吴 霞,于 锐,周 嘉,等.直流电与交流电场影响猪粪堆肥腐熟效果对比 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3823-3831.
Wu X, Yu R, Zhou J, et al. Comparative effects of direct current and alternating current electric fields on the maturity of pig manure composting [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3823-3831.

直流电与交流电场影响猪粪堆肥腐熟效果对比

吴 霞[1,2],于 锐[2*],周 嘉[1**],杨文聪[1,2],邵玟玥[1,2],梁梦月[1,2],袁 宁[1,2],罗那那[2] (1.哈尔滨师范大学,黑龙江 哈尔滨 150025；2.中国科学院东北地理与农业生态研究所,吉林 长春 130102)

摘要：为了对比研究直流电和交流电对猪粪堆肥腐熟效果的影响,以新鲜猪粪和玉米秸秆为原料,在好氧堆肥的基础上,分别施加 3V 直流电(DC)和 3V 交流电(AC),以不施加电场作为对照(CK),进行为期 42d 的堆肥实验.结果表明:CK、DC、AC 处理堆体高温期(>50℃)分别持续了 9,9,8d,最高温度分别为 68.3,69.3,76.5℃;堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 pH 值分别为 7.71、7.92、7.61,EC 值分别为 3.75,3.11 和 3.82mS/cm, C/N 分别为 11.40、10.51、11.96,各处理堆体理化性质均符合无害化的基本要求;堆肥结束时,CK、DC、AC 处理含水率分别为 55.35%、54.70%、45.45%,种子发芽指数(GI)分别为 76%、99%、87%,胡敏酸与富里酸比值(HA/FA)分别为 1.53、2.03、1.62.总之,直流电使堆体腐熟时间缩短了 18%,促进猪粪堆肥腐熟效果比交流电更好;交流电使堆体最高温度升高约 8℃,但交流电明显降低了堆体含水率.

关键词：电场强化堆肥；好氧堆肥；直流电；交流电；腐熟度
中图分类号：X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3823-09

Comparative effects of direct current and alternating current electric fields on the maturity of pig manure composting.

WU Xia[1,2], YU Rui[2*], ZHOU Jia[1**], YANG Wen-cong[1,2], SHAO Wen-yue[1,2], LIANG Meng-yue[1,2], YUAN Ning[1,2], LUO Na-na[2] (1.Harbin Normal University, Harbin 150025, China；2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3823~3831

Abstract: To comparatively investigate the influences of direct current (DC) and alternating current (AC) on the composting maturity of pig manure, fresh pig manure and corn stalks were utilized as raw materials. Based on aerobic composting, 3V DC and 3V AC were respectively applied, with no electric field application serving as the control (CK). A 42-day composting experiment was carried out. The results demonstrated that the high-temperature periods (>50℃) of the CK, DC, and AC treatments lasted for 9, 9, and 8days respectively, and the maximum temperatures were 68.3, 69.3, and 76.5℃ respectively. At the conclusion of composting, the pH values of the CK, DC, and AC treatments were 7.71, 7.92, and 7.61 respectively, the EC values were 3.75, 3.11, and 3.82mS/cm respectively, and the C/N ratios were 11.40, 10.51, and 11.96 respectively. The physicochemical properties of the compost in each treatment conformed to the basic requirements for harmlessness. At the end of composting, the moisture contents of the CK, DC, and AC treatments were 55.35%, 54.70%, and 45.45% respectively, the seed germination indices (GI) were 76%, 99%, and 87% respectively, and the ratios of humic acid to fulvic acid (HA/FA) were 1.53, 2.03, and 1.62 respectively. In summary, DC reduced the composting maturity time by 18%, and the effect of DC in promoting the composting maturity of pig manure was superior to that of AC. AC increased the maximum temperature of the compost by approximately 8℃, but it significantly decreased the moisture content of the compost.

Key words: electric field assisted composting; aerobic compost; direct current; alternating current; degree of decomposition

好氧堆肥对粪污无害化处理较彻底、粪便附加值高,具有技术简单、经济效益好等优点,是目前应用较广泛的禽畜粪便处理模式[1-3].但由于传统堆肥内部氧气分布不均,导致氧气利用率低,微生物代谢活性下降,致使堆体升温慢,堆肥腐熟时间长[4].为解决传统好氧堆肥腐熟不均、效率低下等问题,近年来,电场强化好氧堆肥作为一种新型堆肥技术受到极大关注[5].

目前,已有研究证实电场强化好氧堆肥可以提高堆肥腐熟度,缩短堆肥周期,具有广泛的应用前景[4,6-9].在直流电应用中, 通过将 2~5V 直流电作用于鸡粪或猪粪堆肥(实验周期 25~49d),发现直流电可以提高氧气利用率(30%±9%)、增加电活性细菌丰度(约 3.4 倍),从而加快富里酸和腐殖酸类物质形成,

收稿日期：2024-12-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U23A6001);吉林省自然科学基金资助项目(20210101109JC,YDZJ202301ZYTS232)
* 责任作者, 助理研究员, yurui@iga.ac.cn; ** 教授, Harbin_zhoujia@163.com

促进堆体有机物转化和腐殖化.相比传统好氧堆肥,直流电使堆肥时间缩短了 30%以上,种子发芽指数(GI)提高了 54.29%,且有效减少碳损失[4,6-8].此外,Fu 等[9]研究显示,5V 50Hz 交流电通过优化堆体水分分布、提高温度及氧利用率,能够加快堆肥腐熟进程.因此,电场强化好氧堆肥是提高堆肥成熟度的一种有效策略.但是,目前大多数电场强化好氧堆肥的研究仅设置直流电或交流电,而同一电压下,直流电和交流电对好氧堆肥的对比影响尚不清晰.

因此,本研究在好氧堆肥的基础上分别施加 3V 直流电和 3V 交流电,通过监测堆体的温度、含水率、pH 值、电导率(EC)、C/N 等基础理化性质,以及有机碳(TOC)和水溶性有机碳(DOC)变化、傅里叶红外光谱(FTIR)、氮素变化、腐殖化指数、GI 等指标,探究不同电场对好氧堆肥腐熟度的影响,旨为提高好氧堆肥效率和堆肥质量提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验设计

于 2024 年 7~8 月在吉林省农业科技示范园进行实验,堆肥所用新鲜猪粪和玉米秸秆(3~5cm)均取于附近农场.猪粪和秸秆按干质量比 1:2.69 进行混合,调节堆料初始 C/N 约为 25,堆肥物料初始含水率调整为 65%.物料在体积为 100L 圆桶内进行 42d 好氧堆肥实验.圆桶外围包裹 1cm 厚的保温棉,用于保温.

