



秸秆复配对奶牛粪便兼性堆肥过程促腐减排与减量化的影响

张东莉^{1,2}, 吕同瑞^{1,2}, 赖海玉^{1,2}, 张兰霞^{2,3}, 罗文海^{2,3}, 李国学³, 侯勇^{2,3}, 肖然¹, 钟顺和^{2,4}, 王春荣^{2,4}, 刘飞^{2,4}, 徐志程^{3,✉}

1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 农业农村部西南有机循环工程中心重点实验室, 大理 671000; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 4. 云南顺丰洱海环保科技股份有限公司, 大理 671000

摘要 辅料调理是实现奶牛粪便等高湿物料兼性堆肥高效进行的有效技术, 但不同辅料比例对奶牛粪便兼性堆肥过程气体排放、腐殖化与减量化的调控效果仍有待进一步评价。本研究选用芦苇秸秆以改善奶牛粪堆体结构和碳氮比, 分别添加 7.5%、15%、22.5%、30% (湿重) 的芦苇秸秆与奶牛粪便进行 60 d 的兼性堆肥试验, 探究其促腐减排与减量化的效果。结果表明: 随着芦苇秸秆添加比例的升高, 体系含水率和自由空域分别呈现逐渐降低和升高的变化趋势, 进而促进氧气高效扩散, 加快堆体升温和水蒸发, 但减少了 CO₂ 和 NH₃ 排放以及总养分含量; 腐殖质含量、体积减量率和减重率均呈现先升高后下降的变化趋势。相较于其他添加比例, 添加 15% 芦苇秸秆可延长高温持续时间 4~7 d; 在堆肥结束时, 发酵产物种子发芽指数可达 129.1%, 腐熟度和有机质腐殖化可分别提升 9.2%~34.5% 和 3.2%~47.1%, 物料减重率可达 63.7%, 水分散失占损失总量的 85.8%, 产物总养分 (5.0%) 与初期相比增加 34.6%。

关键词 奶牛粪便; 兼性堆肥; 腐熟度; 气体排放; 减量化

随着经济发展与人民生活水平提高, 肉蛋奶需求量日趋增加, 促使奶牛养殖业规模不断扩大。据统计, 2020 年底中国奶牛存栏规模已达 1.043×10^4 头, 奶牛粪产生量高达 1.3×10^8 t^[1]。奶牛粪便中含有丰富的有机质和氮磷钾等营养元素, 若得不到有效资源化利用, 将会引起资源浪费和环境污染问题^[2]。堆肥化处理是实现奶牛粪便减量化和资源化利用最有效的方法之一^[3], 能够通过物料自身及体系演化微生物的驱动作用, 将有机废弃物转化为富含腐殖质及作物可利用养分的有机肥料。

根据氧气的供给和利用情况, 堆肥可以分为好氧堆肥和兼性堆肥。好氧堆肥具有升温启动快、无害化周期短、腐熟性能高的特点, 但运行成本较高, 且容易排放大量污染气体。相比之下, 兼性堆肥是一种人为调控的自然堆沤, 将物料进行一定性质和结构调控后, 以自然堆存、无动力通风的方式发酵无害化^[4]。兼性堆肥因具有投资运行成本低、操作简单、场地限制小等优点, 已成为绝大多数中小规模畜禽养殖场主要的固体粪便处理方式。已有统计表明, 我国采用堆沤处理的畜禽规模养殖场占比达到 89.4%, 其中采用堆沤的奶牛养殖场占相应畜种养殖场总数的 73.7%^[5]。

由于奶牛粪含水率高 (>80%), 兼性堆肥发酵过程中易存在氧气扩散效率低、有机质降解慢、腐熟效果差的问题, 导致奶牛粪难以实现有效肥料化利用。此外, 兼性堆肥多用于养殖场就地就近处理, 臭气 (如硫化氢 (H₂S) 和氨气 (NH₃)) 排放严重限制了其大规模推广应用。因此, 如何提高兼性堆肥腐熟效果, 同时降低臭气排放, 是实现奶牛粪高效资源化亟需解决的痛点。兼性堆肥与好氧堆肥发酵原理相似, 可借鉴好氧堆肥研究中的策略, 通过添加一定比例的辅料进行物料混匀调配, 调节堆体含水率和堆体物理结构, 促进畜禽粪便有效发酵。卢秉林等^[6]发现与纯牛粪好氧堆肥相比, 添加 40% 小麦秸秆 (体积比) 能够使堆体更快进入高温期, 提前 12 d 腐熟, 并且有效减少 NH₃ 挥发和氮素损失。GHANNEY 等^[7]发现牛粪与秸秆混合进

收稿日期: 2024-09-23 录用日期: 2025-01-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFD1900300)

第一作者: 张东莉 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为固体废弃物资源化利用, zhangdongli1006@163.com ✉通信作者: 徐志程 (1995—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为固体废弃物资源化利用, xuze@cau.edu.cn

行好氧堆肥,在初始含水率为65%时,能够有效促进木质纤维素降解,腐殖化率可增加13%以上。刘凯等^[8]研究表明,牛粪与玉米秸秆以3:7混配(体积比)进行好氧堆肥,在第2 d可升温至55℃,并维持高温16 d,堆肥结束时体积减量率达到56.0%,全氮含量上升1.0%。与好氧堆肥相比,畜禽粪便兼性堆肥的性能调控研究较少,且主要关注腐熟度或污染气体排放等单一方面的影响。例如,尹子铭等^[9]发现与纯猪粪堆沤相比,添加20%玉米秸秆可显著提升物料孔隙率19.4%和碳氮比(C/N),加快有机质转化,最终种子发芽指数(GI)可提高73.8%。吴海程^[10]发现与纯猪粪堆沤相比,添加25%秸秆能够降低8.9%的NH₃排放。然而,目前却鲜有研究聚焦于秸秆复配对奶牛粪兼性堆肥过程减量化、气体减排及腐熟提升的协同调控。此外,兼性堆肥通过自然堆存、无动力通风的方式,在兼氧条件下对有机物进行降解转化。由于堆体结构较为致密,空气扩散距离有限,致使堆体不同区域多存在好氧、兼氧和厌氧环境交织区域,由好氧、兼性、厌氧微生物共同作用,驱动物质分解转化,同一体系下存在较大的异质性,但目前缺乏相关研究。

相比于常用的堆肥辅料(如农作物秸秆等),芦苇秸秆产量高、易获取,不会与粮食作物产生种植竞争,使其在可再生资源市场上具备一定优势。此外,芦苇秸秆中木质素含量较高,堆肥过程中不易被彻底降解而矿化为二氧化碳(CO₂),堆肥产物还田后将会有更多的有机碳以土壤腐殖质的形式保留在土壤中^[11]。朱鹏程^[12]研究发现,芦苇秸秆与牛粪堆肥(体积比为2:1)高温期超过40 d,符合无害化要求,且堆肥结束时有机质及总养分含量均符合《有机肥料》(NY/T 525-2021)要求^[13],明确了芦苇秸秆用于大规模堆肥资源化利用的可行性。因此,本研究选取芦苇秸秆为辅料,设置不同芦苇秸秆添加比例与奶牛粪进行兼性堆肥试验,分析不同堆肥时期堆体温度和氧气等理化特性的垂直和水平变化特征,进而评价堆肥过程中气体排放、腐熟度、减量化和产品养分等指标,综合筛选奶牛粪兼性堆肥的适宜秸秆复配方案。本研究结果能够为我国奶牛粪就地高效处理与利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验以奶牛粪便为堆肥主料,选用芦苇秸秆作为辅料进行兼性堆肥试验。试验所用的奶牛粪便、芦苇秸秆均取自云南顺丰洱海环保科技股份有限公司,其中芦苇秸秆经加工厂统一粉碎至粒径约3 cm后使用。堆肥物料的初始理化特性如表1所示。

表1 堆肥物料基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of composting materials

堆肥原料	含水率 ^a	容重 ^a /(kg·m ⁻³)	pH值 ^a	电导率 ^a /(mS·cm ⁻¹)	总有机碳含量 ^b	总氮含量 ^b	五氧化二磷 ^b	氧化钾 ^b
奶牛粪便	73.6%±0.0%	401.7±10.3	7.0±0.0	2.1±0.1	23.8%±0.3%	1.9%±0.0%	1.5%±0.0%	1.3%±0.0%
芦苇秸秆	16.8%±0.0%	149.7±4.5	7.5±0.1	2.9±0.5	37.4%±0.6%	1.2%±0.1%	0.6%±0.2%	1.7%±0.1%

