



詹亚斌, 魏雨泉, 杨丹旭, 徐敏, 刘波, 陈云峰, 李季. 曝气量对餐厨、园林废弃物共堆肥腐熟及腐殖化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(11): 220-232.
ZHAN Yabin, WEI Yuquan, YANG Danxu, XU Min, LIU Bo, CHEN Yunfeng, LI Ji. Effects of aeration rate on the maturity and humification of co-composting of food waste and garden waste[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(11): 220-232.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.11.18

曝气量对餐厨、园林废弃物共堆肥腐熟及腐殖化的影响

詹亚斌^{1,2} 魏雨泉^{3,4} 杨丹旭⁵ 徐敏¹ 刘波¹ 陈云峰^{1*} 李季^{3,4}

(1. 湖北省农业科学院 植保土肥研究所/农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 武汉 430064;

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. 中国农业大学 有机循环研究院(苏州), 江苏 苏州 215100;

5. 长阳土家族自治县农业产业服务中心, 湖北 宜昌 443500)

摘要 为探究曝气量对餐厨废弃物和园林废弃物共堆肥腐熟及腐殖化的影响, 以园林废弃物作为辅料与餐厨废弃物共堆肥, 一共设置3个处理, 曝气量分别为0.2、0.4、0.6 L/(kg·min), 分别记为AR0.2、AR0.4、AR0.6, 一共进行为期15 d的好氧堆肥, 利用电导率(electrical conductivity, EC)、发芽指数(germination index, GI)表征堆肥腐熟, 利用胡敏酸(humic acid, HA)、*m*(胡敏酸):*m*(富里酸)等指标表征堆肥腐殖化, 通过高通量测序技术研究堆肥细菌群落演替规律, 并将细菌与腐殖酸前体、腐殖化指标、腐熟指标进行关联分析。结果表明: 1) 曝气量为0.4 L/(kg·min)时, 有利于EC的下降、GI的上升, 有利于堆肥的腐熟。堆肥结束时AR0.4的GI为85.31%, 比AR0.2(75.11%)、AR0.6(80.82%)分别高10.20、4.49个百分点。2) 当曝气量为0.4 L/(kg·min)时, 有利于还原糖、氨基酸、多酚向HA的转化, 且有利于堆肥的腐殖化。堆肥结束时3个处理的HA分别为10.57、17.04、13.96 mg/g, *m*(胡敏酸):*m*(富里酸)分别为0.88、1.52、1.06。3) 相关性分析表明, 曝气量为0.4 L/(kg·min)时, 抑制 *Weissella*、*Lactobacillus* 生长, 促进 *Saccharomonospora*、*Thermoactinomyces*、*Aerococcus*、*Aeribacillus*、*Bacillus*、*Geobacillus* 的生长, 有利于堆肥的腐熟以及腐殖化。综上, 建议餐厨与园林废弃物共堆肥时曝气量采用0.4 L/(kg·min), 有利于堆肥的腐熟及腐殖化。

关键词 腐熟; 腐殖酸; 腐殖酸前体; 碳氮转化; 优势微生物

中图分类号 X713

文章编号 1007-4333(2025)11-0220-13

文献标志码 A

Effects of aeration rate on the maturity and humification of co-composting of food waste and garden waste

ZHAN Yabin^{1,2}, WEI Yuquan^{3,4}, YANG Danxu⁵, XU Min¹, LIU Bo,
CHEN Yunfeng^{1*}, LI Ji^{3,4}

(1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer/Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

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

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

4. Organic Recycling Institute (Suzhou), China Agricultural University, Suzhou 215128, China;

5. Changyang Tujia Autonomous County Agricultural Industry Service Center, Yichang 443500, China)

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2024AFB389); 湖北省农业科学院青年科学基金项目(2024NKYJJ11); 农业农村部重点实验室开放课题(KLTMCUAR2024-03); 潜江市公益性行业科研计划项目(2024GYX047)

第一作者: 詹亚斌(ORCID:0000-0001-5687-4506), 助理研究员, 主要从事有机废弃物肥料化与土壤培肥与地力提升研究, E-mail: zhanyabin@126.com; zhanyb@hbaas.com

通讯作者: 陈云峰(ORCID:0009-0003-8307-2340), 研究员, 主要从事农业废弃物肥料化利用与土壤生态学研究, E-mail: chen971314@163.com

Abstract To investigate the effect of the aeration rate on the maturity and humification during co-composting of food waste and garden waste, three treatments were set up. The aeration rates were 0.2, 0.4, and 0.6 L/(kg·min), respectively, denoted as AR0.2, AR0.4, and AR0.6. A total of 15 days of aerobic composting were conducted. The maturity of compost was characterized using electrical conductivity (EC) and germination index (GI), and its humification was assessed through indicators such as humic acid (HA) and the ratio of humic acid to fulvic acid. High-throughput sequencing technology was employed to investigate the succession patterns of bacterial communities during composting. Furthermore, correlation analyses were performed to determine the relationships between bacterial communities and humic acid precursors, humification indicators, and maturity parameters. The results indicate that: 1) The aeration rate of 0.4 L/(kg·min) was beneficial for the decrease of EC and the increase of GI, and thereby was beneficial for the maturation of compost. At the end of composting, the GI of AR0.4 was 85.31%, which was 10.20 and 4.49 percentage higher than those of AR0.2 (75.11%) and AR0.6 (80.82%), respectively. 2) The aeration rate of 0.4 L/(kg·min) was beneficial for the conversion of reducing sugars, amino acids, and polyphenols to HA, and also for the humification of compost. At the end of composting, the HA values of the three treatments were 10.57, 17.04, and 13.96 mg/g, respectively, and the ratios of humic acid to fulvic acid were 0.88, 1.52, and 1.06, respectively. 3) The results of correlation analysis showed that the aeration rate of 0.4 L/(kg·min) inhibited the growth of *Weissella* and *Lactobacillus*, while promoted the growth of *Saccharomonospora*, *Thermoactinomyces*, *Aerococcus*, *Aeribacillus*, *Bacillus*, and *Geobacillus*. It was beneficial for the maturation and humification of compost. In summary, it is recommended to use the aeration rate of 0.4 L/(kg·min) during co-composting food and garden waste can facilitate the maturity and humification of compost.

Keywords maturity; humic acid; humic acid precursor; carbon nitrogen conversion; dominant microorganisms

中国每年产生的餐厨废弃物已经超过 1.2 亿 t, 随着垃圾分类工作的推进,餐厨废弃物的收集量将持续上升^[1]。目前,餐厨废弃物的处置主要包括好氧堆肥和厌氧发酵。好氧堆肥因其技术简单,成本低,可以使餐厨废弃物中的有机质、氮磷钾等养分物质回归到土壤中来,得到广泛应用^[2-4]。

餐厨废弃物由于含水率高(85%~90%)、碳氮比($m(C):m(N)$)低(10~12),通常不能单独堆肥,需要添加辅料,降低堆肥的含水率至 55%~65%、提高碳氮比至 15~25,以便堆肥可以顺利启动发酵^[5]。已有研究表明,锯末、秸秆、菌糠、花生壳、谷壳等可以作为辅料用来调节堆体,促进堆肥快速启动^[6-9]。在选用辅料的时候,通常需要考虑价格低廉、来源稳定这 2 个因素。餐厨废弃物主要产生于城市地区,因此辅料的选择上应该倾向于城市,而非农村地区。城市地区园林绿化较发达,会产生大量的园林废弃物,通常这些废弃物被拉至焚烧厂进行处置。应因地制宜,将园林废弃物作为辅料与餐厨废弃物混匀进行好氧堆肥,并研究其腐熟及腐殖化特征,达到“以废治废”的目的,同时缓解了堆肥辅料成本高的问题。

