



孙玉鑫, 王凌霄, 李文, 许钊, 周陈俊男, 李彦明, 常瑞雪, 艾为党. 受控条件下氧分压对生物质废弃物堆肥臭气排放的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(06): 230-239.

SUN Yuxin, WANG Lingxiao, LI Wen, XU Zhao, ZHOU Chenjunnan, LI Yanming, CHANG Ruixue, AI Weidang. Effect of oxygen partial pressure on odor emission from biomass waste composting under controlled condition[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 230-239.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.23

受控条件下氧分压对生物质废弃物堆肥臭气排放的影响

孙玉鑫^{1,2} 王凌霄¹ 李文¹ 许钊¹ 周陈俊男^{1,2} 李彦明^{1,2} 常瑞雪^{1,2*} 艾为党^{3*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 有机循环研究院(苏州), 江苏 苏州 215100;

3. 中国航天员科研训练中心 人因工程国防科技重点实验室, 北京 100094)

摘要 为获得适用于受控生态生命保障系统的低能耗和低排放的堆肥氧气供应参数, 采用氧气和氮气混合气体模拟受控条件下的气体供应, 以厨余垃圾和园林废弃物为堆肥原料, 通过设置氧分压为5%(T1)、15%(T2)和30%(T3)的3个处理, 探究氧分压对堆肥理化性质及NH₃和H₂S排放的影响。结果表明: T2处理有助于物料快速降解和堆体升温, 堆体最高温度(65.95℃)和高温期持续时间(14 d)高于其他2个处理; T2处理NH₃累积排放量分别比T1和T3处理减少了65.35%、24.01%。相关性分析表明, O₂浓度、EC、C/N、NH₄⁺-N是影响恶臭气体排放的主要因素。综合堆肥理化指标和恶臭气体排放情况, 氧分压为15%可以同时缩短堆肥周期和减排臭气, 研究结果可为受控生态生命保障系统中有机循环系统的构建提供参考。

关键词 堆肥; 氧气; 氧分压; 厨余垃圾; 恶臭气体

中图分类号 X705

文章编号 1007-4333(2024)06-0230-10

文献标志码 A

Effect of oxygen partial pressure on odor emission from biomass waste composting under controlled condition

SUN Yuxin^{1,2}, WANG Lingxiao¹, LI Wen¹, XU Zhao¹, ZHOU Chenjunnan^{1,2}, LI Yanming^{1,2},
CHANG Ruixue^{1,2*}, AI Weidang^{3*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 10019, China;

2. Organic Recycling Research Institute (Suzhou), China Agricultural University, Suzhou 215100, China;

3. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract Aerobic composting technology is the fundamental technology to realize safe treatment and resource utilization of organic solid waste in controlled ecological life support system (CELSS). However, the direct application of compost in CELSS is limited by excessive oxygen supply and energy consumption due to the differences between ground condition and space. Among which, the oxygen supply is an important factor that comprehensively affects the composting process, energy consumption and odor emission. In order to obtain suitable oxygen supply parameters in composting with low energy consumption and low emissions for controlled ecological life support system, a mixture of oxygen and nitrogen was used

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 人因工程重点实验室基金资助项目(6142222210702); 中国农业大学教授工作站(20210505)

第一作者: 孙玉鑫(ORCID:0009-0001-7856-6923), 硕士研究生, E-mail: 1476342271@qq.com

通讯作者: 常瑞雪(ORCID:0000-0001-7598-097X), 副教授, 主要从事废弃物处理与资源化研究, E-mail: changrx@cau.edu.cn

艾为党(ORCID:0000-0002-8556-5742), 研究员, 主要从事载人航天受控生态生保技术研究, E-mail: aiwd@163.com

to simulate gas supply under controlled condition, meanwhile, kitchen waste and garden waste were used as composting materials. The effects of oxygen partial pressure on the physicochemical properties and the emissions of NH_3 and H_2S during the process were investigated by setting three treatments of 5% (T1), 15% (T2) and 30% (T3) oxygen partial pressure. The results showed that: T2 treatment stimulated the materials' biodegradation and temperature rise of the reactor. Its maximum temperature (65.95 °C) and the high-temperature duration (14 days) were higher than those in the other two treatments. Compared with T1 and T3 treatments, the accumulative emission of NH_3 in T2 treatment was reduced by 65.35% and 24.01%, respectively. Combining the physical and chemical indexes of the products and the emission of odor gases, it was concluded that the oxygen partial pressure of 15% was suitable for composting. This study provided a scientific reference for the construction of organic cycle system in controlled ecological life support system.

Keywords composting; oxygen; oxygen partial pressure; kitchen waste; odor gas

堆肥技术通过多种微生物的协同代谢作用,将有机固体废弃物中可生物降解的不稳定组分转化为稳定的腐殖质。堆肥过程中产生的高温环境可以有效杀灭寄生虫卵与动植物病原菌,是实现载人航天空间环境中可再生废弃物(乘员粪便和植物不可食部分等)减量化、无害化和资源化的有效手段^[1]。与地面堆肥技术相比,航天空间中受控生态生命保障系统(CELSS)内的堆肥要求较为严格,需要外源辅助的能量和热量来维持系统的正常运作,且受空间大小、低压强等环境因素的制约^[1]。航天环境中的供氧条件也极为严苛,目前通过建立植物生长系统,利用植物自身的生长繁殖产生 O_2 ,吸收 CO_2 ,从而为CLESS系统内的堆肥环境提供气体循环链条,但会受限于植物的类型、生存条件等因素^[2]。CELSS系统中航天员日常生活产生的食物残渣、排泄物等固体废弃物自然堆放、处理处置过程中均容易产生大气污染物,危害乘员的身体健康和植物的生长发育^[3]。另外,由于乘员粪便的含水率较高,堆肥过程中容易导致厌氧的发生,厌氧微生物产生胺类及 H_2S 等恶臭物质,影响舱内空气环境和堆体发酵速度^[2,4]。为改善以上问题,2016年中国航天员科研训练中心进行了180 d的CELSS堆肥试验,获得有效解决密闭空间中有机固废处理的方法,保障了航天系统物资的持续供应,但整个堆肥过程经历2级生物反应器,设备运作的能耗较高^[4-6]。除此之外,中国航天员科研训练中心运用小麦秸秆在密闭空间中进行堆肥试验,接种菌剂处理经45 d才能接近腐熟状态,不接种处理则未腐熟;北京航空航天大学联用好氧堆肥和蚯蚓技术,处理周期为93和123 d,促进了木质纤维素类物质的降解,同时堆肥产物用于制备类土壤或人工土壤以供在航天空间中栽培作物使用,实现了受控空间中物