注:^a基于湿基质量,^b基于干基质量。

1.2 试验设计

实验地点位于云南省大理白族自治州洱源县旧州村粪污收集站棚内(99°55'E,26°06'N)。试验过程以奶牛粪便为主料,分别添加7.5%、15%、22.5%、30%(基于湿重)芦苇秸秆作为辅料进行堆肥,混合物料C/N为19~29,物料总重为4.3~8.8 t,设置成约长9 m、宽3 m、高1.5 m的条垛式堆体(图1),试验于2023年4月14日开始,至6月13日结束,历时60 d,于第25天翻堆。堆肥期间每天上午约10:00进行温度、氧气(O₂)、CO₂和NH₃等指标测定。在第0、10、25、40、60天采集固体样品并测量堆体长宽高。一部分新鲜样品用于测定含水率、pH值、电导率(EC)以及GI等基本理化指标;另一部分固体样品经自然风干、粉碎后过1 mm筛,测定可挥发性固体(VS)、腐殖质、总养分等指标。其中,为分析堆体的异质性,每个处理共设置12个点位进行测温、测气和取样,分别位于距离堆体一端1.5、3、4.5、6 m处取4个剖面,每个剖面选择距离地面90、60、30 cm的位置为上、中、下点位。

1.3 测定方法

1) 常规指标测定。堆肥温度采用插入式手持工业数显温度计(LCD-150型,仪度,河北)测定。



(a) 堆体正面图

(b) 堆体侧面图

图1 堆肥实景图

Fig. 1 Site photos of composting

O_2 和 CO_2 含量使用泵吸式复合气体分析仪 (GT-2000, 科尔诺, 深圳) 测定。起堆时使用软管插入堆体各个点位, 测气时将软管连接气体分析仪采气头, 待空气排完、读数稳定后记录数据得到 O_2 、 CO_2 体积分数 (%)。 NH_3 采用吸收瓶法测定, 使用小型抽气泵抽取管内气体, 出气头与吸收瓶连接, 瓶中 2% 稀硼酸吸收饱和后由红色变成蓝色, 记录气泵抽气流量及变色时间, 同时将吸收瓶带回实验室, 用 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的稀硫酸滴定至红色, 记录消耗的稀硫酸体积。含水率使用烘干重量法测定, 取一定量鲜样于烘箱 (101 型, 永光明, 北京) 中在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 8 h 至恒重后进行测定。VS 测定采用灼烧法, 取一定量过筛的样品烘干后, 放在电炉上烧至黑色无烟, 转置于马弗炉 (101 型, 永光明, 北京) 中在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 下灼烧 4 h^[14]。堆体自由空域 (free air space, FAS) 利用容重和 VS 计算^[15]。有机质含量及总养分测定参照《有机肥料》(NY/T 525-2021)^[13], 总有机碳含量根据有机质含量和转化系数 1.724 得到, 总氮 (TN) 采用硫酸-过氧化氢消煮-凯氏定氮法, 五氧化二磷 (P_2O_5) 采用钒钼酸铵比色法测定, 氧化钾 (K_2O) 用火焰光度计法测定, 总养分分为 TN、 P_2O_5 、 K_2O 这 3 者加和。

pH、EC、GI 值测定: 将新鲜样品与蒸馏水按 1:10 (m:v) 混合, 固定于往复水平震荡机上, 调节频率 $100\text{ 次}\cdot\text{min}^{-1}$, 在常温下连续振荡 30 min, 静置 30 min 后过滤得到浸提液。用精密 pH 计 (PHS-2C 型, 雷磁, 杭州)、电导率仪 (DDS-307 型, 雷磁, 上海) 分别测定浸提液的 pH、EC 值。此外, 吸取 5 mL 浸提液加入铺有滤纸的 9 cm 培养皿中, 随后在皿中均匀放置 10 粒大小基本一致、饱满的萝卜种子 (未包衣), 同时用蒸馏水作空白对照; 在 $(25\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ 培养箱中避光培养 48 h, 逐一测定根长, 并根据《有机肥料》(NY/T 525-2021)^[13] 计算 GI 值。

2) 腐殖质指标测定。腐殖质 (HS)、胡敏酸 (HA)、富里酸 (FA) 提取和测定: 取 1 g 过筛的风干样于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 混合提取液 ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠 (NaOH) 与 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 焦磷酸钠 ($Na_4P_2O_7$) (V/V=1:1)), 在常温下振荡 30 min, 随后在 $4\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 20 min, 收集上清液, 重复上述操作 4 次 (至浸提液近乎无色), 混合 4 次上清液得到 HS 溶液。此后, 用 $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸溶液将 pH 调节至 1 (可用精密 pH 试纸检测), 在室温下静置 12 h, 随后以 $4\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 上清液为 FA, 沉淀物为 HA。使用总有机碳 (TOC) 分析仪 (SHIMADZU, 岛津, 日本) 测定 HS、FA 含量, HA 含量使用差减法计算, HA 含量与 FA 含量之比为 HA/FA。

紫外-可见光光谱特征参数测定: 将 HS 溶液稀释至 TOC 浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为待测液, 以纯水作为空白对照, 用紫外-可见光分光光度计 (DR6000™, 哈希, 美国) 扫描全谱, 扫描波长范围为 200~900 nm。SUVA₂₅₄ 为测定样品在波长 254 nm 处吸光度 (A) 利用公式 ($SUVA=A\times 100/TOC$) 进行计算, 代表含有不饱和 C=C 键的芳香族化合物, 用于表征腐殖质类物质^[16]; $A_{240-400}$ 代表波长 240~400 nm 的积分面积, 其值越大, 表明水溶性有机物 (DOM) 分子缩合度越大, 腐殖化程度越高^[17]; E_{280}/E_{472} 表示波长 280 和 472 nm 处对应吸光度之比, 该值与木质素物质相对含量成正比^[18]; E_{253}/E_{203} 表示在波长 253 和 203 nm 处对应吸光度之比, 与有机物分子苯环上的取代基种类密切相关, 当苯环取代基上羟基、羧基、羰基等官能团增加时, 该值升高^[19-20]。

3) 减量化指标测定。体积减量率使用卷尺测定堆体长宽高以计算体积, 以体积差值除以初始体积求得体积减量率。减重率用体积和容重计算得出堆体的重量, 不同时期的重量差值除以初始重量求得堆体减重率。

4) 气体指标测定。CO₂ 质量浓度根据公式 (1)^[21] 计算, 通过复合气体分析仪得到 CO₂ 体积分数, 使用公式 (1) 将 CO₂ 体积分数转为质量浓度。

$$F = \frac{\varphi \times M \times 273 \times P}{V_m \times (273 + T) \times 101.325 \times RC} \quad (1)$$

式中: F 为质量浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; φ 为体积分数, %; M 为气体的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; P 为气体压力, kPa ; V_m 为气体标准摩尔体积常数 $22.4, \text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$; T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; RC 为还原系数 0.1 。

NH₃ 质量浓度根据公式 (2) 计算, 根据气泵流量及吸收瓶变色时间计算得气体体积, 再转换为标准状况下体积, 而后根据质量、体积求得质量浓度。CO₂ 和 NH₃ 日排放量和累积排放量根据公式计算^[22]。

$$F = \frac{C \times V \times M \times 101.325 \times (273 + T)}{P \times S \times t \times 273} \quad (2)$$

式中: F 为质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; C 为标定的硫酸标准溶液浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为样品滴定硫酸体积, mL ; M 为气体的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; P 为气体压力, kPa ; S 为气泵流量, $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为吸收瓶中变色的时间, s 。

1.4 分析方法

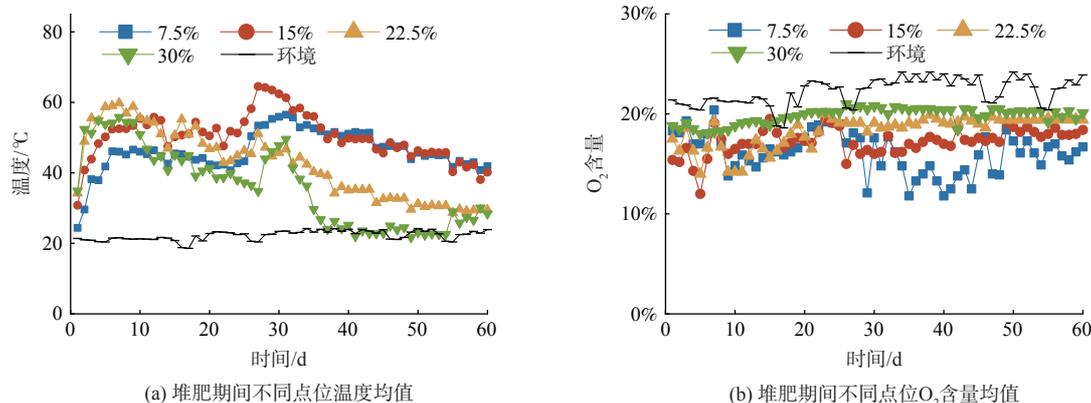
取每个堆体 12 个点位数据的均值, 采用 Microsoft Excel 2022 进行数据统计分析; 使用 SPSS 26.0 根据单因素方差分析 (ANOVA)、多重比较 (LSD-t) 方法确定各处理间显著性差异, 以 $P < 0.05$ 表示差异显著; 采用 Origin 2019 进行绘图。使用箱型图绘制各典型时期 (升温、高温、降温期) 和不同点位 (上、中、下) 的温度、氧气含量。绘制雷达图综合分析不同处理对堆肥促腐减排、提质减量的效果影响。

