

异位发酵床处理农村厕所黑水的效果研究

李佳彬, 李路瑶, 刘雪, 陈卓帛, 宋婷婷, 朱昌雄, 耿兵

引用本文:

李佳彬, 李路瑶, 刘雪, 等. 异位发酵床处理农村厕所黑水的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1998–2005.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0393>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微生物发酵床不同深度垫料的细菌群落多样性

陈倩倩, 刘波, 朱育菁, 刘国红, 车建美, 王阶平, 郑雪芳, 张海峰

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2412–2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0361>

磷脂脂肪酸生物标记法分析养猪发酵床微生物群落结构的空间分布

郑雪芳, 刘波, 朱育菁, 王阶平, 陈倩倩, 魏云华

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 804–812 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1225>

基于宏基因组方法分析养猪发酵床微生物组季节性变化

陈倩倩, 刘波, 王阶平, 朱育菁, 张海峰

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1240–1247 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1330>

果壳种类对生物膜特性及废水处理效果的影响

胡小兵, 汪坤, 沈翼军, 张琳, 姚友长, 林睿, 顾娴静

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2887–2894 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0601>

天津市畜禽粪污处理工艺对抗生素抗性基因的去除效果

闫雷, 丁工尧, 杨凤霞, 阮蓉, 韩秉君, 支苏丽, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2021–2030 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1280>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李佳彬, 李路瑶, 刘雪, 等. 异位发酵床处理农村厕所黑水的效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1998–2005.

LI J B, LI L Y, LIU X, et al. Effects of ectopic microbial fermentation on the treatment of rural toilet black water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1998–2005.



开放科学 OSID

异位发酵床处理农村厕所黑水的效果研究

李佳彬, 李路瑶, 刘雪, 陈卓帛, 宋婷婷, 朱昌雄, 耿兵*

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:为了解决农村厕所黑水带来的环境污染问题,并促进其资源化利用,本研究采用异位发酵床技术处理农村厕所黑水,探究了试验过程中填料的基本参数和微生物数量的变化,并评价了发酵后填料的营养肥效。结果表明:发酵床填料温度整体呈现先升高后降低的变化趋势,基本维持在40~57℃,含水量在50%~65%波动变化,pH值由7.80上升至8.46,电导率变化不明显。发酵床填料微生物以细菌为主,其分布量达到 $10^7 \sim 10^8$ CFU·g⁻¹,高出真菌和放线菌数量2~3个数量级。试验结束时,填料的种子发芽指数为118.05%,表明填料对作物无毒性;填料的TN、TP和TK含量均显著增加,而有机质和C/N显著降低($P < 0.05$),填料对厕所黑水的吸纳系数为2.51,总养分含量和有机质分别为5.85%和76.82%,均满足《有机肥料》(NY 525—2012)的标准。

关键词:异位发酵床;农村厕所黑水;微生物;资源化处理

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)09-1998-08 doi:10.11654/jaes.2021-0393

Effects of ectopic microbial fermentation on the treatment of rural toilet black water

LI Jiabin, LI Luyao, LIU Xue, CHEN Zhuobo, SONG Tingting, ZHU Changxiong, GENG Bing*

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract: In this study, microbial ectopic fermentation technology was used to treat black water from rural toilets, and changes in basic parameters, microbial abundance, and nutrient composition were explored. The results indicated that temperature first increased and then decreased, maintained at 40~57℃, the water content was 50%~65%, the pH value increased from 7.80 to 8.46, and the conductivity did not change significantly during the fermentation of black water. Bacteria were the most abundant microbes, with a magnitude of $10^7 \sim 10^8$ CFU·g⁻¹, and the abundance of fungi and actinomycetes was 2~3 orders of magnitude lower than that of bacteria during ectopic fermentation. The seed germination index of the litter was 118.05%, indicating that waste litter was not toxic to crops. TN, TP, and TK increased significantly, whereas organic matter and C/N decreased significantly ($P < 0.05$). The absorption coefficient of the litter in the black water was 2.51. At the end of the experiment, the total nutrient and organic matter content reached *The Organic Fertilizer* (NY 525—2012) standard, at 5.85% and 76.82%, respectively.

Keywords: ectopic fermentation system; rural toilet black water; microorganism; resourceful treatment

据统计,我国农村每年产生生活污水超过90亿t,人粪尿约2.6亿t^[1]。黑水指包括人类粪便、尿液和冲洗水的厕所污水^[2],是农村生活污水的最主要来源之一。研究表明,生活污水中50%~60%的化学需氧量(COD)、80%~90%的氮、50%~57%的磷和大部分

病原微生物来自于黑水^[3-5]。未经有效处理的厕所黑水若直接排放进水体和土壤中,会对生态环境产生严重威胁,进而影响食物及饮用水安全。另外,粪尿又是优质的肥料资源和土壤调节剂,在补充农田氮、磷和钾等营养元素方面具有很大的潜力^[6-7]。

收稿日期:2021-04-02 录用日期:2021-06-08

作者简介:李佳彬(1997—),女,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:lijabin9705@163.com

*通信作者:耿兵 E-mail:gengbing2000@126.com

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX07603-002)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017ZX07603-002)

