

廖友郡, 孟宇翔, 任竹青. 超声雾化生物反应器在堆肥氨气处理中的应用研究[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(4): 96-104.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.04.013

超声雾化生物反应器在堆肥氨气处理中的应用研究

廖友郡¹, 孟宇翔², 任竹青¹

1. 华中农业大学动物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 湖北省松滋市农业农村局, 松滋 434200

摘要 为提高生物反应器对堆肥臭气的去除效果, 设计了一种新型超声雾化生物反应器, 研究了该反应器在不同工艺条件下对模拟臭气的处理效果, 再以猪粪和木屑为原材料进行堆肥试验, 探究该反应器对实际堆肥过程中产生的臭气去除效果。结果显示, 超声波空化效应能提高反应器对氨气的吸收率, 超声雾化比传统喷淋模式去除氨气的效率提高10%左右; 为解决体系内高氨氮的问题, 将活性污泥进行耐高氨氮驯化后在反应器中挂膜, 发现体系内微生物降解氨氮的能力明显提升; 通过正交试验确定反应器去除氨气的最佳工艺条件。堆肥试验表明, 氨气释放与堆肥温度具有高度一致性, 且在堆肥第5天达到峰值(76.3 mg/m³), 同时, 猪粪堆肥中氨气释放与pH、铵态氮和硝态氮的浓度有关; 反应器对堆肥氨气的去除率高达80.6%; 对其他时段的氨气去除率平均保持在90%左右, 且反应器出气口的氨气质量浓度小于5 mg/m³, 达到相关排放标准。结果表明, 超声雾化生物反应器对于堆肥产生的氨气能起到良好的去除效果。

关键词 氨气; 生物反应器; 超声雾化; 覆膜堆肥; 猪粪堆肥; 臭气去除

中图分类号 S141.4; X713 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)04-0096-09

堆肥是畜禽固体粪便资源化利用的主要途径, 不仅能实现养殖废弃物消纳, 还能种植业提供环境友好的有机肥^[1]。但是, 在堆肥过程中大量氨气释放到环境中, 严重影响了堆肥厂周围的空气质量, 同时也导致成品有机肥的肥效降低^[2]。因此, 寻找一种既经济又环保的方法来处理堆肥产生的恶臭气体已成为政府和社会共同面临的重大问题^[3]。

目前, 针对恶臭气体的去除方式多样, 但每种除臭方式均存在一定的局限性, 如活性炭、沸石吸附和高能光电分解等物理方法成本过高; 采用燃烧、氧化等化学方法容易产生二次污染^[4]; 生物除臭方式成本较低、效果较好, 主要是通过向堆肥堆体中添加外源性微生物进行原位除臭或利用生物反应器中的微生物对臭气进行降解以达到异位除臭的目的。但由于堆肥臭气主要在高温期释放, 堆体温度过高, 在堆肥中投加除臭菌剂并不能达到理想效果^[5]。因此, 堆肥生物除臭策略逐渐从原位除臭转移到异位除臭, 生物反应器常应用于堆肥臭气的异位处理^[6]。

生物滴滤塔作为有机肥厂常用的生物处理方式, 具有运行成本低、处理效果较好、无二次污染等

优点, 但其喷淋系统运行过程中, 存在循环水与氨气的接触不充分等问题。超声处理的空化效应使液体产生微泡, 而这些微泡在极短的时间生长和崩塌, 在崩塌的临界点产生5 000 K高温和100 MPa的压强, 过程中会产生大量活性自由基, 可与氨气发生化学反应, 达到强化吸收的效果^[7]。

本研究将超声雾化装置应用于生物反应器中, 利用超声雾化后的水吸收氨气, 将物理法和生物法联用, 以期寻找一种既经济又环保的方法来处理堆肥产生的恶臭气体, 并为今后生物反应器除臭模式的发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 超声雾化生物反应器的设计

传统喷淋:传统的生物反应器是通过喷淋的方式将水或者营养液洒在填料上, 在本试验中将功率40 W、流量40 L/min的水泵与喷嘴相连组成的喷淋系统作为对照, 其所喷洒的水滴粒径为0.3~0.5 mm。

超声雾化:本试验采用工业超声雾化器, 通过直径5 cm的导雾管将气体从雾化器导入生物除臭反应

收稿日期: 2022-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0500200)

廖友郡, E-mail: 17519499535@163.com

通信作者: 任竹青, E-mail: renzq@mail.hzau.edu.cn

器中,该装置可通过调节功率来控制雾化速率。设计的生物反应器与传统反应器相比多了一层雾化吸收区。超声雾化产生的雾滴粒径在1~5 μm,且自由溢散在反应器内,相比传统喷淋方式,比表面积增大1 000倍以上,极大地增加了氨气与水接触的机会,能更高效地完成气液交换,促进水对氨气的吸收。

生物除臭反应器为半径10 cm、高度50 cm的圆柱体,总体积约12 L,分为上下部分,上部分为雾化吸收区,下部分为生物填料区。所选用材质为亚克力材料,其透光性与化学稳定性都较好。采用无机材料和有机材料结合作为反应器的填料,无机填料为聚氨酯海绵和陶瓷颗粒,其具有疏松、多孔、比表面积大等优点,适合微生物在其表面附着生长。生物填料为活性污泥,其含有大量的微生物菌群,对成分复杂的污水具有良好的处理效果,经过驯化后的活性污泥对氨氮的处理效果显著提升^[8]。模拟臭气为高纯度氨气(99.9%)。除臭系统示意图如图1所示:

