速繁殖,易分解有机物及生猪废弃物被微生物分解,产生有机酸,导致 pH 值略有下降;随着猪粪水的不断进入及填料的消耗,微生物分解蛋白质类有机物,产生大量的氨氮和氨累积于填料之中,导致 pH 值开始上升;之后微生物持续分解含氮类物质,造成氨挥发,同时硝化作用和有机物的分解也会产生 H⁺,又导致 pH 值逐渐降低(图4)。试验全过程 pH 值平均在 8 左右,处于弱碱性环境下,适宜微生物的好氧发酵。通常情况下,发酵床发酵过程中不需要调节床体的 pH 值,其本身可以自动调节酸碱性达到平衡^[16]。试验中异位发酵床发酵过程中的 pH 值有起有伏就是在发酵过程中的自身调节。

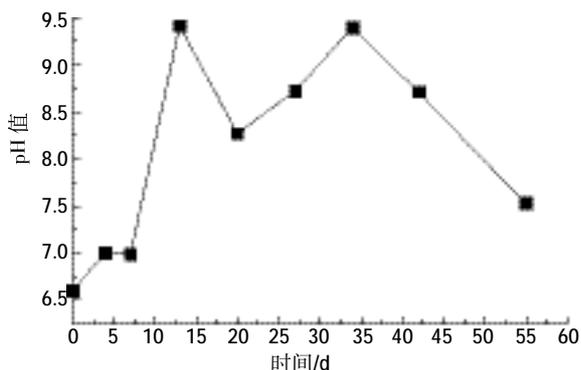


图4 发酵过程中 pH 值的变化

Figure 4 Changes of pH in filler during the fermentation

2.3 填料含水量

水分作为微生物生长繁殖必要因素之一起到有机质溶解、参与微生物新陈代谢及调节填料温度的作用^[17]。一般认为微生物好氧发酵的最重要控制因素是水分,发酵过程中填料的物理性质及生物学性质直接受到含水量和水分调控情况的影响,进而决定好氧发酵反应的速度。大量试验研究表明发酵床初始含水量

控制在 50%~65%较为适宜^[18]。试验开始,床体初始含水量调控为 52.47%(图 5),随着试验的进行和废水的进入,填料含水量升高,异位发酵床试验初期阶段含水量在 60%~65%,满足了发酵床启动阶段快速升温的需要;随着试验的进行,由于环境温度及填料的持续高温造成了水分的快速蒸发,填料含水量下降,引起微生物发酵速度减缓,这也是发酵床填料温度下降的原因之一。随着试验过程中养殖区域废水及生猪尿液的流入,填料的含水量又上升。试验全程填料含水量保持在 50%~65%,适宜微生物的好氧发酵。

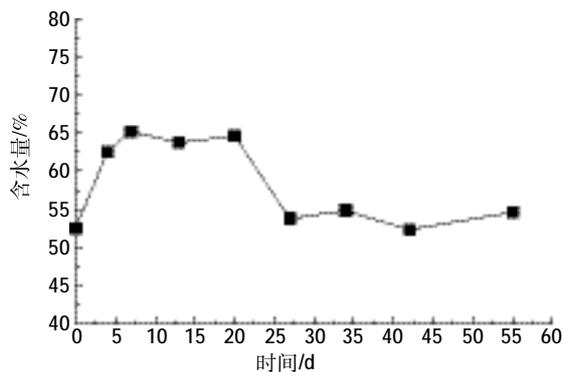


图5 发酵过程中含水量的变化

Figure 5 Changes of moisture content in filler during the fermentation

生猪养殖场养殖废水产生量较大,如果得不到及时有效地处理而直接排放,将会对周围水体产生严重的污染问题。微生物异位发酵床技术改变了传统微生物原位发酵床养殖模式,从而可以避免废水排放量较大而造成的“死床”问题,并显示了对养殖废水独特的处理作用。如表 1 所示,本研究平均每 10 d 冲洗养殖区域 1 次,共计用水 119.86 kg。根据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》,华北区生猪育肥期尿液产污系数为 2.14 L·头⁻¹·d⁻¹,粪便产污系数为 1.81 L·头⁻¹·d⁻¹。本研究共计养殖生猪 5 头,育肥期 55 d,共计产生尿液 588.50 L,粪便 497.75 kg。国辉^[19]利用玉米秸秆作为异位发酵床填料并处理奶牛场养殖废水,结果表明,在发酵结束时填料对奶牛场养殖废水的吸纳系数为 2.42。经计算本试验发酵结束