目前,国内外对黑水处理的技术主要包括好氧生物处理技术^[8-9]、厌氧生物处理技术^[10-11]、电化学技术^[12]、好氧-厌氧结合处理技术^[13-14]等,但大多数黑水处理技术只是实现了降解有机物和脱氮除磷,而浪费了大量的养分资源。通常情况下,我国农村地区的厕所黑水在经化粪池等预处理后,被运送到附近的污水处理厂集中处理,最终达标排放。黑水处理作为农村生活污水处理的一个重要内容,如果不与资源化利用相结合,则会出现综合效益较低、处理模式不可持续等问题,因此,农村厕所黑水的资源化利用成为目前研究的一个重点问题。SKJELHAUGEN等^[15]建立了一种厨余垃圾和黑水的封闭中温好氧处理系统,该系统处理后的废弃物氮损失较少,养分和有机质含量较高,具有良好的农值。谢欣好等^[16]利用稳定化厌氧滤池-人工强化植物栽培系统资源化处理黑水,发现番茄、咖啡、黄葵、辣椒等经济农作物在该栽培系统中生长良好,且植物体内重金属含量没有超过标准,从而能够带来经济效益。

微生物异位发酵床技术是基于微生物原位发酵床改进的一种粪污废弃物处理技术,该技术在连续动态条件下,利用高温好氧发酵的原理处理养殖废弃物,并实现资源转化^[17]。目前,微生物异位发酵床技术已在畜禽养殖废弃物处理上得到了广泛的研究和应用,并取得了良好的环境与经济效益。有学者研究了微生物异位发酵床技术处理生猪养殖废弃物^[17-18]、奶牛养殖废水^[19]和蛋鸡养殖废弃物^[20]的基本参数变化及粪污吸纳量,结果表明畜禽养殖废弃物经微生物好氧发酵后得到了有效降解,同时腐熟填料可作为有机肥料还田。与畜禽养殖粪污不同,农村厕所粪污中重金属和抗生素含量较低^[21-22],从而降低了其资源利用的生态安全风险。目前,未见微生物异位发酵床处理农村厕所粪污的研究和应用报道。因此,本研究采用微生物异位发酵床技术处理农村厕所黑水,并对发酵床填料的基本理化性质、微生物数量和营养成分的变化进行分析,评价最终腐熟填料资源化利用价值,从而为微生物异位发酵床技术资源化利用农村厕所黑水提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验在北京市顺义区某温室大棚进行。模拟液体发酵罐为塑料圆柱体发酵桶,内径45 cm,高73 cm,总体积为100 L。异位发酵床装置采用45 cm×45 cm×45 cm规格的泡沫发酵箱。本试验从2020年12

月16日开始,到2021年1月25日结束,共计40 d,试验设置3个重复。

1.2 试验材料

根据已有研究报道^[17-18],本研究选择某公司生产的生物腐植酸(BFA)菌剂作为微生物菌剂,用量为每1 000 g黑水添加5 g菌剂。该菌剂以芽孢杆菌为主,有效活菌数 $>10^9$ 个 $\cdot$ g $^{-1}$,腐植酸 $\geq 14\%$ 。玉米秸秆与稻壳按质量比为1:1进行混合后作为发酵床填料,每个发酵箱的用量为8 kg。玉米秸秆和稻壳均由某公司提供,其基本理化性质:pH值为6.20和7.55,有机质含量为78.35%和52.49%,碳氮比(C/N)为52.84和41.85,全氮(TN)含量为0.86%和0.74%,全磷(TP)含量为0.098%和0.053%,全钾(TK)含量为1.12%和0.85%。试验厕所黑水取自北京市顺义区某村镇农户化粪池厕所,其COD浓度为1 624.33 mg $\cdot$ L $^{-1}$,氨氮浓度为668.56 mg $\cdot$ L $^{-1}$,总氮浓度为740.48 mg $\cdot$ L $^{-1}$,总磷浓度为37.03 mg $\cdot$ L $^{-1}$,固形物(TS)含量为9 900 mg $\cdot$ L $^{-1}$,pH值为9.24,电导率(EC)为11.61 mS $\cdot$ cm $^{-1}$,细菌总数为 1.28×10^5 CFU $\cdot$ g $^{-1}$ 。

1.3 试验设计及样品采集

将100 kg厕所黑水装入塑料发酵桶中,添加500 g BFA菌剂,混合均匀,并采用增氧泵(功率105 W,曝气量85 L $\cdot$ min $^{-1}$)对黑水进行间歇曝气,其水力停留时间(HRT)为4 h,一方面为厕所黑水好氧发酵提供氧气,另一方面推动黑水在发酵桶内循环流动,使其与菌剂维持完全混合的状态。将混合BFA菌剂的厕所黑水添加到发酵床填料中,搅拌均匀,调节初始含水量为55%左右。在试验过程中每7 d向发酵床填料中添加一次厕所黑水,维持填料含水量在50%~60%^[19],每次添加量分别为13.04、4.45、1.02、2.49、2.13 kg和1.99 kg,共计添加25.12 kg黑水。每日进行一次人工翻搅,从发酵箱的底部由下到上充分翻搅3 min,以保证小型发酵箱发酵的持续进行。在试验第14 d,向发酵床添加约2 kg干燥的玉米秸秆和稻壳,并进行翻堆处理。

分别在试验第0、2、7、14、21、28、35 d和40 d采集3个重复组的发酵床上层(0~20 cm)、中层(20~30 cm)及下层(30~40 cm)各100 g左右填料样品,并混合均匀。新鲜样品用于测定含水量、pH值、EC值和微生物数量,风干样品用于测定有机质、TN、TP和TK等。