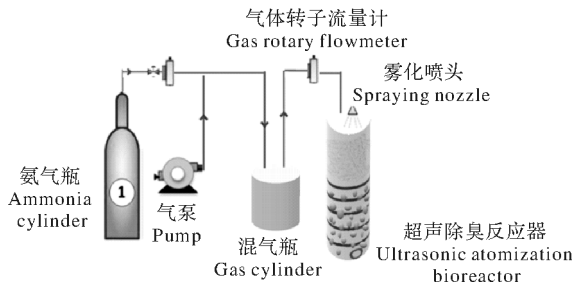


图1 除臭系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of deodorant system

1.2 超声处理水对氨气吸收率的影响

为探究超声处理对氨气去除率的影响,设计如下试验:调节氨气瓶的减压阀和转子流量计产生100 mg/m³的氨气流,将10 mL稀硫酸吸收液(0.01 mol/L)、10 mL超声处理后的蒸馏水、10 mL普通蒸馏水分别装入气泡吸收管,用采气泵吸收氨气流。参照GB/T 14668—1993《空气质量 氨的测定 纳氏试剂比色法》检测环境中氨气质量浓度,以0.01 mol/L稀硫酸作为标准吸收液,本试验假设0.01 mol/L稀硫酸在气泡吸收管中能对氨气达到全吸收。吸收液氨氮质量浓度越高,说明对氨气的吸收效果越好,通过比较3种溶液吸收氨气后的氨氮质量浓度,测定其对氨气吸收能力的差别。

1.3 耐高氨氮活性污泥的驯化和挂膜

为解决反应器连续运行导致的氨氮累积问题,选用活性污泥进行微生物挂膜,活性污泥取自华中

农业大学精品猪场的废水处理设施——兼性塘,采用好氧曝气的方式将其进行驯化,曝气量0.3 L/min,24 h后停止曝气使活性污泥静置0.5 h,取上清液测氨氮浓度和pH值,留下底层沉淀的活性污泥,再重复加入高氨氮废水进行驯化。

驯化活性污泥的模拟废水以葡萄糖和乙酸钠作为有机碳源,氯化铵作为氨氮源,磷酸二氢钾作为磷源,碳酸氢钠作为无机碳源,并加入1 mg/L的微量元素。模拟废水中COD含量为500 mg/L,NH₄⁺-N含量分别控制在400、600、800 mg/L,PO₄³⁻-P含量为10 mg/L,MgSO₄·7H₂O含量为20 mg/L(以Mg²⁺计),NaHCO₃含量为50 mg/L(以CO₃²⁻计),将模拟废水pH值控制在6~8。以400、600、800 mg/L氨氮的模拟废水为梯度分别驯化15 d,经过45 d的耐高氨氮驯化后,再将其挂膜在反应器填料中。进水氨氮400 mg/L,每24 h换水1次,连续驯化15 d。

1.4 生物反应器的氮转化分析

为探究生物反应器去除NH₃的机制,在生物反应器连续运行15 d的过程中,分别测定了第1、4、7、10、13和16天的反应器内渗滤液的氨氮、硝态氮、亚硝态氮和总氮的含量,分析氮转化的机制。

1.5 生物反应器工艺优化正交试验设计

以待处理臭气的氨气质量浓度(A)、气体停留时间(B)、雾化速率(C)为考察因素,NH₃去除率为评价指标,设计了三因素三水平的正交试验,探究这3个因素在不同水平条件下对反应器性能的影响。

氨气质量浓度通过减压阀和转子流量计控制,将纯氨气与不同比例的空气混合;调节工业雾化器功率控制雾化速率,小、中和大3个档位分别对应雾化速率分别为0.5、1.0和1.5 L/h;气体停留时间由空气泵和转子流量计控制。将各因素的水平调节好,等系统稳定运行3 h后,分别测定反应器进气口和出气口的氨气质量浓度,每组试验重复3次。

表1 正交试验设计			
Table 1 Design of orthogonal experiment			
水平 Level	A	B	C
	氨气质量浓度/ (mg/m ³) Ammonia concentration	气体停留时间/s Gas residence time	雾化速率/(L/h) Atomization of water consumption
1	50	15	0.5
2	100	20	1.0
3	150	30	1.5

1.6 堆肥试验

堆肥试验在华中农业大学生猪科教基地-畜牧环境工程实验室进行,采用保温效果较好的ESP泡沫箱模拟槽式堆肥反应装置,堆肥装置高280 mm、长540 mm、宽400 mm,容积约60 L。泡沫箱的底部侧面采用空气泵进行曝气,将定时开关和转子流量计与空气泵串联,定时开关控制曝气时间,转子流量计控制曝气量。在堆肥装置的顶部覆上PE塑料膜,防止堆肥产生的臭气溢散,在塑料膜上开孔接入导气管,导气管另一端连接超声雾化生物反应器的进气口,堆肥产生的臭气经过导气管进入反应器,先被上层雾化区吸收,然后再被下层生物填料区进行降解,最后通过出气口排出(图2)。

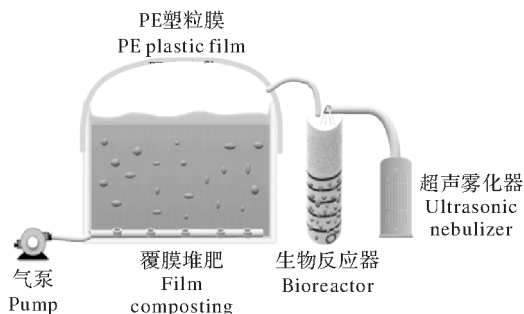


图2 覆膜堆肥除臭装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deodorant device for film composting

