

腐熟堆肥回流对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响

杨佳, 李国学, 马若男, 王国英, 袁京

引用本文:

杨佳, 李国学, 马若男, 等. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0859>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Fe₂O₃对鸡粪堆肥过程中含硫臭气排放的影响](#)

陈文旭, 李国学, 马若男, 刘燕, 袁京

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2465–2471 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0857>

[腐熟堆肥筛上粗颗粒对堆肥化过程中温室气体排放的影响](#)

江滔, 李国学, 唐琼, 马旭光, 王钢

农业环境科学学报. 2015(7): 1363–1370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.019>

[含硫添加剂对猪粪堆肥过程甲烷与臭气排放的影响](#)

闫召伟, 杨菲宇, 高兴祖, 陈杰, 李施雨, 李国学, 罗文海

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2448–2455 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0980>

[双氰胺和氢醌添加对堆肥温室气体排放的影响](#)

杨燕, 尹子铭, 袁京, 罗一鸣, 李国学

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2439–2447 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0955>

[通风量对厨余垃圾堆肥过程中H₂S和NH₃排放的影响](#)

张玉冬, 张红玉, 顾军, 王继红

农业环境科学学报. 2015(7): 1371–1377 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.020>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨佳, 李国学, 马若男, 等. 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, et al. 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.

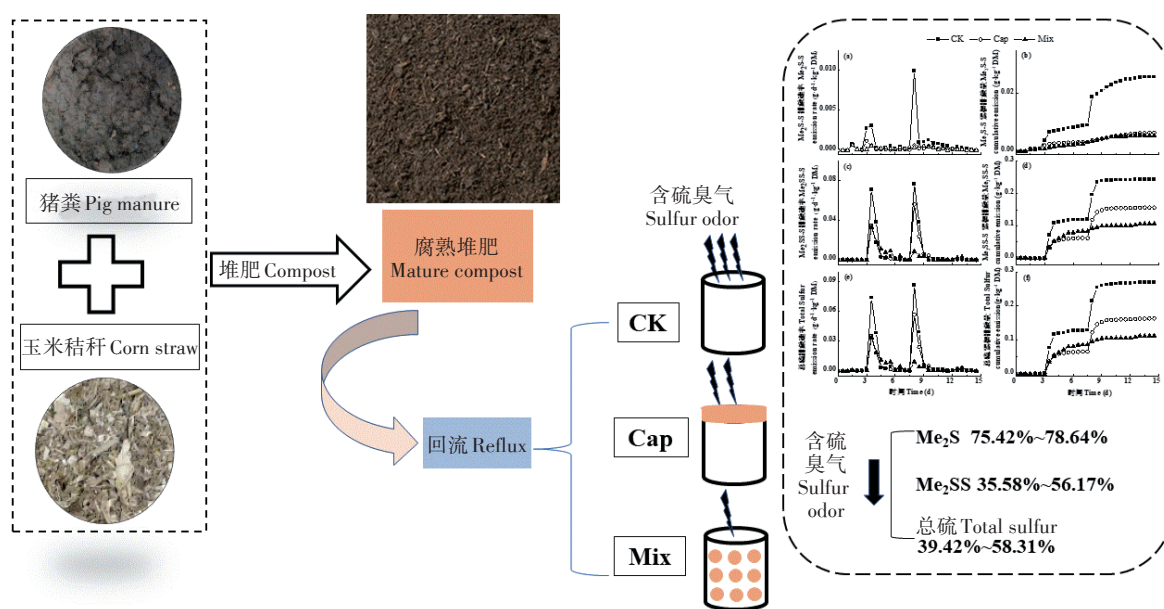


开放科学 OSID

腐熟堆肥回流对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响

杨佳, 李国学, 马若男, 王国英, 袁京*

(中国农业大学资源与环境学院 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)



摘要:为探究腐熟堆肥不同回流方式对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响,本文以猪粪为研究对象进行好氧堆肥试验,设置不添加腐熟堆肥(CK)、腐熟堆肥覆盖处理(Cap)和腐熟堆肥混匀添加(Mix)3个处理。研究表明:腐熟堆肥覆盖和混匀回流方式相较于CK均可促进堆肥腐熟,种子发芽指数(GI)分别提高12.50%和18.09%;甲硫醚(Me₂S)和二甲基二硫醚(Me₂SS)为猪粪高温堆肥过程中主要的含硫臭气(>90%),主要在堆肥前期和翻堆后排放。腐熟堆肥覆盖和混匀回流处理可分别减排Me₂S 75.42%和78.64%、Me₂SS 35.58%和56.17%,降低39.42%和58.31%的总含硫气体排放,增加堆肥产品总硫(TS)含量13.46%和24.07%。腐熟堆肥覆盖和混匀两种回流方式均可促进堆肥腐熟,减少含硫臭气排放,且腐熟堆肥混匀处理效果最佳。

关键词:腐熟堆肥;回流方式;覆盖;混匀;含硫臭气

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2456-09 doi:10.11654/jaes.2021-0859

Effects of reflux of mature compost on sulfur odor emission during pig manure composting

YANG Jia, LI Guoxue, MA Ruonan, WANG Guoying, YUAN Jing*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Science, China)

收稿日期:2021-07-31 录用日期:2021-09-13

作者简介:杨佳(1998—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,从事固体废弃物资源化利用研究。E-mail:yj2020@cau.edu.cn

*通信作者:袁京 E-mail:jingyuan@cau.edu.cn

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-39-19)

Project supported: Project for National Modern Agricultural Industrial Technology System Construction (CARS-39-19)

Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To explore the effects of different mature compost reflux methods on the emission of sulfur odors during composting, the covering and mixing methods of mature compost were designed, and the control treatment had no mature compost. The results showed that inoculating with mature compost increased the maturity of the final compost, and the seed germination index (GI) increased by 12.50% and 18.09%, respectively. Dimethyl sulfide (Me_2S) and methyl disulfide (Me_2SS) were the primary (> 90%) sulfur compounds released during composting, which were mainly emitted in the early stages of composting and after compost turning. The covering method and the mixing of mature compost method reduced Me_2S emissions by 75.42% and 78.64%, respectively, and decreased Me_2SS emissions by 35.58% and 56.17%, respectively. Subsequently, the reflux of mature compost reduced total sulfur odor emission by 39.42%~58.31%, and increased total sulfur (TS) content by 13.46%~24.07%, respectively. Generally, the addition of mature compost promote the maturity of compost and reduced sulfur-containing odor emissions and the mixing method shows the best performance.