堆肥实验设置如下:CK 处理,不施加任何电场;DC 处理,直流电源(优利德 UTP1306S)3V 电压;AC 处理,交流电源(科联 KL1105)3V 电压,50Hz.电场辅助堆肥装置内部周围放置一块碳毡(长为 160mm,宽为 65mm,厚为 10mm),作为阳极;中心放入一根石墨棒(长为 600mm,直径为 16mm),作为阴极.

采用温度计分别于每天 10:00 和 15:00,测量上、中、下 3 个不同位置的温度,取平均值.堆肥过程中,分别在第 0,2,7,14,21,28,35,42d 采用人工翻堆的方式进行曝气.翻堆前,采集 200g 均匀混合样品经自然风干、粉碎,过 100 目筛保存,用于测试堆肥含水率、C/N、TOC、TN.采集 200g 均匀混合样品经−50℃冻干、粉碎,过 100 目筛保存,用于测试堆肥 pH 值、EC、DOC、铵态氮(NH_4^+−N)、硝态氮(NO_3^-−N)、GI、胡富比(HA/FA)等.堆肥物料的基本理化性质如表 1 所示.

表 1 堆肥原料基础理化性质

Table 1 Physico−chemical properties of compost feedstock base

堆肥原料	pH 值	EC(mS/cm)	含水率(%)	TC(%)	TN(%)	C/N
猪粪	6.16±0.02	5.85±0.27	80.23±0.02	39.38±0.52	3.96±0.01	9.95±0.12
玉米秸秆	5.74±0.01	2.47±0.05	10.07±0.05	39.86±0.05	0.93±0.04	43.07±1.80

1.2 堆肥理化性质测定

堆肥鲜样与去离子水按照 1:10(m:V,以干质量计)的比例混合,150r/min 振荡 2h 后,4℃,3500r/min 离心 10min,过滤,测定 pH 值和 EC.取 1mL 溶液,稀释 50 倍后,过 0.45μm 滤膜,测定 DOC[10].

NH_4^+−N 和 NO_3^-−N 测定:称取 0.5000g 堆肥样品,加入 30mL 的 2mol/L 氯化钾溶液(固/液质量比为 1:60),150r/min 振荡 2h 后,4℃,3500r/min 离心 10min,取上清液.用连续流动化学分析仪测试.

采用 CN 元素分析仪(Vario Macro cube, Elementar,德国)测定堆肥样品 TOC、TN.

FTIR 测定:取 2mL 左右的上述堆肥鲜样提取液,先后过 0.45 和 0.22μm 滤膜,用真空冻干机将过滤液冻干.试样用 KBr 压片,测试范围 500~4000cm^{-1},分辨率 4cm^{-1},扫描间隔为 2nm.

胡敏酸(HA)和富里酸(FA)测定方法,参照 NY/T 1867−2010,采用焦磷酸钠−氢氧化钠提取,重铬酸钾氧化容量法[11].

GI 测定,参照陈星[12]的方法,其计算公式如式(1)所示[12].

$$GI = \frac{S_1 \cdot L_1}{S_2 \cdot L_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:S_1 为堆肥浸提液的种子发芽率,%;S_2 为去离子水的种子发芽率,%;L_1 为堆肥浸提液的种子平均根长,mm;L_2 为去离子水的种子平均根长,mm.

1.3 数据分析

实验数据采用 Excel 进行统计分析,采用 Origin2024 进行图形绘制与分析.采用 SPSS 进行

Pearson 相关分析.

2　结果讨论

2.1　堆肥理化性质分析

由图 1(a)可见,CK、DC、AC 处理堆体温度均在第 1d 迅速升到 50℃以上.第 2d,CK、DC、AC 处理堆体温度分别为 62.0,68.5,73.0℃,DC、AC 处理堆体温度明显高于 CK.这可能是由于堆体在电场作用下促进电子向氧气定向移动,提高氧气利用率,增加微生物有氧呼吸,并释放更多热量[13].CK、DC、AC 处理堆体温度>50℃分别持续了 9,9,8d.通常认为堆体温度达到 50℃以上并持续 5d 以上,便可有效杀死病原菌和杂草种子,这说明所有处理均达到堆肥卫生指标的标准[14].所有处理高温期持续时间相差很小.但堆体最高温度不同,CK、DC、AC 处理堆体最高温度分别为 68.3,69.3,76.5℃.这说明施加交流电的堆体最高温度更高,表明交流电更有助于堆体快速升温.