新鲜猪粪中C/N为18.2,含水率为74.6%,而锯末中C/N为356,含水率为3.1%。猪粪含水量、含氮量较高,而锯末含碳量高,所以使用锯末作为堆肥的调理剂。将猪粪与锯末以质量比5:1混合,初始混合物料的C/N约为23,水分为60%~65%。

堆肥装置中加入体积为60 L、质量约22 kg的初始堆肥物料;堆肥的第5、10、20天分别进行人工翻堆,以保证堆肥的均匀性;采用气泵进行静态间歇式通风以保证堆肥充分好氧发酵,每1 h通风10 min,通风速率为2.4 L/min^[9];分别在第1、3、5、7、10、15、20、32天各采集3个平行样,每次分别采集堆体4个角落以及中间的样品并充分混合后,再测定相应指标;样品用密封袋封存后在4℃冰箱冷藏,一部分样品经自然风干后过孔径0.15 mm筛网,备用;每2 d测定堆肥释放的氨气质量浓度,整个堆肥过程持续32 d。

1.7 试验分析方法

采用堆肥专用电子温度计记录10:00和16:00堆体和外界环境温度。称取5 g堆肥样品放入称量瓶,置于烘箱内105℃干燥24 h,根据前后样品质量

差值计算含水率。称取5 g新鲜堆肥样品,与蒸馏水按干质量:体积=1:10(g/mL)混合,振荡器振荡1 h,静置30 min后取上清液,用pH计测定pH值。

硝态氮含量测定采用紫外-可见分光光度计法;铵态氮采用纳氏试剂比色法;水质中总氮的测定采用HJ 636—2012《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》;氨气质量浓度测定参照HG 533—2009《环境空气和废气氨的测定纳氏试剂分光光度法》;种子发芽指数(GI)测定参照GB/T 23486—2009《城镇污水处理厂污泥处置》。

1.8 数据处理和分析

利用IBM SPSS Statistics 20设计正交试验分组,通过方差齐性检验、独立样本 t 检验的 F 值和 t 值、ANOVA单因素分析进行试验数据显著性差异分析;统计各组数据的“平均值±标准差”,使用Graphpad Prism软件绘制曲线。

2 结果与分析

2.1 超声雾化技术强化吸收氨气的效果

以稀硫酸吸收液作为全吸收溶液,对比经超声处理后的自来水和未经超声处理的自来水对于氨气的吸收效果,结果见表2。可见经超声处理后,自来水对氨气的吸收效果明显增强。

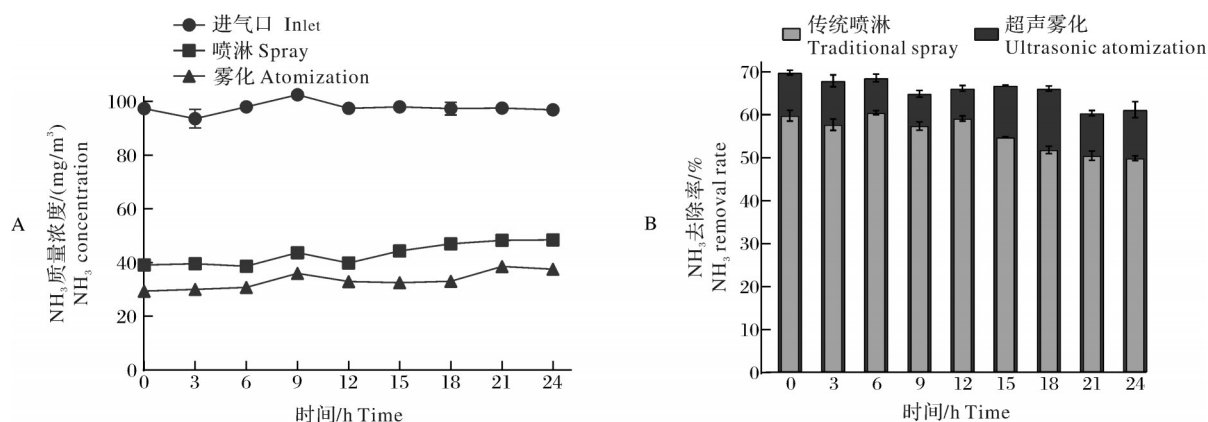
表2 不同溶液对氨气的吸收

Table 2 Absorption of ammonia by different solutions

指标 Indicators	稀硫酸吸收液 Dilute sulfuric acid absorption solution	超声处理后的自来水 Tap water after sonication	自来水 Tap water
氨氮质量浓度/ (mg/L) Ammonia nitrogen concentration	38.02	23.84	20.59
吸收率/% Absorption rate	100.00	62.6	54.2

如图3A所示,对比超声雾化和传统喷淋2种给水方式,探讨其对氨气的吸收效果,以连续24 h为1个周期,每3 h测量1次进、出口氨气质量浓度,其他参数保持一致,反应器出口氨气质量浓度越低,说明对氨气的去除效果越好。

如图3B所示,反应器处理高浓度氨气时,传统喷淋方式对氨气的去除率在55%~60%,超声雾化对氨气的去除率在65%~70%,说明超声雾化方式比传统喷淋在氨气吸收方面更有优势。