Keywords: mature compost; reflux method; covering method; compost mixing; sulfur odor

好氧堆肥是实现畜禽粪便无害化与资源化的生物转化技术。然而,畜禽粪便中的营养物质在微生物的作用下会产生挥发性有机化合物(VOCs)、氨气(NH_3)、硫化氢(H_2S)、挥发性含硫有机化合物(VSCs)等恶臭气体^[1]。堆肥过程释放的恶臭气体不仅对环境和居民造成伤害,同时会降低堆肥过程中碳、氮、硫等元素含量。在堆肥过程中,畜禽粪便孔隙率低,易产生局部厌氧环境,造成含硫臭气的产生^[2]。一般认为,挥发性含硫有机物是堆肥含硫臭气排放中最主要的致臭因子,其主要来源于厌氧条件下含硫氨基酸的降解^[3]。产生的挥发性含硫有机化合物主要以硫化氢(H_2S)、二硫化碳(CS_2)、甲硫醇(MeSH)、甲硫醚(Me_2S)和二甲基二硫醚(Me_2SS)等形式损失^[4], Me_2S 和 Me_2SS 是堆肥过程中硫损失的主要形式,分别占VSCs的33.21%和63.96%^[5]。有效的外源添加材料可改变堆体的理化性质,加速有机质的降解和氧气的传递,从而抑制恶臭气体的排放^[6-8]。研究表明不同种类添加剂的堆肥臭气减排效果不同。张红玉等^[7]在厨余垃圾堆肥中加入秸秆,发现 Me_2S 、 H_2S 和 MeSH 的平均排放浓度分别降低了62.3%、67.9%和49.6%。李赟等^[9]在堆肥中分别添加玉米秸秆、稻壳、锯末和菌糠,结果表明锯末对 H_2S 的减排效果最佳,相比对照可减排84.08%。

腐熟堆肥是经堆肥后所产生的稳定腐熟产品,含水率较低(30%),碳氮比为10~15,孔隙度高且微生物丰富^[10],因而腐熟堆肥回流不仅能够改善堆体的理化性质,提高堆肥中氧气的传递效率,还可以接种土著微生物菌群,从物理和生物两方面提升堆肥品质,减少堆肥过程臭气排放。徐成等^[10]的研究表明,在厨余垃圾堆肥中加入腐熟堆肥,有利于堆肥腐殖质的形成与积累,有效降低腐殖质损失率,显著提高腐殖质含

量。宋修超等^[11]在中药渣堆肥过程中回用腐熟堆肥,发现可以强化有机质降解和腐殖质形成,增加胡敏酸组分(15.2%),胡富比显著升高。曹云等^[12]在猪粪好氧堆肥中添加腐熟堆肥,发现24 h内堆体温度提高5℃,脱氢酶、纤维素酶活性峰度提前,蛋白酶活性增加4.9%。江滔等^[13]和LUO等^[14]在猪粪好氧堆肥中采用混匀、覆盖回流方式添加腐熟堆肥,显著降低了温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放。

腐熟堆肥因其较高的孔隙度和吸附能力,作为生物滤池滤料被广泛应用于臭气控制^[15-17]。王彩云等^[18-19]在鸡粪堆肥过程中覆盖半分解有机物料和自然有机物料,发现均能抑制 NH_3 或 H_2S 的释放,且不同覆盖量的臭气减排效果差异显著。目前,腐熟堆肥作为生物滤料用于控制臭气排放的研究已比较成熟,但主要集中于对堆肥过程中温室气体、 NH_3 和 H_2S 的减排,针对腐熟堆肥原位回流对堆肥过程含硫臭气排放的研究仍较少。

因此,本文以猪粪和玉米秸秆作为好氧堆肥原料,研究腐熟堆肥不同回流方式(覆盖、混匀)对猪粪好氧堆肥过程中主要含硫臭气排放的影响,进一步分析腐熟堆肥回流对堆肥产品腐熟度和养分含量的影响,以期通过“以腐降排”方式,降低臭气排放,提高堆肥产品腐熟度。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验堆肥原料为猪粪和玉米秸秆,猪粪取自北京市海淀区白水洼村养殖场,采用干清粪方式收集。秸秆取自中国农业大学上庄实验站,风干后粉碎处理为20~30 mm的均匀小段。腐熟堆肥与本次堆肥原料同源,为猪粪与玉米秸秆经过堆肥处理后的产品。堆

肥原料理化性质见表1。

1.2 试验设计

本研究共设置3个处理,以猪粪与玉米秸秆联合堆肥为对照(CK),湿基比为7:1;腐熟堆肥覆盖处理(Cap):在CK处理的堆体上覆盖厚度为10 cm、质量为6.5 kg的腐熟堆肥;腐熟堆肥混匀处理(Mix):将与Cap处理同等质量的腐熟堆肥与CK处理均匀混合。堆肥设置初始含水率为60%,连续通风速率为 $0.2\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,在60 L的密闭不锈钢发酵罐中进行14 d好氧堆肥试验。其中发酵罐为本实验室自行研发(图1),内径0.36 m,高度0.6 m,利用C-LGX程序通过罐内温度自动控制曝气,温度传感器与计算机连接,自动记录反应器内温度,与马若男等^[20]报道的试验装置相同。