已有研究表明碳氮比、初始含水率、曝气量等

参数均会影响餐厨废弃物堆肥的腐熟及腐殖化^[10]。餐厨废弃物由于含水率高,在储存运输过程中会经历厌氧发酵,产生了大量有机酸,并滋生了大量厌氧微生物,抑制餐厨堆肥的腐熟及腐殖化^[11]。Xu 等^[12]在研究餐厨废弃物堆肥腐熟影响时发现,给堆体提供充足的氧气后,能促进其快速腐熟。此外,曝气量过高或过低可能都不利于堆肥的腐熟及腐殖化。Gao 等^[13]认为曝气量为 0.5 L/(kg·min)时有利于堆肥高温期的持续、堆肥的腐熟。苟久兰等^[14]将曝气量设置为 0.4 L/(kg·min)时有利于堆肥碳氮的保存及腐熟。徐鹏翔等^[15]研究发现堆肥曝气量主要集中在 0.2~0.6 L/(kg·min)。目前,堆肥过程中的腐殖质形成机制主要包括木质素学说、多酚学说、微生物合成学说、细胞自溶学说、糖-胺缩合学说等^[16-18]。这些学说大多认可微生物驱动的生物过程对腐殖质的形成至关重要,微生物分解大分子有机物产生还原糖、氨基酸、多酚、醌、木质素等小分子物质缩合形成腐殖质。Wu 等^[19]研究发现高曝气量有利于鸡粪堆肥简单组分的形成,而低曝气量有利于复杂组分的形成。已有研究在探究餐厨废弃物与园林废弃物共堆肥时,将餐厨废弃物作为主料、园林废弃物作为辅料,主要集中工艺调控、添

加剂、微生物接种剂上^[20-21],且主要针对水分去除、腐熟^[22],缺乏曝气量对餐厨、园林废弃物共堆肥腐殖酸形成的影响。

因此,本研究拟以餐厨废弃物为主料、园林废弃物为辅料进行堆肥,设置3个不同曝气量0.2、0.4、0.6 L/(kg·min),采用温度、酸碱度(pH)、电导率(electrical conductivity, EC)、碳氮比、种子发芽指数(germination index, GI)等指标表征堆肥腐熟程度,通过胡敏酸(humic acid, HA)、富里酸(fulvic acid, FA)、 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{总有机碳})$ 、 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{富里酸})$ 等

指标表征堆肥腐殖化,通过高通量测序技术研究堆肥细菌群落演替规律,并将细菌与腐殖酸前体、腐殖化指标、腐熟指标进行关联分析,探究餐厨、园林废弃物共堆肥腐熟、腐殖化影响因素,以期餐厨、园林废弃物共堆肥曝气量选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

餐厨垃圾取自苏州市某中学食堂;园林废弃物购买于苏州市某木材加工厂,具体性质见表1。

表1 本研究堆肥物料基本性质
Table 1 Basic properties of the composting materials in this study

原料 Raw material	含水率 ^① /％ Moisture content	酸碱度 ^① pH	总有机碳 ^② /％ Total organic carbon	总氮 ^② /％ Total nitrogen	碳氮比 Carbon nitrogen ratio
餐厨废弃物 Food waste	78.521±2.56	4.62±0.25	42.02±0.42	3.28±0.12	12.81±0.51
园林废弃物 Garden waste	13.79±1.27	6.32±0.17	45.46±0.67	0.25±0.03	181.84±19.83

注:①以湿基计算;②以干基计算。
Note: ① is calculated on a wet basis, and ② is calculated on a dry basis.

1.2 试验设计

选取餐厨废弃物(剔除金属、塑料袋等杂物)作为堆肥主料,同时选取园林废弃物(园林修剪后的树枝粉碎至最大长度2 cm左右)作为堆肥辅料,主料与辅料按照质量分数85:15(鲜重)混合均匀,装入长×宽×

高和壁厚为67.5 cm×48.0 cm×41.0 cm和3.5 cm的反应器中。反应器的结构详见图1。一共设置3个处理,曝气量分别为0.2、0.4、0.6 L/(kg·min)(采用间歇曝气,曝气30 min,停止30 min),分别记为AR0.2、AR0.4、AR0.6,每个处理3个重复。

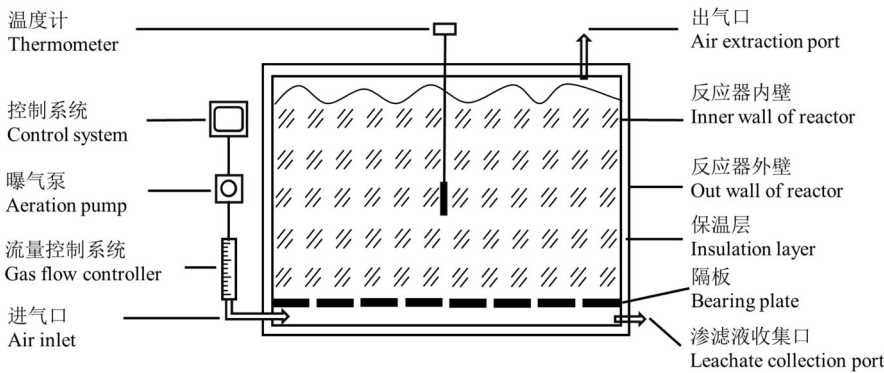


图1 堆肥试验装置
Fig. 1 Composting experimental device

堆肥一共进行15 d,分别于第1、5、10、15天在每个反应器中进行多点取样(随机取5—6个样品),将取到的样品混为一个样品,然后采用四分法收集

样品300 g;200 g风干、磨碎过筛用于理化指标、腐殖酸前体、腐殖酸的测定,100 g保存于-80℃用于总DNA的提取。每次取样后,进行人工翻堆。

1.3 测定项目及方法

温度采用便携式电子温度计每天 9:00 和 15:00 多点测定堆体温度。堆体氧气采用便携式氧气检测仪测定。pH、EC、总有机碳(total organic carbon, TOC)、总氮(total nitrogen, TN)的测定参考 NY/T 525—2021《有机肥料》^[23]。碳素损失根据堆体质量和 TOC 含量计算而来:碳素损失=(堆肥某时间点碳质量-堆肥初始碳质量)/堆肥初始碳质量×100%。碳氮比根据 TOC 和 TN 计算获得。GI 测定采用黄瓜种子发芽情况计算得出^[24]。HA、FA、可溶性有机碳(DOM-C)和可溶性有机氮(DOM-N)的提取、测定参考文献^[25]。还原糖的测定采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法^[26],游离氨基酸的测定采用茚三酮比色法^[27],多酚的测定采用 Folin-Denis 法^[28]。

将-80℃保存的样品寄往上海美吉生物医药科技有限公司进行 Illumina Hiseq 扩增子测序,细菌测序引物及具体 PCR 反应体系、程序参考文献^[29]。

1.4 数据处理

采用 SPSS Statistics 26.0 进行数据的统计分析,采用 Origin2024 进行作图。

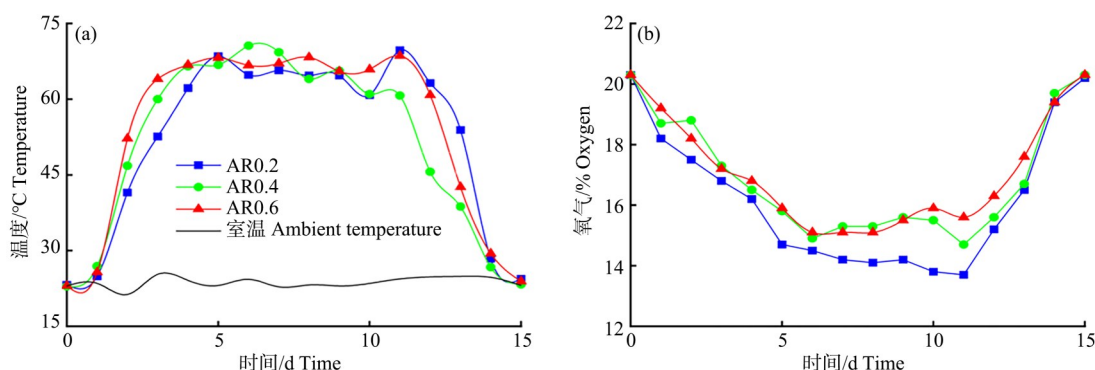
2 结果与分析

2.1 不同曝气量处理下堆肥温度、氧气变化特征

不同曝气量对堆肥温度的影响见图 2(a)。可

见 3 个不同曝气量处理的堆体的温度呈现先上升、后保持高温、再下降的趋势。其中:在第 1—5 天,3 个处理的温度呈现上升的趋势,且呈现 AR0.6>AR0.4>AR0.2 的趋势;在第 6—11 天,3 个处理持续保持高温,在 60℃以上;在第 12—15 天,3 个处理的温度呈现下降的趋势,且呈现 AR0.4<AR0.6<AR0.2 的趋势。说明曝气量为 0.4 L/(kg·min)时有利于堆肥升温、有机物的降解,导致其温度下降速率也较快。与 AR0.4 相比,可能是 AR0.2 的供氧不足,不利于微生物繁殖、堆体升温,而 AR0.6 则由于曝气量过大,带走了堆体温度、水分,不利于微生物繁殖、有机物的降解。