图3 雾化和喷淋对 NH_3 去除能力(A)和去除率(B)的比较Fig.3 Comparison of NH_3 removal capacity(A) and removal rate(B) of atomization and spraying

超声雾化的去除率从初始的70%下降到24 h后的62%,传统喷淋的去除率从60%下降到50%,进一步检测除臭反应器内渗滤液的氨氮质量浓度,结果表明,24 h内渗滤液的氨氮质量浓度从138 mg/L 上升到890 mg/L ,表明在反应器运行过程中氨氮逐渐累积,而氨气在水中的溶解速率与水中的氨氮质量浓度相关,体系内氨氮质量浓度越高,氨气去除效率越低,为使反应器能高效稳定运行,需进一步解决反应器连续运行导致的氨氮累积问题。

2.2 生物反应器挂膜及氮转化机制

如图4所示,第1天的出水氨氮质量浓度为295 mg/L ,氨氮去除率为26.25%;第15天的出水氨氮质量浓度为142 mg/L ,去除率为60.5%,pH随着水中的氨氮质量浓度增高而上升,两者之间具有一致性;第16天进水氨氮质量浓度增高到600 mg/L ,再驯化15 d,氨氮的去除率从41%提高到59%,且逐渐趋于稳定。第31天氨氮质量浓度为800 mg/L ,接近所测渗滤液的氨氮质量浓度最大值,24 h时去除率为62.5%;48 h时出水氨氮质量浓度为141 mg/L ,去除率为82.4%。

将驯化的耐高氨氮活性污泥加入除臭反应器,连续运行15 d,观察微生物的挂膜情况以及挂膜后反应器对氨气的去除效果。如图5所示,在通入氨气质量浓度为50 mg/m^3 、进气量为48 L/min 的基本参数下,第1天出口氨气质量浓度为7.2 mg/m^3 ,第3天为8.8 mg/m^3 ,第15天为4.8 mg/m^3 ,生物反应器整体对氨气的去除率也从起始82%逐渐达到90%,整体而言,前2 d氨气去除率下降,随后缓慢上升。可能是前期除了超声雾化吸收作用,填料本身对氨气也有吸附作用,但填料吸收氨气的能力在2 d内达到饱和;反应器整体性能稳定上升,原因是活性污泥挂

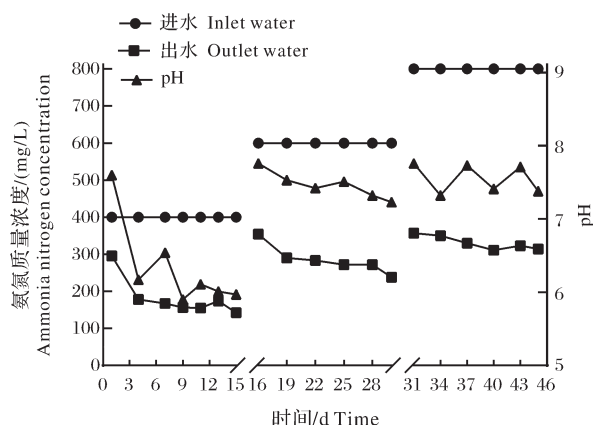


图4 45 d高氨氮驯化效果

Fig. 4 45 d acclimation effect of high ammonia nitrogen

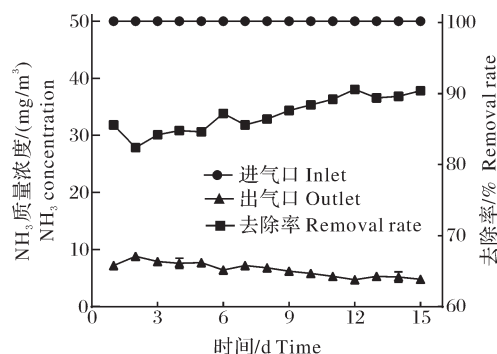


图5 挂膜运行15 d氨气去除率变化

Fig. 5 The variation curve of NH_3 removal rate after 15 days of membrane hanging operation

膜需一段时间,以硝化细菌为代表的微生物迅速繁殖,整个体系的硝化活性也随之上升,对反应器内的氨氮进行降解,避免了高氨氮累积导致的吸收阈值。

如图6所示,反应器内渗滤液的铵态氮含量在前6 d上升,由于氨气被水吸收后转化为铵态氮,在前期出现累积,经过6 d后达到峰值水平;从第7天开始,铵态氮含量逐渐下降,说明微生物已经逐渐适应反

应器内环境,大量繁殖并利用铵态氮产生能量进行生命活动。硝态氮含量在连续 15 d 内稳定上升,可能是驯化后的活性污泥内有大量的氮代谢菌群,它们利用铵态氮氧化为硝态氮产生能量进行生命活动,随着氮代谢菌群的定植,整个体系的硝化反应增强,产生的硝态氮含量逐渐上升,当硝化细菌群体数量达到上限时,产生的硝态氮含量逐渐稳定。亚硝态氮属于硝化反应的中间产物,产生之后迅速转化为其他形态,所以整体含量不高。总氮含量前中期上升较快,后期较稳定。试验连续进行 15 d,固定每天通入反应器内的氨气量,渗滤液的总氮含量反映了反应器对氮元素的整体吸收水平。前期微生物菌群大量繁殖,以氮为营养源的细菌将氨气固定同化,所以渗滤液总氮含量不断上升,后期微生物群落达到饱和进入稳定期,含量逐渐趋于稳定。

