



除臭微生物的筛选复配及其在堆肥中的应用

牛永艳¹, 穆永松², 毛婷¹, 郑群¹, 叶泽¹, 季彬¹, 王治业^{1*}

1 甘肃省科学院生物研究所 甘肃省微生物资源开发利用重点实验室, 甘肃 兰州 730000

2 甘肃华瑞农业股份有限公司, 甘肃 张掖 734000

牛永艳, 穆永松, 毛婷, 郑群, 叶泽, 季彬, 王治业. 除臭微生物的筛选复配及其在堆肥中的应用[J]. 微生物学报, 2023, 63(4): 1531-1540.

NIU Yongyan, MU Yongsong, MAO Ting, ZHENG Qun, YE Ze, JI Bin, WANG Zhiye. Deodorizing microorganisms: screening and application in composting[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(4): 1531-1540.

摘要: 【目的】从沼渣和硫铁矿场土壤中分离可以去除氨氮和硫化物的微生物, 并筛选复配后应用于堆肥中, 以减少畜牧业粪便处理时臭气的释放量, 改善工作环境。【方法】利用选择培养基分别筛选除氨和除硫的微生物, 并进行 16S rRNA 基因序列分析鉴定, 挑选效果较好的菌株进行组合, 复配出微生物除臭剂将其应用于粪便堆肥中, 通过检测现场氨气和硫化氢浓度初步评估其除臭效果。【结果】分离出了 12 株除氨微生物和 5 株除硫微生物, 挑选出 5 株效果较好的菌株分别标记为 N-2、N-5、N-6、N-11 和 S-3。复配实验表明菌株 N-5+N-6+N-11+S-3 组成的微生物除臭剂效果最佳, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 S^{2-} 去除率最高, 分别为 82.46% 和 84.84%。同时, 堆肥应用实验证明微生物除臭剂具有除臭功效, 尤其是在堆肥前期, 在第 7 天翻堆的过程中氨气和硫化氢释放量相对于对照组减少了 62.84% 和 53.12%。堆肥结束, 与对照组相比, 微生物除臭剂组氨氮含量低于对照组 33.62%。【结论】本研究获得的微生物除臭剂有效降低了畜禽粪便堆肥过程中恶臭气体的释放, 在改善畜牧业粪便堆肥处理环境方面具有较大的应用潜力。

关键词: 微生物除臭剂; 氨气; 硫化氢; 粪便堆肥

资助项目: 甘肃省科技厅青年科技基金(21JR1RA350); 甘肃省科学院创新团队项目(2019CX004-1)

This work was supported by the Gansu Provincial Science and Technology Department Youth Science and Technology Fund (21JR1RA350) and the Innovation Team Project of Gansu Academy of Sciences (2019CX004-1).

*Corresponding author. E-mail: zhiye_wang@sina.com

Received: 2022-08-26; Accepted: 2022-11-25; Published online: 2022-12-01

Deodorizing microorganisms: screening and application in composting

NIU Yongyan¹, MU Yongsong², MAO Ting¹, ZHENG Qun¹, YE Ze¹, JI Bin¹,
WANG Zhiye^{1*}

1 Key Laboratory of Microbial Resources Development and Utilization of Gansu Province, Institute of Biology, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China

2 Gansu Huarui Agriculture Co., Ltd., Zhangye 734000, Gansu, China

Abstract: [Objective] To isolate the microorganisms that can remove ammonia and hydrogen sulfide from biogas residue and pyrite soil and use them for composting, so as to reduce the odor release in the process of manure treatment and improve the working environment. [Methods] The microorganisms capable of removing ammonia and hydrogen sulfide were screened out by the culture method and identified by 16S rRNA gene sequencing. The strains with good removal performance were selected to prepare the microbial deodorants. The deodorants were then applied to the composting of manure, and their deodorization effects were preliminarily evaluated based on the concentrations of ammonia and hydrogen sulfide. [Results] A total of 12 ammonia-removing strains and 5 sulfur-removing strains were isolated, from which 5 strains with good removal performance were screened out and labeled as N-2, N-5, N-6, N-11, and S-3, respectively. The microbial deodorant composed of strains N-5, N-6, N-11, and S-3 had the best deodorization effect, with the ammonia- and sulfide-removing rates of 82.46% and 84.84%, respectively. The composting test proved that the microbial deodorant had deodorization effect. Especially in the early stage of composting, the microbial deodorant group reduced the release of ammonia and hydrogen sulfide in the process of turning on day 7 by 62.84% and 53.12%, respectively, compared with the control group. At the end of composting, the ammonia nitrogen content of the microbial deodorant group was 33.62% lower than that of the control group. [Conclusion] The microbial deodorant produced in this study can effectively reduce the release of odorant gas in the process of manure composting and thus demonstrates great application potential in improving the environment of livestock waste treatment.