不同曝气量对堆肥氧气的影响见图 2(b)。可见 3 个处理的堆体氧气含量呈现下降、平稳、然后上升的趋势,与堆肥温度趋势相反。其中:堆肥第 0—5 天,氧气下降归因于微生物分解有机物消耗了大量氧气;在第 6—11 天,氧气维持较低水平,归因于堆肥处于有机物分解效率最大时期,氧气消耗量较大;在第 12—15 天,氧气逐渐上升,归因于堆肥降温期,微生物逐渐进入休眠期,有机物分解逐渐停止,不会大量消耗氧气。在堆肥第 1—12 天,AR0.4、AR0.6 的堆体氧气始终高于 AR0.2 处理,且 AR0.4 与 AR0.6 之间的氧气差异不大,说明曝气量为 0.4 L/(kg·min)时,基本满足了堆肥对氧气的需求。



AR0.2、AR0.4、AR0.6 分别表示曝气量为 0.2、0.4、0.6 L/(kg·min)。下同。
AR0.2, AR0.4, and AR0.6 represent aeration rates of 0.2, 0.4 and 0.6 L/(kg·min), respectively. The same below.

图 2 不同曝气量处理下堆肥温度(a)和氧气(b)变化

Fig. 2 Changes in temperature (a), and oxygen (b) of composting during different aeration rates

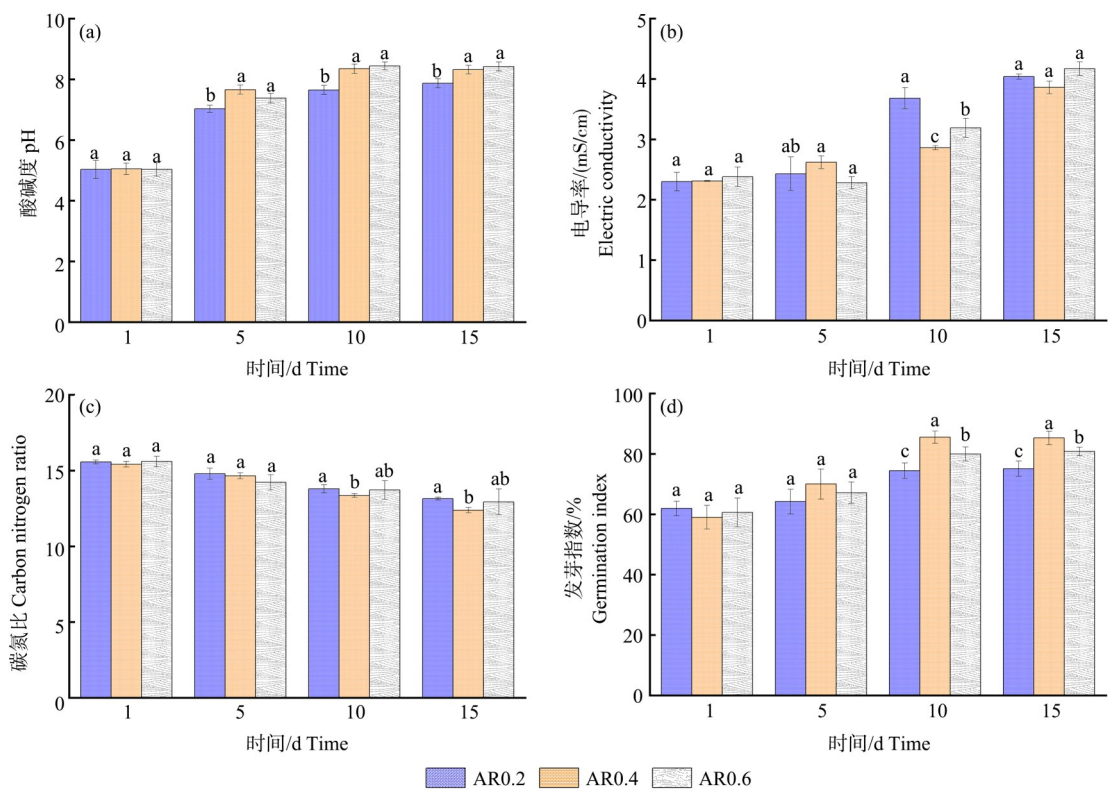
2.2 不同曝气量处理下堆肥腐熟特征

不同曝气量对堆肥 pH、EC、碳氮比、GI 的影响见图 3。由图 3(a)可见,3 个处理的 pH 呈现上升,然后保

持平稳的趋势:3 个处理的 pH 在第 5 天上升到 7.0 以上,分别为 7.03、7.66、7.38;堆肥结束时,3 个处理的 pH 分别为 7.87、8.32、8.42;在堆肥过程中,曝气量高

的处理(AR0.4、AR0.6)pH上升较快,可能是曝气量越高,越有利于有机酸的分解与挥发。由图3(b)可见,3个处理的EC呈现上升的趋势:由第1天的2.30、2.31、2.38 mS/cm上升到第15天的4.04、3.86、4.17 mS/cm;AR0.4的EC<4 mS/cm,达到堆肥腐熟对盐分的要求,其余2个处理的EC超过4 mS/cm。由图3(c)可见,3个处理的碳氮比呈现下降的趋势:由第1天的15.57、15.42、15.60下降至第15天的13.15、12.38、

12.93,分别下降了2.42、3.04、2.67,C/N下降幅度较小可以归因于堆肥时间较短。由图3(d)可见,3个处理的GI呈现上升,然后保持平稳的趋势:由第1天的61.95%、59.01%、60.61%上升至第15天的75.11%、85.31%、80.82%,分别上升了13.16%、26.30%、20.21%。AR0.4的GI上升幅度最大,且在第5天达到70.03%。以上结果说明曝气量为0.4 L/(kg·min)时,有利于堆肥的腐熟。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图3 不同曝气量处理下堆肥酸碱度(a)、电导率(b)、碳氮比(c)和发芽指数(d)变化

Fig. 3 Changes in pH (a), electric conductivity (b), carbon nitrogen ratio (c), and germination index (d) of composting during different aeration rates

2.3 不同曝气量处理下堆肥碳氮转化特征

不同曝气量对堆肥总有机碳、碳素损失、可溶性有机碳、总氮、可溶性有机氮的影响见图4。由图4(a)可见,3个处理的TOC呈现下降的趋势:由第1天的39.87%、39.83%、39.99%下降至第15天的37.74%、37.15%、37.71%,分别下降了2.13、2.68、2.28个百分点。AR0.4的TOC下降幅度较大。由图4(b)可见:碳损失主要集中在堆肥中后期(第5—15天);堆肥结束,3个处理的碳损失分别为18.68%、25.32%、22.65%,说明曝气量为0.4 L/

(kg·min)时,有利于有机质的降解。TOC降解幅度较小,可以归因于堆肥时间较短。由图4(c)可见,3个处理的DOM-C呈现上升,然后下降的趋势:由第1天的28.23、28.71、29.33 mg/g上升至第5天的33.30、33.12、38.42 mg/g,分别上升了17.94%、15.32%、31.00%;AR0.6的DOM-C含量上升幅度最大,说明曝气量为0.6 L/(kg·min)时,有DOM-C的生成;之后,微生物利用DOM-C的含量大于分解产生的DOM-C含量,导致3个处理的DOM-C呈现下降的趋势;堆肥结束,3个处理的DOM-C分别为

13.64、16.30、19.30 mg/g。

由图 4(d)可见,3 个处理的 TN 呈现上升的趋势:由第 1 天的 2.56%、2.58%、2.56% 上升至第 15 天的 2.87%、3.00%、2.92%,分别上升了 0.31、0.42、0.36 个百分点。TN 的上升归因于有机物的分解,导致 TN 相对含量有所浓缩。AR0.4 的 TN 含量上升幅度最大,说明曝气量为

0.4 L/(kg·min)时,有利于有机物的降解、TN 的浓缩。由图 4(e)可见,3 个处理的 DOM-N 呈现上升,然后下降的趋势:由第 1 天的 3.12、3.23、3.27 mg/g 上升至第 5 天的 3.95、3.80、4.44 mg/g,分别上升了 26.83%、17.48%、35.66%;在堆肥第 5—15 天,3 个处理 DOM-N 呈现下降的趋势,在第 15 天下降至 2.24、2.62、2.87 mg/g。