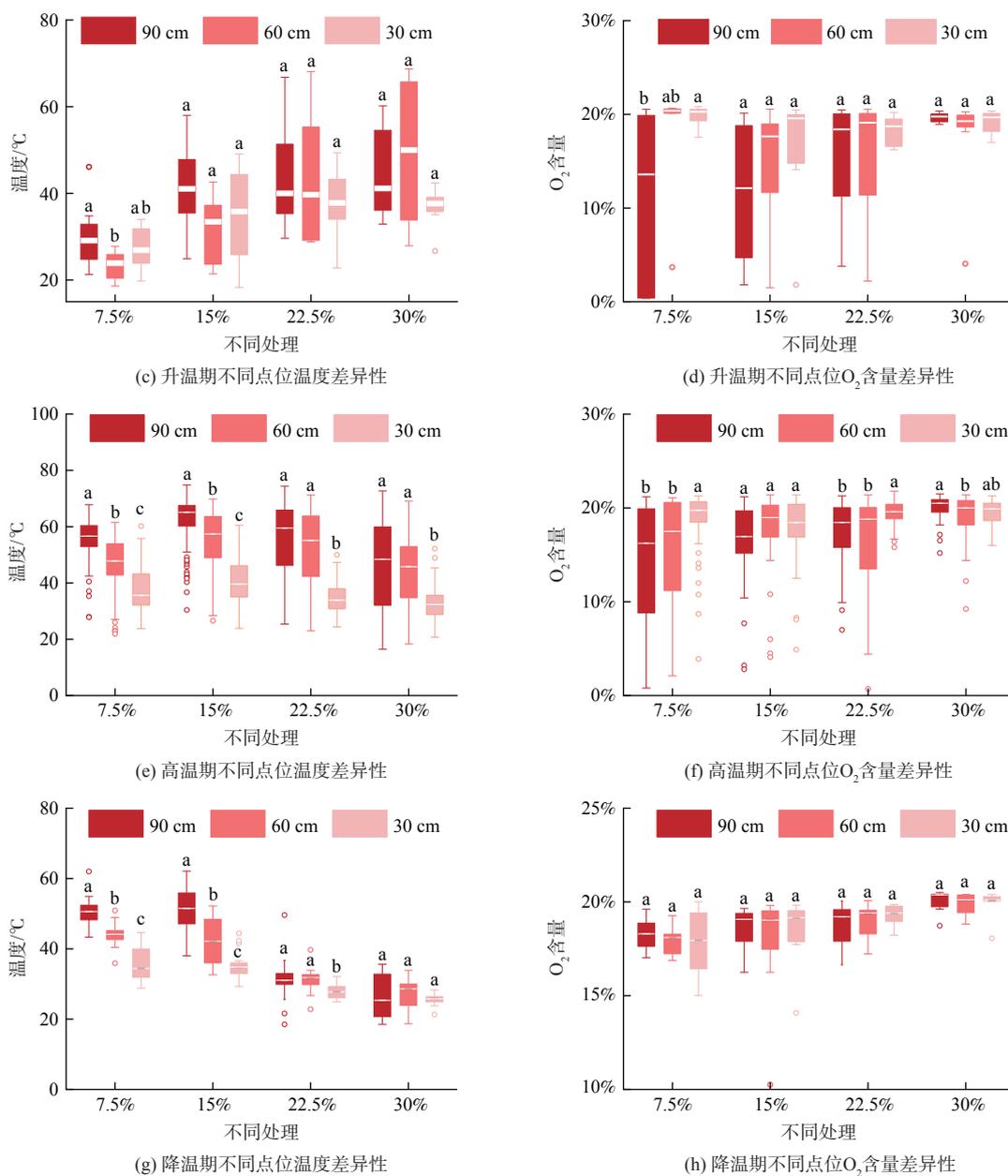
2 结果与讨论

2.1 温度与氧气含量变化

添加 15% 及以上秸秆的处理能够在 4 d 内达到 50°C 以上, 并维持高温期 9~16 d (图 2(a)), 满足《畜禽粪便无害化处理技术规范》(GB/T 36195-2018) 要求^[23]。升温速度随秸秆添加比例增大而加快, 主要是由于添加高比例秸秆提高了堆体的自由孔隙, 改善了堆体通气性, 营造了较好的微生物生境^[24]。第 25 天翻堆后, 添加 15% 及以下秸秆的处理仍能持续高温 8 d 以上, 而其他处理仅能维持 2 d, 表明添加高比例秸秆 (>15%) 能够有效加快有机质分解, 更早进入降温期。15% 处理达到 50°C 以上的时间比其他处理长 4~7 d, 可能是较为适宜的堆体孔隙度和较高的可降解有机质含量有利于微生物持续代谢产热。由于堆肥过程好氧微生物主要利用 O₂ 作为终端电子受体进行有机物分解放热^[25], 好氧微生物消耗大量 O₂ 不断进行放热反应, 使得 O₂ 含量与温度呈相反变化趋势 (图 2(b))。所有处理的 O₂ 含量在整个堆肥过程中均大于 10%, 说明添加秸秆可有效改善牛粪致密结构, 促进 O₂ 扩散, 尹子铭等^[9] 同样发现在猪粪堆沤过程中, 秸秆添加可提升堆体自由孔隙率 19.4%。在堆肥高温期, O₂ 含量和嗜热微生物产热活动均随秸秆添加比例的增大而增加, 说明添加秸秆对氧气扩散的影响高于微生物耗氧反应。

兼性堆肥主要依靠无动力通风, 即空气的自由扩散进行供氧, 发酵过程中可能会由于空气扩散效率不同, 引起堆体异质性^[24]。本研究中堆体不同剖面的温度和 O₂ 含量无明显差异 ($P > 0.05$), 但各堆肥时期的





注：图(a)、(b)分别为堆体不同点位每天温度和氧气含量的均值；图(c)~(h)为不同高度点位在升温、高温、降温期间内每天温度和氧气含量的汇总；图(c)~(h)中不同小写字母表示相同时期下处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 堆肥过程温度和氧气含量变化

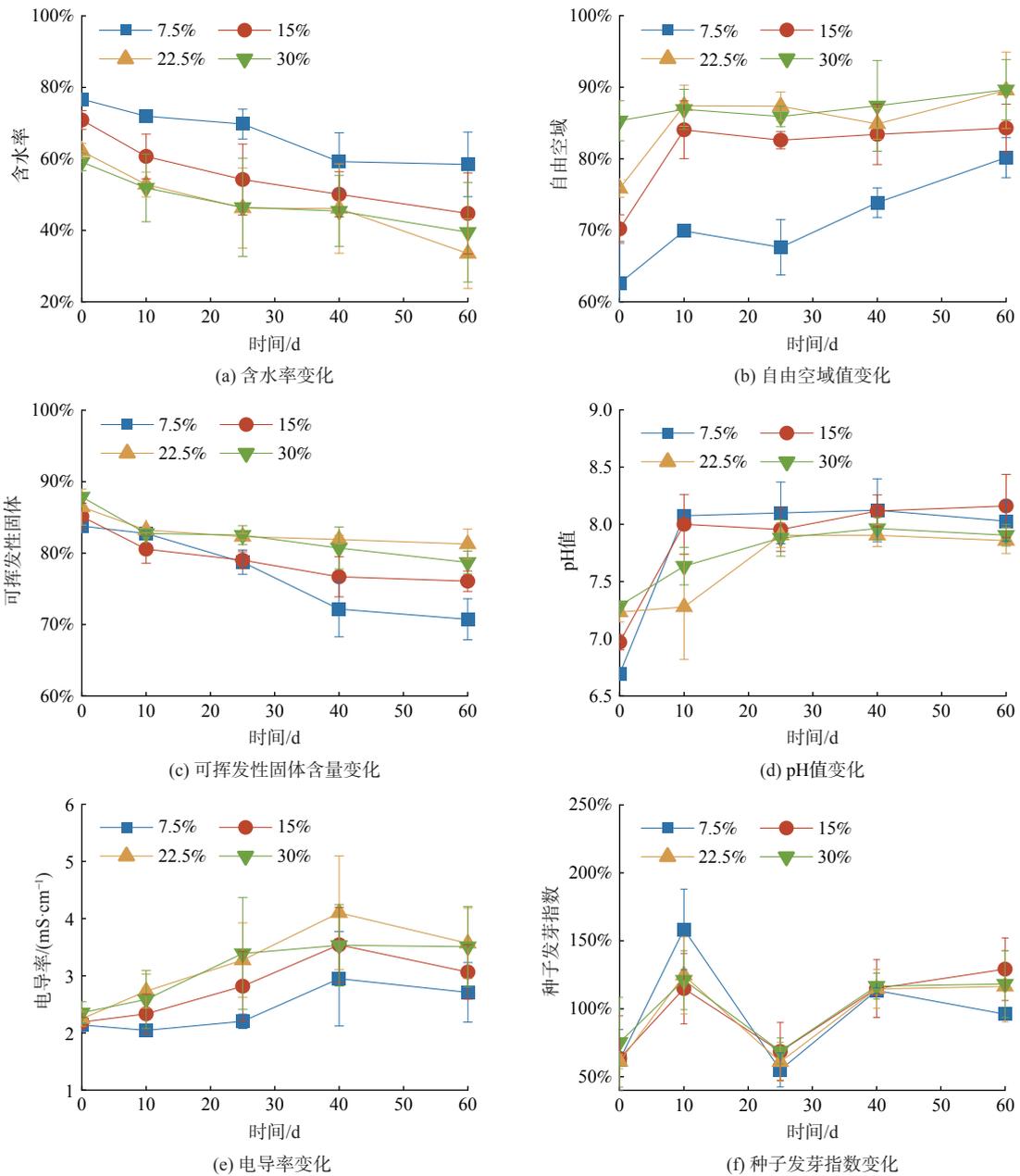
Fig. 2 Changes in temperature and oxygen content during composting