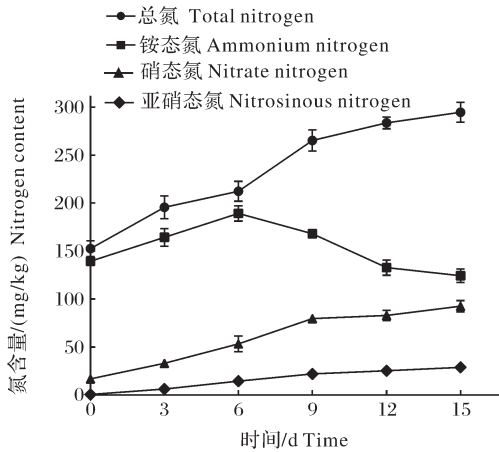


图 6 不同时期渗滤液各形态氮转化曲线
Fig. 6 N transformation curves of leachate in different periods

2.3 正交优化试验

正交优化试验结果如表 3 所示。本次试验的最优水平组合为氨气质量浓度 50 mg/m³、气体停留时间 30 s 和雾化速率 1.5 L/h。氨气的进气含量越低,反应器的去除效率越高,说明反应器对氨气的去除有阈值上限,当超过它的最大阈值后,除臭效果明显降低。

影响因素的主次顺序为:B>A>C,即气体停留时间对去除率的影响程度最大,氨气质量浓度次之,雾化浓度最小。说明雾化吸收氨气需要一定的时间,如果气体流量太大,就会超过反应器对氨气的负载上限,导致去除效果降低;而雾化浓度的影响程度最小,可能是因为在一定密闭的空间内,雾滴达到一

定的浓度时,雾滴之间便会相互碰撞形成大雾滴,而雾滴变大后比表面积下降,反而影响了雾滴对氨气的吸收。

表 3 正交试验结果

Table 3 Result of orthogonal test

序号 No.	A	B	C	氨气去除率/% Removal rate of ammonia
1	1	1	1	66.2±1.4
2	1	2	2	70.8±1.1
3	1	3	3	83.2±0.6
4	2	1	2	59.0±0.4
5	2	2	3	75.6±0.7
6	2	3	1	65.8±0.6
7	3	1	3	56.9±0.6
8	3	2	1	58.2±0.4
9	3	3	2	70.7±0.6
极差 R	34.4	37.6	25.5	
优组合 Optimal combination	A ₁	B ₃	C ₃	

2.4 堆肥的氨气释放与去除

前期试验结果表明,超声雾化生物反应器对实验室内模拟的高浓度氨气具有较好的去除效果,为进一步验证本生物反应器在实际生产中的应用前景,进行堆肥试验。如图 7 所示,堆肥在第 3 天达到 50℃以上,且高温期持续了 5 d 左右;在第 5、10、20 天分别进行人工翻堆,翻堆后温度由于热量的损失而降低。在堆肥前中期,温度曲线与氨气质量浓度曲线具有高度的一致性,堆肥初始阶段中有机质分解放热的同时产生了大量的铵态氮,并伴随着高温以氨气的形式释放,且二者相继达到峰值;随后,高温导致微生物活性降低,温度和氨气质量浓度也随之下降;堆肥后期可利用有机质含量越来越少,温度也随之降低,但高于环境温度,说明微生物活动并没有停止,此时主要是针对纤维素和木质素等难降解的糖类,氨气的释放几乎停止。

堆肥可以在很宽的 pH(5~9)范围下进行^[10],如果在起始阶段 pH 和温度较高,就会引起氮元素以氨气的形式挥发,堆体 pH 呈弱碱性,且在堆肥前期缓慢升高,后期逐渐下降然后趋于稳定。在堆肥中后期,难降解的物质降解后产生有机酸;而且铵根离子以氨气的形式释放,这些因素共同导致了 pH 下降。

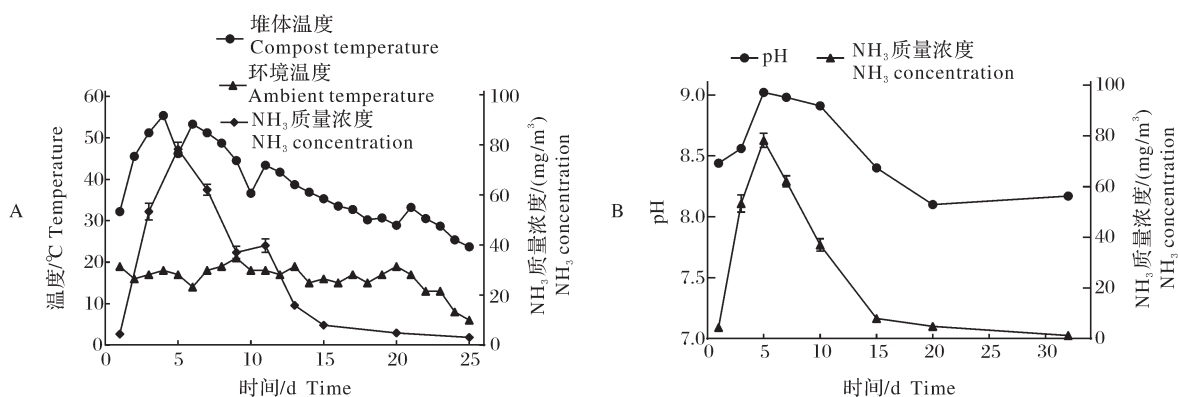


图7 堆肥过程的温度(A)和pH(B)变化

Fig.7 The variation curve of temperature (A) and pH (B) in composting process

如图8所示,在堆肥初始阶段,铵态氮(NH_4^+-N)含量迅速上升到峰值(2 000 mg/kg),堆肥在进入高温期后,猪粪中大量易降解的蛋白质被微生物矿化分解,而高温又抑制硝化细菌的活性,所以造成铵态氮迅速累积,随后含量迅速下降,并在第15天后维持在一个较低的水平,可能原因是此阶段铵态氮以氨