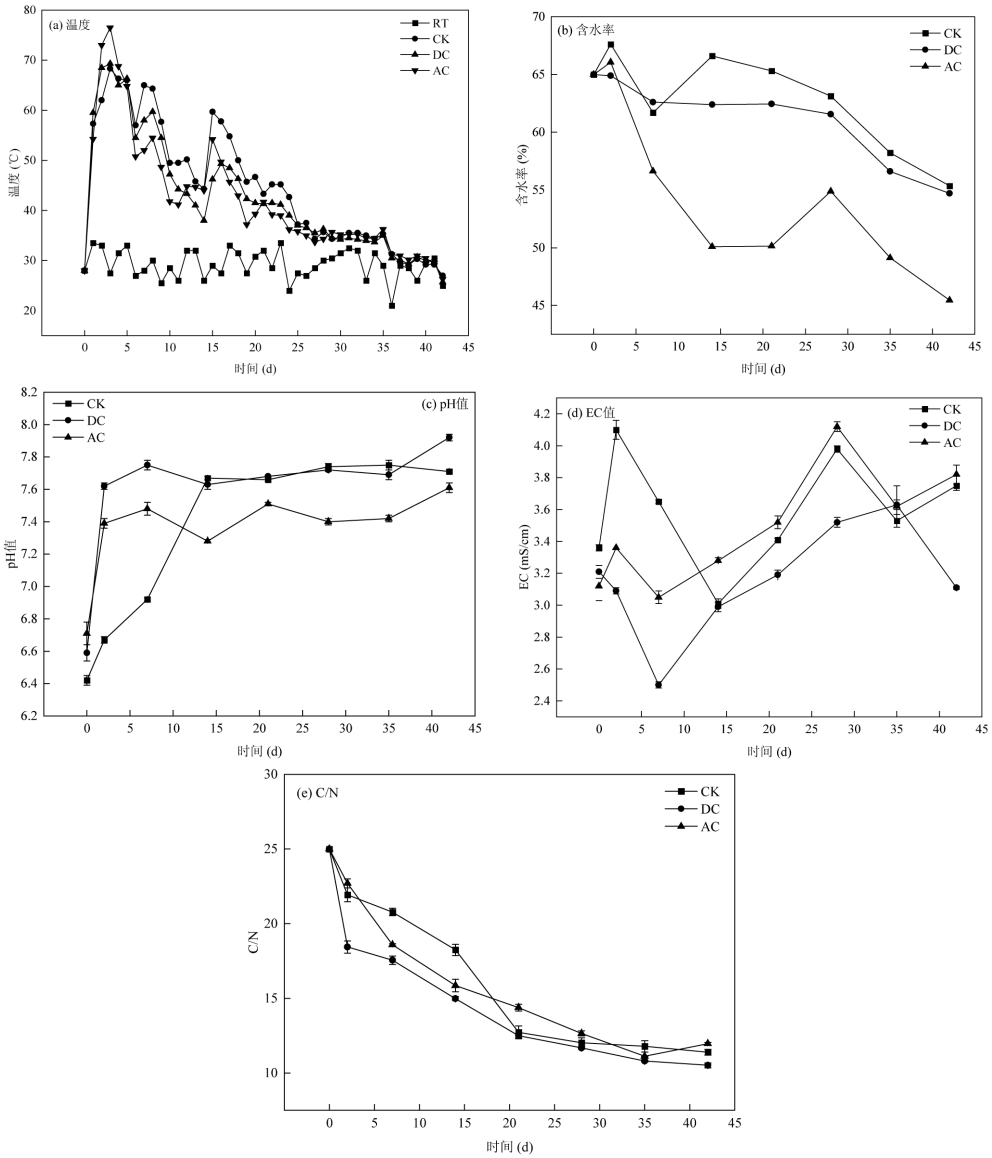


图 1　堆肥过程中堆体温度、含水率、pH 值、EC 值、C/N 变化

Fig.1　Changes in temperature, moisture content, pH, EC, and C/N during composting

堆肥含水率会直接影响好氧堆肥的发酵时间和腐熟程度[14].从图 1(b)可以看出,整体上,所有处理堆体含水率呈下降趋势.第 0~7d,CK、DC、AC 处理堆体含水率分别下降了 3%、2%、8%.其中,AC 处理堆体含水率下降最快.一方面可能是因为 AC 处理温度上升快,温度高,达到 76.5℃,部分水分以水蒸气的

形式蒸发散失;另一方面,可能是由于电渗脱水,50Hz的交流电每0.01s颠倒一次正负极,水分子在两个电极之间来回快速移动.而碳毡吸水性强,这可能导致堆体含水率减少[15].第 42d 堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体含水率分别为 55.35%、54.70%、45.45%.值得注意的是,AC 处理含水率比 DC、CK 处理减少了约 10%.这说明交流电会使堆肥过程消耗大量水分,在后续研究中为了维持高温期天数,可能需要及时补充水分或考虑其他材料.

由图 1(c)可见,DC、AC 处理堆体 pH 值在 0~7d 快速上升,分别从 6.59、6.71 上升到 7.75、7.48.这可能是因为在 0~2d,施加电场使堆体升温快、温度高,氨化作用增强,加速了有机氮向 NH_4^+-N 的转化,这些产物的累积导致 pH 值升高[16].DC 处理堆体 pH 值在第 7d 达到最高值 7.75,AC 处理堆体 pH 值在第 21d 达到最高值 7.51.CK 处理堆体 pH 值在第 35d 达到最高值 7.75,达到峰值的时间比施加电场处理长.这表明,施加电场有利于增强堆体氨化作用.pH 值达到峰值后,由于 NH_3 挥发损失,氨化作用减弱,硝化作用增强,堆肥过程中形成了碳酸氢盐缓冲体系,导致所有处理堆体 pH 值开始下降[17].到堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 pH 值分别为 7.71、7.92、7.61.所有处理堆体 pH 值均符合《有机肥料》(NY525-2012) 的成熟堆肥规定限值 (5.5<pH<8.5)[18].

EC 反映堆肥过程中可溶性盐含量变化.从图 1(d)可以看出,第 0~2d,CK、AC 处理堆体 EC 值呈现升高趋势.CK、AC 处理 EC 值分别从 3.36 和 3.12mS/cm 增加到 4.10 和 3.36mS/cm.这可能是由于堆体升温和水分蒸发导致可溶性盐分浓缩,以及有机物被分解,生成磷酸盐和铵盐[14].AC 处理虽然含水率下降快,但 EC 值较低的原因可能与微生物活动有关,大量营养盐被微生物利用,因此水溶性盐含量较低.同时期 DC 处理 EC 值下降的原因可能是含水率下降较少.第 2~7d,所有处理堆体 EC 值呈下降趋势,这可能是由于高温阶段,堆体中 NH_4^+ 转化为 NH_3 然后挥发,导致堆体盐分减少[8].第 15~30d,所有处理堆体 EC 值再次增加.CK、AC 处理堆体 EC 值分别在第 28d 达到 3.98 和 4.12mS/cm, DC 在第 35d 达到 3.63mS/cm.这可能是由于有机质矿化作用和“浓度效应”,导致所有处理 EC 值增加[18].堆肥结束时,CK、DC、AC 处理 EC 值分别为 3.75,3.11 和 3.82mS/cm,都低于有机肥农用土地施用限值 4mS/cm[19].