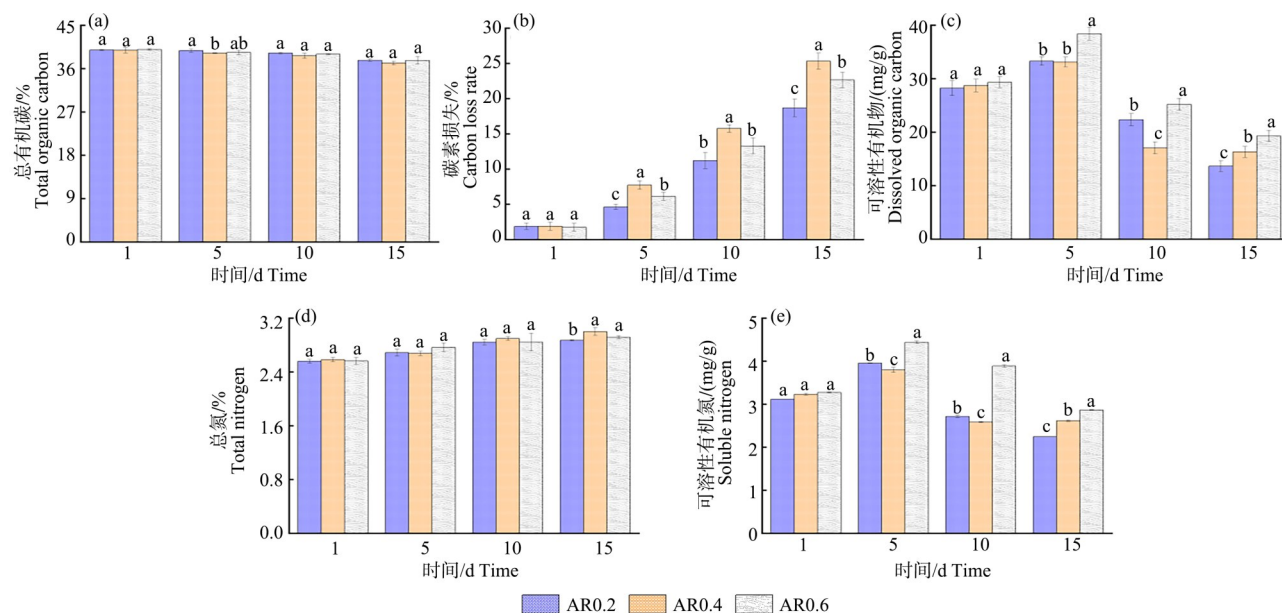


图 4 不同曝气量处理下堆肥总有机碳(a)、碳素损失(b)、可溶性有机碳(c)、总氮(d)和可溶性有机氮(e)变化

Fig. 4 Changes in total organic carbon (a), carbon loss (b), dissolved organic carbon (c), total nitrogen (d), and soluble nitrogen (e) of composting during different aeration rates

2.4 不同曝气量处理下堆肥腐殖酸及其前体转化特征

不同曝气量对堆肥还原糖、氨基酸、多酚的影响见图 5。腐殖酸前体包括还原糖、氨基酸、多酚等。这些前体可以通过美拉德反应缩合成为腐殖酸,但也可以作为能源被微生物分解利用,因此前体物质通常呈现下降的趋势。由图 5(a)和(b)可见,还原糖、氨基酸呈现下降的趋势,堆肥结束时 AR0.4 的还原糖、氨基酸比 AR0.2、AR0.6 低,说明曝气量为 0.4 L/(kg·min)时,有利于还原糖、氨基酸向胡敏酸的转化。由图 5(c)可见,多酚呈现上升然后下降的趋势,多酚的上升可以归因于有机物的降解,下降则可以归因于多酚向腐殖酸的转化,堆肥结束时 3 个处理的多酚分别为 2.68、2.25、2.38 mg/g,说明曝气量为 0.4 L/(kg·min)时,有利于多酚向胡敏酸的转化。以上结果表明曝气量为

0.4 L/(kg·min)时,有利于前体物质向腐殖酸的转化。

不同曝气量对胡敏酸、富里酸、*m*(胡敏酸):*m*(总有机碳)、*m*(胡敏酸):*m*(富里酸)的影响见图 6。由图 6(a)可见,3 个处理的 HA-C 呈现上升、下降、然后上升的趋势:由第 1 天的 20.49、20.16、20.34 mg/g 上升至第 5 天的 24.27、24.02、23.23 mg/g,分别上升了 18.45%、19.13%、14.23%;之后,3 个处理的 HA-C 在第 10 天下降至 5.97、11.62、8.33 mg/g,在第 15 天上升至 10.57、17.04、13.96 mg/g,说明曝气量为 0.4 L/(kg·min)时有利于堆肥 HA 的形成。堆肥前期,3 个处理的 HA-C 含量上升,可能是因为此时前体物质主要缩合成 HA-C;堆肥中期,3 个处理的 HA-C 含量有所下降,可能是此时前体物质主要被微生物作为能源物质利用,而不是缩合成 HA-C 了,且前期形成的

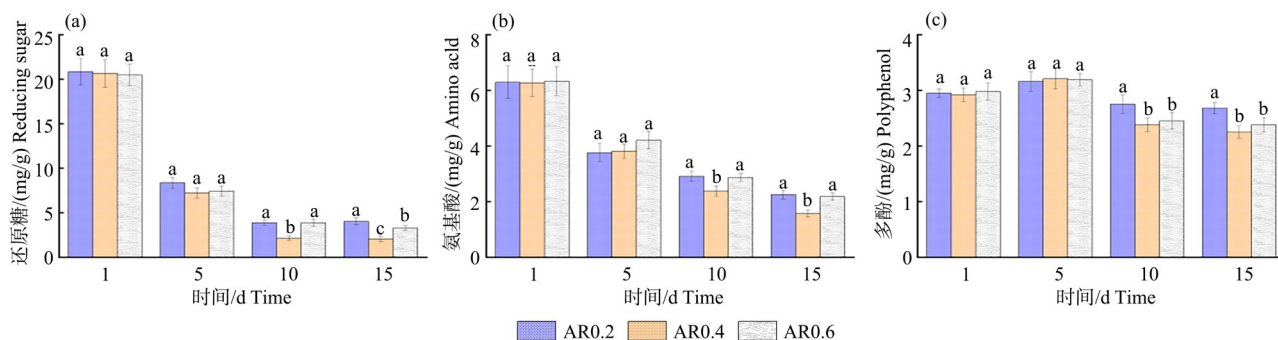


图5 不同曝气量处理下堆肥还原糖(a)、氨基酸(b)和多酚(c)变化

Fig. 5 Changes in reducing sugar (a), amino acid (b), and polyphenol (c) of composting during different aeration rates

HA-C 不稳定, 容易被微生物分解利用; 堆肥第 15 天, 3 个处理的 HA-C 略有上升, 可能是此时前体逐渐合成为 HA-C。由图 6(b) 可见, 3 个处理的 FA-C 呈现下降的趋势: 由第 1 天的 27.80、27.75、27.80 mg/g 下降至第 15 天的 11.95、11.21、13.17 mg/g, 分别下降了 57.02%、59.59%、52.61%。由图 6(c) 和 (d) 可见, 3 个处理 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{总有机碳})$ 、 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{富里酸})$ 变化趋

势与 HA 一致, 堆肥结束时 3 个处理的 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{总有机碳})$ 分别为 2.80、4.58、3.70, 3 个处理的 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{富里酸})$ 分别为 0.88、1.52、1.06, 说明曝气量为 0.4 L/(kg·min) 时, 有利于 TOC 向着 HA 的转化, 有利于 HA 的复杂化。