气的形式释放出去,而且温度逐渐下降,硝化细菌活性逐渐增强,铵态氮转化为硝态氮。硝态氮(NO_3^--N)是植物可利用的氮元素形态,成品肥中硝态氮的含量决定了作为商品肥的氮肥价值,堆肥初始阶段 NO_3^--N 含量很低,高温期之后 NO_3^--N 的含量开始持续稳定上升,并在腐熟期达到一个较高的水平。

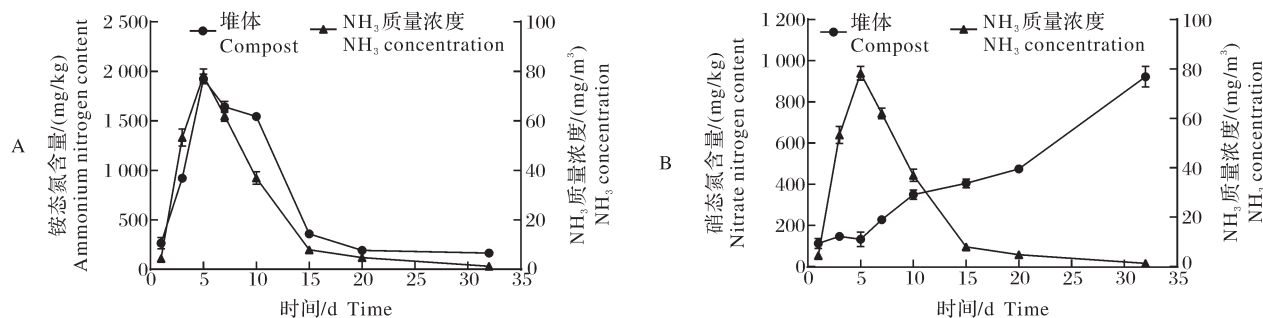


图8 堆肥过程中的铵态氮(A)和硝态氮(B)含量的变化

Fig.8 The variation curve of NH_4^+-N (A) and NO_3^--N (B) content in composting process

综上可知,堆肥的温度、pH、铵态氮和硝态氮浓度反映了堆肥的N元素转化程度,而这些因素共同决定了堆肥氨气的释放。

本试验中猪粪堆肥生成的气体由于受PE膜的束缚,只能通过导气管进入超声雾化生物反应器,臭气被反应器处理后残余气体从出口离开。因此,本试验选择了2个氨气质量浓度采样点:一是进气浓度,此点在猪粪堆肥的上表面5 cm处,PE塑料膜覆盖的下方;二是反应器的气体出口处浓度。比较2个采样点之间NH₃含量差,可以明确反应器对NH₃的去除效果。

如图9所示,第1天堆肥表面的氨气质量浓度仅为5.1 mg/m³,之后4 d内氨气质量浓度呈直线上升,并在堆肥第5天达到峰值76.3 mg/m³。堆肥初始阶

段,堆体温度和土著微生物活性都较低,但易降解且富含能量的有机质充足(如可溶性糖和蛋白质),真菌、放线菌在适宜条件下短时间内大量繁殖,并对有机质进行分解。温度由于微生物活动而不断升高,不稳定的铵态氮在高温下以NH₃的形式释放出去,并在第5天的时候达到顶峰。氨气质量浓度在达到高峰期后又迅速下降,主要是易降解的有机质在堆肥前期被微生物耗尽^[11],矿化作用减弱,NH₃的释放量也随之减小,在堆肥第10天,由于翻堆作用使物料重新分布,前期没有与微生物接触而未被利用的有机质被继续分解,导致氨气释放出现小回升。堆肥持续15 d后进入陈化阶段,此阶段主要是对难降解性物质(如木质素、纤维素、几丁质等)进行降解^[12],此时氨气质量浓度在10 mg/m³以下且持续稳定下

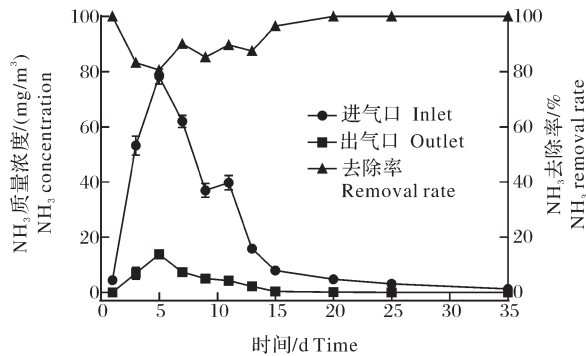


图9 堆肥过程中的氨气质量浓度和去除率的变化

Fig.9 The variation curve of ammonia concentration and removal rate in composting process