C/N 是反映堆体成熟度的重要因素.所有处理在堆肥过程中堆体 C/N 呈下降趋势(图 1(e)).这是因为微生物首先利用易降解的有机物作为自身活动的碳氮源,导致碳水化合物的消耗速度大于氮素的下降速度[7].第 1~8d,CK、DC、AC 处理堆体 C/N 分别下降了 17%、30%、26%.AC、DC 处理堆体 C/N 下降速度明显快于 CK,这可能是由于施加电场堆体中微生物分解有机碳速度比 CK 处理更快.堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 C/N 分别为 11.40、10.51、11.96.一般认为堆肥结束 C/N 与堆肥初始 C/N 的比值小于 0.6 时,可认定堆肥已经完全腐熟[20].CK、DC、AC 处理堆肥结束 C/N 与初始 C/N 的比值分别为 0.46、0.42 和 0.48,这表明直流电更能促进堆体腐熟.

2.2 有机碳组分变化

图 2(a)可以看出,所有处理堆体 TOC 含量呈下降趋势.这是因为好氧堆肥是微生物降解有机质的过程,因此,所有处理堆体 TOC 含量随堆肥进程不断减少[1].第 1~8d,CK、DC、AC 处理堆体 TOC 分别下降了 1%、5%、3%.这是因为在高温期,微生物在高温环境下分解一些简单的碳水化合物、氨基酸和脂肪等有机质作为自身新陈代谢的碳源[7].DC、AC 处理 TOC 含量下降更快,说明施加电场有助于增强微生物活动.DC 处理比 AC 处理降解更多 TOC 可能与含水率有关.适宜的含水率为物质交换提供了溶剂,并允许微生物自由移动[21].AC 处理由于水分损失过多限制了微生物活动[9].第 21d 后,微生物开始分解纤维素、半纤维素和木质素等复杂的有机物,TOC 分解速率不断下降并趋于平缓[22].到第 42d 堆肥结束时, CK、DC、AC 处理堆体 TOC 含量分别为 33%、30%、35%.这表明直流电更有利于促进有机质的分解.

DOC 主要是由氨基酸、糖、有机酸等易分解的小分子化合物组成,是微生物可直接利用的碳源[20].图 2(b)可以看出,升温期,CK 处理堆体有小幅度下降趋势.这可能是因为一些简单有机质被微生物分解利用.DC 处理堆体 DOC 含量在整个高温期都处于下降趋势,这可能是由于施加电场堆体升温快、温度高,增强了微生物活动.AC 处理 DOC 含量明显高于

CK、DC,这可能是由于 AC 处理堆体含水率下降太快,限制了微生物活动.堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 DOC 含量分别为 11.5,10.9 和 15.7g/kg.这表明直流电更能促进堆体 DOC 分解,为微生物提供更多碳源.

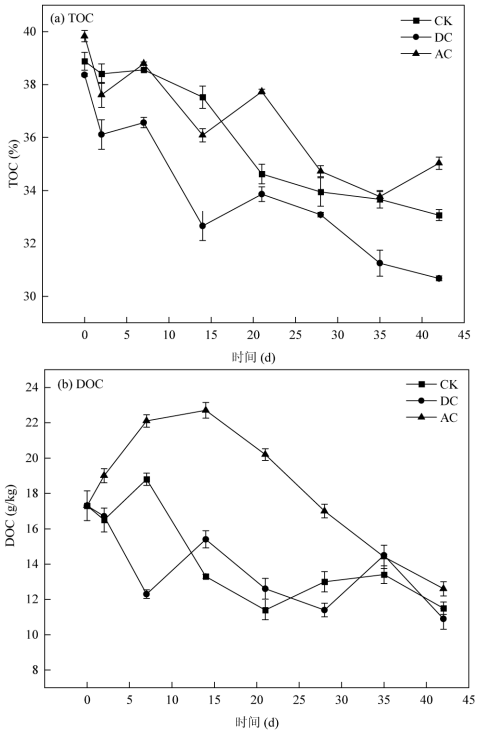


图 2　堆肥中总有机碳(TOC)、水溶性有机碳(DOC)的变化

Fig.2　Changes in total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC) in compost

2.3　FTIR 分析

图 3 显示,3 个处理整体趋势相似,但强度有所不同.所有处理在约 3400cm^{-1} 有一个宽峰,分配给带有 O−H 基团的碳水化合物,如纤维素、半纤维素、单糖和有机酸.随着堆肥进行峰值逐渐降低,DC、AC 处理相比于 CK 更低,表明电场辅助有助于促进有机物降解[23].1650cm^{-1} 附近芳香族 C=C、C=O 酰胺基团的拉伸以及芳香基团(1020cm^{-1})在堆肥过程中增加,说明堆肥加速了腐殖质物质的形成,促进堆体腐熟.在 2936~2958cm^{-1} 处,脂肪族 C−H 拉伸强度呈下降趋势,这可能是由于脂质和碳水化合物的生物降解所致[23].相比之下,DC、AC 处理下降趋势更明显.这可能是由于施加电场增加了电活性细菌的相对丰度,加速有机物的生物降解[5].在 1100cm^{-1} 附近吸收峰是羧酸、酯类和醚类中的 C−O 拉伸引起的,说明由糖类转化为羧基和酯类含氧化合物逐渐增多[24].DC、AC 峰值变化更明显,表明施加电场有利于形成腐殖酸前体.上述变化表明,碳水化合物、脂肪类物质随着好氧堆肥进行不断被降解,峰值逐渐降低;芳香类物质逐渐形成,峰相应增强.相比之下,施加电场有利于物料降解,促进堆体腐熟.