1.4 测定指标及方法

每日上午9:00用堆肥温度计测定填料10、25、

40 cm 深度处的温度,同时记录发酵箱附近的环境温度。新鲜样品按 1:10($m:V$)与离子水混合振荡,取上清液,分别用 S-3C 型 pH 计和 DDS-11A 型电导率仪测定填料 pH 值和 EC 值。按照文献[18-20]的方法测定填料含水量、微生物数量和种子发芽指数(GI)。填料有机质、TN、TP 和 TK 采用《有机肥料》(NY 525—2012)中的相关方法测定。

定期记录添加厕所黑水的质量,计算废水吸纳系数,废水吸纳系数表示每千克填料在发酵过程中吸纳黑水的能力,为黑水添加总量(kg)与填料初始质量(kg)的比值。

1.5 数据分析

利用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对试验数据进行统计分析和绘图,采用单因素方差和 Duncan 检验法分析显著性差异;利用 Pearson 相关系数分析显著相关性。

2 结果与分析

2.1 异位发酵床填料温度变化

图 1 为异位发酵床试验过程中不同深度填料的温度变化趋势。在试验开始时,发酵床 3 处深度的填料平均温度为 10.6 °C,从第 2 d 开始温度迅速上升,在第 5 d 时升高至 57.0 °C 左右。之后第 8 d 填料温度下降较快,到 14 d 时的填料温度降至最低为 27.5 °C。在第 14 d,向发酵床内添加干燥的玉米秸秆和稻壳,并进行翻堆处理。在第 18 d,填料温度重新升高到 40 °C 以上,发酵床填料内的反应继续进行。试验第 21 d 时,温度逐渐下降,直至第 40 d 降至环境温度。试验阶段处于冬季,环境温度比较低,在 3.0~12.0 °C 范围内变化。通过显著性对比分析可以看出,填料内不同深度处(10、25 cm 和 40 cm)的温度均呈现相同的变化趋势,而且各层之间差异不显著。本试验过程

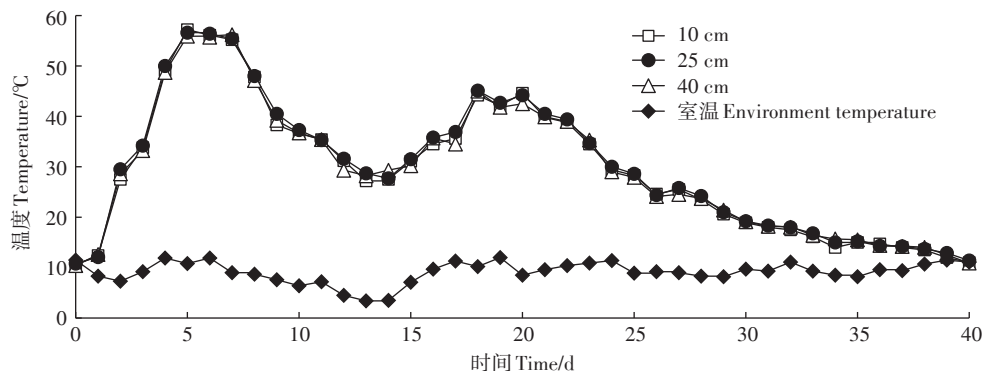


图 1 试验过程中不同深度填料的温度变化

Figure 1 Changes in temperature of different layers of litter during fermentation

中,填料平均温度维持在 45 °C 左右,其中 50 °C 以上的高温持续了 4 d 左右。

2.2 异位发酵床填料 pH 值和 EC 值变化

异位发酵床填料 pH 值和 EC 值的变化情况如图 2 所示。在试验过程中,填料的 pH 值呈现先波动上升后下降的趋势。第 0 d 的初始 pH 值为 7.88,之后 pH 值波动上升,在第 21 d 达到最大值,为 8.95。随后填料的 pH 值缓慢下降,在试验结束时, pH 值为 8.46,较试验初始值略有上升。在整个试验阶段,填料 pH 值基本稳定在 8.0~9.0,呈弱碱性,比较适合微生物的生长和好氧发酵。与 pH 值的变化趋势不同,EC 值在试验过程中变化幅度不明显,呈现先下降后微弱上升的趋势,最后逐步趋于稳定,总体处在 1.25~1.98 $mS \cdot cm^{-1}$ 。

2.3 异位发酵床填料含水量变化

在试验初期,填料含水量为 57.83%,为发酵床发酵的适宜含水量。在试验过程中,由于厕所黑水的持续添加和发酵床的好氧发酵,填料含水量呈现上下波动的变化趋势,第 14 d 含水量最高,为 66.80%。填料含水量在试验过程中基本保持在 50%~65%,有利于微生物的生长繁殖。试验结束时,填料含水量为