Keywords: microbial deodorant; ammonia gas; hydrogen sulfide; composting of manure

大型养殖场的建设和投入,在促进经济飞速发展的同时,也对当地环境造成了一定的危害。养殖场大量粪便的堆积已成为重要的环境污染源,比如粪便在堆放过程中释放的 NH₃ 和 H₂S 等恶臭气体^[1]。恶臭气体在生理上会引起嗅觉迟钝、毒害呼吸系统等,在心理上会产

生不舒服、厌烦等负面情绪^[2]。因此,有效降低粪便堆放过程中臭气的释放量已经成为养殖业健康可持续发展的关键技术之一,也是面临的挑战之一^[3]。

目前,国内外恶臭污染治理技术研究的主要方向为生物除臭^[4]。生物除臭中微生物除臭

技术较常用,与化学和物理除臭技术相比,生物除臭技术有高效、环境友好、应用简单以及经济实惠等优点,应用和推广潜力较大^[5]。从除臭过程来看,微生物除臭技术又可分为异位控制技术和原位控制技术^[6]。异位控制技术针对已释放的恶臭气体,通过气体收集装置和除臭生物膜对臭气进行集中脱除^[7-8]。原位除臭是通过除臭菌剂代谢降解恶臭物质,或抑制臭气产生进行除臭的技术^[9-10]。除臭菌是微生物除臭的关键,所以国内外的研究工作主要集中在高效除臭优势菌株的选育。由多种微生物配制而成的复合微生物除臭制剂,充分发挥了微生物之间的协同作用^[11],能够同时有效地降低恶臭气体成分中主要的氨气和硫化氢的释放,从而获得最佳的除臭应用效果。日本、美国、荷兰等国早在 20 世纪 70 年代就相继研发出许多微生物除臭剂,而我国 90 年代初期才关注和研究恶臭污染物防治与控制技术^[12]。近年来,我国自主选育和复配的复合微生物制剂研究的报道逐渐增多,但推广应用的研究还是多采用国外进口的微生物除臭制剂,以日本的 EM 菌剂为主^[6]。本研究以氨气和硫化氢去除为目的筛选除臭微生物,挑选高效菌株复配微生物除臭剂应用于粪便堆肥中,检测堆肥现场氨气和硫化氢的释放量以及堆肥结束后全氮和氨氮的含量,分析微生物除臭剂的应用效果,为制备畜禽粪便除臭复合菌剂提供更多菌种选择,同时推广本土自主研发微生物除臭剂的应用。

1 材料与amp;方法

1.1 样品采集地点

沼渣样品采集于甘肃省张掖市华瑞农业股份有限公司奶牛养殖场沼气站。硫铁矿场土壤样品采集于甘肃白银厂黄铁矿型铜铅锌矿床。

1.2 培养基

细菌基础培养基(g/L):牛肉膏 10.0,蛋白胨 5.0,酵母粉 5.0,葡萄糖 5.0,NaCl 5.0,pH 7.0-7.2,121 °C 灭菌 20 min。

异养硝化培养基(g/L):NH₄Cl 0.382 (NH₄⁺-N 100 mg/L),乙酸钠 2,MgSO₄·7H₂O 0.05,K₂HPO₄ 0.2,NaCl 0.12,MnSO₄·4H₂O 0.01,FeSO₄ 0.01,pH 7.0-7.2,121 °C 灭菌 20 min。

硫氧化菌筛选培养基(g/L):K₂HPO₄ 1.5,KH₂PO₄ 1.5,MgCl₂·7H₂O 0.8,CaCl₂ 0.5,pH 7.0-7.2,121 °C 灭菌 20 min。Na₂S·9H₂O 过滤后加至 S²⁻终浓度 50 mg/L。

复合培养基(g/L):乙酸钠 4.0,NaCl 5.0,NH₄Cl 0.382,K₂HPO₄ 0.4,KH₂PO₄ 0.4,MgCl₂·7H₂O 0.8,CaCl₂ 0.5,FeCl₂ 0.02,pH 7.0-7.2,121 °C 灭菌 20 min。Na₂S·9H₂O 过滤后加至 S²⁻终浓度 50 mg/L。