2.5 不同曝气量处理下堆肥细菌演替规律

不同曝气量对堆肥细菌门水平的影响见图 7(a)。堆肥过程中主要的细菌物门包括: 厚壁菌

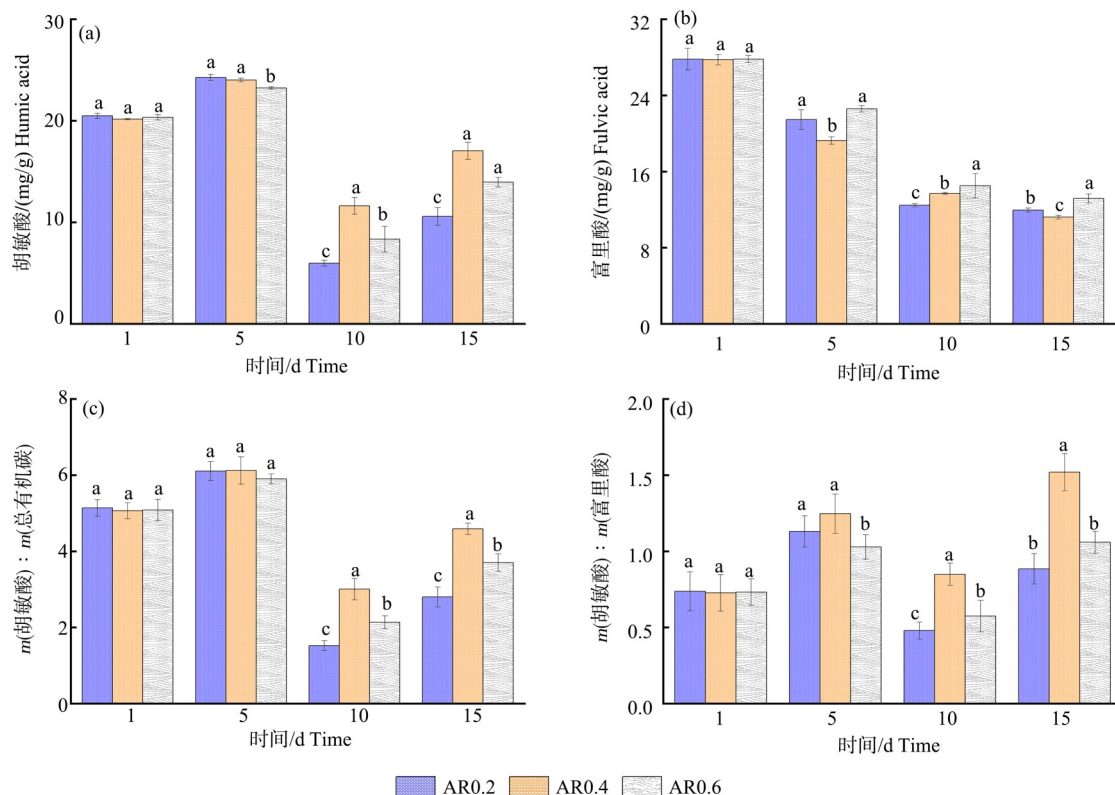


图6 不同曝气量处理下堆肥胡敏酸(a)、富里酸(b)、 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{总有机碳})$ (c)以及 $m(\text{胡敏酸}):m(\text{富里酸})$ (d)变化

Fig. 6 Changes in humic acid (a), fulvic acid (b), $m(\text{humic acid}):m(\text{total organic carbon})$ (c), and $m(\text{humic acid}):m(\text{fulvic acid})$ (d) of composting during different aeration rates

门(Firmicutes)、放线菌门(Actinobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)。其中 Firmicutes 相对丰度较高,堆肥第 1 天,3 个处理的 Firmicutes 相对丰度分别为 61.80%、64.90%、63.90%;堆肥第 5 天,3 个处理的 Firmicutes 相对丰度有所上升,分别上升至 83.10%、83.80%、75.30%;堆肥第 10—15 天,3 个处理的 Firmicutes 相对丰度有所下降,堆肥结束下降至 61.70%、66.50%、63.70%。Actinobacteria、Proteobacteria 的相对丰度次之,且基本呈现上升的趋势;堆肥第 1 天,3 个处理的 Actinobacteria 相对丰度分别为 13.30%、10.60%、10.10%,在第 15 天上升至 33.40%、23.50%、26.70%;堆肥第 1 天,3 个处理的 Proteobacteria 分别为 3.40%、3.00%、4.20%;堆肥第 10—15 天,AR0.4、AR0.6 的

Proteobacteria 相对丰度有所上升,AR0.2 的 Proteobacteria 相对丰度有所下降。

不同曝气量对堆肥细菌属水平的影响见图 7 (b)。堆肥过程中主要的细菌属水平包括:魏斯氏菌(*Weissella*)、糖单胞菌(*Saccharomonospora*)、嗜热细菌(*Thermobifida*)、乳酸杆菌(*Lactobacillus*)、脉杆菌(*Ureibacillus*)、热放线菌(*Thermoactinomyces*)、气单胞菌(*Aerococcus*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、好氧芽孢杆菌(*Aeribacillus*)、土芽孢杆菌(*Geobacillus*)。 *Weissella*、*Lactobacillus* 是堆肥前期的优势菌,该菌会分泌酸性物质,从而抑制堆肥的腐熟;堆肥第 1 天,3 个处理的 *Weissella* 相对丰度分别为 42.59%、21.52%、27.92%,3 个处理的 *Lactobacillus* 相对丰度分别为 27.8%、33.49%、26.01%;

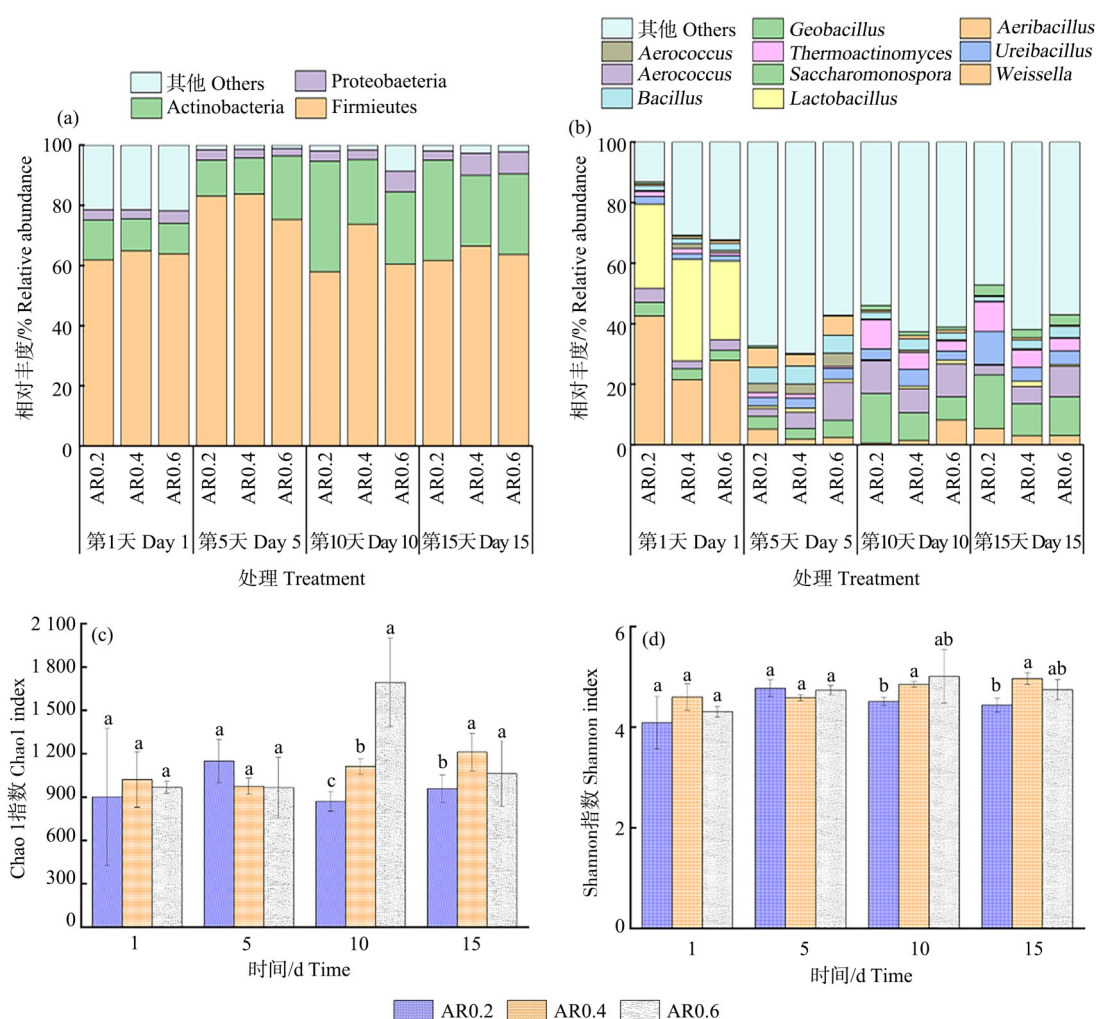


图 7 不同曝气量处理下堆肥细菌门水平(a)、属水平(b)、Chao 1 指数(c)和 Shannon 指数(d)相对丰度变化

Fig. 7 Changes in relative abundance of bacterial phyla (a), genus (b), Chao 1 index (c), and Shannon index (d) in compost under different aeration rates