流的可持续发展与航天系统的功能性运作,但以上均存在堆肥周期较长,发酵速率缓慢的问题^[3,7]。

氧气是保障堆肥活动顺利进行的重要因素,充足的氧气能够为微生物的生长繁殖和分解代谢提供基础,使其在快速降解有机物的同时释放出热量,促进堆肥反应的进行。但是,堆肥中氧气浓度过高会增加有机氮向 NH_4^+-N 的转化,使氮素以 NH_3 的形式逸散,加剧氮素损失^[1,4];氧气浓度过低,会使厌氧微生物大量繁殖,释放 H_2S 和挥发性有机化合物(VOCs)等恶臭物质^[5]。Kazunori等^[8]研究表明,堆体氧气浓度 $<4.3\%$ 时,容易促使恶臭气体的产生。一般认为堆肥氧气浓度在 $5\%\sim 15\%$ 较为合适^[9-10]。Nguyen等^[11]研究了不同氧气浓度($20.8\%\text{ O}_2$ 和 $3.0\%\text{ O}_2$)和供氧速率(96.20 、 24.20 、 13.70 、 $3.45\text{ mL}/(\text{min}\cdot\text{kg})$)(以湿固体计)对厨余垃圾堆肥的影响,发现供氧浓度为 3.0% 、供氧速率为 $13.70\text{ mL}/(\text{min}\cdot\text{kg})$ 时有机物质的降解率最佳,堆肥效果最好。

因此,合理选择供氧策略是提高好氧堆肥效率、保证堆肥品质的关键。由于受控生保系统的封闭空间中氧气资源极为有限,亟需探寻合适的氧气供应条件,保证堆肥各阶段氧气需求,推进堆肥发酵进程。然而,受控生态生保系统中好氧堆肥氧气供应参数方面的研究尚未见报道。基于上述研究背景,本研究以厨余垃圾、修剪草和落叶为原料模拟CELSS的有机固体废弃物,设置3种不同的氧分压(5% 、 15% 和 30%),分析其在受控条件下适宜的氧气供应量,以在降低堆肥能耗的基础上促进堆肥发酵,并探明堆肥不同氧分压下臭气排放的变化规律,获得实现低能耗和低排放的氧供应参数,以期有效节约资源,进一步优化堆肥工艺,构筑受控生保系统的有机生态循环模式,推进低能耗的环境

友好型堆肥体系建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

厨余垃圾取自中国农业大学食堂,园林废弃物(主要包括修剪草和落叶)作为调理剂,取自中国农业大学校园;将厨余垃圾、园林废弃物用粉碎机预处理至5 mm左右备用,所用原料的基本理化性质如表1所示。

1.2 试验设计与堆肥操作

将厨余垃圾和园林废弃物(主要包括修剪草和落叶)按 $m(\text{厨余垃圾}):m(\text{园林废弃物})=3:1$ (鲜

重)混合均匀,调节原料 C/N 为 25。为避免堆肥初始阶段的过度酸化导致系统崩溃,添加 3%(鲜重)生石灰作为 pH 调节剂^[12]。混合物料含水率调整为 60%,物料的填充容重为 0.35 kg/L。本研究共设置 3 个处理,为模拟生态生命保障系统(CELSS)环境,通过调整纯氧和纯氮的比例使进气氧分压分别为 5%(T1)、15%(T2)和 30%(T3),连续通风速率控制在 0.2 L/(min·kg)(以干物质计)。堆肥发酵周期为 15 d,在第 0、2、5、7、10、15 天进行翻堆并采集样品,每份样品采集量 ≥ 200 g,所取样品分为 2 份:一份为鲜样,于 -20 ℃ 冰箱中保存备用;另一份进行风干处理用于测定相关元素含量。

表 1 堆肥原料基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of compost materials

原料 Ingredient	总碳/% Total carbon	总氮/% Total nitrogen	总硫/% Total sulfur	碳氮比 C/N	含水率/% Moisture content	pH	电导率/ (mS/cm) EC
厨余垃圾 Kitchen waste	48.61	2.89	0.288	16.82	73	4.50	1.05
园林废弃物 Garden waste	40.96	1.14	0.244	35.93	13	7.60	1.10

试验装置为 8 L 密闭式堆肥发酵反应器(图 1)。可见:反应器采用底部强制通风供氧工艺,外部有自动控温箱(温度保持在 50 ℃),系统进气端直接与气瓶流量计相连,避免通风系统中的污染气体干扰后续测定,在反应器进气端、出口端设置气体吸收瓶;反应器内部设有温度传感器和数据自动记录仪。