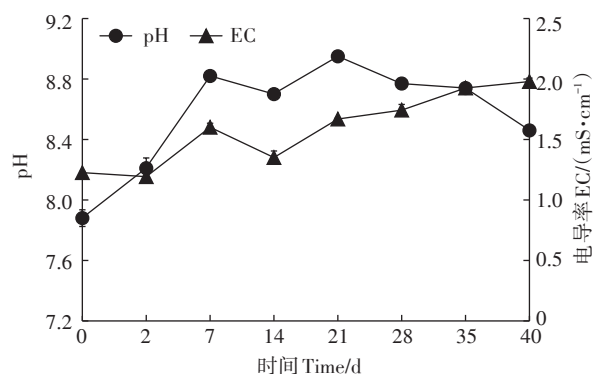


图 2 试验过程中填料 pH 值和 EC 值的变化

Figure 2 Changes in pH and EC of the litter during fermentation

51.57%, 低于填料初始含水量。

2.4 异位发酵床填料微生物数量变化

图3为异位发酵床微生物数量变化趋势图。试验初始第0 d的微生物数量普遍较低,随着试验的进行,微生物大量繁殖,填料的细菌、真菌和放线菌数量分别从开始的 1.14×10^7 、 8.47×10^4 CFU·g⁻¹和 6.93×10^6 CFU·g⁻¹增加到最大值 4.58×10^8 、 2.93×10^5 CFU·g⁻¹和 2.37×10^7 CFU·g⁻¹。随着填料温度的升高,微生物数量尤其是真菌数量开始下降,随着温度的降低,在第14 d真菌数量开始上升,试验结束时真菌数量为 9.7×10^4 CFU·g⁻¹。试验全过程放线菌和细菌都呈现先上升后下降的趋势,试验结束时,细菌和放线菌的数量分别为 1.27×10^8 CFU·g⁻¹和 4.43×10^5 CFU·g⁻¹。在本研究中,发酵床填料中的细菌、真菌和放线菌的数量级分别为 10^8 、 10^5 CFU·g⁻¹和 10^6 CFU·g⁻¹,可见异位发酵床中参与降解黑水中有机的主要微生物为细菌。

2.5 异位发酵床填料营养成分含量变化

图4和图5为异位发酵床试验初始与结束时填料中营养成分(TN、TP、TK、有机质和C/N)的变化情况。从图4中可以看出,与试验初始相比,试验结束时填料中的TN、TP和TK显著增加。填料中TN、TP、TK含量分别由试验初始的0.84%、0.23%和1.28%增加为结束时的1.88%、0.68%和2.01%,分别增加了1.04、0.45、0.73个百分点。如图5所示,试验结束时填料中有机质含量和C/N显著降低,分别由试验初始的94.77%和62.20降低为结束时的76.82%和24.09,有机质含量下降了17.95个百分点,C/N下降了61.28%。

2.6 异位发酵床填料种子发芽指数变化

试验开始第0 d的GI值为83.48%,表明初始填料对植物有较低的毒害作用。随着试验的进行,GI值明显降低,在第7 d达到最小值,为43.17%。之后GI

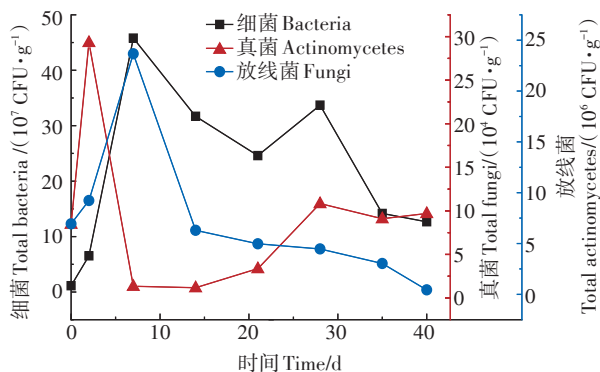
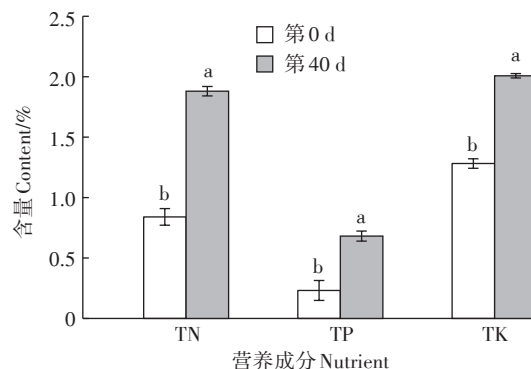


图3 试验过程中填料中微生物数量的变化

Figure 3 Changes in the abundance of microorganisms of litter during fermentation



不同小写字母表示第0 d与第40 d差异显著($P < 0.05$)。下同
Different letters indicate significant differences between 0 d and 40 d ($P < 0.05$). The same below

图4 试验初始和试验结束时填料TN、TP、TK含量比较

Figure 4 Comparison of the TN, TP, and TK content in litter between the beginning and ending day

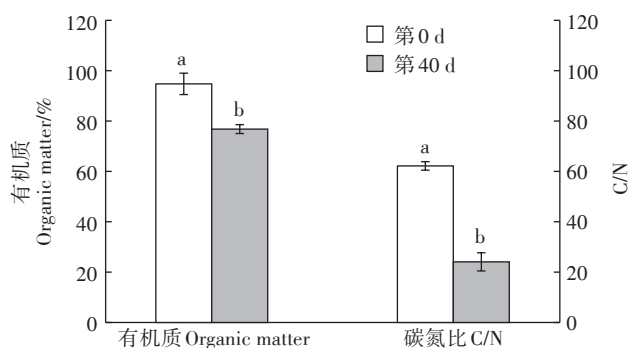


图5 试验初始和试验结束时填料有机质含量和C/N比较

Figure 5 Comparison of the organic matter content and C/N in litter between the beginning and ending day