降,到最后阶段已检测不出氨气的释放。

经过反应器处理后的氨气质量浓度大幅度降低,根据GB 14554—1993《恶臭污染物排放标准》中对于恶臭污染物厂界标准值的规定,堆肥场所属于标准中所规定的三类区,其排放的氨气质量浓度不得超过 5.0 mg/m^3 ,在整个堆肥周期中,第3、5、7天的氨气质量浓度分别为 7.2 、 14.8 和 8.1 mg/m^3 ,其他测定时间点的氨气质量浓度均小于 5 mg/m^3 ,达到排放标准。

3 讨论

3.1 超声雾化相比传统喷淋的优势

生物反应器除臭的应用过程中,臭气的吸收方式至关重要,超声雾化相比传统喷淋的吸收方式,主要有以下两大优势:

一是超声波的空化效应,空化作用使液体产生微泡,而这些微泡在坍塌的瞬间会在临界点产生超高温和高压,这个过程会产生大量的活性自由基^[13],本研究结果表明,超声处理后的水比自来水吸收氨气的能力增强。已有研究报道,经过超声处理后的水对1-辛烯-3-醇(1种难溶性的VOC气体)的吸收效果也明显提高^[14]。说明超声处理不仅能够提高对易溶于水的臭气的吸收,对难溶于水的臭气也具有促进吸收的效果,堆肥产生臭气种类较多,有易溶解的氨气和硫化氢等,也有难溶性的VOCs,因此,超声处理后的自来水对堆肥产生的各种臭气具有良好的兼容性。

二是超声雾化产生的雾滴具有粒径小、分布均匀的优点。雾化方式捕获气态污染物的概率与雾滴的直径有关,当气态污染物与雾滴的粒径恰好相近

时,气态污染物更容易与雾滴碰撞从而被捕获,超声雾化能够产生粒径 $5 \mu\text{m}$ 左右的雾滴,而大部分的气态污染物粒径都在此范围^[11]。本试验结果显示,超声雾化比传统喷淋模式对氨气的去除率提高了10%左右,因为超声雾化使氨气有更多机会与水分子碰撞反应,所以增强了对氨气的吸收效果。

3.2 活性污泥挂膜对反应器稳定性的影响

生物反应器在长期运行的情况下,会产生氨氮累积,导致反应器的去除效率降低,因此,需要对生物反应器进行微生物接种以提高反应器处理氨氮的能力^[15]。本研究对活性污泥进行了45 d的高氨氮驯化,驯化后去除氨氮水平显著提升,将驯化后的耐高氨氮活性污泥在反应器填料上进行挂膜,发现降解氨氮的能力显著提升。通过分析其中的氮元素转化,发现体系内硝化反应活性明显上升,硝态氮和总氮含量均呈持续上升然后逐渐稳定的趋势,说明活性污泥中以硝化细菌为主体的氮代谢菌群在反应器内完成定植,整个过程中渗滤液的氨氮质量浓度在 $100 \sim 200 \text{ mg/L}$,远低于接种活性污泥前的氨氮质量浓度,说明接种活性污泥对体系的氨氮累积有明显的改进作用。Juhler等^[16]研究发现,采用驯化后的活性污泥不仅能提高反应器的耐受能力,而且反应器的启动时间由原来的30 d左右缩短为约7 d。

3.3 除臭反应器基本运行工艺的优化

正交试验结果表明氨气质量浓度 50 mg/m^3 、气体停留时间30 s和雾化速率 1.5 L/h 为最优水平组合,即氨气的进气浓度越低,反应器的去除效率越高,说明本反应器对氨气的去除有阈值上限,当超过最大阈值后,除臭效果明显降低,这与Hou等^[17]的研究结果一致;当气体在反应器内停留时间越长,其对氨气的处理效果越好,通常气体在反应器内的停留时间只有15~30 s,微生物对氨气的吸收能力有限,整个体系主要通过超声雾化将氨气吸收溶解,然后再利用微生物将水中的氨氮降解。

本试验中气体停留时间为影响最大的因素,雾化速率影响最小。因此,在实际去除氨气过程中应考虑反应器对氨气的最大负荷。雾化速率影响程度最小的原因可能是雾滴浓度太高,小雾滴碰撞形成大雾滴,比表面积反而减少,对氨气与雾滴的接触产生负影响,而产生高浓度的雾滴会消耗更多的水电,因此,在实际应用中建议不必追求过高的雾化速率。

此外,周俊兆^[18]研究表明,喷淋强度对去除率的影响较大。而本试验研究表明可能是给水方式的不同造成去除率的差异。雾化方式产生的雾滴更细腻、均匀、利用率较高,对氨气的吸收效果更好;而喷淋方式对水的利用率较低,只能采用过量的给水来提高去除率,这也从侧面证明超声雾化相对于传统喷淋的优越性。