表 1 发酵过程中养殖区冲洗用水量(kg)

Table 1 Amount of scouring water during the fermentation (kg)

日期 Date	5月31日	6月09日	6月19日	6月29日	7月09日	7月19日	合计
养殖区冲洗水量	19.91	19.94	20.03	20.24	19.83	19.91	119.86

注:养殖数量为 5 头猪。

时异位发酵床填料对生猪养殖废水和粪便的吸纳系数分别为 2.53 和 1.78, 表明其对生猪养殖废水的吸纳能力优于对奶牛养殖废水的吸纳能力。

2.4 微生物数量

微生物发酵床功能的发挥紧紧依赖于本土微生物及菌剂微生物的协同作用, 而微生物的数量变化可以反映出发酵床的运行情况。发酵过程中填料的营养成分、pH 值、温度等的变化都会影响微生物群落的变化^[20]。发酵床发酵初期微生物数量较低, 随着发酵床内不断添加养殖废弃物, 填料中可直接利用的养分较多, 微生物迅速繁殖, 此时细菌、真菌数量快速增加 (图 6), 同时, 大量微生物分解粪尿及填料中的有机物释放的热量导致床体温度迅速升高。试验初期床体中的大量微生物分解能力较强, 床体持续高温使得水分蒸发较快, 填入的猪粪和废水被微生物快速分解和消耗。第 20 d, 床体的含水量持续下降, 并且 pH 值持续升高且处于碱性的环境中, 此时不利于微生物的生长繁殖, 这个阶段细菌和真菌的数量均下降^[19]。随着填料含水量和养分含量逐渐上升, 细菌和真菌数量升高。进入试验后期, 随着床体逐渐“老化”, 可直接利用的营养成分逐渐减少, 细菌和真菌的数量减少。试验全过程, 细菌数量从第 0 d 的 $0.03 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高为第 55 d 的 $11.90 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$, 细菌数量基本处于 $10^7 \sim 10^8$ 数量级; 真菌数量从第 0 d 的 $0.01 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高为第 55 d 的 $0.25 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$, 真菌数量处于 $10^6 \sim 10^7$ 数量级, 所以在该微生物发酵作用中, 细菌的发酵作用起主要作用。

2.5 营养成分的变化

异位发酵床发酵前后填料中营养成分(总氮、总磷、总钾、有机质、碳氮比)的变化如图 7 和图 8 所示。

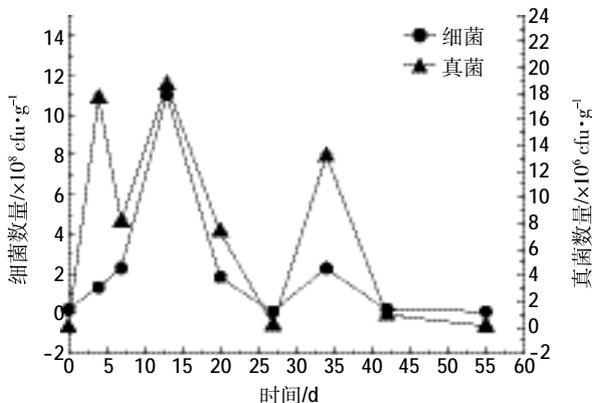
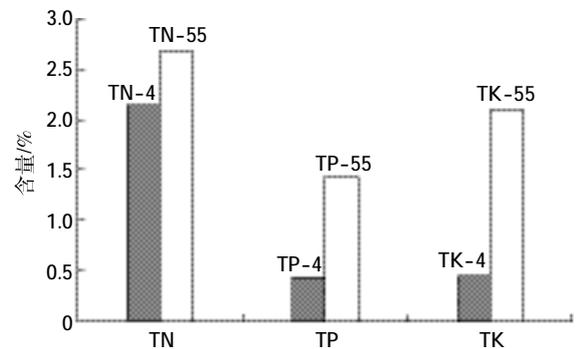