试验期间每12 h进行一次温度记录和气体的采集测定,在试验第3 d和第7 d进行翻堆,翻堆时,腐熟堆肥覆盖层保持原样取出,待其他物料充分翻堆后,再装入腐熟堆肥保持同样的覆盖层高度。取样时间为第0、3、5、7、10、14 d,五点法随机采集固体样品300 g,其中50 g鲜样用于测定含水率,100 g鲜样保存于4℃的冷藏冰箱,用于测定pH值、电导率(EC)、种子发芽指数(GI)等腐熟度指标,其余样品经风干粉碎

后,用于测定总碳(TC)、总氮(TN)、总硫(TS)含量。

1.3 试验方法

(1)理化性质:温度由自动测温仪(175-T3,Testo,德国)测定,可实时监测、随时读取和自动记录;含水率采用烘干法于105℃烘箱中烘至质量恒定后测定; O_2 含量由便携式沼气分析仪(Biogas 5000,Geotech,英国)测定;堆肥主要元素(TC、TN和TS)含量采用元素分析仪(vario MACRO cube,Hananu,德国)进行测定。

(2)腐熟度:将堆肥鲜样与去离子水按照1:10(固液比)混匀,振荡30 min,静置10 min过滤,收集上清液作为待测液。其中pH值、EC采用多参数分析仪(DZS-706-A,雷磁,上海)进行测定;GI值的测定方法为取待测液5 mL于铺有滤纸的培养皿中,均匀放置10粒萝卜种子,于 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ 培养箱(SHP-250,精宏,上海)中避光培养48 h,测算种子发芽指数(GI),计算方法参照《有机肥料》(NY/T 525—2021)。

(3)含硫臭气:采用气相色谱(GC-A90,Echrom,中国)测定含硫臭气,所测含硫臭气包括羰基硫(COS)、二硫化碳(CS_2)、硫化氢(H_2S)、甲硫醇(MeSH)、乙硫醇(EtSH)、甲硫醚(Me_2S)、乙硫醚(Et_2S)和二甲基二硫(Me_2SS)等8种成分。气相色谱包括火焰光度检测器和毛细管柱(Agilent, Gas pro,美国)。测定方法采用外标法,气相柱箱温度以 $20^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率由 60°C 升高到 200°C 并维持10 min。载气为氦气,速率为 $3\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,检测限为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。气相色谱采用3种不同的标气(北京海谱)进行标定,数据处理采用Echrom Chem Lab软件(V.1.0.2)。详细方法参照ZANG等^[21]的研究。

2 结果和讨论

2.1 温度和氧气

CK、Cap和Mix处理在堆肥第2 d均进入高温期,且在第3 d达到温度峰值(图2a),分别为 73.8°C 、 74.4°C 和 75.8°C , 60°C 以上的高温期持续时间分别为4、4 d

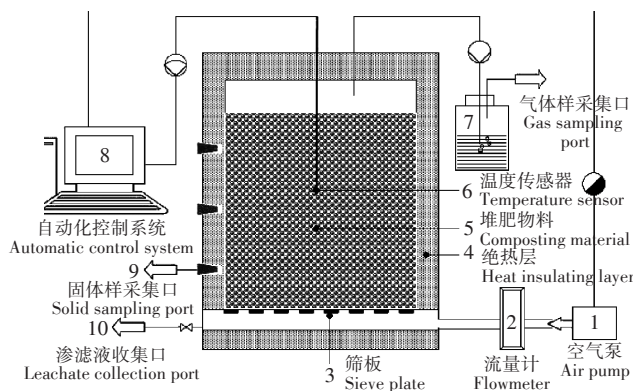


图1 密闭式好氧堆肥发酵罐示意图

Figure 1 Diagram of composting reactor

表1 堆肥原料基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of raw materials of composting

物料 Feedstock	含水率 ^a Moisture content/%	灰分 ^b Ash/%	总碳 ^b Total carbon/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 ^b Total nitrogen/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总硫 ^b Total sulfur/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
猪粪 Pig manure	68.51 ± 1.55	24.46 ± 3.79	38.12 ± 1.63	2.78 ± 0.04	0.540 ± 0.001
秸秆 Corn stalk	8.80 ± 0.08	9.33 ± 1.13	43.57 ± 0.75	0.95 ± 0.04	0.370 ± 0.002
腐熟堆肥 Mature compost	37.04 ± 0.87	57.44 ± 0.67	20.43 ± 0.07	2.60 ± 0.03	0.590 ± 0.008

注:a为基于湿基质量;b为基于干基质量。

Note:a is based on wet weight;b is based on dry weight.

和5 d。堆肥前期混匀处理的温度高于其他处理,由于混匀添加腐熟堆肥后堆体的结构得到改善,微生物群落丰度增多,堆体中微生物的代谢作用加速,导致温度快速升高^[22]。第7 d翻堆后,各处理的温度急剧上升,但覆盖处理的温度回升速度相对缓慢,可能是由于覆盖层限制堆体气体流通,有机质降解速率减缓。整个堆肥过程中,各处理的高温期(>55℃)均可持续5 d以上,满足我国《粪便无害化卫生要求》(GB 7959—2012)。

氧气浓度与微生物活性密切相关,可反映堆肥进程^[23]。从整个堆肥周期来看,堆体内氧气浓度先迅速下降,后波动回升至接近环境水平(图2b)。堆肥第2 d,各处理的氧气浓度迅速下降,混匀处理的氧气浓度较其他处理更低(最低为5.8%),且每次翻堆后氧气含量均迅速降低。微生物代谢产热的同时会消耗大量氧气,因此温度和氧气含量呈显著负相关关系($r=-0.128, P<0.01$),与以往研究结果一致^[24]。