堆体上层温度均高于中下层，主要是由于上层物料与空气接触面积大，利于氧气扩散进入堆体，加快有机质降解产热。此外，在重力的作用下，上层有机质降解产生的牛粪细颗粒和水逐渐沉降至底层，造成了底层的高含水率和高密度环境，进而阻碍了物料的发酵^[26]。考虑到耗氧产热作用，不同高度点位的 O_2 含量与温度变化趋势相反，但 30% 处理由上至下呈现递减的趋势，一方面是由于上层物料对氧气扩散的阻碍作用，另一方面可能是堆体内部产热过多，热量的向上扩散阻碍了氧气向下流动。相比于 7.5% 和 15% 处理 ($P < 0.05$)，22.5% 和 30% 处理堆体温度和 O_2 含量分层不明显，表明当秸秆添加 $\geq 22.5\%$ 时，相比于耗氧活动，堆体结构的改善对氧气扩散的影响占主导地位。

2.2 基本理化特性变化

1) 含水率和 FAS 值。各处理物料中的含水率随着堆肥进行逐渐降低，尤其是 15% 处理的含水率降幅

在 10 d 内可达 14.4% (图 3(a))。由于 7.5%、15% 处理在翻堆后出现 2 次升温且维持高温 8 d 以上, 致使其含水率在 25 d 后仍出现较为明显的降低趋势。堆肥 40 d 后, 除 7.5% 处理外, 其他处理的含水率持续下降, 主要是较强的透气性促进物料被持续风干。堆肥结束时, 添加 15% 及以上秸秆处理的含水率均降至 45% 以下, 满足《畜禽粪便堆肥技术规范》(NY/T 3422-2019) 要求^[27]。相较于含水率, 各处理的 FAS 在堆肥过程中整体呈现相反变化趋势, 且随着秸秆添加比例增大而逐渐增加 (图 3(b))。堆肥过程中 FAS 增长主要发生在兼性堆肥前 10 d, 主要是因为有机质降解加速升温, 促进了水分持续散失 (图 3(a))。相较于其他处理, 添加 15% 秸秆处理在堆肥前 10 d 的 FAS 增幅最大 (19.7%), 可能与含水率大幅降低有关。在第 25 天后, 除 7.5% 处理的 FAS 仍持续增长外, 其余处理均趋于平缓, 可能是由于较低的秸秆比例延迟了高温期, 从而导致后期剧烈的有机质降解和水分蒸发。



注: 图中标标准差代表不同点位间差异。

图 3 堆肥过程中含水率、FAS、VS、pH 值、EC、GI 变化

Fig. 3 Changes of moisture content, FAS, VS, pH value, EC, and GI during composting

2) VS 值。在兼性堆肥过程中,各处理 VS 含量整体呈现下降趋势(图 3(c)),特别是在高温期最显著,表明了有机质的持续降解。堆肥原料中大量易降解有机质(如糖类、蛋白质、氨基酸等)在适宜的氧气、温度条件下可被微生物迅速氧化分解并产生热量,导致堆肥前期 VS 迅速下降。在第 25 天翻堆后,7.5% 处理 VS 降低速率更快,主要是由于其较高的易降解有机质含量和较慢的有机质降解速率,使其在翻堆后重新调整了堆体微生物和有机质分配布局,进而改善了好氧微生物代谢。堆肥结束时,VS 的降幅随秸秆添加比例增加而减小,7.5%、15%、22.5% 和 30% 秸秆处理分别为 15.6%、10.7%、9.0%、7.5%,主要是由于秸秆比例增加提高了堆肥体系中木质素等难降解有机质含量,进而影响了分解速率。

3) pH 和 EC 值。各处理 pH 整体呈现先上升后逐渐稳定的趋势(图 3(d))。堆肥前期 pH 升高主要是因为蛋白质、氨基酸等大量有机氮化合物被持续矿化为铵态氮(NH_4^+),随后在高温下以 NH_3 形式挥发,中和了物料中的有机酸^[28]。pH 值的上升速率与秸秆添加比例成反比,可能是由于低比例秸秆堆体中粪便含量高,蛋白质含量高,其降解生成的 NH_4^+ 较多,同时,低比例秸秆处理孔隙率低且含水率高,导致堆体内留存的 NH_4^+ 含量高^[29]。各处理的 EC 值整体呈现先上升后下降的趋势(图 3(e))。堆肥初期,由于有机质的矿化及有机酸的溶解作用, NH_4^+ 、碳酸氢根(HCO_3^-)、硫酸氢根(HSO_4^-) 等可溶性盐大量产生,并且堆肥前 10 d 含水率下降迅速(图 3(a)),堆体中水溶性离子浓度升高,导致各处理 EC 值迅速上升^[30]。随着大量无机盐被 HA 结合和小分子有机酸降解,所有处理的 EC 值在第 40 天后下降。堆肥结束时,各处理产物的 pH 和 EC 值分别为 7.8~8.1 和 2.7~3.5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,符合《有机肥料》(NY/T 525-2021)的要求^[13]。

4) GI 值。各处理 GI 值在前 25 d 呈现先上升后下降的趋势(图 3(f))。各处理 GI 值初期升高主要与有机酸不断减少以及 NH_4^+ 等离子以气体形式挥发有关^[31]。各处理 GI 值在第 10 天后显著下降,可能是由于物料分解过程中产生了小分子有机醛、多环芳烃等不完全降解产物,不利于种子萌发。随着物料中毒性成分(如低分子量有机酸、多酚等)被微生物逐渐分解并合成腐殖质,各处理 GI 值持续增加^[32]。然而,7.5% 处理 GI 值在 40 d 后再次出现下降,主要是因为物料持续分解,且较高的含水率(图 3(a))造成物料内部游离孔隙被水膜填充,影响微生物活性^[33]。堆肥结束时,7.5%、15%、22.5% 和 30% 处理的 GI 值分别为 96.0%、129.1%、116.5%、118.3%,全部达到《有机肥料》(NY/T 525-2021)的腐熟度要求($\text{GI} \geq 70\%$)^[13]。其中,添加 15% 秸秆处理的 GI 值最高,表明辅料配比适宜时,更利于有机质腐殖化进行以及毒性因子消减,从而加速堆体腐熟^[34]。