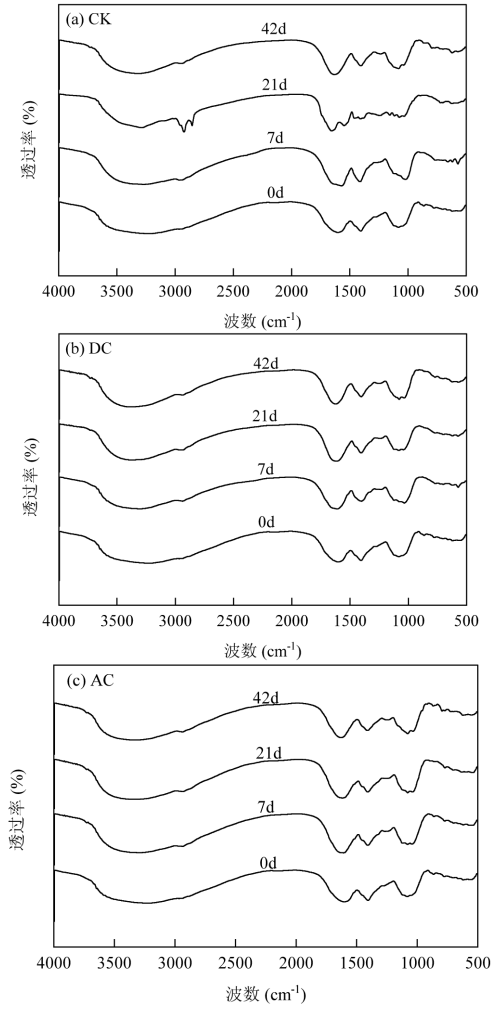


图 3　堆肥过程中 FTIR 图

Fig.3　FTIR plots at different times in the composting process

2.4　氮素组分变化

由图 4(a)可见,所有处理 TN 含量在堆肥过程中呈上升趋势.第 0d,CK、DC、AC 处理 TN 含量分别为 14.68,11.53,12.45g/kg.堆肥结束时, CK、DC、AC 处理 TN 含量分别为 29.02,29.19,29.29g/kg.这是因为有机物大量分解产生的“浓度效应”以及微生物的生物固氮作用,致使 TN 含量在整个堆肥过程中持续增加[25].DC、AC 处理堆体 TN 含量略高于 CK.这说明施加电场有利于堆体物料中氮素的保存.

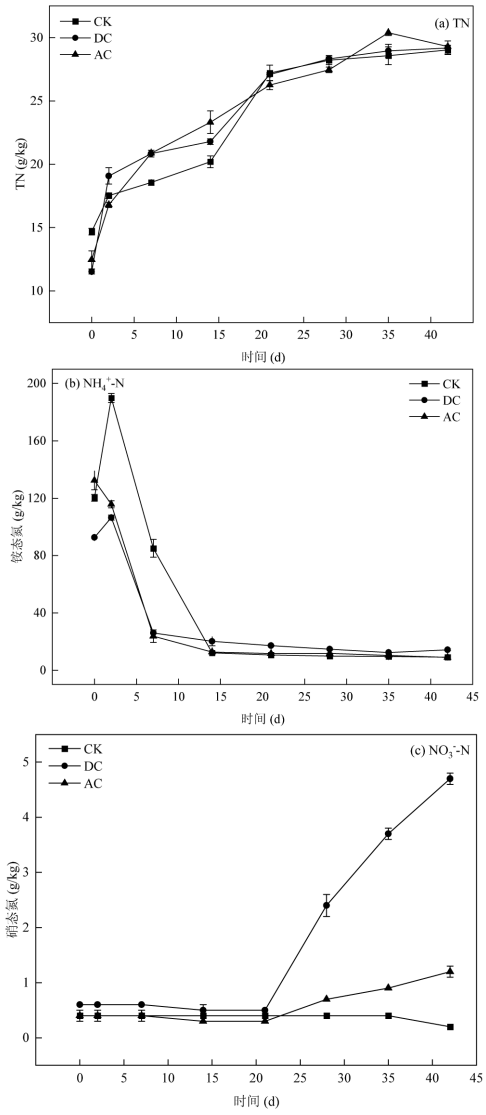


图 4 堆肥过程中总氮(TN)、铵态氮(NH_4^+–N)、硝态氮(NO_3^-–N)变化

Fig.4 Changes in total nitrogen (TN),ammonia nitrogen (NH_4^+–N) and nitrate nitrogen (NO_3^-–N) during composting process

第 0~2d,CK、DC 处理 NH_4^+–N 含量增加,在第 2d 达到最大值 189.92 和 106.48g/kg(图 4(b)).这是由于有机氮的矿化分解和微生物的氨化作用[26].进入高温期,各处理堆体 NH_4^+–N 开始下降.CK、DC、AC 处理 NH_4^+–N 含量分别下降了 55%、72%、79%,DC、AC 处理 NH_4^+–N 含量明显低于 CK.这可能是因为 DC、AC 处理堆体温度更高,微生物活性增强,有机氮被分解的过程中释放出 NH_3,造成氮素不断损失,NH_4^+–N 含量减少更多[27].到堆肥后期,硝化作用把 NH_4^+–N 转化为 NO_3^-–N,导致 NH_4^+–N 含量持续下降[26].堆肥初期,CK、DC、AC 处理堆体 NO_3^-–N 含量分别为 0.43,0.56 和 0.41g/kg,所有处理堆体 NO_3^-–N 含量相差较小(图 4(c)).这可能是由于温度和 pH 值升高,限制了硝化细菌的生长繁殖,NO_3^-–N 含量较低[17].第 21d,CK、DC、AC 处理 NO_3^-–N 含量分别为 0.39,0.55 和 0.35g/kg. 在硝化作用下,NO_3^-–N 逐渐增加[28].同时,通过电子转移也能够将 NH_4^+–N 转化为 NO_3^-–N[29].堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 NO_3^-–N 含量分别为 0.22,4.66 和 1.22g/kg. DC、AC 处理 NO_3^-–N 含量明显高于 CK,这表明施加电场能增强硝化作用、促进电子转移,有利于氮的保留,直流电的效果更好.

2.5 堆体腐熟程度分析

GI 是反映有机肥料中种子的生长能力和腐熟程度的指标.由图 5(a)可知,所有处理 GI 呈现波动上升趋势.第 0~15d,由于堆体中低分子量脂肪酸、氨和有毒氮化合物的积累,种子发芽受到抑制[8].15d 后,微生物分解大量有机质,GI 逐渐增加.研究表明,GI 达到 50%时,堆肥已初步腐熟[17].DC、AC 处理 GI 在第 7d 已达 55%、59%,CK 处理则在第 21d 达到 50%以上.CK 处理的初步腐熟时间相较于 DC、AC 处理推迟了 14d 左右,这表明施加电场有助于缩短堆肥时间.堆肥结束时,CK、DC、AC 处理 GI 分别为 76%、99%、87%,符合《禽畜粪便堆肥技术规范》(NY/T3442–2019)中 GI≥70%的规定[30].DC 处理堆肥腐熟时间比 CK 处理缩短了 18%,这与 Tang 等在直流电辅助鸡粪好氧堆肥的研究相似[6].总之,电场有助于提高好氧堆肥腐熟程度,且直流电效果优于交流电.