超声雾化加生物反应器可以作为去除堆肥氨气的一种较好技术,但应用超声雾化这一工艺与生物反应器中的投产比仍需进一步探究。

参考文献 References

- [1] 贾伟. 我国粪肥分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. JIA W. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014(in Chinese with English abstract).
- [2] CARO J, GALLEGRO M. Environmental and biological monitoring of volatile organic compounds in the workplace[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(3): 426-433.
- [3] YUAN J, YANG Q Y, ZHANG Z Y, et al. Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. *Journal of environmental sciences*, 2015, 37: 83-90.
- [4] 张生伟. 猪粪高效除臭菌株筛选及其除臭机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016. ZHANG S W. Screening of efficient deodorant microbial strains and deodorizing mechanism of swine feces[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [5] GROENESTIJN J W V, KRAAKMAN N J R. Recent developments in biological waste gas purification in Europe[J]. *Chemical engineering journal*, 2005, 113(2/3): 85-91.
- [6] CHENG Z W, LU L C, KENNES C, et al. Treatment of gaseous toluene in three biofilters inoculated with fungi/bacteria: microbial analysis, performance and starvation response[J]. *Journal of hazardous materials*, 2016, 303: 83-93.
- [7] 程小平. 超声场作用下氨气鼓泡吸收研究与数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. CHENG X P. Study on ammonia absorption in a bubble column radiated by ultrasonics and numerical simulation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012(in Chinese with English abstract).
- [8] 李晨静. 高效亚硝化菌群筛选培养及氨氮降解特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021. LI C J. Study on the screening and cultivation of highly efficient nitrosifying bacteria and the degradation characteristics of ammonia[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021(in Chinese with English abstract).
- [9] 聂二旗, 郑国砥, 高定, 等. 适量通风显著降低鸡粪好氧堆肥过程中氮素损失[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1773-1780. NIE E Q, ZHENG G D, GAO D, et al. Moderate intensity of ventilation can significantly reduce nitrogen loss during aerobic composting of chicken manure[J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2019, 25(10): 1773-1780 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张云龙, 宋明淦, 李秀芬, 等. 磷酸盐添加对快速好氧堆肥过程 pH 及腐熟效果的影响[J]. *环境化学*, 2020, 39(7): 1996-2004. ZHANG Y L, SONG M G, LI X F, et al. Effect of phosphate addition on pile pH and maturity during rapid aerobic composting process[J]. *Environmental chemistry*, 2020, 39(7): 1996-2004 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵旭, 王文丽, 李娟. 玉米秸秆调节牛粪含水率对其腐熟进程及氨气释放量的影响[J]. *生态科学*, 2020, 39(5): 179-186. ZHAO X, WANG W L, LI J. Effect of corn stalk regulating moisture content on cow manure compost and ammonia release[J]. *Ecological science*, 2020, 39(5): 179-186 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李易. 好氧堆肥对难溶性磷酸盐溶解效果的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010. LI Y. Study of the release effect of aerobic composting to the insoluble phosphate[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [13] TERUTSUKI D, MITSUNO H, SATO K, et al. Highly effective volatile organic compound dissolving strategy based on mist atomization for odorant biosensors[J]. *Analytica chimica acta*, 2020, 1139: 178-188.
- [14] 路旭, 钱作勤, 徐灿, 等. 基于超声雾化的室内外防霾净化一体窗设计[J]. *电子世界*, 2017(5): 72-74. LUO X, QIAN Z Q, XU C, et al. Design of indoor and outdoor haze prevention and purification integrated window based on ultrasonic atomization[J]. *Electronics world*, 2017(5): 72-74 (in Chinese).
- [15] 任源. 短程硝化颗粒污泥培养及其处理高氨氮废水的效能与机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. REN Y. Cultivation of shortcut nitrifying granular sludge and its efficiency and mechanism for treating ammonium-nitrogen-rich wastewater[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [16] JUHLER S, REVSBECH N P, SCHRAMM A, et al. Distribution and rate of microbial processes in an ammonia-loaded air filter biofilm[J]. *Applied and environmental microbiology*, 2009, 75(11): 3705-3713.
- [17] HOU J Q, LI M X, XIA T M, et al. Simultaneous removal of ammonia and hydrogen sulfide gases using biofilter media from the biodehydration stage and curing stage of composting[J]. *Environmental science and pollution research*, 2016, 23(20): 20628-20636.
- [18] 周俊兆. 生物滴滤池对氨气的去除机理和生物多样性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016. ZHOU J Z. Study on the ammonia removal mechanism and biological diversity of BTF[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016 (in Chinese with English abstract).

Application of ultrasonic atomization bioreactor in treating ammonia gas from composting

LIAO Youjun¹, MENG Yuxiang², REN Zhuqing¹

1. College of Animal Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Songzi Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Province, Songzi 434200, China

Abstract A novel ultrasonic atomization bioreactor was designed to improve the removal effect of the bioreactor on the odor produced by composting. The treatment effect of the bioreactor on simulated odor under different conditions was studied. The pig manure and wood chips were used to conduct composting experiments to explore the actual effect of the bioreactor on removing odor produced by. The results showed that the effect of ultrasonic cavitation improved the absorption rate of ammonia gas. Ultrasonic atomization was about 10% more efficient than the traditional spray mode in removing ammonia gas. In order to solve the problem of high ammonia nitrogen in the system, the activated sludge was domesticated with high ammonia nitrogen and hung in the reactor, and the ability of microorganisms in the system to degrade ammonia nitrogen was significantly improved. The process conditions for removing ammonia gas with the bioreactor were optimized with orthogonal experiments. The results of composting experiments showed that ammonia release was highly consistent with the temperature of composting and peaked on day 5 of composting (76.3 mg/m³). The ammonia release in pig manure composting was related to the pH, the concentration of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen. The reactor's removal rate of composting ammonia peak was 80.6%, the average ammonia removal rate for other periods was maintained at about 90%. The ammonia concentration at the outlet of bioreactor was less than 5 mg/m³, which meets the relevant emission standards. It is indicated that the ultrasonic atomization bioreactor can play a good role in removing ammonia gas produced by composting. It will provide a new idea for developing bioreactors in the future.

Keywords ammonia; bioreactors; ultrasonic atomization; mulching composting; pig manure composting; odor removal

(责任编辑:赵琳琳)