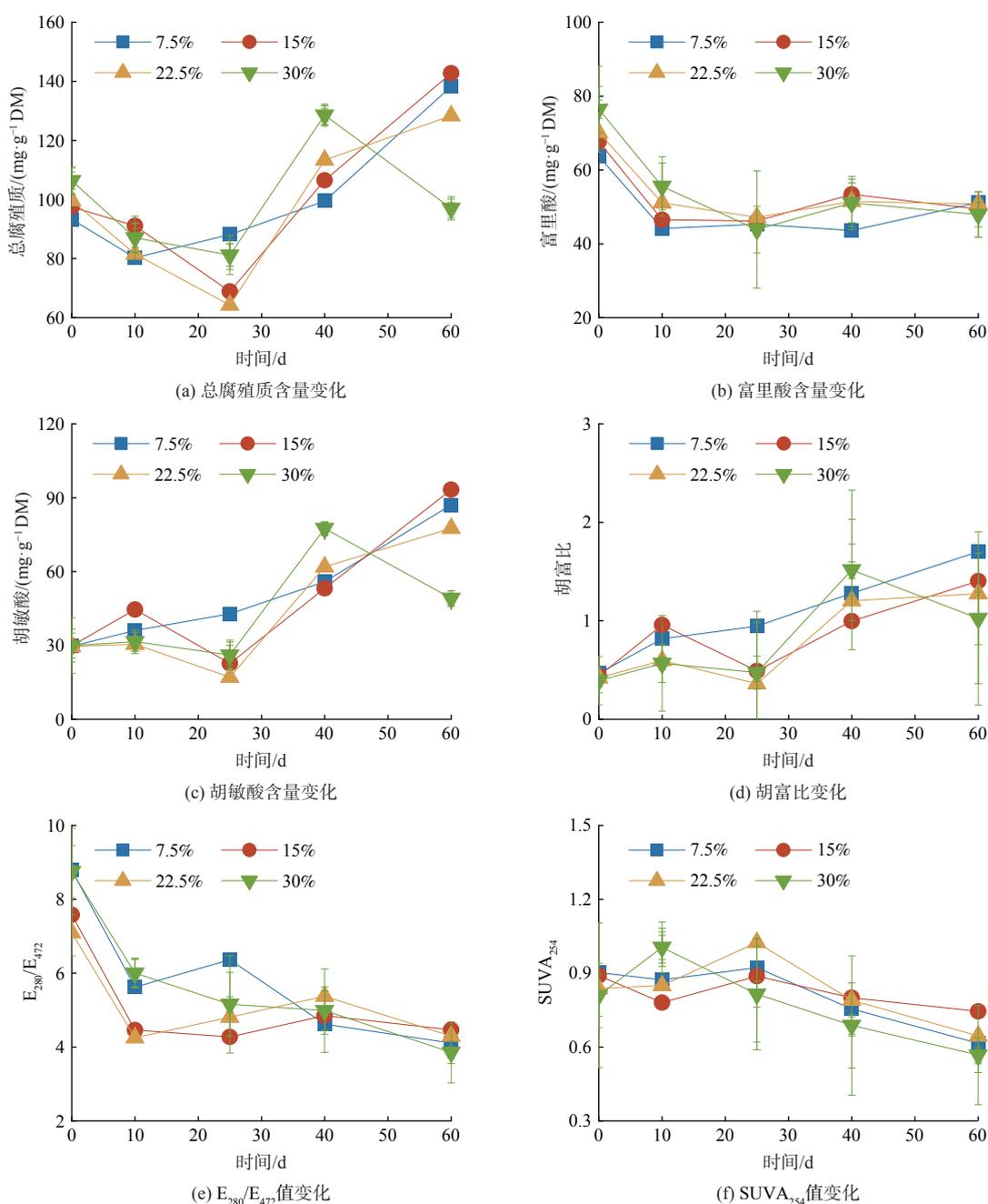
2.3 腐殖化变化

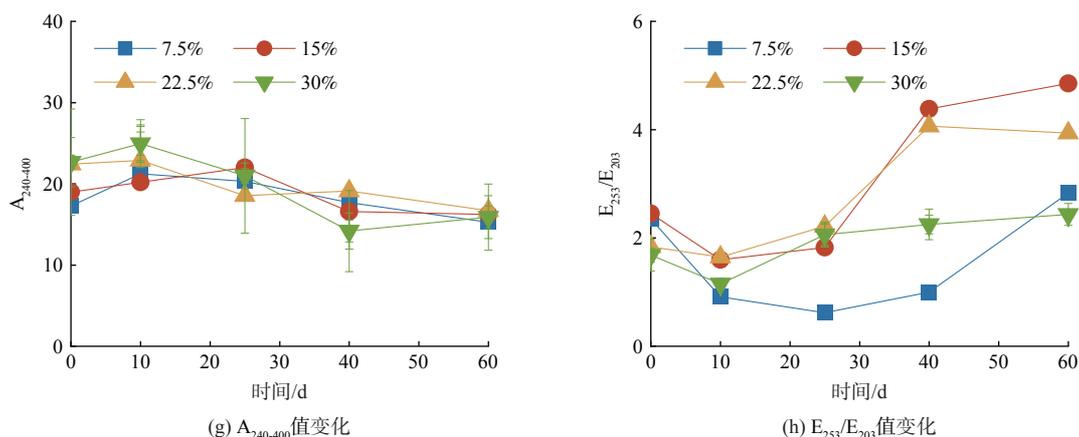
1) HS、FA、HA 和 HA/FA 值。各处理 HS 含量整体呈先下降后上升的趋势(图 4(a))。HS 含量在前 10 d 的降幅随秸秆添加比例增加而增大,主要是由于秸秆添加改善了堆体的自由空域(图 3(b)),推动了好氧嗜热微生物的氧化代谢作用,致使分子量小且结构简单的 FA 在高温期易被微生物作为碳源利用^[35]。并且部分 FA 可能会进一步转化生成结构更稳定的 HA^[36]。此外,高温期大分子物质降解,在堆肥后期进一步聚合形成 HA,也是 HA 增加的原因。这与林嘉聪等^[37]研究结果一致,木质素等具有芳香结构的化学物在高温期分解形成大量醛类、酮类物质,在温度下降后快速聚合形成 HA。因此,各处理 HA 含量和 HA/FA 在堆肥过程中基本呈现上升趋势(图 4(c)、(d)),而 FA 含量则逐渐下降(图 4(b))。在堆肥 10~40 d,7.5% 处理含有更多蛋白质,促进了氨基酸生成,进而与还原糖发生美拉德反应^[38],经历了更快的 HA 和 HS 合成。相比之下,15%、22.5% 和 30% 处理中不稳定腐殖质不断被利用,HA 和 HS 含量在 10~25 d 迅速下降;但随着木质纤维素的持续分解,可溶性多糖、还原糖、多酚等前体物不断产生^[39],驱动腐殖质含量在降温期开始逐渐升高。然而,30% 处理的 HA 含量在堆肥 40 d 后出现明显降低现象,可能是秸秆添加比例过多,加快堆体中氧气扩散,提高了微生物代谢活性,促进了前体物质矿化^[40]。相较于其他处理,15% 处理最终的 HA 含量最高可提升 47.1%,主要是适宜的高温时间促进木质素的降解及中间体和氨基酸的缩合效率,进而增加堆肥产物的腐殖化程度。

2) E_{280}/E_{472} 和 SUVA_{254} 值。 E_{280}/E_{472} 值在堆肥过程中整体呈现下降的趋势(图 4(e)),表明了木质素类化合物的逐渐降解^[41]。7.5% 处理由于升温缓慢抑制了木质素类等难降解化合物的分解,而 30% 处理中木质素含量较高,使得这两个处理在初期具有较高的 E_{280}/E_{472} 值。15%、22.5% 和 30% 处理的 E_{280}/E_{472} 值在 25~40 d 更低,表明降温期木质素大量分解,进而促进了腐殖质合成(图 4(a)、(c))。在堆肥过程中,所有处理的 SUVA_{254} 值呈现先上升后下降趋势(图 4(f))。堆肥高温期微生物活性增强,促进了木质素酚等有机

质降解转化为醌类物质,使得 $SUVA_{254}$ 值逐渐增大^[42]。堆肥 25 d 后,各处理的 $SUVA_{254}$ 显著降低,这可能是由于有机物降解速率减缓,并且有部分不饱和化合物被微生物分解^[43]。在堆肥结束时,15% 处理具有相对较高的 $SUVA_{254}$,主要是由于其高温持续时间较长,加快了木质素降解为酚类和醌类化合物^[44]。

3) $A_{240-400}$ 和 E_{253}/E_{203} 值。在堆肥过程中,所有处理的 $A_{240-400}$ 表现为先增加后下降的趋势(图 4(g))。堆肥高温期 $A_{240-400}$ 的增加可能是由于剧烈的生化反应使得酚类、芳香族羧酸等苯环化合物不断增多,有机分子的缩合程度不断增强^[45]。30% 处理在堆肥降温期具有较低的 $A_{240-400}$,可能与腐殖质大量分解有关(图 4(a)、(c))。所有处理中 E_{253}/E_{203} 均呈现了与 $A_{240-400}$ 相反的变化趋势(图 4(h))。堆肥初期, E_{253}/E_{203} 显著降低可能是由于部分含氧官能团(如羧基)转化为 CO_2 ^[46]。 E_{253}/E_{203} 在堆肥降温期显著升高,可能是由于有机物分子苯环上的脂肪链发生氧化分解,转化为羟基、羰基等官能团^[47]。与其他处理相比,15% 处理的 E_{253}/E_{203} 值在 40~60 d 较高,可能是由于 HA 大量合成(图 4(c)),其较高的吸附性促进了羰基、羧基、酯基等官能团聚集^[48]。