图 6 发酵过程中微生物数量的变化

Figure 6 Changes of quantities of microorganisms in filler during the fermentation

从结果可以看出试验全过程, 填料的总氮、总磷、总钾较发酵前均有所提高, 而填料的有机质、碳氮比较发酵前均下降。填料中 TN、TP、TK 含量分别由发酵初始的 2.14%、0.44%、0.45% 增加为结束时的 2.67%、1.42%、2.1%, 分别增加了 28.97%、222.73%、366.67%; 填料的有机质含量、C/N 比分别由发酵初始的 67.96%、18.48 减少为结束时的 56.11%、12.17, 分别减少了 17.44%、34.15%。

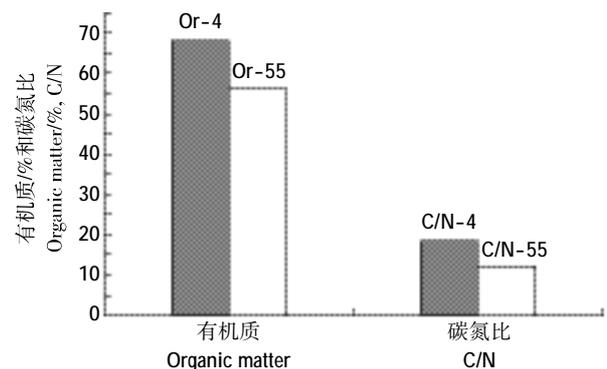
通常来说, TN、TP、TK、有机质含量及 C/N 比是评价堆肥腐熟标准的指标^[21]。床体发酵后微生物大量繁殖, 快速分解猪粪尿及填料中易分解有机物, 产生大



“TN-4”、“TN-55”、“TP-4”、“TP-55”、“TK-4”、“TK-55”分别为填料在发酵前(第 4 d)和发酵后(第 55 d)总氮、总磷和总钾的含量
“TN-4”, “TN-55”, “TP-4”, “TP-55”, “TK-4” and “TK-55” mean changes of total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the filler before fermentation (on day 4th) and after fermentation (on day 55th), respectively

图 7 发酵过程中 TN、TP、TK 含量的变化

Figure 7 Changes of TN, TP, TK in filler during the fermentation



“Or-4”、“Or-55”、“C/N-4”、“C/N-55”分别为填料在发酵前(第 4 d)和发酵后(第 55 d)有机质、碳氮比的含量
“Or-4”, “Or-55”, “C/N-4”, and “C/N-55” mean changes of organic matter and C/N ratio in the filler before fermentation (on day 4th) and after fermentation (on day 55th), respectively

图 8 发酵过程中有机质、C/N 比的变化

Figure 8 Changes of organic matter, C/N in filler during the fermentation

量氨氮和氨。随着发酵的进行,填料中微生物持续快速生长和繁殖,加快了分解有效氮的速度并以铵态氮的形式累积,而后导致床体 pH 值上升,抵制了硝化细菌的活性,氮会以氨气的形式释放^[22]。试验后期,随着床体温度下降,大量硝化细菌产生导致硝态氮含量上升,因此,发酵床体系 TN 含量缓慢上升。有机质是微生物繁殖、生存的基本条件,碳元素为微生物生命活动提供能量^[23]。发酵过程中随着填料温度上升,大量微生物生长繁殖且微生物活性升高,易分解的有机物被大量分解,碳元素为其分解提供了能量,C/N 比下降;但试验后期,由于填料中还存有一些难分解有机物及纤维素,因此,有机质含量下降并不明显。

试验后 TP、TK 含量显著上升,这是因为试验过程中,猪粪和废水不断填入填料,废弃物中含有较高营养元素,并且微生物不断分解有机物,有机物降解并以 NH₃、CO₂ 等形式挥发,导致填料的干重减少,所以 TP、TK 含量较发酵前显著上升^[24]。试验结束后填料的总养分含量为 6.19%,有机质的质量分数为 56.11%,达到 NY 525—2012 国家有机肥料关于总养分含量及有机质的质量分数的标准。