Weissella、*Lactobacillus*的相对丰度如此之高,归因于餐厨废弃物在储存运输过程中经历了厌氧过程。堆肥第5—10天, *Thermobifida*、*Bacillus*、*Thermoactinomyces*的相对丰度较高,主要归因于这3种细菌具有耐受高温的特性。堆肥结束时, *Saccharomonospora*的相对丰度较高,可能是其与堆肥的腐殖化有关。

由图7(c)可见,3个处理的Chao1呈现上升然后下降的趋势;由图7(d)可见,3个处理的Shannon呈现上升然后保持平稳的趋势。堆肥结束时,AR0.4的Chao1、Shannon略高于其余2个处理,说明曝气量为0.4 L/(kg·min)时,有利于细菌数量和丰富度的增加。

2.6 相对丰度前10细菌与腐熟、腐殖化指标关联分析

相对丰度前10细菌与腐熟、腐殖化指标关联分析见表2。堆肥过程中,微生物会影响前体的转化,最终影响堆肥的腐熟及腐殖化。*Weissella*、*Lactobacillus*与还原糖、氨基酸呈现显著正相关($P<0.05$),与GI呈现显著负相关($P<0.05$),说明*Weissella*、*Lactobacillus*的下降有利于还原糖、氨基酸向胡敏酸的转化,有利于堆肥的腐熟;堆肥结束时,3个处理的*Weissella*相对丰度分别为5.43%、3.00%、3.04%,3个处理的*Lactobacillus*相对丰度分别为2.21%、1.78%、0.59%,说明曝气量为0.4、

0.6 L/(kg·min)会抑制*Weissella*、*Lactobacillus*的生长,进而促进堆肥的腐熟。*Saccharomonospora*、*Thermoactinomyces*与还原糖、氨基酸、HA、FA、 $m(\text{HA}):m(\text{FA})$ 呈现显著负相关($P<0.05$),与GI呈现显著正相关($P<0.05$),说明*Saccharomonospora*、*Thermoactinomyces*的上升可能将还原糖、氨基酸作为能量物质进行消耗,不利于堆肥腐殖酸的形成,但有利于堆肥的腐熟;堆肥结束时,3个处理的*Saccharomonospora*相对丰度分别为17.70%、10.50%、12.80%,3个处理的*Thermoactinomyces*相对丰度分别为9.74%、5.73%、4.11%,曝气量为0.4、0.6 L/(kg·min)会降低二者的相对丰度,可能说明有利于堆肥的腐殖化。*Aerococcus*、*Aeribacillus*与多酚、HA、 $m(\text{HA}):m(\text{TOC})$ 呈现显著正相关,说明*Aerococcus*、*Aeribacillus*的上升会促进多酚的形成,有利于TOC向HA的转化;堆肥结束时,3个处理的*Aerococcus*相对丰度分别为0.20%、0.50%、0.29%,3个处理的*Aeribacillus*相对丰度分别为0.39%、0.75%、0.46%,说明曝气量为0.4 L/(kg·min)有利于*Aerococcus*、*Aeribacillus*的生长,有利于堆肥的腐殖酸的形成。*Bacillus*与 $m(\text{HA}):m(\text{TOC})$ 、 $m(\text{HA}):m(\text{FA})$ 呈现显著正相关($P<0.05$),说明*Bacillus*的上升有利于TOC向HA的转化,有利于HA结构的复杂化;堆肥结束时,3个处理的*Bacillus*相对丰度分别为1.5%、2.79%、

表2 相对丰度前10的细菌与前体、腐殖酸、GI之间Pearson相关性分析
Table 2 Pearson correlation analysis between bacteria (top 10 genera in relative abundance) and precursors, humic acid and GI

菌属 Genus	还原糖 Reducing sugar	氨基酸 Amino acid	多酚 Polyphenol	胡敏酸 Humic acid	富里酸 Fulvic acid	$m(\text{胡敏酸}):m(\text{总有机碳})$	$m(\text{胡敏酸}):m(\text{富里酸})$	发芽指数 Germination index
<i>Weissella</i>	0.90**	0.84**	0.27	0.33	0.79**	0.30	−0.35	−0.65*
<i>Saccharomonospora</i>	−0.65*	−0.72**	−0.58*	−0.8**	−0.81**	−0.77**	−0.11	0.62*
<i>Thermobifida</i>	−0.53	−0.41	−0.27	−0.43	−0.42	−0.43	−0.19	0.48
<i>Lactobacillus</i>	0.83**	0.78**	0.26	0.31	0.72**	0.28	−0.30	−0.65*
<i>Ureibacillus</i>	−0.55	−0.62*	−0.37	−0.45	−0.63*	−0.42	0.15	0.49
<i>Thermoactinomyces</i>	−0.58*	−0.66*	−0.56	−0.81**	−0.78**	−0.8**	−0.17	0.59*
<i>Aerococcus</i>	−0.05	0.07	0.62*	0.58*	0.15	0.59*	0.45	−0.21
<i>Bacillus</i>	−0.31	−0.17	0.44	0.54	0.01	0.55*	0.54*	0.01
<i>Aeribacillus</i>	−0.07	0.08	0.67*	0.65*	0.25	0.64*	0.39	−0.32
<i>Geobacillus</i>	−0.59*	−0.74**	−0.71**	−0.56	−0.77**	−0.51	0.25	0.67*

注:*和**分别表示相对丰度前10的细菌与前体、腐殖酸、GI之间存在显著差异($P<0.05$)和极显著差异($P<0.01$)。
Note: * and ** represent significant differences ($P<0.05$) and extremely significant differences ($P<0.01$) between the top 10 bacteria in relative abundance and their precursors, humic acid, and GI, respectively.

3.63%,说明曝气量为 0.4、0.6 L/(kg·min)有利于堆肥的腐殖化。*Geobacillus*与还原糖、氨基酸、多酚、FA 呈现显著负相关($P<0.05$),与 GI 呈现显著正相关($P<0.05$),说明 *Geobacillus* 相对丰度的上升,可能会将还原糖、氨基酸、多酚作为能量物质进行消耗,但是有利于堆肥的腐熟;堆肥结束时,3 个处理的 *Geobacillus* 相对丰度分别为 3.59%、2.80%、3.39%,说明曝气量为 0.4、0.6 L/(kg·min)有利于堆肥的腐殖化。

3 讨 论

当小分子有机物被微生物分解利用后,剩余的大分子有机物很难被微生物分解利用,此时堆体不再产热,堆肥散热逐渐接近室温,堆肥基本达到腐熟。畜禽粪便、生活污水、农作物秸秆、蘑菇渣等废弃物堆肥时,堆肥温度接近室温通常需要 30 d 以上^[30]。本次试验周期较短,在堆肥第 15 天已经接近室温,这可能是餐厨废弃物产热加快了水分的蒸发,当含水率较低时,微生物处于休眠状态,不再继续分解有机物,导致堆体接近室温。因此,堆体接近室温可能并不能代表易于降解的有机物完全被微生物分解利用,同时不能表征堆肥达到腐熟标准。我们建议在开展堆肥试验(特别是研究堆肥腐熟特征)时,可以在堆肥接近室温时再次添加水分,如果堆肥不继续升温,认为其达到腐熟标准。当然,生产实践中面临的最大挑战是去除有机废弃物中的水分,而不是腐熟与否的问题。本次试验周期较短,导致碳素降解在 25% 左右。大多数堆肥的有机碳降解在 40% 以上,例如姜继超等^[31]在为期 40 d 的烂苹果和鸡粪联合堆肥中发现,有机碳降解率在 55% 左右。在生产实践中,如果场地、时间允许,可以在餐厨废弃物堆肥接近室温时,再次添加水分并翻堆、曝气,促进有机物被进一步分解,从而达到提升堆肥腐熟程度的目的。