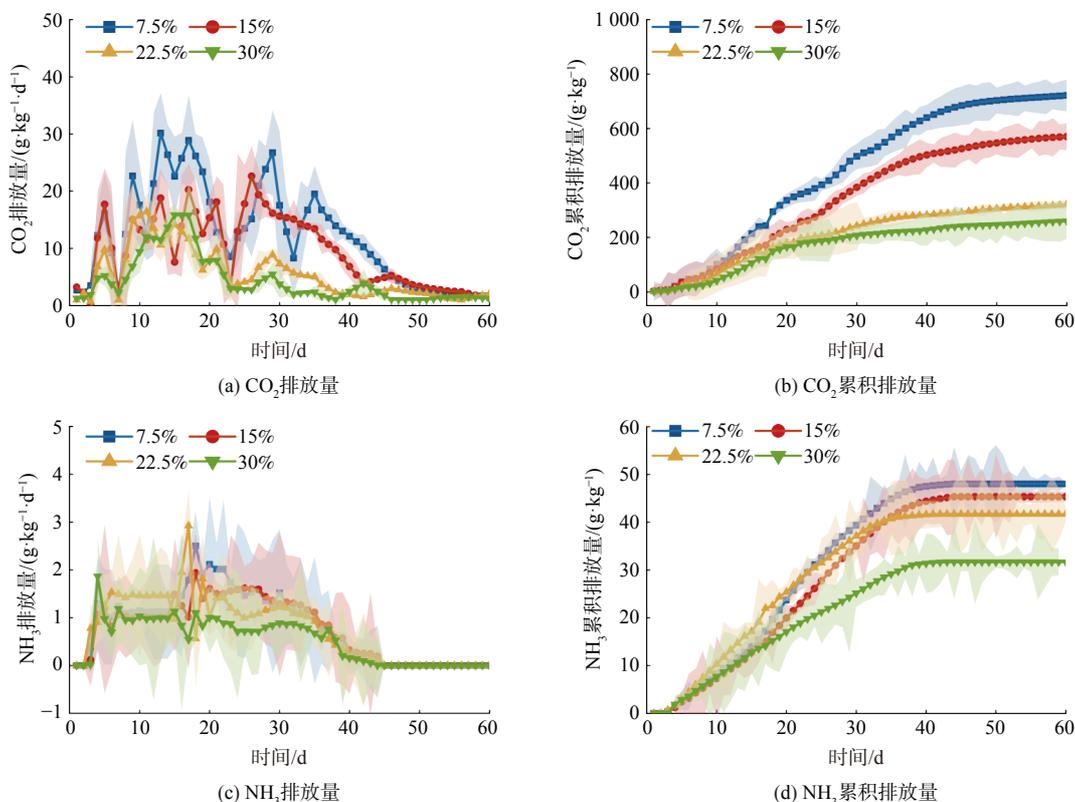
注：图中标准差代表不同点位间差异。

图 4 堆肥过程腐殖化变化

Fig. 4 Variations of humification process in composting

2.4 CO₂ 和 NH₃ 排放变化

1) CO₂ 排放量。各处理 CO₂ 排放主要集中在堆肥前 20 d (图 5(a))，主要是由于糖类、蛋白质等易降解有机物被微生物优先降解转化。在堆肥第 25 天后，7.5%、15% 处理的 CO₂ 排放量再次升高，主要是翻堆促使有机质均匀分配，且二次升温促使微生物活性增加^[49]。CO₂ 排放峰值和累积排放量均随着秸秆添加比例增加而减少，可能是因为较低的秸秆添加比例处理具有更高的含水率和更多的易降解有机质，促进了 CO₂ 排放^[50]。



注：图中阴影部分代表不同点位间差异。

图 5 堆肥过程 CO₂、NH₃ 的日排放量和累积排放量

Fig. 5 Daily and cumulative emissions of CO₂ and NH₃ during composting

2) NH_3 排放量。与 CO_2 排放相似,各处理 NH_3 排放主要发生在高温期(图 5(c))。堆肥启动后,易降解的含氮化合物(如蛋白质、氨基酸、多肽等)在微生物氨化作用下逐渐被分解为 NH_4^+ [51],随后在高温碱性环境下不断被转化为 NH_3 [52]。在高温作用下,22.5% 处理在前 25 d 具有较高的 NH_3 排放峰值,而随着秸秆比例进一步加大,对 NH_4^+ 和 NH_3 的吸附作用增强[53],同时,堆体疏松的结构也提高了供氧效率,促进 NH_3 向 NO_3^- -N 的转化过程并提高硝化细菌的活性,从而降低气态氮的损失实现 NH_3 减排的效果[54],故 30% 处理的 NH_3 排放量始终保持较低水平。吴海程[10]研究表明 NH_3 排放主要受温度和 pH 值相互影响,7.5% 和 15% 处理具有更高的 pH 和更丰富的蛋白质等有机氮化合物,并在翻堆后经历了更显著的升温, NH_3 在 25~30 d 剧烈排放,进而导致其最高的累积排放量(图 5(d))。此外,低比例秸秆处理的含水率较高(图 3(a)),大量水溶性铵根离子溶解于水中,随着水蒸气的挥发更容易以 NH_3 的形式排出[55]。因此, NH_3 累积排放量随着秸秆添加比例增加而减少。

2.5 减量化变化

各处理体积减量率和物料减重率呈现逐渐上升趋势(图 6(a)、(b))。堆体体积减量率在前 10 d 增幅较大,而且随秸秆添加比例增大而逐渐增加,可能是由于更为蓬松的堆体在重力作用下更容易被压缩。此外,由于水分蒸发和气体散失作用,导致减重效果在堆肥前期较为明显。与体积减量率相反,7.5% 和 15% 处理在前 10 d 减重率最大(23.9%~31.3%),可能是因为较多的牛粪使堆体中含有更多的易降解有机物(如蛋白质、糖类)。随着难降解有机物(如木质纤维素)的持续分解,22.5% 和 30% 处理的减重率在堆肥 40 d 后显著上升。堆肥结束时,各处理减重率在 57.0%~63.7% 之间。

为分析水分散失在减重中的作用,进一步计算各处理堆肥过程中的水分和干物质重量变化(图 6(c)、(d))。同减重率结果一致,7.5% 和 15% 处理前 25 d 干物质和水分质量下降较快,主要是受易降解有机质含量和高温状况影响。堆肥结束时,各处理水分损失率为 67.2%~79.6%,水分损失量占物料总损失量(湿基)72.7%~90.5%,表明物料损失主要以水分散失为主。特别是 7.5%、15% 处理水分损失量占比较大(85% 以上),主要是由于堆体含水率高和高温持续时间长。

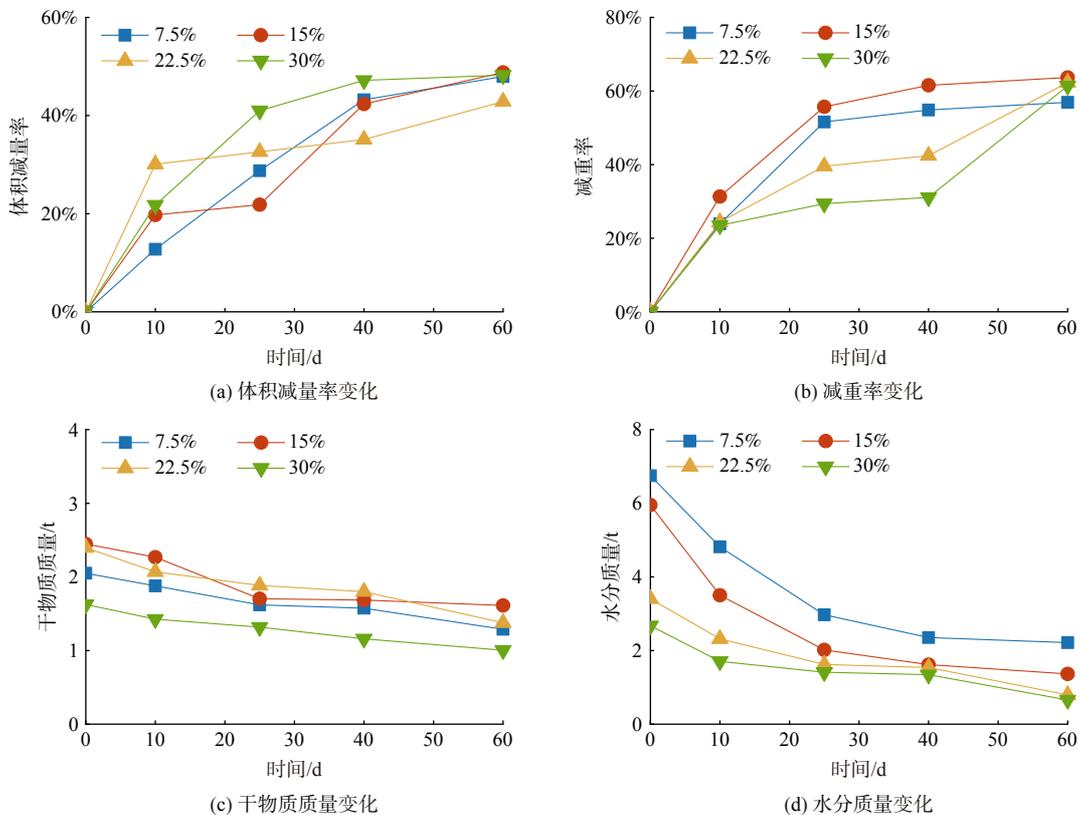


图 6 堆肥过程体积减量率、减重率、干物质质量和水分质量的变化

Fig. 6 Changes of volume reduction rate, weight reduction rate, dry mass and water mass during composting

2.6 总养分变化

堆肥结束时, 各处理的 TN 含量由 1.2%~1.8% 增加至 1.5%~2.5% (图 7(a))。这主要是由于堆肥过程中有机碳和有机氮均被微生物同化和分解, 且微生物对有机碳的需求高于对有机氮的需求^[56-57]。7.5% 和 22.5% 处理分别具有更长时期的有机碳剧烈降解和较少的 NH_3 排放量, 堆肥结束时 TN 增长率 (27.8%、34.5%) 相较其他处理 (16.4%、25.9%) 更大。

由于堆肥中磷和钾元素较为稳定不易挥发, 仅存在不同形态间的转化。因此, 在堆体的“浓缩效应”作用下, P_2O_5 和 K_2O 含量逐渐增加至 0.8%~0.9%、2.0%~2.2% (图 7(b)、(c))^[58]。由于秸秆中总养分含量远低于奶牛粪便, 总养分含量随着秸秆添加比例增加而减少。堆肥结束时, 以 15% 处理 K_2O 增加率最大 (53.1%), 进而导致最大的总养分增长率, 可能是 15% 处理水分质量下降最多 (图 6(d)), 其 K_2O 相对质量增加率高于其他处理。堆肥结束时, 各处理养分含量在 4.6%~5.5% (图 7(d)), 达到《有机肥料》(NY/T 525-2021) 总养分 $\geq 4\%$ 的要求^[13]。