3 结论

试验采用微生物异位发酵床技术,即将床体与养殖过程分离来处理生猪养殖的废弃物,有效地解决了传统微生物发酵床存在的一些问题。

(1)试验初始,填料温度高于 55℃保持 3 d 以上,可以有效消灭填料中有害微生物,提高填料的卫生安全系数;试验全过程,发酵最高温为 66℃,填料温度高于 40℃的发酵天数共计 48 d,填料温度基本维持在 35~60℃之间,可以确保床体的良好发酵。

(2)将初始填料的含水量调节为 52.47%,可以满足启动床体发酵的需求;试验全过程中填料含水量处于 50%~65%间,有利于微生物的好氧发酵;经过计算,本研究中填料废水吸纳能力的系数为 2.53,优于对奶牛养殖废水的吸纳系数,有效地解决了传统微生物发酵床出现的“死床”问题,且试验期间对异位发酵床的管理,操作起来较为容易。

(3)试验全过程 pH 值平均浮动于 8 左右,填料中的微生物处于弱碱性环境下,适宜好氧发酵;本研究的微生物发酵体系以细菌活动为主,其好氧发酵有效地降解、消纳生猪排泄的废弃物等有机物。

(4)研究结束时,填料中的有机质、碳氮比均下降,TN、TP、TK 均上升,填料的总养分含量为 6.19%,

有机质的质量分数为 56.11%,均达到我国有机肥料关于总养分含量及有机质的质量分数的标准,满足其作为再利用的有机肥料的基本要求,提高了农业生产的资源利用率和经济效益。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部.第一次全国污染源普查公报[N].人民日报,2010-02-10(16).
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 1st national survey of pollution sources bulletin[N]. People's Daily, 2010-02-10(16). (in Chinese)
- [2] 吴利珍.规模养猪场粪污污染及治理对策[J].畜牧与兽医,2013,45(12):126-127.
WU Li-zhen. The pollution and countermeasures of piggery waste[J]. Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2013, 45(12): 126-127. (in Chinese)
- [3] 王远孝,李雁,钟翔,等.猪用发酵床的研究与应用[J].家畜生态学报,2007,28(6):139-142.
WANG Yuan-xiao, LI Yan, ZHONG Xiang, et al. Research and application of biology bed for pigs[J]. Acta Ecologica Animalis Domestici, 2007, 28(6): 139-142. (in Chinese)
- [4] 施光发,甘友保,朱冠元,等.土壤微生物发酵床养猪技术[J].畜牧与兽医,2006,38(3):59.
SHI Guang-fa, GAN You-bao, ZHU Guan-yuan, et al. Technology of microbial fermentation bed for pigs[J]. Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2006, 38(3): 59. (in Chinese)
- [5] 胡海燕,于勇,徐晶,等.发酵床养猪废弃垫料的资源化利用评价[J].植物营养与肥料学报,2013,19(1):252-258.
HU Hai-yan, YU Yong, XU Jing, et al. Evaluation on resource utilization of litters in pig-on-litter farming system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 252-258. (in Chinese)
- [6] Lu Y C, Wang X F, Wang X J, et al. Characterization of the effective cellulose degrading strain CTL-6[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(4): 649-655.
- [7] 纪玉琨,何洪,薛念涛.我国发酵床养猪技术发展现状研究[J].黑龙江农业科学,2014,39(6):135-139.
JI Yu-kun, HE Hong, XUE Nian-tao. Research of development status on deep litter system for pig breeding in China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014, 39(6): 135-139. (in Chinese)
- [8] 李婧.发酵床不同深度垫料中微生物与温室气体的分布特征[D].南京:南京农业大学,2012:4-6.
LI Jing. Distribution of microbe and greenhouse gas in different depth of bio-bed[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012: 4-6. (in Chinese)
- [9] Zaki N G, Khattab I A, Abd El-Monem N M. Removal of some heavy metals by CKD leachate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(1-2): 21-27.