腐殖酸是好氧堆肥的重要产物,主要包括 FA 和 HA.图 5 可以看出,FA 和 HA 在堆肥过程中的变化具有相反趋势.所有处理堆体 FA 含量随着堆肥过程不断下降.堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 FA 含量分别为 0.23,0.83 和 0.82g/kg. FA 主要由脂肪族和芳香族化合物混合组成,结构简单松散[5].FA 含量减少的原因可能与其性质不稳定,容易被微生物分解利用有关[31].图 5(c)可以看出,所有处理堆体 HA 在 0~25d 整体变化较小,25d 后开始增加.这是因为堆肥降温腐熟阶段是 HA 形成的关键时期,此时嗜温微生物发挥主要作用,促进前体物缩合聚合形成 HA[5].同时,FA 转化成更稳定的胡敏酸分子也使 HA 增加.堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 HA 含量分别为 1.48,1.61 和 1.22g/kg.这表明施加直流电更能促进

有机质向 HA 转化.

HA/FA 反映好氧堆肥的腐熟程度,比值越大,腐熟程度越高.堆肥前期,所有处理 HA/FA 变化无明显差异(图 5(d)).第 25d 后,所有处理堆体 HA/FA 逐渐增加.这是因为堆肥后期,易降解的腐殖质基本已转化成稳定态,木质素、纤维素等较复杂的有机物通过微生物活动生成腐殖质[32].堆肥结束时,CK、DC、AC 处理堆体 HA/FA 分别为 1.53、2.03、1.62,DC、AC 处理堆体 HA/FA 高于 CK.这说明施加电场有助于堆体腐殖化,这与 Shen 等[8]和 Fu 等[9]在电场辅助好氧堆肥的研究结果一致.直流电促进腐熟效果比交流电更好,这可能与堆肥含水率有关.

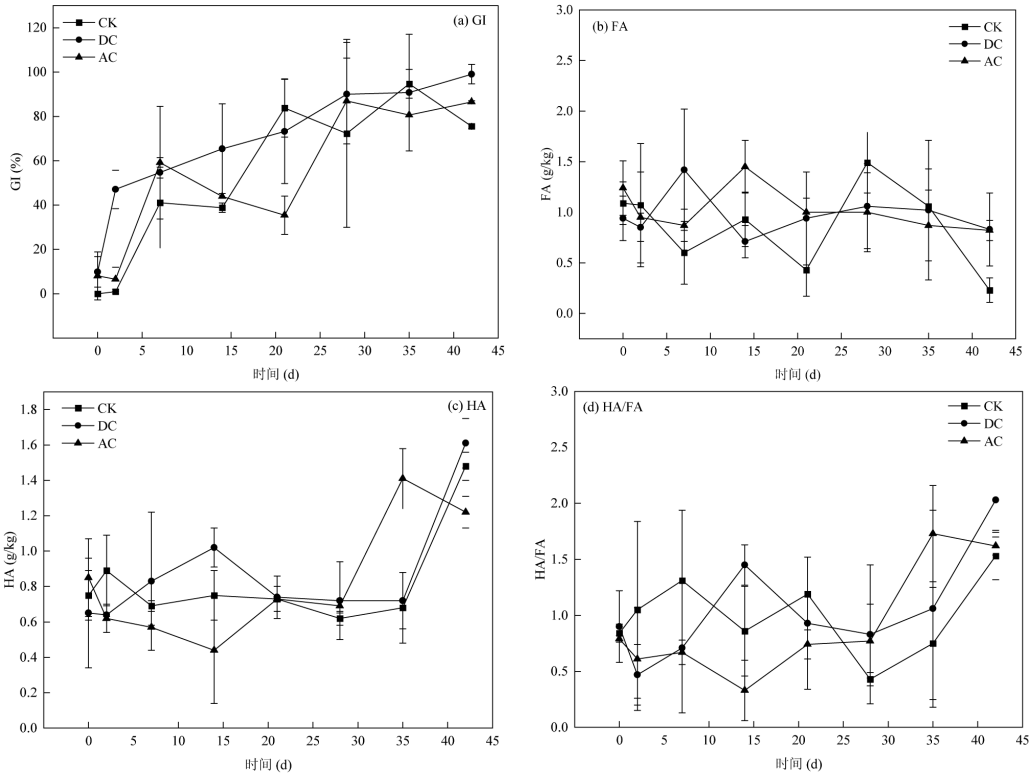
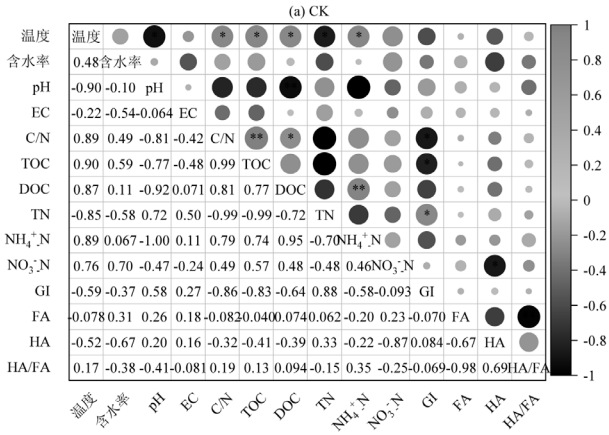


图 5　堆肥过程中种子发芽指数(GI)、富里酸(FA)、胡敏酸(HA)、HA/FA 变化

Fig.5　Changes in seed germination index (GI) ,Fulvic Acid (FA), Humic Acid (HA), HA/FA during composting process