2.2 理化性质

各处理堆肥初始与结束理化指标如表2所示。整体来看,无论是堆肥前还是堆肥后,腐熟堆肥覆盖处理的下层堆肥性质均与对照处理相似。但腐熟堆肥覆盖层的含水率由37.04%增加到53.31%,主要为堆体高温期携带的大量水蒸气被覆盖层吸收所致。堆肥结束时,CK、Cap和Mix处理堆体的灰分含量分别为26.96%、26.10%和39.51%,Mix处理较CK处理增加12.55个百分点,说明腐熟堆肥与物料混匀可提高有机质的降解率。随着堆体中有机质的降解,TC含量减少,TN和TS含量相对增加,Mix处理经堆肥后TS含量最高,C/N最低。Cap处理覆盖层TS含量变化不显著,说明覆盖层的腐熟堆肥较稳定,不易发生降解。添加腐熟堆肥混匀后,有机质降解程度提高,堆体中N和S生物浓缩效应增强,导致C/N下降,TS含量明显增加。整体来看,Mix处理的TS、TN含量高于Cap处理,表明混匀添加腐熟堆肥对有机物的降解具

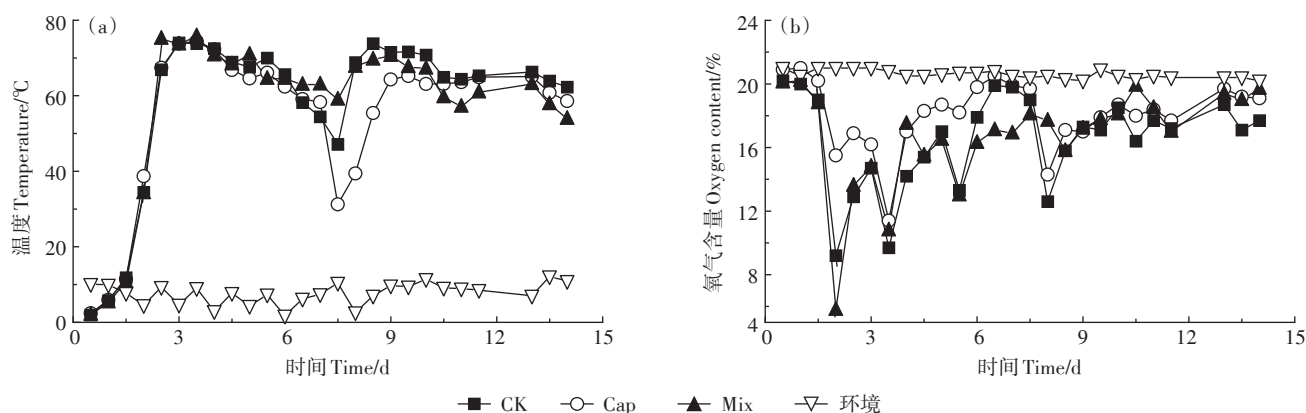


图2 腐熟堆肥不同回流方式的温度和氧气含量变化

Figure 2 Changes in temperature and oxygen content with different mature compost reflux methods during composting

表2 各处理及覆盖层堆肥前后物料性质变化

Table 2 Properties of compost and cover material before and after composting

处理 Treatment	堆肥阶段 Composting time	含水率 ^a Moisture/%	灰分 ^b Ash/%	总碳 ^b Total carbon/%	总氮 ^b Total nitrogen/%	总硫 ^b Total sulfur/%	C/N	C/S
CK	初始	60.91±1.93	19.68±0.24	38.33±1.72	2.34±0.15	0.51±0.02	16.39	75.74
	结束	65.66±1.36	26.96±2.02	28.31±0.87	2.30±0.08	0.59±0.01	12.29	48.14
Cap 堆体	初始	60.91±1.93	19.68±2.38	39.67±1.51	2.28±0.04	0.52±0.02	17.42	76.39
	结束	62.08±1.50	26.10±1.14	30.43±0.91	2.40±0.03	0.59±0.01	12.65	51.80
Cap 覆盖物	初始	37.04±0.87	57.44±0.67	20.43±0.07	2.60±0.03	0.59±0.01	7.86	34.63
	结束	53.31±1.06	59.31±0.75	18.14±0.08	2.36±0.07	0.59±0.00	7.69	30.75
Mix	初始	56.87±1.40	29.47±1.89	34.82±0.16	2.44±0.13	0.54±0.01	14.26	64.33
	结束	59.87±0.33	39.51±1.26	26.48±1.06	2.72±0.07	0.67±0.02	9.72	39.52

注:a为基于湿基质量,b为基于干基质量。

Note:a is based on wet weight;b is based on dry weight.

有促进作用($P<0.01$)。

2.3 腐熟度

堆肥过程中各处理pH值在7.94~9.01,且差异不显著($P>0.05$)(图3a)。堆肥初期,CK、Cap和Mix处理的pH值分别为7.94、7.96和8.16,其中Mix处理的pH值较高,主要与腐熟堆肥本身为碱性有关。随后各处理堆体pH逐渐上升,主要与好氧代谢利用过程中有机氮的矿化作用有关。第5 d以后,CK处理的pH值高于其他处理,这是因为CK处理在前5 d温度略低于其他两个处理,有机质降解程度较低,有机氮的矿化作用延后。相对于Cap和Mix处理,前期温度快速升高加快有机质降解,有机质含量减少后矿化作用减弱,使得pH值上升速率减缓^[25]。各处理堆肥结束时pH值均达到《有机肥料》(NY/T 525—2021)中弱碱性腐熟标准。