值逐渐上升,在第28 d超过80%,至试验结束时达到118.05%,表明填料已腐熟,对植物无毒害作用,并起到了促进植物种子发芽和根伸长的作用。

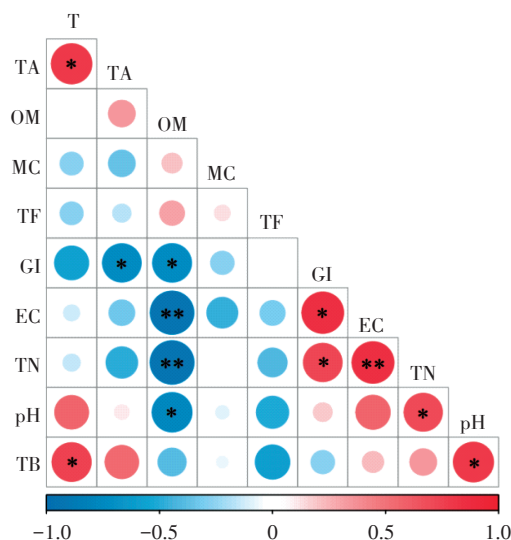
2.7 异位发酵过程中理化指标间相关性分析

试验过程中异位发酵床各理化指标间的相关性如图6所示。从图中可以看出,填料温度与细菌数量、放线菌数量呈显著正相关,pH值与细菌数量呈显著正相关。填料有机质含量与pH、EC、GI、TN均呈负相关性,其中与EC和TN的相关性极显著。相反,填料TN含量与pH、EC和GI有较强的正相关性。

3 讨论

3.1 异位发酵床填物理化性质变化

在好氧发酵过程中,温度是判断发酵床发酵效果和腐熟度的重要指标,也是影响微生物活性和还原过程的重要因素^[23-24]。本试验初期,填料温度迅速上升,这是由于厕所黑水及填料中含有大量易分解的可



图中带有颜色的圆形代表对应两个理化指标间的相关性,颜色越深、形状越大表明两个指标间相关性越显著,其中红色表示正相关,蓝色表示负相关。T、OM、MC、TB、TF和TA分别代表温度、有机质、含水量、细菌数量、真菌数量和放线菌数量。

*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)

Colored circles indicate correlations between two indexes, the darker the color and the larger the shape, the more significant correlation. The red indicates positive correlation, and the blue indicates negative correlation. T, OM, MC, TB, TF and TA in the figure are temperature, organic matter, moisture content, total bacteria, total fungi and total actinomycetes, respectively. * indicates significant correlation ($P<0.05$), while ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$)

图6 试验过程中发酵床理化指标相关系数图

Figure 6 Correlation coefficient diagram of physicochemical indexes during fermentation

溶性有机物质,微生物快速分解这些物质,同时释放出大量的热能^[25]。有研究表明,只有当填料温度保持在55℃以上且不少于3d时,填料中的病原微生物和蛔虫卵才能被有效杀灭,达到《粪便无害化卫生标准》的要求^[26]。VINNERÅS^[27]的研究发现黑水好氧堆肥温度高于50℃时,可以确保减少 10^5 CFU·g⁻¹的病原体。本试验中,填料温度呈现上下波动的趋势,这与前人研究中畜禽养殖废弃物异位发酵床填料温度变化情况相似^[28-29]。这主要是因为厕所黑水的不断添加及每日人工翻堆使得填料温度升高;随着填料中碳源和能量的减少,微生物活性减弱,温度逐渐降低。第14d时填料温度降至最低,一方面是由于发酵床体积较小,散热较快,另一方面也与填料的含水量高于65%有关。在实际生产中可适当扩大发酵床规模或及时补充新鲜填料,维持发酵床的高温发酵。

发酵过程中pH值的变化可以反映出微生物的活性和有机物的代谢过程^[30]。HAUG^[31]的研究表明,微生物在pH值为6.0~8.5时可以保持较高的生物活性,从而达到理想的发酵效果。本试验过程中填料的pH

值呈先升高后降低的变化趋势,这与填料温度的变化规律较为相似,可能是NH₃在高温下易挥发造成的。试验初期填料的pH值迅速升高,甚至在部分时间超过8.5,这主要是由于微生物的大量繁殖,持续分解厕所黑水中的含氮有机物,产生的有机酸迅速挥发,且大量生成NH₃,使得pH值上升^[29];之后填料pH值缓慢下降,可能是有机物降解产生氢离子和小分子有机酸以及NH₃挥发造成的^[32]。本研究中,pH值与有机质含量呈负相关,与TN含量呈正相关,这与一些研究结果相似,通常有机物降解、氨化作用及硝化作用等过程会影响pH值的变化^[33]。

EC值表示发酵床的可溶性盐含量,EC值越高,表明溶液中的可溶性盐含量越高。研究表明,高电导率肥料容易造成土壤盐渍化,并对植物生长产生毒害作用。本试验研究结果表明,在整个发酵过程中,填料EC值变化不太明显,总体呈现先降低后略有升高的趋势。试验初期,微生物代谢旺盛,在有机物矿化和溶解作用下,产生大量小分子有机盐及各种离子,沉积在填料中,造成EC值升高^[34];CO₂、NH₃的挥发和矿物盐的沉淀作用可能是发酵后期EC值下降的原因^[35]。随着填料中有机物降解以及温度下降,微生物活性减弱,不能利用的盐分逐渐增多,并以水溶态积累^[36],因此填料EC值逐步趋于稳定。一般认为堆料电导率小于9.0 mS·cm⁻¹时,不会对种子发芽产生抑制^[37]。试验结束时填料EC值为1.98 mS·cm⁻¹,说明发酵床发酵后的填料质量较好。