2.6　相关分析

如图 6 所示,CK、DC 处理堆体 GI 与 C/N(r=−0.931,P<0.01;r=−0.915,P<0.01)、TOC(r=−0.885,P<0.01;r=−0.836,P<0.01)呈极显著负相关;与 TN(r=0.931,P<0.01;r=0.960,P<0.01)呈极显著正相关.AC 处理堆体 GI 与 C/N(r=−0.794,P<0.05)、TOC(r=−0.722,P<0.05)呈显著负相关;与 TN(r=0.824,P<0.05)呈显著正相关.这是因为堆肥过程中,碳素作为能源被微生物消耗,氮素作为营养物质被保留.因此,GI 与碳元素呈负相关,与氮元素呈正相关.DC、AC 处理堆体 GI 与含水率(r=−0.740,P<0.05;r=−0.729,P<0.05)呈显著负相关,而 CK 处理中没有体现相关性.这表明好氧堆肥腐熟程度可能受堆体含水率影响.DC、AC 处理堆体 HA/FA 与 HA(r=0.917,P<0.01;r=0.981,P<0.01)呈极显著正相关,CK 处理中未体现.这说明施加电场有利于促进有机质向 HA 转化,促进腐殖酸组分形成,这与 Zhang 等[4]研究结果一致.



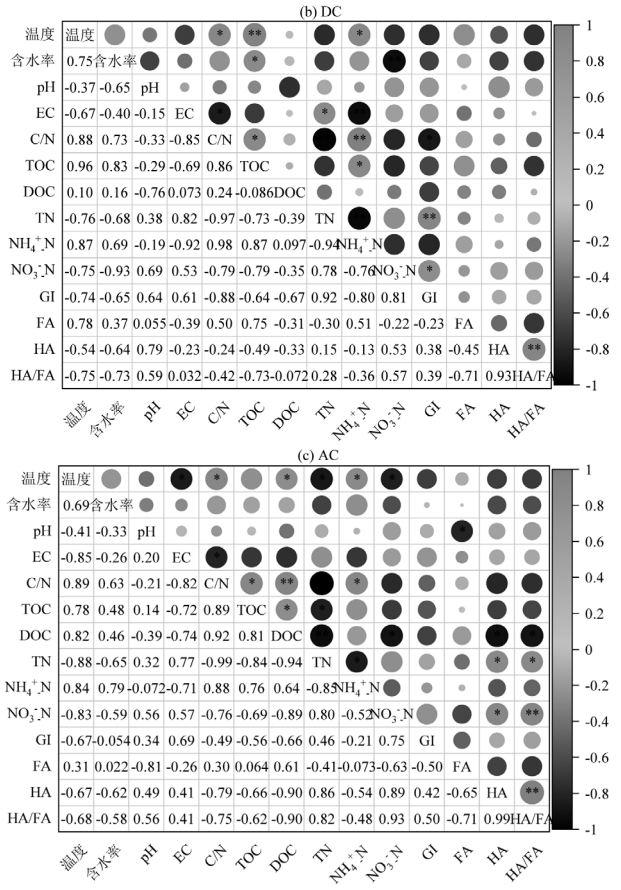


图 6 堆肥过程中各项指标相关分析

Fig.6 Correlation of indicators in the composting process

3 结论

3.1 交流电能明显提高堆肥温度,最高温达到了 76.5℃,比对照组高约 8℃.

3.2 直流电有利于有机质分解以及氮素的保留,促进堆体腐殖化.

3.3 直流电场和交流电场的 GI 分别达到了 99%、87%,HA/FA 分别为 2.03、1.62.相比之下,直流电促腐效果优于交流电.

参考文献:

[1] 吴浩玮,孙小淇,梁博文,等.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析 [J]. 农业环境科学学报, 2020,39(6):1168-1176.
Wu H W, Sun X Q, Liang B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020,39(6):1168-1176.

[2] 曾 锦,徐 锐,梁高飞,等.畜禽养殖废弃物资源化利用技术及推广模式研究进展 [J]. 畜牧与饲料科学, 2018,39(8):56-63.
Zeng J, Xu R, Liang G F, et al. Research advances on the resource recycling technology and extension model of livestock and poultry wastes [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018,39(8):56-63.

[3] 刘 春,刘晨阳,王济民,等.我国畜禽粪便资源化利用现状与对策建议 [J]. 中国农业资源与区划, 2021,42(2):35-43.
Liu C, Liu C Y, Wang J M, et al. China's livestock and poultry manure resource utilisation status quo and countermeasures suggestions [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021,42(2):35-43.

[4] Zhang L, Wang X, Wang H, et al. Electric field as extracellular enzyme activator promotes conversion of lignocellulose to humic acid in composting process [J]. Bioresource Technology, 2024,391:129948.

[5] 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]. 中国环境科学, 2023,43(10):5291-5302.
Chang Y, Li R Q, Li J, et al. Mechanism and regulation method of humic acid formation in composting-a review [J]. China Environmental Science, 2023,43(10):5291-5302.

[6] Tang J H, Li X, Zhao W Q, et al. Electric field induces electron flow to simultaneously enhance the maturity of aerobic composting and mitigate greenhouse gas emissions [J]. Bioresource Technology, 2019, 279:324-242.

[7] 付 涛,李 翔,上官华媛,等.电场促进畜禽粪便好氧堆肥中 DOM 演化的光谱学研究 [J]. 环境科学学报, 2021,41(4):1465-1477.
Fu T, Li X, Shangguan H Y, et al. Spectrum analysis of the evolution of DOM during electric-field assisted aerobic composting for the treatment of livestock and poultry manure treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(4):1465-1477.

[8] Shen C, Shangguan H Y, Fu T, et al. Electric field-assisted aerobic co-composting of chicken manure and kitchen waste: Ammonia mitigation and maturation enhancement [J]. Bioresource Technology, 2024,391:129931.

[9] Fu T, Tang J H, Wu J X, et al. Alternating electric field enables hyperthermophilic composting of organic solid wastes [J]. Science of the Total Environment, 2022,828:154439.

[10] 梁梦月,袁 宁,于 锐,等.酸碱改性生物炭与膨润土复配提高猪粪堆肥 Cu 和 Zn 钝化率 [J]. 农业环境科学学报, 2024,43(9):2126-2133.
Liang M Y, Yuan N, Yu R, et al. Improvement of Cu and Zn immobilization in pig manure compost by compounding acid and alkali modified biochar with bentonite clay [J]. Journal of Agro Environment Science, 2024,43(9):2126-2133.