EC值反映堆肥过程中可溶性离子浓度,而可溶性离子过多会对植物有毒害作用。一般认为堆肥结束后,EC值小于 $4\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 对作物无毒害作用^[26]。堆肥前期(图3b),CK、Cap和Mix处理的EC值分别为 3.20 、 $3.30\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $3.17\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。堆肥第3 d,CK和Cap处理EC值达到峰值,分别为 $3.75\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $3.72\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。大量的有机物在堆肥前期快速降解,产生大量的铵根离子(NH_4^+)及其他离子,导致EC值快速升高到峰值。温度回升后,铵根离子转化成氨气及其他离子并开始矿化,EC值呈下降趋势,最终趋于稳定^[8]。Mix处理的EC值在堆肥初期呈现下降趋势,这是由于混匀添加腐熟堆肥后,对于堆体物料孔隙度起到良好调节作用,有机质降解充分, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化迅速,因此EC值没有明显上升趋势。堆肥结束时各处理的EC值为 $2.4\sim 2.8\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,均满足对植物无毒害作用的要求,各处理差异不显著($P>0.05$)。

GI值作为判断堆肥是否腐熟的重要指标,可以反映堆肥对植物的毒害作用程度。一般认为,GI $>70\%$ 时堆肥完全腐熟^[27]。如图3c所示,GI值总体呈波动上升趋势。堆肥结束时,CK、Cap和Mix处理的GI值分别为 46.82% 、 59.32% 和 64.91% ,与CK相比,Cap和Mix处理的GI值分别增加 12.50 、 18.09 个百分点。Cap覆盖层在堆肥高温期吸收大量冷凝水,而冷凝水中携带的有机酸和氨态氮等植物毒性物质使得堆体中植物毒性物质减少,从而促进堆体的腐熟和GI值的升高。在Mix处理中,混匀添加腐熟堆肥可促进堆体中的有机质降解和转化形成腐殖质,减少对植物的毒害作用,进而提高GI值。

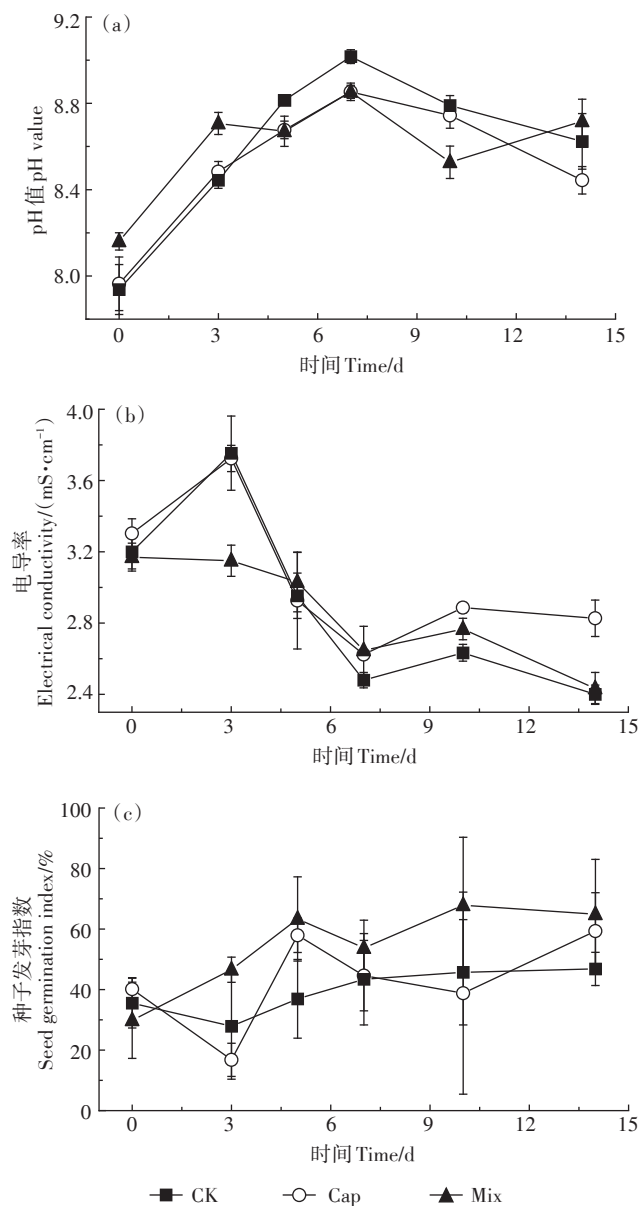


图3 不同回流方式的腐熟度指标变化

Figure 3 Changes in maturity indexes with different mature compost reflux methods during composting

2.4 含硫恶臭气体

堆肥体系中的局部厌氧环境和微生物代谢作用易导致含硫恶臭气体的产生。本文中检测了主要的8种含硫臭气,分别为 COS 、 CS_2 、 H_2S 、 MeSH 、 EtSH 、 Et_2S 、 Me_2S 和 Me_2SS ,其中 Me_2S 和 Me_2SS 是含硫气体排放的主要形式,与他人研究结果一致^[28-32]。从整个堆肥过程来看,含硫气体的峰值均出现在翻堆后,这是由于翻堆后物料混合均匀,微生物代谢活动增强,造成局部厌氧环境,导致含硫气体的排放,两次翻堆后 Me_2S 和 Me_2SS 的排放量分别占其总排放量的 50.31%

和60.59%。腐熟堆肥回流(Cap和Mix)对堆肥过程中(特别是翻堆后)含硫气体的减排具有显著效果($P<0.01$),因为添加腐熟堆肥后改善堆体的孔隙度,增大氧气的传递速率,有助于含硫气体的减排。

从 Me_2S 排放速率来看(图4a),CK处理的排放峰值出现在第4 d和第8 d,Cap和Mix处理的排放速率始终维持较低水平。CK处理的 Me_2S 累积硫元素排放量最高($25.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(图4b),Cap和Mix处理相较于CK可分别减排 Me_2S 75.42%和78.64%。CK处理中,以 Me_2S 形式损失的硫占初始物料TS含量的