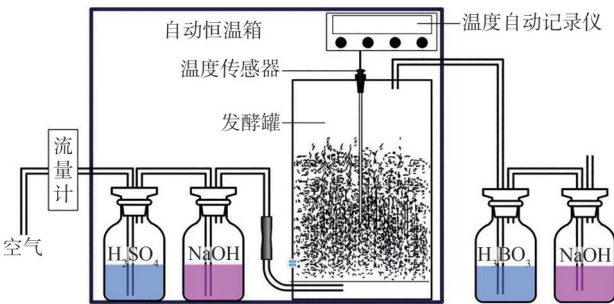


图 1 密闭式堆肥模拟反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the closed simulative composting reactor

1.3 指标测定及分析

温度传感器 Pt100 和自动温度记录仪用于测定堆肥温度并记录温度数据,采集频率为 30 min

记录 1 次;酸碱度 pH 和电导率 EC 用鲜样和去离子水按 $m(\text{鲜样}):m(\text{去离子水})=1:10$ 混合,在室温下以 200 r/min 振荡 30 min,静置过滤后的浸提液经校准过的 MP522 型 pH 计和电导率仪测得^[13];TC、TN、TS 含量采用元素分析仪(Elementar Vario MACRO)测定^[14];H₂S 和 O₂ 采用沼气分析仪(Geotech Biogas 5000)测定;CO₂ 和 NH₃ 分别采用氢氧化钠和硼酸吸收,吸收液由标准稀硫酸溶液滴定的方法测定。NH₄⁺-N 用鲜样和 2 mol/L 的氯化钾溶液按 $m(\text{鲜样}):m(\text{氯化钾溶液})=1:10$ 浸提,振荡 30 min 并静置过滤后得到浸提液,用流动分析仪测定。

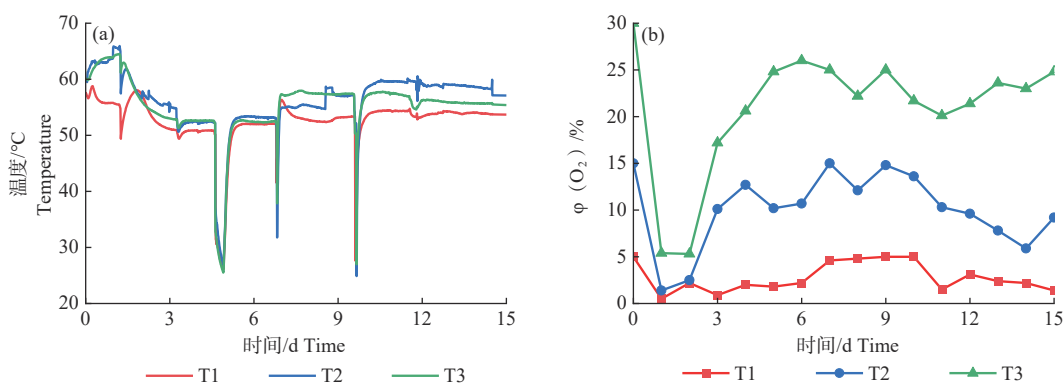
反映检测化合物气味潜力的无量纲值(OAV)为化合物的化学浓度与其相应气味检测阈值(ODT)的比值。OAVs 是所有检测到的化合物的 OAV 总和。堆肥过程中 NH₃ 和 H₂S 的 ODT 均参照 Rincón 等^[15]相关数据进行计算。

本研究使用 WPS Office 和 Origin 2023 进行数据处理与图表制作,同时通过 SPSS 27.0 进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同氧分压对堆肥中温度和氧气的影响

不同氧分压处理的温度和 O_2 浓度变化见图2。由图2(a)可见:T2和T3处理在第1天分别达到峰值温度65.95和64.48℃,显著高于T1处理(58.78℃),且T2处理从第10天开始明显高于T3处理。T1处理的温度始终低于60℃,仅在第2、7天翻堆后出现小幅升温。在整个堆肥过程中,堆肥温度呈现先上升后下降,最后波动性平稳的趋势。3个处理高温期($>50℃$)持续时间均超过7d,可实现废弃物的无害化处理。



T1, 氧分压 5%; T2, 氧分压 15%; T3, 氧分压 30%。下同。

T1, oxygen partial pressure 5%; T2, oxygen partial pressure 15%; T3, oxygen partial pressure 30%. The same below.

图2 堆肥过程中温度(a)和 O_2 浓度(b)的变化

Fig. 2 Changes of temperature (a) and O_2 concentration (b) in composting process

2.2 不同氧分压对堆肥过程中pH和EC的影响

不同氧分压处理的堆肥pH和EC变化见图3。由图3(a)可见所有氧分压处理的pH值均呈现先下降后上升最后趋于平稳的趋势。在堆肥结束时各处理均未达到NY/T 525—2021《有机肥料》^[16]中堆肥产品pH的安全标准(5.5~8.5)。

由图3(b)可见:堆肥初期,随着温度的升高,有机物被微生物快速分解为小分子组分,各处理的EC值均呈现缓慢上升的趋势。从第7天开始,T1处理迅速上升,并在第10天达到峰值,与T2和T3处理间存在极显著差异($P \leq 0.001$);T2和T3处理有利于小分子物质的固持,分别在第7、10天达到较低的峰值后逐渐下降。堆肥结束时,只有T2和T3处理的EC值在作物生长的安全范围之内(低于 4.0 mS/cm)^[17],T1处理显著高于T2和T3处理($P \leq 0.001$)。

由图2(b)可见:氧分压越高,堆体 O_2 浓度越高。T1处理的 O_2 浓度不足,最低已经达到0.5%; O_2 浓度低值持续2d后开始逐步回升,并最终趋于平稳,但T1处理的 O_2 浓度始终低于5%,难以维持堆体微生物代谢活动的需求。T2处理的 O_2 浓度大多数时间保持在9.2%~15.0%,T3处理的 O_2 浓度基本保持在20%以上,证明其堆肥后期 O_2 过量供应。整体来看,各处理的 O_2 浓度变化趋势基本一致,均在堆肥第1天迅速下降,这是因为易降解有机质在堆肥前期剧烈分解大量消耗 O_2 ,之后随着易降解有机质逐渐耗尽,堆体 O_2 浓度逐渐升高至初始 O_2 浓度水平。