发酵床的水分含量是微生物生长繁殖和有机物降解的关键条件,会影响好氧发酵的效率和腐熟时间。适宜的水分含量是保持微生物最佳活性的必要条件,水分含量过低可能会抑制微生物的新陈代谢,而水分含量太高可能会减小填料的孔隙率,引起厌氧发酵^[38]。大量研究表明,含水量在45%~65%时,最有利于微生物的正常代谢活动^[39]。在本试验中,微生物活动升温 and 翻堆使得填料中的水分挥发,同时由于持续添加厕所黑水,填料含水量在45%~67%范围内上下波动变化。第14d时,由于填料含水量高于65%,造成床体温度骤然下降^[40]。这也说明随着发酵的进行,发酵床吸纳废水的能力也逐渐下降。在实际生产过程中,对填料适当补充水分,并及时翻堆通风,可以保证发酵反应的正常进行,但同时要避免补水过多造成填料结块,发酵终止。经计算,本研究中异位发酵床填料对厕所黑水的吸纳系数为2.51,低于对生猪养殖废水的吸纳系数^[18],但高于对奶牛和蛋鸡养殖废水

的吸纳系数^[19-20]。

3.2 异位发酵床填料微生物数量变化

微生物作为好氧发酵的主体,其种类和数量直接影响发酵床的发酵速率^[41]。研究表明,细菌、真菌和放线菌是参与好氧发酵过程的主要微生物^[38],菌剂的添加增加了填料中微生物的丰度,从而加快发酵床的发酵过程。本试验表明,微生物数量与填料温度和pH值呈现较强的相关性,这主要是由于在好氧发酵初期,填料中含有丰富的营养物质,使得微生物迅速生长和繁殖,促进了温度升高;随着试验进行,填料的高温和碱性环境杀死了部分微生物,导致微生物数量减少。本研究中发酵床填料微生物以细菌为主,其分布量达到了 $10^7 \sim 10^8$ 数量级,高出真菌和放线菌数量2~3个数量级。与生猪发酵床填料中的微生物数量相比,本研究中细菌和真菌的数量与其相近,而放线菌数量比其高1~2个数量级^[42]。研究表明,放线菌是高温阶段降解木质素和纤维素的优势菌群,能够分解结构复杂的有机质^[43]。

3.3 异位发酵床填料营养成分变化

一般来说,TN、TP、TK、有机质含量和C/N常被认为是反映发酵床填料质量和腐熟度的重要指标^[44]。在填料中,碳素是细胞的组成物质和能源物质,氮素是构成蛋白质、核酸、酶等重要细胞成分的物质^[45]。有研究表明,微生物在填料C/N为25~30时能保持最佳活性,有利于粪便快速发酵分解^[35]。本研究中,随着试验的进行,填料的有机质含量和C/N呈现降低的趋势,这主要是由于微生物分解转化有机物,释放出大量 CO_2 和 NH_3 ,其中碳素以 CO_2 形式不断损失,而氮素损失较少,导致有机质含量和C/N降低^[46-47]。相关分析表明,pH值和EC值是有机质含量变化的主要因素,进而也影响填料TN含量和GI值。本试验结束时,填料TN、TP和TK含量较试验初始有显著增加,虽然发酵过程中由于矿化作用及持续性的 NH_3 挥发造成氮素有一定的损失,但填料总干质量的下降幅度明显大于TN下降幅度,因此最终的TN含量有所提高;填料中磷和钾不会以挥发的形式损失,但是由于填料中的有机物不断分解,填料体积和质量会因水分的大量蒸发而明显减少,因此TP和TK的相对含量会随发酵过程的完成而逐渐增加^[48]。试验结束后填料的总养分含量为5.85%,有机质的质量分数为76.82%,满足《有机肥料》(NY 525—2012)的标准。

3.4 异位发酵床填料腐熟度评价

未腐熟的填料中有分解性有机物的存在,当被施

用至土壤中时,其通过微生物的降解作用生成丁酸、戊酸和多酚类物质等中间产物^[49],从而抑制和损害作物的生长。因此,需要对最终填料进行腐熟度评价,其中GI值是衡量发酵床填料腐熟度以及植物毒性的有效且直接的生物性指标^[50]。有研究表明,当 $\text{GI} > 50\%$ 时,可以认为填料对植物已基本没有毒性,当 $\text{GI} > 80\%$ 时,表明填料已完全腐熟^[51-52]。本研究中,初始填料的GI值较高,这是因为填料中添加的厕所黑水含有大量的营养物质。在试验初始阶段,由于水解作用导致氨、乙酸等其他低分子物质的累积,抑制了种子的生根发芽,使得GI值呈下降趋势。随着有害物质被降解,GI值从第7 d开始快速上升,在第28 d时上升至83.41%,满足腐熟的标准。试验结束时,GI值超过100%,这是因为当填料腐熟到一定程度时,不但对植物不产生毒性,同时还能为植物生长提供丰富的营养物质,促进种子生根发芽,可见异位发酵床处理后的填料可作为有机肥料资源化利用。相比TIQUIA等^[53]的畜禽发酵床试验结果,本试验的发酵床填料的GI值更高,这可能是由于人体排泄物中的重金属含量少于畜禽粪污^[22],而重金属的大量积累会使发酵床填料产生植物毒性。

4 结论

(1)异位发酵床填料不同深度的温度差异不显著,并且平均温度基本维持在 45°C 左右, 50°C 高温持续约4 d,确保了发酵填料的生物安全性。试验过程中填料含水量在50%~65%波动变化,pH值由7.80上升至8.46,而电导率变化不明显。

(2)异位发酵床填料对厕所黑水具有一定的吸纳能力,其吸纳系数为2.51,为农村厕所黑水的资源化利用提供了新的技术措施。在异位发酵床处理黑水过程中填料中的微生物以细菌为主,分布数量达到 $10^8 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$,高出真菌和放线菌数量2~3个数量级。