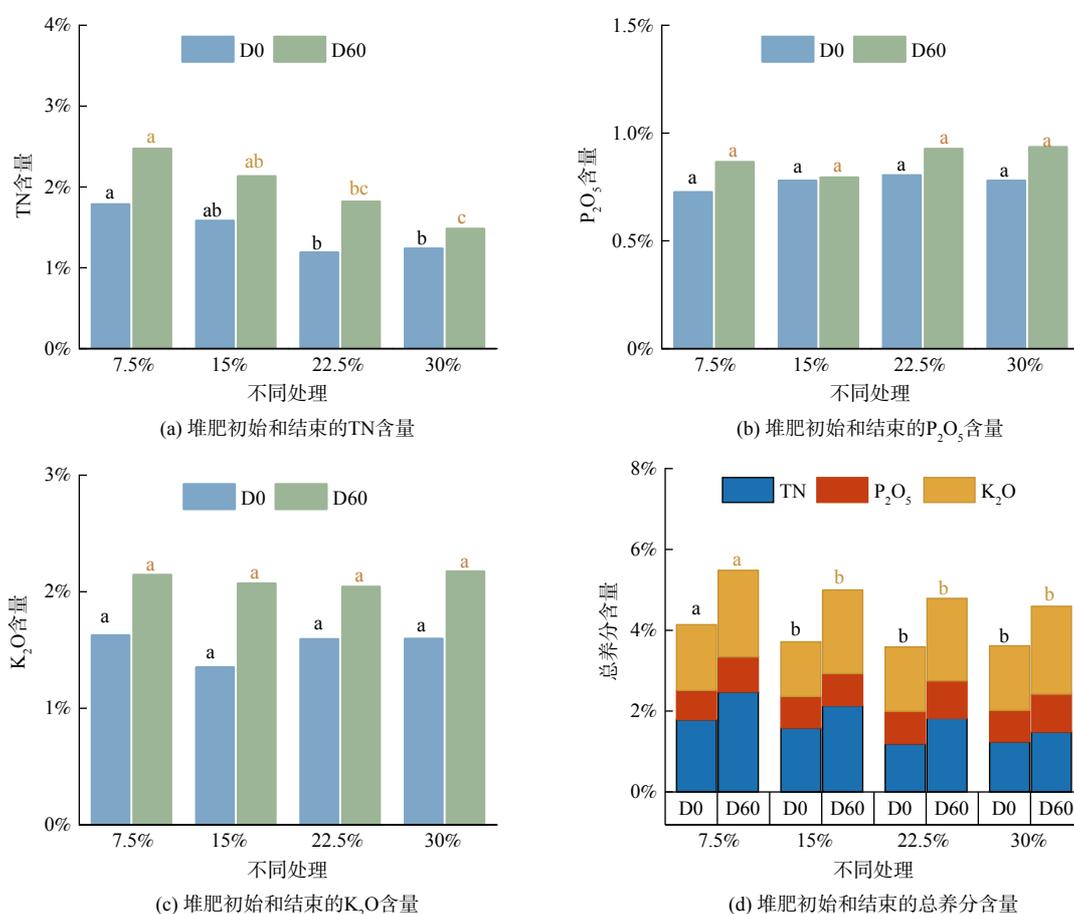


图 7 初始和结束的 TN、 P_2O_5 、 K_2O 和总养分含量变化

Fig. 7 Changes of TN, P_2O_5 , K_2O , and total nutrients content at the beginning and end of composting

2.7 综合效应分析

通过雷达图 (图 8) 综合展示了不同比例秸秆与牛粪混合兼性堆肥对其气体排放 (CO_2 、 NH_3 累积排放量)、腐熟度 (GI、HS 含量) 及堆肥质量 (总养分、含水率、减重率) 3 个维度的协同调控作用。结果表明, 30% 处理的气体累积排放量最低, 气体减排效果较好, 但在促进堆体减量、提高总养分含量及腐熟度方面的效果一般。相比之下, 15% 处理的综合效果最优, 能够提升堆体腐熟度 (GI、HS 含量最高), 促进堆体减量, 堆体浓缩促使其总养分含量较高, 并且其气体排放量也位于各处理中间。因此, 在牛粪兼性堆肥中

添加 15% 秸秆对于协同调控堆体促腐减排、提质减量方面有较好改善效果。

3 结论

1) 随着芦苇秸秆添加比例的升高, 明显改善牛粪高含水率和致密结构特性, 加快氧气扩散和堆体升温, 同时减少 CO_2 和 NH_3 累积排放量。堆肥结束时, 各处理体积和质量分别降低 42.9%~48.8% 和 57.0%~63.7%, 水分损失量占物料总损失量(湿基) 72.7%~90.5%, 总养分达到 4.6%~5.5%。

2) 15% 芦苇秸秆添加比例下的效果最好。较其他添加比例, 堆肥结束时, 15% 秸秆处理种子发芽指数最高(129.1%), 最高可提升 47.1% 的 HA 含量, 保障了堆肥过程的芳构化和腐殖质的不饱和官能团生成, 并且能够实现快速减量, 提升堆肥产品总养分含量。

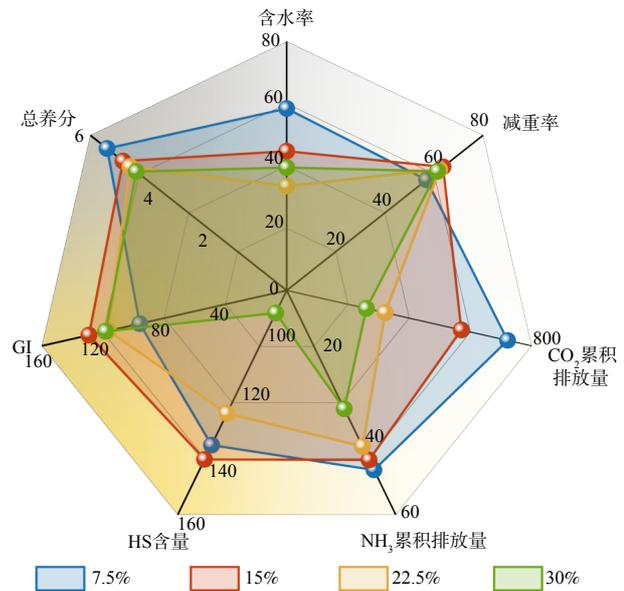


图 8 不同处理综合效应的雷达图

Fig. 8 Radar chart of the comprehensive effects of different treatments

参考文献

- [1] 许佳彬, 李翠霞. “规模效应”还是“拥挤效应”?——奶牛养殖产业集聚对环境效率的非线性影响研究[J]. 农业技术经济, 2023(10): 22-43.
- [2] 朱智杰. 规模化奶牛场粪便的无害化处理措施[J]. 畜牧兽医学报, 2020, 39(1): 48-49.
- [3] WANG N Y, HE Y, ZHAO K Q, et al. Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 354: 120337.
- [4] KONG Y L, WANG G Y, CHEN W J, et al. Phytotoxicity of farm livestock manures in anoxic heap composting using the seed germination index as indicator[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 247: 114251.
- [5] 周海滨, 丁京涛, 孟海波, 等. 中国畜禽粪污资源化利用技术应用调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 237-246.
- [6] 卢秉林, 王文丽, 李娟, 等. 牛粪与小麦秸秆混合高温堆肥的腐熟进程研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 30-34.
- [7] GHANNEY P, YEBOAH S, ANNING D K, et al. Moisture-Induced Effects on Lignocellulosic and Humification Fractions in Aerobically Composted Straw and Manure[J]. *Fermentation-Basel*, 2023, 9(6): 551.
- [8] 刘凯, 郁继华, 颀建明, 等. 不同配比的牛粪与玉米秸秆对高温堆肥的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 82-88.
- [9] 尹子铭, 杨燕, 唐若兰, 等. 秸秆对猪粪静态兼性堆肥无害化和腐熟度的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 218-226.
- [10] 吴海程. 畜禽粪便堆沤肥碳氮减排与促腐调控技术应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [11] 陈金海, 李艳丽, 王磊, 等. 两种基于芦苇秸秆还田的改良措施对崇明东滩围垦土壤理化性质和微生物呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 307-315.
- [12] 朱鹏程. 芦苇秸秆肥料化过程中微生物群落及其抗生素抗性基因动态规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [13] 农业农村部. 有机肥料: NY/T 525-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] MA C, CHEN X Y, ZHENG G D, et al. Exploring the influence mechanisms of polystyrene-microplastics on sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 362: 127798.
- [15] 王永江, 黄光群, 韩鲁佳, 等. 塑料和麦秸膨胀剂对猪粪好氧堆肥的影响试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 158-163.
- [16] SUN B, LI Y, SONG M, et al. Molecular characterization of the composition and transformation of dissolved organic matter during the semi-permeable membrane covered hyperthermophilic composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425: 127496.
- [17] ZHAO X Y, WEI Y Q, FAN Y Y, et al. Roles of bacterial community in the transformation of dissolved organic matter for the stability and safety of material during sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 267: 378-385.
- [18] 赵越, 魏雨泉, 李洋, 等. 不同物料堆肥腐熟程度的紫外-可见光谱特性表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 961-965.
- [19] MARTIN A P S, MARHUENDA-EGEA F C, BUSTAMANTE M A, et al. Spectroscopy techniques for monitoring the composting process: A review[J]. *Agronomy-Basel*, 2023, 13(9): 2245.
- [20] LI L Q, LIU Y, KONG Y L, et al. Relating bacterial dynamics and functions to greenhouse gas and odor emissions during anoxic heap composting of four kinds of livestock manure[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118589.
- [21] YANG Y, CHEN W J, LIU G L, et al. Effects of cornstalk and sawdust coverings on greenhouse gas emissions during sheep manure storage[J]. *Waste Management*, 2023, 166: 104-114.
- [22] HE X S, XI B D, JIANG Y H, et al. Structural transformation study of water-extractable organic matter during the industrial composting of cattle manure[J]. *Microchemical Journal*, 2013, 106: 160-166.
- [23] 国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会. 畜禽粪便无害化处理技术规范: GB/T 36195-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [24] 罗娟, 孟海波, 张玉华, 等. 玉米秸秆添加对果蔬废弃物沼渣堆肥效果的影响[J]. 中国沼气, 2019, 37(4): 92-97.