[11] NY/T1867—2010 土壤腐殖质组成的测定:焦磷酸钠-氢氧化钠提取,重铬酸钾氧化容量法 [S].
NY/T1867—2010 Determination of humus content in soil [S].

[12] 陈 星.利用发芽指数评价堆肥腐熟度方法研究 [D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2022.
Chen X. Study on evaluation method of compost maturity by germination index [D]. Xianyang: North West Agriculture and Forestry University, 2022.

[13] Liu Z, Wang X, Wang F, et al. The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,270:122328.

[14] 李 翔.电场促进好氧堆肥腐熟与减少 N_2O 排放机理研究 [D]. 福州:福建农林大学, 2020.
Li X. Electric field enhances the maturity of aerobic composting and

mitigates N_2O emissions [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.

[15] 屈园浩,邓文义,谢晓丹,等.活性炭/石墨辅助污泥电渗脱水研究 [J]. 化工学报, 2023,74(7):3038−3050.
Qu Y H, Deng W Y, Xie X D, et al. Study on electro−osmotic dewatering of sludge assisted by activated carbon/graphite [J]. CIESC Journal, 2023,74(7):3038−3050.

[16] 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, 2023,43(8):189−201.
Wang Y L, Qiu H Z, Li M C, et al. Microbial community succession and response to environmental factors during composting under different ventilation conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(8):189−201.

[17] 韩大勇,李拥军,刘海霞,等.稻秸秆对羊粪好氧堆肥理化特性与氮素转化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2024,43(8):1896−1906.
Han D Y, Li Y J, Liu H X, et al. Effects of rice straw on the physicochemical properties and nitrogen transformation of aerobic composting of sheep manure [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2024,43(8):1896−1906.

[18] 何莹莹,闵柏林,向远昆,等.胞外聚合物对电场辅助好氧堆肥有机物转化的影响 [J/OL]. 中国环境科学,1−10[2024−11−22]. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000−6923.20240016.003.
He Y Y, Min B L, Xiang Y K, et al. Effect of extracellular polymers on organic matter conversion during electric field−assisted aerobic composting [J/OL]. China Environmental Science,1−10[2024−11−22]. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000−6923.20240016.003.

[19] Xu S Q, Jia K X, Zheng Y, et al. Phosphorus transformation behavior and phosphorus cycling genes expression in food waste composting with hydroxyapatite enhanced by phosphate−solubilizing bacteria [J]. Bioresource Technology, 2023,376:128882.

[20] 杨　超.生物炭对猪粪堆肥中磷形态转化的影响及其微生物学机制 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2022.
Yang C. Effect and Microbiological Mechanism of Biochar on Phosphorus Form Transformation during Pig Manure Composting [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.

[21] Ermolaev E, Sundberg C, Pell M, et al. Effects of moisture on emissions of methane, nitrous oxide and carbon dioxide from food and garden waste composting [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,240 (Dec.10):118165.

[22] Wu J, Zhang A, Li G, et al. Effect of different components of single superphosphate on organic matter degradation and maturity during pig manure composting [J]. Science of The Total Environment, 2019,646 (PT.1−1660):587−594.

[23] Cui H, Ou Y, Wang L X, et al. Critical passivation mechanisms on heavy metals during aerobic composting with different grain−size zeolite [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,406:124313.

[24] 王素素.过硫酸盐高级氧化驱动堆肥生境碳氮转化过程及其作用机制研究 [D]. 南宁:广西大学, 2022.
Wang S S. Research on mechanism of carbon and nitrogen transformation in compost habita drived by advanced persulfate oxidation [D]. Nanning: Guangxi University, 2022.

[25] 王志慧,杨新平,茆　军,等.外源菌剂对棉花秸秆堆肥过程中微生物群落及腐熟效果的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2024,40(10):1376−1384.
Wang Z H, Yang X P, Mao J, et al. Influence of exogenous microbial agents on microbial community and maturity effect during cotton straw composting [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(10):1376−1384.

[26] 李丹阳,马若男,亓传仁,等.含水率对羊粪堆肥腐熟度及污染气体排放的影响 [J]. 农业工程学报, 2020,36(20):254−262.
Li D Y, Ma R N, Qi C R, et al. Effects of moisture content on maturity and pollution gas emissions during sheep manure composting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20):254−262.

[27] 曹丽娜,王　岩,王　跃,等.添加麦秸对鸡粪堆肥过程中氮素减排及细菌群落的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2023,42(11):2560−2569.
Cao L N, Wang Y, Wang Y, et al. Effects of wheat straw addition on nitrogen emission reduction and bacterial community during chicken manure composting [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2023, 42(11):2560−2569.

[28] 王友玲,邱慧珍,PHILIP Ghanney,等.通风方式对牛粪堆肥氨气排放与氮素转化的影响 [J]. 农业机械学报, 2020,51(11):313−320.
Wang Y L, Qiu H Z, PHILIP Ghanney, et al. Influence of ventilation modes on ammonia emission and nitrogen conversion in cattle manure composting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):313−320.

[29] Shi M Z, Zhao Y, Zhu L J, et al. Denitrification during composting: Biochemistry, implication and perspective [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020,153:105043.

[30] NY/T3442−2019　禽畜粪便堆肥技术规范 [S].
NY/T3442−2019　Technical specification for animal manure composting [S].

[31] 李　兰,王艺璇,徐　智,等.生物干化餐厨垃圾堆肥腐殖化过程及其腐植酸活性评价 [J]. 农业环境科学学报, 2024,43(9):2134−2144.
Li L, Wang Y X, Xu Z, et al. Humification process of bio−dried kitchen waste composting and evaluation of humic acid activity [J]. Journal of Agro−Environment Science, 2024,43(9):2134−2144.

[32] Zhang L, Wang X, Wang H, et al. Microbial electrochemical composting: A sustainable strategy to enhance lignocellulose conversion into humus [J]. Chemical Engineering Journal, 2024,481: 148496.

作者简介：吴　霞(1999−),女,四川广安人,哈尔滨师范大学硕士研究生,主要从事农业废弃物资源化研究.wx98926417@163.com.