以往的研究中,畜禽粪便、生活污水、农作物秸秆、蘑菇渣等废弃物堆肥的 HA 通常呈现上升的趋势,而本次试验堆肥的腐殖酸却呈现下降的趋势,这是因为餐厨废弃物中的 HA 以简单组分为主,导致其容易被微生物分解、利用。因此,HA 的含量可能并不能表征堆肥的腐殖化,可以利用 $m(\text{HA}):m(\text{FA})$ 或者多光谱(紫外、三维荧光、傅里叶红外)分析 HA 来表征堆肥的腐殖化。随着堆肥腐殖酸的形

成,通常会吸附可溶性阳离子,会使 EC 值下降。而本次试验,堆肥结束时 3 个处理的 EC 为 3.86~4.17 mS/cm,可能是餐厨废弃物含有大量盐分导致的,随着有机物分解,盐分逐渐浓缩,导致堆肥结束时 EC 较高,这与刘英杰等^[32]的研究结果一致。

微生物会影响堆肥前体的形成,最终影响腐殖酸的形成^[33]。餐厨废弃物的高含水率在存储、运输过程中会经历厌氧发酵,导致其 *Lactobacillus*、*Weissella* 含量较高,会抑制堆肥的腐熟及腐殖酸的形成。本次研究发现高曝气量会抑制 *Lactobacillus*、*Weissella* 的生长,有利于 *Saccharomonospora*、*Thermoactinomyces*、*Aerococcus*、*Aeribacillus*、*Bacillus*、*Geobacillus* 的生长,有利于堆肥的腐熟及腐殖酸的形成。Yu 等^[34]在研究中发现 *Aerococcus*、*Aeribacillus* 有利于木质素的降解,有利于堆肥的腐殖化。欧蓓等^[35]在研究中发现,餐厨堆肥高温有利于 *Bacillus* 的生长,有利于有机物的降解、堆肥的腐熟。刘娟等^[36]在研究中发现,*Lactobacillus*、*Weissella* 会抑制堆肥的腐熟,与本研究结果一致。因此,可以通过多种调控手段抑制 *Lactobacillus*、*Weissella* 的生长,促进堆肥腐熟。例如詹亚斌等^[37]通过添加生物炭抑制 *Lactobacillus*、*Weissella* 的生长,达到促进餐厨废弃物堆肥腐熟的目的。本研究发现,*Lactobacillus*、*Weissella* 是制约餐厨废弃物堆肥腐熟及腐殖化的重要因子,后期可以通过多种手段抑制 *Lactobacillus*、*Weissella* 的生长,从而达到促进堆肥腐熟及腐殖化的目的。

4 结 论

本研究以餐厨废弃物和园林废弃物为堆肥原料,探究不同曝气量对堆肥腐熟、碳氮转化、腐殖酸及其前体变化、细菌群落演替的影响,并将相对丰度前 10 的细菌属与腐熟、腐殖化指标进行关联分析。主要结论如下:1)曝气量为 0.4 L/(kg·min)时,有利于堆肥温度的上升、有机质的降解、EC 的下降、GI 的上升,有利于堆肥的腐熟;2)曝气量为 0.4 L/(kg·min)时,有利于还原糖、氨基酸、多酚向 HA 的转化,且有利于堆肥的腐殖化;3)相关性分析表明,曝气量为 0.4 L/(kg·min)时,会抑制 *Weissella*、*Lactobacillus* 生长,促进 *Saccharomonospora*、*Thermoactinomyces*、*Aerococcus*、*Aeribacillus*、*Bacillus*、*Geobacillus* 的生长,有利于堆肥的腐熟以及腐

殖化。因此,餐厨与园林废弃物共堆肥的最适曝气量为 $0.4\text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 。本研究是在 130 L 的反应器中进行模拟堆肥的,并不能代表实际生产中的大堆体,后续可以在堆肥厂中进行堆肥试验,探寻大规模堆肥厂中餐厨与园林废弃物共堆肥最适曝气量,以便更好地指导生产实践。

参考文献 References

- [1] Sindhu R, Gnansounou E, Rebello S, Binod P, Varjani S, Thakur I S, Nair R B, Pandey A. Conversion of food and kitchen waste to value-added products[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 241: 619-630
- [2] Wei Y Q, Zhao Y, Lu Q, Cao Z Y, Wei Z M. Organophosphorus-degrading bacterial community during composting from different sources and their roles in phosphorus transformation[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 264: 277-284
- [3] 王国英,袁京,孔艺霖,沈玉君,杨燕,李国学.堆肥种子发芽指数测定方法与敏感性种子筛选[J].农业工程学报,2021,37(19):220-227
Wang G Y, Yuan J, Kong Y L, Shen Y J, Yang Y, Li G X. Determination of seed germination index and selection of sensitive seeds for phytotoxicity evaluation of composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 220-227 (in Chinese)
- [4] 黄引超,董晨曦,袁京,张微,和立文.生物炭对放牧绒山羊羊粪堆肥腐熟度及臭气排放的影响[J].中国农业大学学报,2024,29(8):157-168
Huang Y C, Dong C X, Yuan J, Zhang W, He L W. Effects of biochar on the maturity, degradation of lignocellulose, and odor emissions of aerobic composting of grazing cashmere goat manure[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(8): 157-168 (in Chinese)
- [5] 薛晶晶,李彦明,常瑞雪,王珏,彭粮欢.厨余与园林废物共堆肥过程氮素转化及损失[J].农业工程学报,2021,37(10):192-197
Xue J J, Li Y M, Chang R X, Wang J, Peng L H. Nitrogen transformation and loss during co-composting of kitchen and garden wastes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(10): 192-197 (in Chinese)
- [6] Usmani Z, Sharma M, Awasthi A K, Sharma G D, Gupta V K. Minimizing hazardous impact of food waste in a circular economy—advances in resource recovery through green strategies[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 126154
- [7] 席北斗,刘鸿亮,孟伟,黄国和,秦肖生.厨余垃圾堆肥蓬松剂技术研究[J].安全与环境学报,2003,3(3):41-45
Xi B D, Liu H L, Meng W, Huang G H, Qin X S. An improvement to domestic waste composting by adding different bulking agents[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(3): 41-45 (in Chinese)
- [8] 李赞,袁京,李国学,张地方,王国英,张邦喜,宫小燕.辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J].中国环境科学,2017,37(3):1031-1039
Li Y, Yuan J, Li G X, Zhang D F, Wang G Y, Zhang B X, Gong X Y. Use of additive to control odors and promote maturity of municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 1031-1039 (in Chinese)
- [9] Wang X J, Zhang W W, Gu J, Gao H, QIN Q J. Effects of different bulking agents on the maturity, enzymatic activity, and microbial community functional diversity of kitchen waste compost[J]. *Environmental Technology*, 2016, 37(20): 2555-2563
- [10] Wu J Q, Zhao Y, Wang F, Zhao X Y, Dang Q L, Tong T J, Wei Z M. Identifying the action ways of function materials in catalyzing organic waste transformation into humus during chicken manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 303: 122927
- [11] Zhang X J, Zhan Y B, Zhang H, Wang R L, Tao X L, Zhang L P, Zuo Y L, Zhang L, Wei Y Q. Inoculation of phosphate-solubilizing bacteria regulates microbial interaction to improve phosphorus fractions transformation during kitchen waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 340: 125714
- [12] Xu Z C, Qi C R, Zhang L X, Ma Y, Li G X, Nghiem L D, Luo W H. Regulating bacterial dynamics by lime addition to enhance kitchen waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341: 125749
- [13] Gao M C, Liang F Y, Yu A, Li B, Yang L J. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios[J]. *Chemosphere*, 2010, 78(5): 614-619.
- [14] 苟久兰,罗文海,袁京,李国学,柳玲玲,张邦喜.通风速率对鸡粪—烟末联合堆肥腐熟度和污染气体排放的影响[J].西南农业学报,2021,34(4):872-879
Gou J L, Luo W H, Yuan J, Li G X, Liu L L, Zhang B X. Effects of aeration rate on maturity and polluted gas emission in chicken manure and tobacco wastes co-composting[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(4): 872-879 (in Chinese)
- [15] 徐鹏翔,王越,杨军香,李季.好氧堆肥中通风工艺与参数研究进展[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2403-2408
Xu P X, Wang Y, Yang J X, Li J. Advances in ventilation systems and parameter choices during aerobic composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2403-2408 (in Chinese)
- [16] Zhao X Y, Tan W B, Peng J J, Dang Q L, Zhang H, Xi B D. Biowaste-source-dependent synthetic pathways of redox functional groups with in humic acids favoring pentachlorophenol dichlorination in composting process[J]. *Environment International*, 2020, 135: 105380
- [17] Wu D, Wei Z M, Mohamed T A, Zheng G G, Qu F T, Wang F, Zhao Y, Song C H. Lignocellulose biomass bioconversion during composting: Mechanism of action of lignocellulase, pretreatment methods and future perspectives[J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131635
- [18] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A. Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(3): 616-623
- [19] Wu J Q, Zhao Y, Yu H M, Wei D, Yang T X, Wei Z M, Lu Q, Zhang X. Effects of aeration rates on the structural changes in humic substance during co-composting of digestates and chicken manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 510-520
- [20] Yang F, Li G X, Yang Q Y, LUO W H. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Chemosphere*,