2.3 不同氧分压对堆肥过程中C/N和 NH_4^+-N 的影响

不同氧分压处理的堆肥C/N和 NH_4^+-N 变化见图4。由图4(a)可见:不同处理间C/N变化趋势存在一定差异。堆肥初期T1和T3处理的C/N呈现上升趋势,且T3处理的上升幅度大于T1处理,说明充足的 O_2 可以促进有机碳的降解。T2处理则相反,反应初期碳以 CO_2 的形式大量损失,且该处理的温度较其他处理高,高的堆肥温度促使氮以 NH_3 的形式损失,两者共同作用使C/N降低。从第7天开始,T2和T3处理的C/N总体保持下降趋势,但由于T1处理反应中后期氮以 NH_3 的形式大量逸散,C/N略有上升。

由图4(b)可见:堆肥开始时 NH_4^+-N 浓度均为 0.16 g/kg ,随着反应进行,T1处理的 NH_4^+-N 显著大幅度增加且一直高于T2和T3处理,说明低的氧

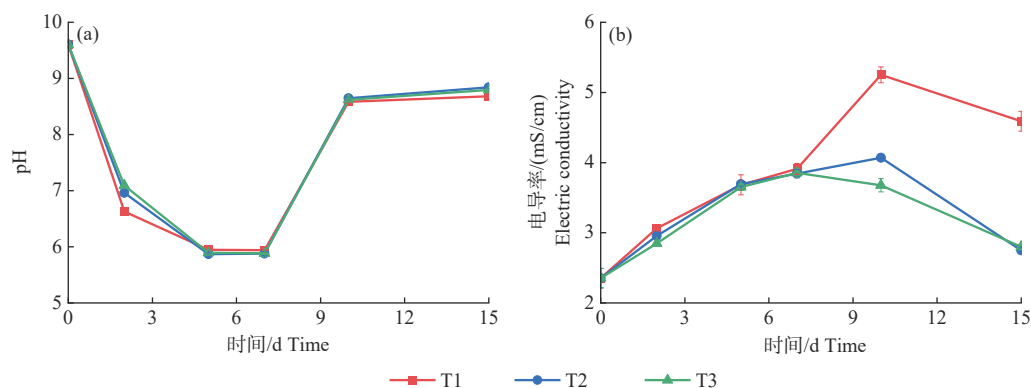
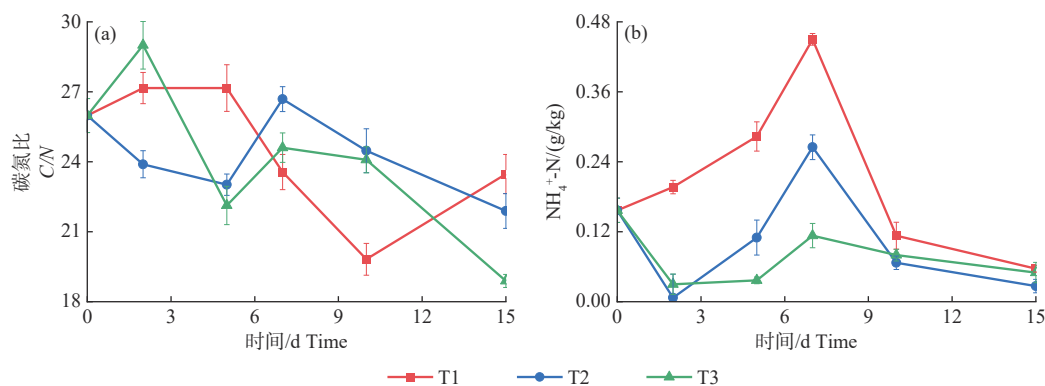


图3 堆肥过程中pH(a)和EC(b)的变化

Fig. 3 Changes of pH (a) and EC (b) in composting process

图4 堆肥过程中C/N(a)和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (b)的变化Fig. 4 Changes of C/N (a) and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (b) in composting process

分压可能有利于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的积累。T1和T2处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在第5~7天急剧上升,所有处理均在第7天达到峰值。堆肥结束时各处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量无显著差异($P>0.05$)。整个堆肥过程中各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均呈现先上升后下降的趋势。

2.4 不同氧分压对堆肥过程中 NH_3 和 H_2S 气体排放的影响

2.4.1 NH_3 排放速率及累积排放量

不同氧分压处理的 NH_3 排放速率和累积排放量变化见图5。由图5(a)可见:各处理的 NH_3 排放速率峰值主要出现在升温期 and 高温期,其中T1、T2和T3的 NH_3 排放速率峰值分别为0.055 8(第2天)、0.012 6(第2天)、0.008 2 g/(kg·d)(第3天)。随着反应进行, NH_3 排放量逐渐减少至极低水平,堆肥第7天翻堆后再次出现 NH_3 排放峰值,且T1处理2次排放峰值均远大于T2和T3处理。由图5(b)可见:在堆肥结束时,T2和T3处理的 NH_3 累积排放量较T1处理分别减少70.49%和67.62%。从 NH_3 减

排的效果上来看,T2处理 NH_3 减排效果最好。

2.4.2 H_2S 排放速率及累积排放量

不同氧分压处理的 H_2S 的排放速率变化和累积排放量变化见图5。由图5(c)可见:各处理堆肥初期 H_2S 的排放速率较低,从第6天开始先后出现排放高峰。T1、T2和T3处理的 H_2S 排放速率峰值分别为0.002 1(第14天)、0.002 9(第14天)、0.003 8 g/(kg·d)(第8天),其中T3处理显著提高了 H_2S 的排放峰值。由图5(d)可见:堆肥结束时,T2和T3处理的 H_2S 累积排放量明显高于T1处理。从 H_2S 减排效果上来看,T1处理减排效果最好,与T2和T3处理相比,可使 H_2S 分别减排40.67%和38.75%。