(3)由于有机质的不断分解,在试验结束时填料的C/N显著降低,而TN、TP和TK含量显著增加。填料总养分和有机质含量分别为5.85%和76.82%,达到《有机肥料》(NY 525—2012)的要求。腐熟填料的种子发芽指数达到118.05%,可作为有机肥使用。

参考文献:

- [1] 周律,李秉浩,李佳磷. 韩国农村排水系统的建设及对我国新农村水污染控制的启示[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(4): 42-47.
- ZHOU L, LEE B H, LI J L. Wastewater facility construction in Korean

- rural areas and apocalypse for water pollution control in new rural areas of China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2008, 10(4):42-47.
- [2] 李子富, 王晓希, 王婷婷, 等. 城市生态卫生排水系统及其应用[J]. 建设科技, 2010(21):44-47. LI Z F, WANG X X, WANG T T, et al. Urban ecological sanitation drainage system and its applications[J]. *Construction Science and Technology*, 2010(21):44-47.
- [3] WITHERS P J, JORDAN P, MAY L, et al. Do septic tank systems pose a hidden threat to water quality? [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(2):123-130.
- [4] 李子夫, 金璠. 生活污水的分类收集与处理系统[J]. 中国给水排水, 2001, 17(1):64-65. LI Z F, JIN F. Classified collection and treatment system of domestic sewage[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(1):64-65.
- [5] LUOSTARINEN S, SANDERS W, KUJAWA-ROELEVELD K, et al. Effect of temperature on anaerobic treatment of black water in UASB-septic tank systems[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 98:980-986.
- [6] PAULO P L, GALBIATI A F, FILHO F J C M, et al. Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 147(1):61-66.
- [7] WIELEMAKER R C, WEIJMA J, ZEEMAN G. Harvest to harvest: Recovering nutrients with new sanitation systems for reuse in urban agriculture[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 128:426-437.
- [8] 杨宏伟. 基于低能膜生物反应器处理农村生活污水研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(9):113-117. YANG H W. Research on treatment of rural domestic wastewater based on low energy membrane bioreactor[J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(9):113-117.
- [9] MAHMOOD I B, LI Z F, UDDIN S M N, et al. Co-composting of fecal matter in mongolia using two different technologies[J]. *Journal of Water Sanitation & Hygiene for Development*, 2015, 5(1):165-171.
- [10] SHARMA M K, TYAGI V K, SAINI G, et al. On-site treatment of source separated domestic wastewater employing anaerobic package system[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(1):1209-1216.
- [11] 赵丙良, 袁林江, 张娜, 等. 改良型外循环厌氧反应器处理黑水特性研究[J]. 水处理技术, 2011, 12(12):86-89, 93. ZHAO B L, YUAN L J, ZHANG N, et al. Treatment of blackwater with modified UASB reactor[J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, 12(12):86-89, 93.
- [12] ROGERS T W, ROGERS T S, STONER M H, et al. A granular activated carbon/electrochemical hybrid system for onsite treatment and reuse of blackwater[J]. *Water Research*, 2018, 144:553-560.
- [13] JIN Z, XIE X Y, ZHOU J, et al. Blackwater treatment using vertical greening: Efficiency and microbial community structure[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249(1):175-181.
- [14] 刘洪波, 姚洋, 冷风. ABR/MFC/MEC处理粪便黑水的启动与同步脱氮除碳[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5):32-36. LIU H B, YAO Y Y, LENG F. Start-up and simultaneous carbon and nitrogen removal of ABR/MFC/MEC coupled device for fecal sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(5):32-36.
- [15] SKJELHAUGEN O J. Closed system for local reuse of blackwater and food waste, integrated with agriculture[J]. *Water Science & Technology*, 1999, 39(5):161-168.
- [16] 谢欣好, 温兴泉, 郑向勇, 等. 屋顶绿化系统处理稳定化黑水[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3):1355-1361. XIE X Y, WEN X Q, ZHENG X Y, et al. Treatment of pretreated toilet flushing water by green roof system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(3):1355-1361.
- [17] 李艳苓, 杨晓燕, 董立婷, 等. 不同填料原料对微生物异位发酵床处理生猪养殖废弃物效果的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4):367-373. LI Y L, YANG X Y, DONG L T, et al. Effects of different stuffing raw materials on the treatment of piggery waste by ectopic microbial fermentation bed[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4):367-373.
- [18] 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 L T, ZHU C X, ZHANG L, 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.
- [19] GUO H, GENG B, LIU X, et al. Characterization of bacterial consortium and its application in an ectopic fermentation system[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 139:28-33.
- [20] 李路瑶, 李佳彬, 冯烁, 等. 微生物异位发酵床处理蛋鸡养殖废弃物的效果[J]. 中国农业气象, 2020, 41(8):473-482. LI L Y, LI J B, FENG S, et al. Treatment effects of ectopic microbial fermentation on layer hens waste[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(8):473-482.
- [21] JÖNSSON H, BAKY A, JEPPSSON U, et al. Composition of urine, faeces, greywater and biowaste: For utilisation in the URWARE model [R]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2005:21-32.
- [22] LI Y X, ZHANG X L, LI W, et al. The residues and environmental risks of multiple veterinary antibiotics in animal faeces[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(3):2211-2220.
- [23] CHEN R, WANG Y, WANG W, et al. N₂O emissions and nitrogen transformation during windrow composting of dairy manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 160(6):121-127.
- [24] RICH N, BHARTI A, KUMAR S. Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 252(3):83-90.
- [25] 汪开英, 朱凤香, 王卫平. 不同辅料生物菌剂堆肥发酵层温度变化[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1):186-188. WANG K Y, ZHU F X, WANG W P. Variations of layer temperature during pig manure composting with different amendments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(1):186-188.
- [26] WU N, XIE S, ZENG M, et al. Impacts of pile temperature on antibiotic resistance, metal resistance and microbial community during swine manure composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744:140920.
- [27] VINNÉRÅS B. Comparison of composting, storage and urea treatment for sanitising of faecal matter and manure[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(17):3317-3321.
- [28] RICH N, BHARTI A. Assessment of different types of in-vessel com-