- 2013, 93: 1393-1399
- [21] 马丽红, 黄懿梅, 李学章, 祁金花, 赵振振, 李萍. 两种添加剂对牛粪堆肥中氮转化及相关微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 76-82, 110
- Ma L H, Huang Y M, Li X Z, Qi J H, Zhao Z Z, Li P. Effect of two amendments on nitrogen transformation and its related microbial during cow manure composting [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (1): 76-82, 110 (in Chinese)
- [22] 张奎, 左一琳, 詹亚斌, 邓杰, 张利萍, 陶玥玥, 王海候, 魏雨泉, 李季. 初始 pH 对餐厨垃圾生物干化脱水效率的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (22): 9737-9745
- Zhang K, Zuo Y L, Zhan Y B, Deng J, Zhang L P, Tao Y Y, Wang H H, Wei Y Q, Li J. Effect of initial pH on bio-drying dehydration efficiency of food waste [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(22): 9737-9745 (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料(NY/T 525—2021)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Organic fertilizer (NY/T 525—2021) [S]. Beijing: China Standard Press, 2021 (in Chinese)
- [24] 詹亚斌, 魏雨泉, 杨利, 夏贤格, 刘波, 陶兴玲, 李季, 陈云峰. 磷矿粉添加量对餐厨废弃物堆肥腐殖酸演化的影响[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(10): 1444-1447, 1453
- Zhan Y B, Wei Y Q, Yang L, Xia X G, Liu B, Tao X L, Li J, Chen Y F. Effect of phosphate rock powder addition on the humic acid evolution of food waste composting [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(10): 1444-1447, 1453 (in Chinese)
- [25] Yu Z, Liu X M, Zhao M H, Zhao W Q, Liu J, Tang J, Liao H P, Chen Z, Zhou S G. Hyperthermophilic composting accelerates the humification process of sewage sludge: Molecular characterization of dissolved organic matter using EEM-PARAFAC and two-dimensional correlation spectroscopy [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 274: 198-206
- [26] 高继国. 普通生物化学教程实验指导[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- GAO J G. *Experimental Guide for General Biochemistry Tutorial* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009 (in Chinese)
- [27] Lowry O H, Rosebrough H J, Farr A, Randall R J. Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 193(1): 265-275
- [28] Anesini C, Ferraro G E, Filip R. Total polyphenol content and antioxidant capacity of commercially available tea (*Camellia sinensis*) in Argentina [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(19): 9225-9229
- [29] Wang Y, Gong J Y, Li J X, Xin Y Y, Hao Z Y, Chen C, Li H X, Wang B, Ding G M, Li W W, Zhang Z Y, Xu P X, Xu T, Ding G C, Li J. Insights into bacterial diversity in compost: core microbiome and prevalence of potential pathogenic bacteria [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137304
- [30] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011
- Li J, Peng S P. *Practical Handbook of Composting Engineering* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011 (in Chinese)
- [31] 姜继韶, 党森, 王撑, 王洋, 孙杏菊, 王晨境, 杨鲜丽, 刘娟, 潘尤伟, 闫广轩, 张春燕, 李云蓓. 过磷酸钙和腐烂苹果联合添加对猪粪堆肥过程中碳素转化和腐熟的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4422-4430.
- Jiang J S, Dang S, Wang N, Wang Y, Sun X J, Wang C J, Yang X L, Liu J, Pan Y W, Yan G X, Zhang C Y, Li Y B. Influences of calcium superphosphate, rotten apples and their mixture on organic matter transformation and compost maturity during pig manure composting [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(11): 4422-4430 (in Chinese)
- [32] 刘英杰, 李婉婷, 王海候, 陶玥玥, 常远, 周凯文, 丁晓燕, 魏雨泉, 李季. 锯末添加量对餐厨废弃物生物干化效率和细菌群落的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 208-216
- Liu Y J, Li W T, Wang H H, Tao Y Y, Chang Y, Zhou K Y, Ding X Y, Wei Y Q, Li J. Effects of sawdust addition on bio-drying efficiency and bacterial community of food waste [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15): 208-216 (in Chinese)
- [33] 施童, 陈杰, 元传仁, 李国学, 罗文海, 徐志程. 农林废弃物对厨余垃圾堆肥腐殖化的影响与微生物驱动机制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 191-201
- Shi T, Chen J, Qi C R, Li G X, Luo W H, Xu Z C. Effects of agricultural and forestry wastes on humification and its microbially driven mechanisms in kitchen waste composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(13): 191-201 (in Chinese)
- [34] Yu Z, Liu X M, Zhao M H, Zhao W Q, Liu J, Tang J, Liao H P, Chen Z, Zhou S G. Hyperthermophilic composting accelerates the humification process of sewage sludge: molecular characterization of dissolved organic matter using EEM-PARAFAC and two-dimensional correlation spectroscopy [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 274: 198-206
- [35] 欧蓓, 薛映, 肖可可, 杨家宽, 陈海滨, 关文义, 程谦勋. 添加秸秆堆肥处理厨余垃圾过程中蛋白类物质转化及微生物群落研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2022, 50(10): 83-96
- Ou B, Xue Y, Xiao K K, Yang J K, Chen H B, Guan W Y, Cheng Q X. Study on proteinaceous components conversion and microbial community during composting of food waste added by straw bulking agents [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2022, 50(10): 83-96 (in Chinese)
- [36] 刘娟, 沈玉君, 罗文海, 丁惊涛, 孟海波, 周海滨, 张曦, 程红胜, 王健, 徐鹏翔. 盐含量对餐厨垃圾好氧堆肥腐殖化过程及微生物演变的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 190-201
- Liu J, Shen Y J, Luo W H, Ding J T, Meng H B, Zhou H B, Zhang X, Cheng H S, Wang J, Xu P X. Effects of salt content on the humification and microbial community succession of food waste aerobic composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 (19): 190-201 (in Chinese)
- [37] 詹亚斌, 张阿克, 陈云峰, 夏贤格, 杨利. 生物炭添加对餐厨废弃物堆肥腐殖酸形成及微生物演替的影响[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(2): 145-150, 158
- Zhan Y B, Zhang A K, Chen Y F, Xia X G, Yang L. Effect of biochar addition on the formation of humic acid and microbial evolution in food waste composting [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(2): 145-150, 158 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 詹亚斌,博士,湖北省农业科学院植保土肥研究所助理研究员。主要研究方向为有机废弃物肥料化、土壤培肥与地力提升。主持湖北省自然科学基金、农业农村部资源循环利用技术与模式综合性重点实验室开放课题、湖北省农科院青年科学基金等共5个项目。以第一或通讯作者在 *Bioresource Technology*、*Biochar*、*Science of the Total Environment*、*Journal of Environmental Chemical Engineering*、*Environmental Technology & Innovation* 等杂志上发表论文 20 余篇,授权专利 5 项,出版论著 1 部。



通讯作者简介: 陈云峰,博士,湖北省农业科学院植保土肥研究所研究员,农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室主任。主要研究方向:农业废弃物肥料化利用、土壤生态学。主持国家重点研发计划项目课题、国家自然科学基金面上项目等课题 20 余项。以第一作者在 *Applied Soil Ecology*、*Pedosphere*、《生态学报》等杂志上发表文章 30 余篇,授权专利 3 项,出版论著 2 部,获湖北省科技进步二等奖 1 项。