- [25] 施童, 陈杰, 亓传仁, 等. 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.
- [26] 江滔, SCHUCHARDT F, 李国学. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 212-217.
- [27] 中华人民共和国农业农村部. 畜禽粪便堆肥技术规范: NY/T 3442-2019[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [28] ZHANG L X, GAO X Z, LI Y M, et al. Optimization of free air space to regulate bacterial succession and functions for alleviating gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 387: 129682.
- [29] 兴虹, 吴丽红, 许艳广, 等. 辅料比对厨余垃圾好氧堆肥理化特性变化影响研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(7): 66-70.
- [30] LIU Y, MA R A, TANG R L, et al. Effects of phosphate-containing additives and zeolite on maturity and heavy metal passivation during pig manure composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155727.
- [31] GOU C L, WANG Y Q, ZHANG X Q, et al. Inoculation with a psychrotrophic-thermophilic complex microbial agent accelerates onset and promotes maturity of dairy manure-rice straw composting under cold climate conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 339-346.
- [32] 王晓君, 温文霞, 潘松青, 等. 辅料比例对餐厨垃圾好氧堆肥及微生物特性的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3215-3222.
- [33] 张凤, 任勇翔, 张海阳, 等. 投加方式和通风速率对脱水污泥堆肥效果的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(8): 2372-2378.
- [34] 刘英杰, 李婉婷, 王海候, 等. 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.
- [35] ZHAO X Y, XU K L, WANG J W, et al. Potential of biochar integrated manganese sulfate for promoting pig manure compost humification and its biological mechanism[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 357: 127350.
- [36] JINDO K, SONOKI T, MATSUMOTO K, et al. Influence of biochar addition on the humic substances of composting manures[J]. *Waste Management*, 2016, 49: 545-552.
- [37] 林嘉聪, 韩卓雅, 王定美, 等. 不同覆盖对圣女果秸秆简化静态堆肥与腐殖化进程的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4): 273-283.
- [38] BAI L, DENG Y, LI J, et al. Role of the proportion of cattle manure and biogas residue on the degradation of lignocellulose and humification during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 307: 122941.
- [39] WU J, ZHAO Y, ZHAO W, et al. Effect of precursors combined with bacteria communities on the formation of humic substances during different materials composting[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 226: 191-199.
- [40] ZHANG L X, GAO X Z, SHI T, et al. Regulating aeration intensity to simultaneously improve humification and mitigate gaseous emissions in food waste digestate composting: Performance and bacterial dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164239.
- [41] BIYADA S, MERZOUKI M, ELKARRACH K, et al. Spectroscopic characterization of organic matter transformation during composting of textile solid waste using UV-Visible spectroscopy, Infrared spectroscopy and X-ray diffraction (XRD)[J]. *Microchemical Journal*, 2020, 159: 105314.
- [42] ZHU N, ZHU Y Y, LIANG D, et al. Enhanced turnover of phenolic precursors by *Gloeophyllum trabeum* pretreatment promotes humic substance formation during co-composting of pig manure and wheat straw[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 315: 128211.
- [43] WANG K, LI W G, GONG X J, et al. Spectral study of dissolved organic matter in biosolid during the composting process using inorganic bulking agent: UV-vis, GPC, FTIR and EEM[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 85: 617-623.
- [44] CHEN Y, WANG Y Y, XU Z, et al. Enhanced humification of maize straw and canola residue during composting by inoculating *Phanerochaete chrysosporium* in the cooling period[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122075-122075.
- [45] 李柯蒙, 李洁月, 游少鸿, 等. 猪粪堆肥过程中腐殖酸电子转移机制及光谱演化特征[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 79-88.
- [46] XU J Q, JIANG Z W, LI M Q, et al. A compost-derived thermophilic microbial consortium enhances the humification process and alters the microbial diversity during composting[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 240-249.
- [47] JIAO M N, YANG Z W, XU W Y, et al. Elucidating carbon conversion and bacterial succession by amending Fenon-like systems during co-composting of pig manure and branch[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170279.
- [48] 侯智斌, 谢益平, 曹长春, 等. 添加不同比例玉米生物炭的堆肥腐殖质光谱学表征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11459-11475.
- [49] CHEN H Y, AWASTHI S K, LIU T, et al. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121908.
- [50] RICH N, BHARTI A, KUMAR S. Effect of bulking agents and cow dung as inoculant on vegetable waste compost quality[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 252: 83-90.
- [51] WANG S G, ZENG Y. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248: 13-19.
- [52] LIU H, AWASTHI M K, ZHANG Z Q, et al. Microbial dynamics and nitrogen retention during sheep manure composting employing peach shell biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 386: 129555.
- [53] 张晓旭, 张红玉, 李国学. 秸秆添加对厨余垃圾堆肥时 H_2S 和 NH_3 排放的影响[J]. 环境工程, 2015, 33(1): 100-104.
- [54] 刘尚斌, 郑祥洲, 王煌平, 等. 蝇蛆预处理及辅料添加对鸡粪堆肥氨挥发和温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1151-1162.
- [55] 田野, 刘善江, 陈益山. 不同水分和物料配比条件下堆肥氨气排放量研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 127-134.
- [56] LI R H, WANG J J, ZHANG Z Q, et al. Nutrient transformations during composting of pig manure with bentonite[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 121: 362-368.
- [57] FENG L, YU Q, ZHEN Q, et al. Change of nutrients and humus in the composting process using different livestock manures[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(5): 11619-11628.
- [58] WEI Y H, LIANG Z W, ZHANG Y. Evolution of physicochemical properties and bacterial community in aerobic composting of swine manure based on a patent compost tray[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 126136.

(责任编辑: 陶雪)

Effect of straw on maturity, gaseous emission, and weight reduction during anoxic composting of cow manure

ZHANG Dongli^{1,2}, LV Tongrui^{1,2}, LAI Haiyu^{1,2}, ZHANG Lanxia^{2,3}, LUO Wenhai^{2,3}, LI Guoxue³, HOU Yong^{2,3}, XIAO Ran¹, ZHONG Shunhe^{2,4}, WANG Chunrong^{2,4}, LIU Fei^{2,4}, XU Zhicheng^{3,*}

1. College of Resources and Environment, Southwest University Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Southwest Organic Recycling Engineering Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671000, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 4. Yunnan Shunfeng Erhai Lake Environmental Protection Technology co., Ltd. Dali 671000, China

*Corresponding author, E-mail: xuze@cau.edu.cn

Abstract Addition of bulking agents is an effective strategy to enhance the efficiency of anoxic composting of high-moisture materials, such as cow manure. However, the regulatory effects of different bulking agent ratios on gaseous emissions, humification, and weight reduction during anoxic composting of cow manure still require further evaluation. In this study, reed straw was selected to improve the structure and C/N ratio of cow manure. Reed straw was mixed with cow manure at the wet ratio of 7.5%, 15%, 22.5%, and 30% and then composted for 60 days. Results showed that moisture content and free air space gradually decreased and increased, respectively, with the increased ratio of reed straw to facilitate oxygen diffusion, temperature increase, and water evaporation as well as reduce carbon dioxide, ammonia emissions and total nutrient content. Humus content, volume reduction rate, and weight reduction rate exhibited an increase and then decrease profile during anoxic composting. By contrast, 15% of reed straw extended thermophilic duration by 4~7 days and enhanced germination index to 129.1% by the end of composting to improve maturity and humification by 9.2%~34.5% and 3.2%~47.1%, respectively. In addition, the 15% addition ratio could achieve 63.7% of material weight reduction rate, 85.8% of water loss, and the increase in total nutrient content by 34.6% in comparison with feedstocks (5.0%).

Keywords cow manure; anoxic composting; maturity; gaseous emissions; weight reduction