2.4.3 堆肥臭气综合气味活性值

结合 NH_3 和 H_2S 的气味活性值(OAV)计算恶臭气体的综合气味活性值(OAVs),以评估堆肥主要恶臭气体的综合排放情况,具体结果见表2。可见:T1处理的综合气味活性值最低,说明氧分压为

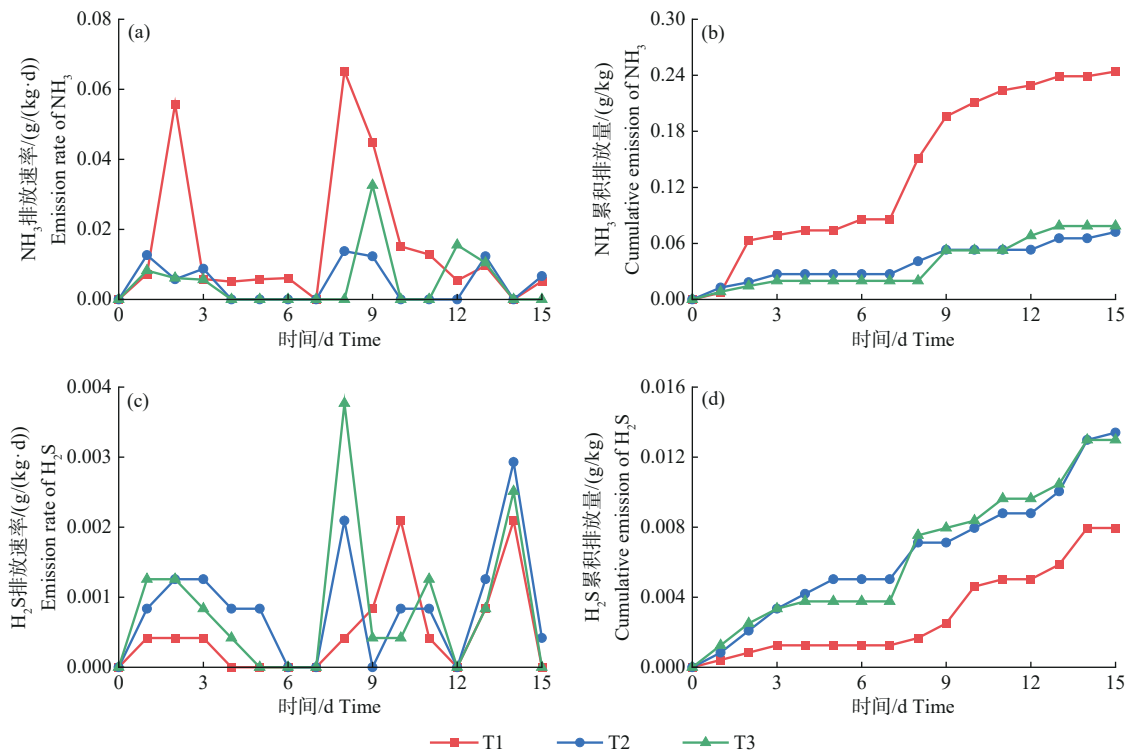


图 5 堆肥过程中 NH_3 和 H_2S 的排放速率 (a) 和 (c) 及累积排放量 (b) 和 (d)

Fig. 5 Emission rates (a) and (c) and cumulative emissions (b) and (d) of NH_3 and H_2S in composting process

表 2 堆肥臭气综合气味活性值分析

Table 2 Analysis of comprehensive odor activity values in composting process

处理 Treatment	$\omega(\text{恶臭气体})/(\text{g/kg})$		臭气综合气味活性值 Comprehensive odor activity value
	NH_3 累积排放量 Cumulative emission of NH_3	H_2S 累积排放量 Cumulative emission of H_2S	
T1	0.244 1	0.008 0	17.059 5
T2	0.072 2	0.013 4	28.544 5
T3	0.078 6	0.013 0	27.657 5

5% 时可以有效降低 NH_3 和 H_2S 的综合排放情况。Capelli 等^[18]研究表明多个污染气体之间可能存在协同或屏蔽作用。因此,恶臭气体的综合气味活性值与真实值之间可能存在差异。由此可以看出,臭气综合气味活性值能够量化堆肥过程中的臭气污染,但臭气评估具有一定的复杂性,应结合多因素综合考虑。

2.5 理化性质及臭气的相关性分析

不同氧分压处理下堆肥理化性质与臭气排放的相关性如图 6 所示。可见:不同理化性质与臭气排放的相关性在不同处理中呈现出较大差异; O_2 、

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与恶臭气体排放呈显著相关,其中 O_2 是与各处理臭气排放相关性最强的理化指标。进一步分析表明:恶臭气体排放与 T3 处理的 O_2 呈显著的负相关关系,这是由于较高的 O_2 浓度不利于厌氧或微厌氧微生物对 H_2S 的还原转化,但有利于氨氧化微生物的生长,减少了 NH_3 的释放。恶臭气体排放与 T1、T2 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均呈负相关,与 T3 处理呈正相关,其中 T2 处理的 H_2S 排放与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关。