0.51%,Cap和Mix处理分别占0.12%和0.10%(表3),表明腐熟堆肥回流处理可降低堆体中硫元素损失。Cap和Mix对 Me_2SS 有显著的减排效果($P<0.001$)。不同处理的 Me_2SS 的排放速率峰值均出现在第4 d和第8 d,且Cap和Mix处理在第4 d的减排效果明显,减排率达到50%以上(图4c)。CK、Cap和Mix处理的 Me_2SS 的累积硫元素排放量分别为243.38、156.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和106.66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图4d),Cap和Mix处理相较于CK处理分别减排35.58%和56.17%。CK、Cap、Mix 3个处理的 Me_2SS 排放造成的硫损失分别占初始

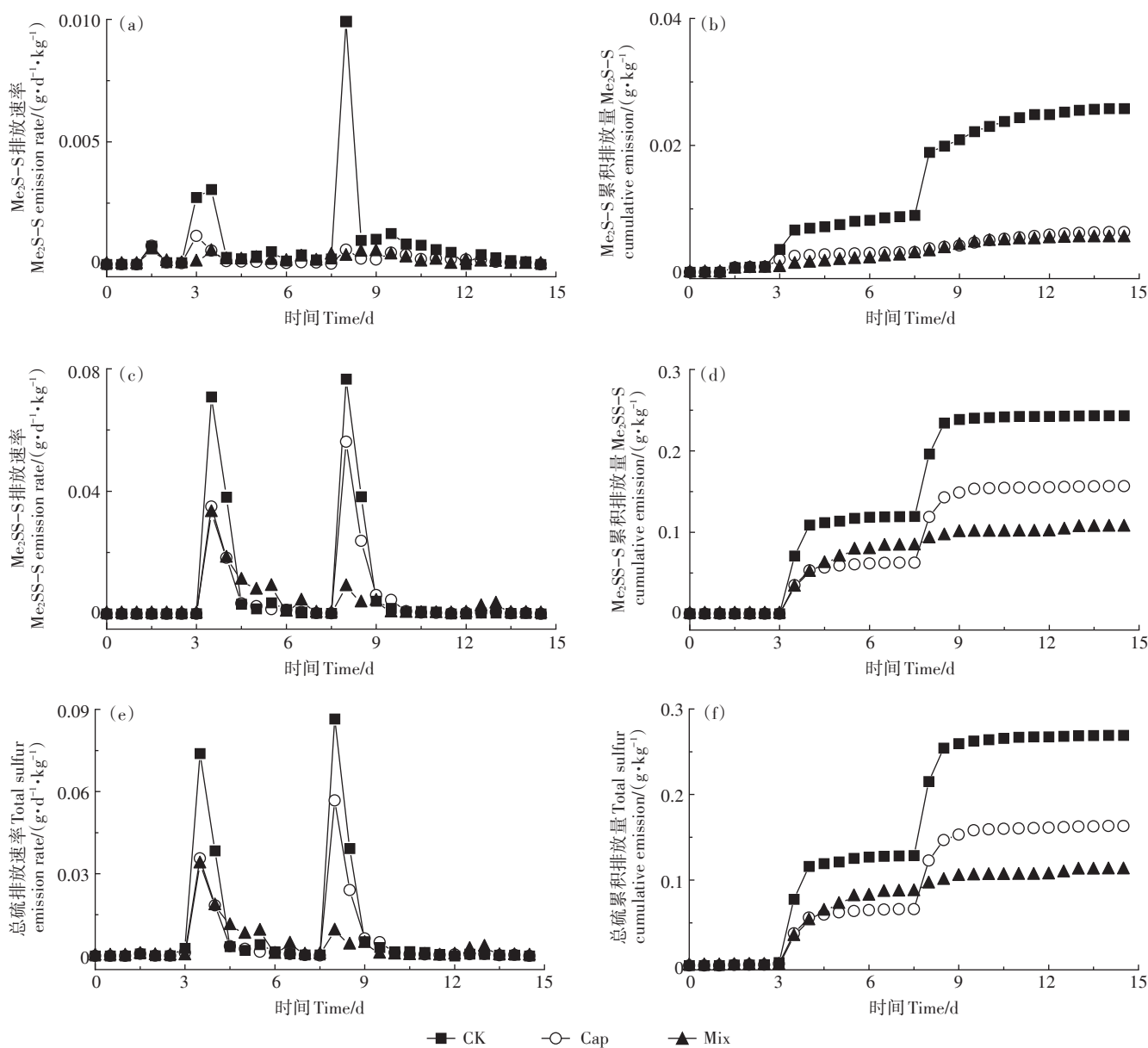


图4 腐熟堆肥不同回流方式的 Me_2S 、 Me_2SS 以及气体形式排放的硫元素含量及累积排放量

Figure 4 Concentration and cumulative loss of Me_2S , Me_2SS and sulfur from sulfur odors with different mature compost reflux methods during composting

物料S含量的4.77%、3.02%和1.98%(表3)。

CK、Cap和Mix处理以8种含硫气体形式排放造成的累积硫元素损失量分别为269.32、163.16 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和112.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图4f)。Cap和Mix处理相较于CK处理分别减少39.42%和58.31%的含硫气体排放,占初始物料硫含量的3.14%和2.08%,而CK处理下气体排放造成的硫损失占初始物料硫含量的5.28%(表3)。腐熟堆肥孔隙率较高,对挥发性气体可起到吸附作用,同时混匀添加腐熟堆肥能够为微生物生长代谢提供更充足的氧气,减少恶臭气体的产生^[33]。因此,覆盖和混匀添加腐熟堆肥对堆肥过程中的含硫气体减排均具有良好的效果。其中,混匀添加腐熟堆肥效果优于腐熟堆肥覆盖。

2.5 理化性质与含硫臭气的相关性

堆肥物料的理化性质直接影响气体的排放。如图5所示,CK处理 Me_2S 和总硫臭气的排放与堆体中的氧气含量呈显著负相关($r=-0.82, P<0.05$; $r=-0.87$,