- posters and its effect on stabilization of MSW compost[J]. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2015, 2(3):1-6.
- [29] 焦洪超, 栾炳志, 宋志刚, 等. 发酵床养猪填料基础参数变化规律研究[J]. 中国兽医学报, 2013, 33(10):1610-1614. JIAO H C, LUAN B Z, SONG Z G, 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.
- [30] MENG J, SHI F H, MENG Q X, et al. Effects of bedding material composition in deep litter systems on bedding characteristics and growth performance of limousin calves[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2015, 28(1):143-150.
- [31] HAUG R T. The practical handbook of compost engineering[M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993:717.
- [32] 殷小冬, 赵贺, 高飞, 等. 不同异位发酵床填料的粪污处理能力比较研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(11):102-107. YIN X D, ZHAO H, GAO F, et al. Comparative study on fecal disposal capacity of different heterotopic fermentation mattresses[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(11):102-107.
- [33] PRICE G W, JIAN Z, ARNOLD P. Influence of agricultural wastes and a finished compost on the decomposition of slaughterhouse waste composts[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 130(30):248-254.
- [34] KIM J K, LEE D J, RAVINDRAN B, et al. Evaluation of integrated ammonia recovery technology and nutrient status with an in-vessel composting process for swine manure[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245:365-371.
- [35] 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.
- [36] CACERES R, FLOTATS X, MAFIA O. Changes in the chemical and physicochemical properties of the solid fraction of cattle slurry during composting using different aeration strategies[J]. *Waste Management*, 2006, 26(10):1081-1091.
- [37] RAVIV M, MEDINA S, KRASNOVSKY A. Organic matter and nitrogen conservation in manure compost for organic agriculture[J]. *Compost Science & Utilization*, 2013, 12(1):6-10.
- [38] 余苗, 高凤仙. 发酵床养猪及其关键影响因素[J]. 家畜生态学报, 2011, 32(4):93-96. YU M, GAO F X. The fermented bed for pig-raising and the key factors[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2011, 32(4):93-96.
- [39] KAUFMAN T D, LUKEZIC F L, BLOOM J R. The effect of free-living nematodes and compost moisture on growth and yield in *Agaricus brunnescens*[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2011, 30(4):503-506.
- [40] 蒋建明, 白建勇, 闫俊书, 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 J M, BAI J Y, YAN J S, et al. Research and application of key technology of microbial fermentation bed pig raising mode[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(9):173-176.
- [41] 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 J L, LIU B, SHI H, et al. Advances in research of microbial fermentation bed in pig farming[J]. *Current Biotechnology*, 2012, 2(6):411-416.
- [42] 叶世豪, 沈琦, 李园成, 等. 秸秆垫料的猪粪异位发酵床微生物群落分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3):638-647. YE S H, SHEN Q, LI Y C, et al. Analysis of the microbial community of pig manure fermented with straw litter in an ectopic fermentation system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3):638-647.
- [43] KHALIL A I, BEHEARY M S, SALEM E M. Monitoring of microbial populations and their cellulolytic activities during the composting of municipal solid wastes[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2001, 17(2):155-161.
- [44] GU W, ZHANG F, XU P, et al. Effects of sulphur and *Thiobacillus thiooparus* on cow manure aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(11):6529-6535.
- [45] 晏卓逸, 岳波, 高红, 等. 我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异[J]. 环境科学, 2017, 38(7):3078-3084. YAN Z Y, YUE B, GAO H, et al. Basic features of combustible rural garbage component and its spatial-temporal difference in China[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(7):3078-3084.
- [46] SILES-CASTELLANO A B, LÓPEZ M J, JURADO M M, et al. Industrial composting of low carbon/nitrogen ratio mixtures of agri-food waste and impact on compost quality[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316:123946.
- [47] FUKUMOTO Y, OSADA T, HANAJIMA D. Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4 emissions during swine manure composting without forced aeration-effect of compost pile scale[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 89(6):109-114.
- [48] SHEN Q, SUN H, YAO X, et al. A comparative study of pig manure with different waste straws in an ectopic fermentation system with thermophilic bacteria during the aerobic process: Performance and microbial community dynamics[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281:202-208.
- [49] COURTNEY R G, MULLEN G J. Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types[J]. *Bioresources Technology*, 2008, 99(8):2913-2918.
- [50] SILES-CASTELLANO A B, LÓPEZ M J, LÓPEZ-GONZÁLEZ J A, et al. Comparative analysis of phytotoxicity and compost quality in industrial composting facilities processing different organic wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 252:119820.
- [51] QIAN X, SHEN G, WANG Z, et al. Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2):530-535.
- [52] 冯雯雯, 董永华, 蔡涵冰, 等. 微生物菌剂对畜禽粪便与秸秆混合发酵过程参数影响及腐熟度综合评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6):265-271. FENG W W, DONG Y H, CAI H B, et al. Effects of microbial inoculant on parameters of mixed fermentation process of livestock manure and straw and comprehensive evaluation of maturity[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(6):265-271.
- [53] TIQUIA S M, TAM N F Y. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 65:43-49.