结合其他理化指标来看,T1 处理中, NH_3 和 H_2S 的排放仅与温度、EC 均呈正相关。T2 处理中,

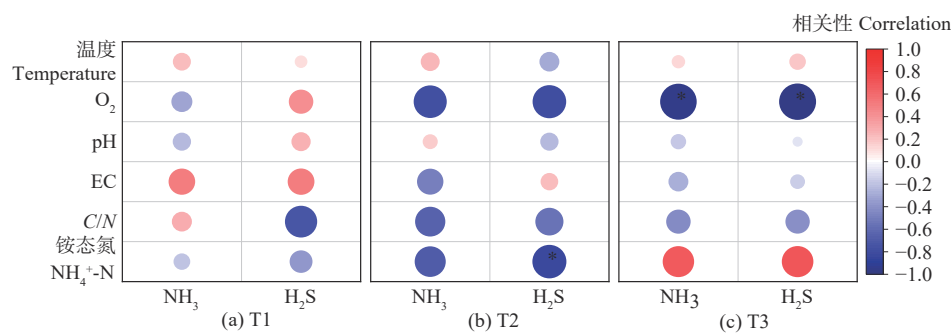


图6 堆肥过程中臭气排放与理化性质的相关性

Fig. 6 Correlation between odor emission and physicochemical properties in composting process

除温度、pH外,NH₃排放与其余指标均呈负相关;H₂S仅与EC呈正相关,说明15%的氧分压更有利于微生物的生长代谢等活动,促进小分子物质的产生。T3处理中,NH₃和H₂S排放与温度、NH₄⁺-N均呈正相关,与其余指标均成负相关关系。

3 讨论

3.1 堆肥过程中的氧气需求及供应

本研究表明,较高的氧分压可以加速有机质降解,缩短升温时间,并通过增加单位时间和体积内的热量蓄积来提高堆体发酵的温度,这与Jiang等^[19]的研究结果一致。杨佳等^[20]研究发现腐熟堆肥覆盖处理限制了堆肥过程中的气体流动,降低了有机质的降解速率,这与本研究较低氧分压处理的结果相符。Magalhaes等^[21]研究表明当O₂浓度为10.0%~18.0%时,微生物活性最好,有利于有机质的降解转化,与本研究结果相符。本研究中T1处理堆体O₂浓度低于5%限制了堆体微生物的代谢活动,这与倪梅娣^[9]和Yang等^[22]的研究结果一致;T2处理的O₂浓度为9.2%~15.0%,处于微生物生长繁殖与代谢活动的适宜范围;而T3处理20%以上的O₂浓度高于适宜范围。因此,氧气供应会显著影响堆肥过程中物质的降解转化。

结合温度变化,堆肥初期随着温度升高,耗氧量迅速增加,且堆肥后期随着易降解有机质的减少,微生物的耗氧量也逐渐减少,O₂浓度小幅回升,这与张玉冬等^[23]的研究结果一致。T2和T3处理在堆肥后期温度差异不大,表明T3处理中O₂为过量供应。因此,堆肥过程氧气供应可以考虑分时段区别性设置,增加高温期供氧量,降低降温期和腐熟期供氧量,从而减少氧气消耗。

3.2 不同氧分压处理对堆肥臭气排放的影响

堆肥中的氧气供应会通过控制氨化作用、NH₃排放以及硝化过程影响堆肥氮素动力学^[24]。本研究发现,T1处理氧气供应不足产生的局部厌氧环境,导致NH₃排放量增加。但Ma等^[25]研究0.05、0.10、0.20和0.40 m³/h的间歇通风速率对NH₃排放的影响,发现通风速率越小,NH₃排放量越小,与本研究存在差异,这可能是因为本研究中氧分压5%对堆体的厌氧影响远大于其所研究的范围,限制了氨氧化微生物的活性,从而影响氮的转化路径。T2和T3处理充足的氧气供应有利于氨氧化细菌的生长,使得氨氧化作用加强,氨氧化是硝化的限速步骤,促进了NH₄⁺-N向NO₃⁺-N的转化,从而减少NH₃的产生,这与NH₄⁺-N含量的变化结果一致^[26-27]。结合基础理化指标来看,堆体第7天开始出现小幅升温,温度的升高促进有机酸的挥发,使pH值逐渐升高,最终稳定下来,NH₃排放速率也相应表现出先升后降的趋势^[23]。同时,碱性环境下有机氮的矿化作用使NH₄⁺-N大多以NH₃的形式挥发而降低,这与Chan等^[28]的研究结果一致。堆肥后期,各处理NH₃排放出现较小增幅,促使EC不断降低,这与Xu等^[29]的研究结果一致。另外,Ogunwande等^[30]和马若男等^[31]发现当C/N为20~30时,C/N越高,NH₃的排放量越小。本研究中,与其他处理相比,T2处理的C/N整体上处于较高水平(21.89~23.65),有利于实现NH₃的减排。这说明不同氧分压改变了堆肥理化性质、微生物活性和群落动态,使得臭气排放发生变化^[32]。

研究表明,堆肥中的厌氧环境是H₂S产生的主要原因,氧分压较低时氧气供应量不足,容易出现局部厌氧环境,促进H₂S的排放^[33];氧分压较高时

产生 H_2S 的前体物质较少,不利于硫还原菌对 H_2S 的还原转化^[34]。但本研究中 H_2S 的累积排放量大小为 $\text{T2} > \text{T3} > \text{T1}$,与以上研究结论相左,这是由于堆肥过程中 T2 处理的 O_2 浓度(9.2%~15.0%)位于较适宜的范围内,堆体自由空域较大,有利于微生物的生长代谢,活跃的微生物分解含硫有机物质,释放 H_2S ^[35]。因此,氧气供应会显著影响堆肥过程中的臭气排放情况。

4 结 论

为获得受控生态生保系统(CELSS)中好氧堆肥低能耗和低排放的氧供应参数,本研究探究了受控条件下氧分压(5%、15%和30%)对好氧堆肥进程 NH_3 和 H_2S 排放的影响,并结合堆肥指标对原因进行解析,主要结论如下:

1)15%的氧分压更有利于微生物的生长代谢,促进堆肥发酵进程;

2)与氧分压为5%和30%的处理相比,15%的氧分压使 NH_3 累积排放量分别减少了65.35%、24.01%;

3)堆肥过程中 O_2 浓度、EC、C/N 和 NH_4^+-N 是影响臭气排放的主要因素。

参考文献 References

- [1] 郭双生,董文平.我国受控生态生命保障技术研究进展与未来发展方向分析[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 112-120
Guo S S, Dong W P. Analyses on current status and future developing direction of controlled ecological life support techniques in China [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2018, 31(2): 112-120 (in Chinese)
- [2] 蔡淑芳,陈敏,杨有泉,雷锦桂.受控生态生保系统氧气流动及废弃物发酵处理装置设计[J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(3): 219-224
Cai S F, Chen M, Yang Y Q, Lei J G. Oxygen flow and design of waste fermentation disposal device in controlled ecological life support system [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2017, 30(3): 219-224 (in Chinese)
- [3] 郭双生,吴志强,高峰,邓一兵.中国受控生态生保技术研究进展与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 269-280
Guo S S, Wu Z Q, Gao F, Deng Y B. Progress and prospect of controlled ecological life support technology in China [J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22(3): 269-280 (in Chinese)
- [4] Jin X D, Ai W D, Li C X, Zhang L C, Yu Q N, Tang Y K, Dong W Y. Operation overview of a biological waste treatment system during the 4-crew 180-day integrated experiment in the controlled ecological life support system (CELSS)[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2021, 29: 15-21
- [5] Zhang L C, Li T, Ai W D, Zhang C Y, Tang Y K, Yu Q N, Li Y H. Water management in a controlled ecological life support system during a 4-person-180-day integrated experiment: Configuration and performance [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(651): 2080-2086
- [6] Li T, Zhang L C, Ai W D, Dong W Y, Yu Q N. A modified MBR system with post advanced purification for domestic water supply system in 180-day CELSS: Construction, pollutant removal and water allocation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018(222): 37-43
- [7] He W T, Liu H, Xing Y D, Jones S B. Comparison of three soil-like substrate production techniques for a bioregenerative life support system [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(9): 1156-1161
- [8] Kazunori I, Yosh I N. Effects of oxygen supply rate and the concentration on composting of dairy manure [C]. In: *ASAE Annual International Meeting*, 1999. Toron: American Society of Agricultural Engineers, 1999: 9
- [9] 倪梅娣.猪粪好氧堆肥过程中氧气浓度变化规律的研究[D].杭州:浙江大学, 2006
Ni M D. Study on the oxygen concentration during the aerobic composting process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006 (in Chinese)
- [10] 安玉亭,刘彬,薛丹丹,王立波,贾媛媛,吴永波,原宝东.城市污泥与稻草混合堆肥氧气消耗的通风量优化研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 128-133
An Y T, Liu B, Xue D D, Wang L B, Jia Y Y, Wu Y B, Yuan B D. The research of optimal ventilation: The oxygen consumption study of urban sewage sludge composting with rice straw [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1): 128-133 (in Chinese)
- [11] Nguyen T P, Koyama M, Nakasaki K. Effects of oxygen supply rate on organic matter decomposition and microbial communities during composting in a controlled lab-scale composting system [J]. *Waste Management*, 2022, 153: 275-282
- [12] 杨娜,王巧,吕凡,余波平,徐期勇,何晶晶.我国家庭厨余垃圾与餐厨垃圾理化性质对比分析:源头分类的影响[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(4): 7-16
Yang N, Wang Q, Lv F, Yu B P, Xu Q Y, He P J. Comparative analysis of the physicochemical characteristics between household food waste and restaurant food waste in China: Impact of source segregation [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2023, 31(4): 7-16 (in Chinese)
- [13] 龚建英,田锁霞,王智中,李国学,李彦明.微生物菌剂和鸡粪对蔬菜废弃物堆肥化处理的影响[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8): 2813-2817
Gong J Y, Tian S X, Wang Z Z, Li G X, Li Y M. Effect of inoculation and poultry dung on composting of vegetable residues [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(8): 2813-2817 (in Chinese)
- [14] Finstein M S, Miller F C, Strom P F, MacGregor S T, Psarianos K M. Composting ecosystem management for waste treatment [J]. *Bio/Technology*, 1983, 1(4): 347-353
- [15] Rincón C A, De Guardia A, Couvert A, Wolbert D, Le Roux S, Soutrel I, Nunes G. Odor concentration (OC) prediction based on odor activity values (OAVs) during composting of solid wastes and digestates [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 201: 1-12
- [16] NY 525—2012. 有机肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
NY 525-2012. Organic fertilizer [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (in Chinese)