$P<0.05$), Cap处理 Me_2S 排放与氧气含量同样具有显著负相关($r=-0.91, P<0.05$)。含硫臭气的排放峰值在高温期出现,高温期堆体微生物代谢活动增强,氧气含量降低,导致含硫臭气迅速排放。Mix处理中含硫气体的排放与堆肥理化性质没有显著的相关性,可能是由于添加腐熟堆肥后,其较低的含水率以及较高的孔隙度有利于氧气扩散,同时腐熟堆肥自身携带的大量土著微生物可直接降解臭气分子。因此,腐熟堆肥与堆肥原料混匀处理可有效改善堆体孔隙结构,增大氧气传递效率,减少局部厌氧环境,阻止含硫臭气的产生。

3 结论

(1)腐熟堆肥回流有利于增强微生物代谢活动,加速有机质的降解,提高堆体温度。与对照处理相比,腐熟堆肥覆盖处理使总氮增加0.10个百分点,混匀处理总氮和总硫分别增加0.42、0.08个百分点,腐熟堆肥回流提高了堆肥中营养元素氮和硫的含量。

(2)腐熟堆肥不同回流方式均可满足堆肥产品无害化要求,同时可以提高堆肥腐熟度,经过14 d堆肥,堆体pH和EC值达到腐熟标准。与CK相比,腐熟堆肥覆盖与混匀回流可分别提高种子发芽指数12.50、18.09个百分点。

(3)含硫恶臭气体排放集中在堆肥前10 d,且翻堆后排放量显著增加, Me_2S 和 Me_2SS 为主要的含硫臭气,占总含硫气体排放量的90%以上。腐熟堆肥覆盖对 Me_2S 和 Me_2SS 的减排率分别为75.42%和35.58%,混匀处理对这两种臭气的减排率分别增加至78.64%和56.17%,腐熟堆肥混匀回流方式控制臭气效果更佳。

表3 不同回流方式的硫元素平衡分析(%)

Table 3 The total sulfur content balance in different reflux modes (%)

项目 Item	CK	Cap	Mix
初始 Initial content	0.51	0.52	0.54
结束 Final content	0.59	0.59	0.67
$\text{Me}_2\text{SS}-\text{S}$ 损失 $\text{Me}_2\text{SS}-\text{S}$ loss ^b	4.77	3.02	1.98
$\text{Me}_2\text{S}-\text{S}$ 损失 Me_2S loss ^c	0.51	0.12	0.10
总硫损失 TS loss ^a	5.28	3.14	2.08

注:a为硫损失占初始总硫的百分比,b为 $\text{Me}_2\text{SS}-\text{S}$ 损失占初始总硫百分比,c为 $\text{Me}_2\text{S}-\text{S}$ 损失占初始总硫百分比。

Note: a is the percentage of sulfur loss in the initial total sulfur, b is the percentage of $\text{Me}_2\text{SS}-\text{S}$ loss in the initial total sulfur, and c is the percentage of $\text{Me}_2\text{S}-\text{S}$ loss in the initial total sulfur.

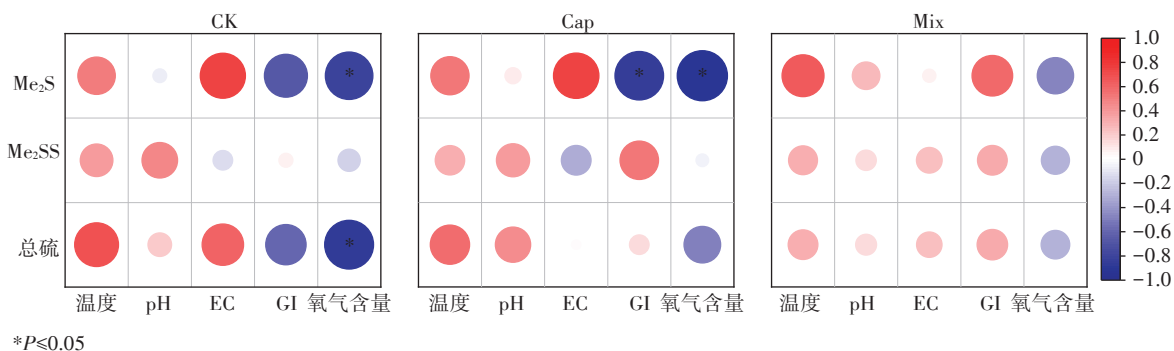


图5 不同回流方式的含硫臭气排放与理化性质的相关性

Figure 5 Correlation between sulfur order emission and physicochemical properties with different mature compost reflux methods during composting

参考文献:

- [1] D'IMPORZANO G, CRIUELLI F, ADANI F. Biological compost stability influences odor molecules production measured by electronic nose during food-waste high-rate composting[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 402(2/3):278-284.
- [2] GUO R, LI G, TAO J, et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 112(58):171-178.
- [3] SCHIAVON M, MARTINI L M, CORRA C, et al. Characterisation of volatile organic compounds (VOCs) released by the composting of different waste matrices[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231:845-853.
- [4] DRENNAN M F, DISTEFANO T D. Characterization of the curing process from high-solids anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(2):537-544.
- [5] 臧冰, 李恕艳, 李国学. 风干预处理对堆肥腐熟度及臭气排放量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2):247-253. ZANG B, LI S Y, LI G X. Effects of air-dry pretreatment on maturity and odors during composting of pig manure and corn stalks[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):247-253.
- [6] SHAO L M, ZHANG C Y, WU D, et al. Effects of bulking agent addition on odorous compounds emissions during composting of OFMSW[J]. *Waste Management*, 2014, 34(8):1381-1390.
- [7] 张红玉, 路鹏, 李国学, 等. 秸秆对厨余垃圾堆肥臭气和渗滤液减排的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9):248-254. ZHANG H Y, LU P, LI G X, et al. Effect of corn stalks addition on odors and leachate reduction during kitchen waste composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9):248-254.
- [8] LIU T, AWASTHI M K, AWASTHI S K, et al. Influence of fine coal gasification slag on greenhouse gases emission and volatile fatty acids during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 316:123915.
- [9] 李赞, 袁京, 李国学, 等. 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, et al. 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.
- [10] 徐成, 刘国涛, 王政, 等. 添加腐熟堆肥对厨余垃圾堆肥腐殖质形成的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(8):122-127. XU C, LIU G T, WANG Z, et al. Effect of matured compost addition on the formation of humus in kitchen waste composting[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(8):122-127.
- [11] 宋修超, 郭德杰, 马艳, 等. 腐熟堆肥回流对中药渣好氧堆肥进程及堆肥品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12):2844-2851. SONG X C, GUO D J, MA Y, et al. Matured compost recycling enhances the efficiency of composting and improves the quality of end-products during composting of herb residues[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2844-2851.
- [12] 曹云, 常志州, 黄红英, 等. 添加腐熟猪粪对猪粪好氧堆肥效果的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21):220-226. CAO Y, CHANG Z Z, HUANG H Y, et al. Effect of compost inoculation on pig manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21):220-226.
- [13] 江滔, 李国学, 唐琼, 等. 腐熟堆肥筛上粗颗粒对堆肥化过程中温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7):1363-1370. JIANG T, LI G X, TANG Q, et al. Effect of adding coarse materials from matured compost on greenhouse gas emissions from organic wastes during composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7):1363-1370.
- [14] LUO W H, YUAN J, LUO Y M, et al. Effects of mixing and covering with mature compost on gaseous emissions during composting[J]. *Chemosphere*, 2014, 117:14-19.
- [15] HOOD M C, SHAH S B, KOLAR P, et al. Biofiltration of ammonia and GHGs from swine gestation barn pit exhaust[J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58(3):771-782.
- [16] LEE S J, CHANG D I, CHANG H H. Effect of biofilter made of composted pine tree bark and perils on reducing odor from pig house[J]. *Journal of Taiwan Livestock Research*, 2006, 47(1):33-42.
- [17] YUAN J, DU L, LI S, et al. Use of mature compost as filter media and the effect of packing depth on hydrogen sulfide removal from composting exhaust gases by biofiltration[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(4):3762-3770.
- [18] 王彩云, 吴景贵, 何瑞成, 等. 半分解有机物料覆盖对鸡粪中 NH_3 及 H_2S 释放的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(4):457-464. WANG C Y, WU J G, HE R C, et al. Effects of semi-decomposed organic materials covering on release of ammonia and hydrogen sulfide in chicken manure[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(4):457-464.
- [19] 王彩云, 吴景贵. 自然有机物料覆盖对鸡粪中 NH_3 及 H_2S 释放的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(10):198-205. WANG C Y, WU J G. Effects of natural organic materials covering on release of NH_3 and H_2S in chicken manure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(10):198-205.
- [20] 马若男, 李丹阳, 仝传仁, 等. 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, et al. 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.
- [21] ZANG B, LI S Y, MICHEL F, et al. Effects of mix ratio, moisture content and aeration rate on sulfur odor emissions during pig manure composting[J]. *Waste Management*, 2016, 56:498-505.
- [22] KATO K, MIURA N. Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(9):3372-3380.
- [23] WAN L B, WANG X T, CONG C, et al. Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301:122730.
- [24] YUAN J, LI Y, ZHANG H, et al. Effects of adding bulking agents on the biodrying of kitchen waste and the odor emissions produced[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 67(5):344.
- [25] 张红玉, 张玉冬, 顾军, 等. 调理剂对厨余垃圾堆肥中 H_2S 和 NH_3 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11):3379-3386. ZHANG

- H Y, ZHANG Y D, GU J, et al. Effect of amendments on H_2S and NH_3 emissions during kitchen waste composting[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11):3379–3386.
- [26] LI S, LI J, YUAN J, et al. The influences of inoculants from municipal sludge and solid waste on compost stability, maturity and enzyme activities during chicken manure composting[J]. *Environmental Technology*, 2017, 38(13/14):1770–1778.
- [27] 蔡娟, 张应虎, 张昌勇, 等. 牛粪堆肥过程中的物质变化及腐熟度评价[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(10):72–75. CAI J, ZHANG Y H, ZHANG C Y, et al. Material change and rotten degree evaluation in cattle dung composting process[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2018, 46(10):72–75.
- [28] 王新娟, 骆晓松, 开心平, 等. 堆肥过程中产生的尾气[J]. 辽宁化工, 2007, 36(12):819–821. WANG X J, LUO X S, KAI X P, et al. The odours from the compost[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2007, 36(12):819–821.
- [29] 王玉军, 邢志贤, 张秀芳, 等. 便携式气相色谱-质谱联用仪现场测定畜禽粪便堆肥中挥发性有机物[J]. 分析化学, 2012, 40(6):899–903. WANG Y J, XING Z X, ZHANG X F, et al. On-site detection of volatile organic compounds during composting treatment of live-stock and poultry manure by GC-MS[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2012, 40(6):899–903.
- [30] ROSENFELD P, GREY M, SELLEW P. Olfactory response to mushroom composting emissions as a function of chemical concentration[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(3):760–767.
- [31] 张静, 於林中, 何晶晶, 等. 不同植物废物对垃圾堆肥过程VSCs释放的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(1):68–72. ZHANG J, WU L Z, HE P J, et al. Effect of green wastes mixing on VSCs emission during MSW composting[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(1):68–72.
- [32] 何晶晶, 曾阳, 唐家富, 等. 城市生活垃圾初期降解挥发性有机物释放特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(6):854–858, 869. HE P J, ZENG Y, TANG J F, et al. Emission of volatile organic compounds during initial decomposition phase of municipal solid waste[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2010, 38(6):854–858, 869.
- [33] BLANES-VIDAL V, HANSEN M. N, SOUSA P. Reduction of odor and odorant emissions from slurry stores by means of straw covers[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(4):1518–1527.