- [10] 肖佳华, 郭 萍. 生态养猪发酵床垫料原料替代技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 2012:3-22.
XIAO Jia-hua, GUO Ping. Study on substitution of raw materials in pig-on-litter system[D]. Beijing: Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, 2012: 3-22. (in Chinese)
- [11] 余 苗, 高凤仙. 发酵床养猪及其关键影响因素[J]. 家禽生态学报, 2011, 32(4): 93-96.
YU Miao, GAO Feng-xian. The fermented bed for pig-raising and the key factors[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2011, 32(4): 93-96. (in Chinese)
- [12] Cronje A L, Williams A G, Tuner C, et al. The respiration rate of composting pig manure[J]. Compost Science and Utilization, 2004, 12(2): 119-129.
- [13] 蒋建明, 闫俊山, 白建勇, 等. 微生物发酵床养猪模式的关键技术研究与应用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 173-176.
JIANG Jian-ming, YAN Jun-shan, BAI Jian-yong, et al. The research and application of the key technology in the microbial fermentation bed for pig-raising[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 173-176. (in Chinese)
- [14] Sundberg C, Smars S, Jonsson H. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting [J]. Bioresource Technology, 2004, 95(2): 145-150.
- [15] 焦洪超, 栾炳志, 宋志刚, 等. 发酵床养猪垫料基础参数变化规律研究[J]. 中国兽医学报, 2013, 33(10): 1610-1614.
JIAO Hong-chao, LUAN Bing-zhi, SONG Zhi-gang, et al. Study on the basic parameters of litters in fermenting-bed system of pig production [J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2013, 33(10): 1610-1614. (in Chinese)
- [16] 曹 珍, 陈 峰, 张祥斌, 等. 发酵床养殖畜禽基本技术参数的研究进展[J]. 家畜生态学报, 2014, 35(4): 7-11.
CAO Zhen, CHEN Feng, ZHANG Xiang-bin, et al. Review of basic parameters of deep-litter system for breeding livestock and poultry [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2014, 35(4): 7-11. (in Chinese)
- [17] Richuard T L, Hamelers H V M, Veeken A, et al. Moisture relationships in composting processes[J]. Copost Sci Utilizat, 2002, 10(4): 286.
- [18] 蓝江林, 宋泽琼, 刘 波, 等. 微生物发酵床不同腐熟程度垫料主要理化特性[J]. 福建农业学报, 2013, 28(11): 1132-1136.
LAN Jiang-lin, SONG Ze-qiong, LIU Bo, et al. The main physical and chemical characteristics of pig litter in the microbial fermentation bed [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 28(11): 1132-1136. (in Chinese)
- [19] 国 辉. 异位发酵床技术在奶牛养殖废水污染控制中的研究及应用[D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 中国农业大学, 2013: 70-71.
GUO Hui. Research and application of ectopic deep litter fermentation system in the control of dairy farming wastewater pollution[D]. Beijing: Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, China Agricultural University, 2013: 70-71. (in Chinese)
- [20] 蓝江林, 刘 波, 史 怀, 等. 微生物发酵床养猪技术研究进展[J]. 生物技术进展, 2012, 2(6): 411-416.
LAN Jiang-lin, LIU Bo, SHI Huai, et al. Advances in research of microbial fermentation bed in pig farming[J]. Current Biotechnology, 2012, 2(6): 411-416. (in Chinese)
- [21] 尹红梅, 贺月林, 李兰芝, 等. 发酵床陈化垫料堆肥的腐熟条件[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(3): 84-87.
YIN Hong-mei, HE Yue-lin, LI Lan-zhi, et al. Decomposing conditions of composting aging dunnage in fermentation bed[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(3): 84-87. (in Chinese)
- [22] 马 晗, 郭海宁, 李建辉, 等. 发酵床垫料中有机质及氮素形态变化[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3): 388-391.
MA Han, GUO Hai-ning, LI Jian-hui, et al. Variation of organic matter and nutrient forms in pig bio-bed litters[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(3): 388-391. (in Chinese)
- [23] 刘海琴, 张志勇, 罗 佳, 等. 养猪发酵床废弃垫料高温堆置肥料的研究[J]. 江西农业学报, 2015, 27(8): 44-48.
LIU Hai-qin, ZHANG Zhi-yong, LUO Jia, et al. Research on composting waste bedding material for pig-raising through high-temperature fermentation[J]. Jiangxi Acta Agriculturae, 2015, 27(8): 44-48. (in Chinese)
- [24] Guo H, Beng B, Zhu C X, et al. Characterization of bacterial consortium and its application in an ectopic fermentation system[J]. Bioresource Technology, 2013, 139: 28-33.