- [17] Zhang B X, Fan F F, Guo C, Yu M J, Zhao M C, Song Y, Li Y. Evaluation of maturity and odor emissions in the process of combined composting of kitchen waste and garden waste [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021, 11(12): 5500
- [18] Capelli L, Sironi S, Del Rosso R, Céntola P, Il Grande M. A comparative and critical evaluation of odour assessment methods on a landfill site[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(30): 7050-7058
- [19] Jiang T, Li G X, Tang Q, Ma X G, Schuchardt F. Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 31: 124-132
- [20] 杨佳, 李国学, 马若男, 王国英, 袁京. 腐熟堆肥回流对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2456-2464
Yang J, Li G X, Ma R N, Wang G Y, Yuan J. Effects of reflux of mature compost on sulfur odor emission during pig manure composting [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2456-2464 (in Chinese)
- [21] Magalhães A M T, Shea P J, Jawson M D, Wicklund E A, Nelson D W. Practical simulation of composting in the laboratory [J]. *Waste Management & Research*, 1993, 11(2): 143-154
- [22] Yang F, Li G X, Shi H, Wang Y M. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Waste Management*, 2015, 36: 70-76
- [23] 张玉冬, 张红玉, 顾军, 王继红. 通风量对厨余垃圾堆肥过程中 H_2S 和 NH_3 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1371-1377
Zhang Y D, Zhang H Y, Gu J, Wang J H. Influence of ventilation on H_2S and NH_3 emissions during kitchen waste composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1371-1377 (in Chinese)
- [24] De Guardia A, Petiot C, Rogeau D, Druilhe C. Influence of aeration rate on nitrogen dynamics during composting[J]. *Waste Management*, 2008, 28(3): 575-587
- [25] Ma R N, Liu Y, Wang J N, Li D Y, Qi C R, Li G X, Yuan J. Effects of oxygen levels on maturity, humification, and odor emissions during chicken manure composting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369: 133326
- [26] 顾沈怡, 钱锟, 詹永冰, 申卫收, 林先贵. 不同添加剂对鸡粪堆肥中氨气和温室气体排放的影响[J]. 环境生态学, 2023, 5(2): 51-60
Gu S Y, Qian K, Zhan Y B, Shen W S, Lin X G. Effects of different additives on ammonia and greenhouse gas emissions from chicken manure composting[J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(2): 51-60 (in Chinese)
- [27] 胖是, 王燕, 廖新伟, 吴银宝, 熊宽荣. 通风量对蛋鸡粪堆肥氨气排放的影响[J]. 中国家禽, 2015, 37(15): 23-30
Pan S, Wang Y, Liao X D, Wu Y B, Xiong K R. Effect of ventilation on ammonia emission in layer manure composting[J]. *China Poultry*, 2015, 37(15): 23-30 (in Chinese)
- [28] Chan M T, Selvam A, Wong J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvit' food waste composting by zeolite amendment [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 838-844
- [29] Xu Z C, Ma Y, Zhang L X, Han Y Y, Yuan J, Li G X, Luo W H. Relating bacterial dynamics and functions to gaseous emissions during composting of kitchen and garden wastes [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 767(17): 144210
- [30] Ogunwande G A, Osunade J A, Adekalu K O, Ogunjimi L A O. Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(16): 7495-7503
- [31] 马若男, 李丹阳, 元传仁, 李国学, 王国英, 刘燕, 孙少泽, 袁京. 碳氮比对鸡粪堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 194-202
Ma R N, Li D Y, Qi C R, Li G X, Wang G Y, Liu Y, Sun S Z, Yuan J. Effects of C/N ratio on maturity and odor emissions during chicken manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24): 194-202 (in Chinese)
- [32] Tan Z H, Zhu H X, He X S, Xi B D, Tian Y X, Sun X J, Zhang H X, Ouche Q Y. Effect of ventilation quantity on electron transfer capacity and spectral characteristics of humic substances during sludge composting [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(46): 70269-70284
- [33] Zhang H Y, Schuchardt F, Li G X, Yang J B, Yang Q Y. Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW)[J]. *Waste Management*, 2013, 33(4): 957-963
- [34] 吴伟霞, 席北斗, 黄彩红, 李艳红, 李伟, 马彩云, 郭威, 唐朱睿. 有机固废堆肥中产臭及除臭技术的微生物作用机制研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(10): 2486-2496
Wu W X, Xi B D, Huang C H, Li Y H, Li W, Ma C Y, Guo W, Tang Z R. Review on microbial mechanism of odor generation and deodorization technology during organic solid waste composting [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(10): 2486-2496 (in Chinese)
- [35] 于海娇. 猪粪堆肥化处理中硫化氢释放规律及处理工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015
Yu H J. Study on hydrogen sulfide release law and treatment technology in pig manure composting[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 孙玉鑫, 硕士研究生, 现就读于中国农业大学资源与环境专业。研究生期间获得二等学业奖学金, 参与中国农业大学有机循环环教授工作站、生物质废弃物降解需氧规律研究及其低氧耗堆肥工艺构建项目。参加第十六届全国堆肥技术与工程研讨会、有机循环学术讲座等学术研讨会。目前发表相关论文2篇。



通讯作者简介：常瑞雪,博士,中国农业大学副教授,博士生导师。主要从事固体废弃物无害化处理、固体废弃物处理产物增值化利用等领域的研究开发与技术推广工作。累计承担国家、省部级、地方、企业委托以及国际合作等项目 10 余项,包括美国 USDA 项目子课题主持人、生物质废弃物降解需氧规律研究及其低氧耗堆肥工艺构建项目、北京市设施蔬菜创新团队项目、中国农业大学教授工作站项目、海南大宗生物质废弃物高效生物转化与高质量循环利用关键技术项目、国家重点研发计划等;多次参与国内外研讨合作与交流会,获中国植物病理学会第十三届青年学术研讨会“优秀报告奖”等;发表论文 40 余篇;发明专利 12 件。



通讯作者简介：艾为党,中国航天员科研训练中心研究员。主要从事受控生态生保技术研究工作。累计承担“863”、载人航天预研等各类课题 30 多项。参与创建我国首个大型密闭生态循环系统,组织实施我国首次面向未来地外星球生存的 2 人 30 d 及 4 人 180 d 受控生态生保系统集成试验,创新构建了一种用于空间站的植物培养方法,创建了以碳元素为主控因子的受控生态生保系统中固体废物处理技术体系。获部委级科技进步二等奖 1 项,三等奖 7 项;发表期刊论文 140 篇,其中 SCI 或 EI 收录 60 篇;授权发明专利 21 项,实用新型专利 8 项,外观设计专利 3 项。