1.3 除臭微生物除氨效果测定

将 1 mL 种子液接种到装有 100 mL 异养硝化培养基的锥形瓶中,以没有接种菌液的培养基作为空白。在 30 °C、180 r/min 的摇床中培养 48 h 后取样,在波长 600 nm 处检测细菌生长情况,然后 10 000 r/min 离心 2 min,用纳氏比色法测定上清液中 NH₄⁺-N 的浓度,设置 3 个平行。氨氮去除率计算公式如下:

$$\mu = (w_1 - w_0) / w_1 \times 100\%$$

μ : 氨氮去除率; w_1 : 培养基初始氨氮浓度; w_0 : 培养基最终氨氮浓度。

1.4 除臭微生物除硫效果测定

取 100 mL 硫氧化菌筛选培养基于 250 mL 的锥形瓶中,接种 1 mL 种子液,以没有接种菌液的培养基作为空白。在 30 °C、180 r/min 的摇床中培养 48 h 后取样,在波长 600 nm 处检测细菌生长情况,然后 10 000 r/min 离心 2 min,用亚甲基蓝比色法测定上清液中 S²⁻的浓度,设

置 3 个平行。 S^{2-} 去除率计算公式如下:

$$\mu = (w_1 - w_0) / w_1 \times 100\%$$

μ : S^{2-} 去除率; w_1 : 培养基初始 S^{2-} 浓度; w_0 : 培养基最终 S^{2-} 浓度。

1.5 微生物除臭剂复配方法

(1) 拮抗试验: 采用牛津杯法。(2) 复合菌剂的组合试验: 将互不拮抗的 5 个菌株进行组合, 共组建了 14 个处理组, 然后按照 1:1 的比例根据复筛的方法测定其对氨氮和硫的去除率, 选出效果最好的菌株组合。

1.6 复合微生物除臭剂的堆肥应用实验

1.6.1 实验场地

张掖金马肥料厂。

1.6.2 实验设计

堆肥原料有牛粪和玉米秸秆, 其具体理化性质见表 1。添加玉米秸秆将牛粪堆肥的 C/N 调节至 24 左右, 物料含水率控制在 65%–70%。试验组接入微生物除臭剂, 对照组接入等量高温灭活的除臭剂。实验组和对照组分别堆放在不同的塑料大棚里, 每个堆体长 1 m, 堆底宽 1 m, 高 1 m, 堆体间隔为 3 m。将堆肥质量 5% 的微生物除臭剂喷洒于配置好的物料中, 搅拌均匀后发酵, 每个处理 3 个重复, 试验期为 20 d, 第 4 天、第 7 天、第 10 天、第 15 天翻堆 1 次, 每个处理堆肥环节保持一致。

1.6.3 堆肥样品采集及测定采样方法

各发酵堆体试验开始和结束时, 翻堆混合均匀后, 分别在 5 个点各取样 150 g (四角和中心), 取样深度 30 cm, 用四分法留样。样品有机质和全氮含量参考 NY 525—2012 标准测定,

氨氮的含量采用纳氏试剂比色法测定, 每个样品 3 次重复。

1.6.4 堆肥现场温度检测

使用数字电子温度计(国产)插入距离堆体顶部 0.5 m 处测量温度, 下午 14:00 测量, 测量 3 次后取平均值作为当天堆体的温度, 同时记录周围环境的温度。

1.6.5 堆肥现场氨气硫化氢浓度

使用手持式泵吸氨气检测仪和硫化氢检测仪(深圳无眼界科技有限公司)检测。测量时将检测仪放置在堆体上方 0.5 m 处(距离地面 1.5 m), 围绕堆体检测 3 处后取平均值作为当天氨气和硫化氢浓度。

1.7 数据处理和统计分析

试验数据经 Microsoft Excel 进行统计分析, 利用 OriginPro 9.0 进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 除臭微生物的筛选鉴定

2.1.1 除氨菌的筛选结果

从沼渣样品中共分离到 12 株具有除氨效果的细菌, 测序结果表明这些菌株主要属于短杆菌属(*Brevibacterium*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、泛菌属(*Pantoea*)。从图 1 可以看出, 12 株细菌中有 5 株可以在以 100 mg/L NH_4^+-N 为唯一氮源的异养硝化液体培养基中培养 48 h 后, OD_{600} 达到 1.5 以上, 其中 N-6 和 N-11 长势较好, 分别达到了 1.98 和 2.16。同时, 如图 1 所示, N-2、

表 1 堆肥原料的主要理化性质

Table 1 Main physical and chemical properties of compost raw materials

Composting raw materials	Organic matter (%)	Total nitrogen (%)	Total phosphorus (%)	Moisture content (%)	pH	C/N
Cow dung	52.81	1.12	0.36	74.80	7.54	26.5
Corn stalks	60.36	0.36	0.29	12.32	7.73	65.8

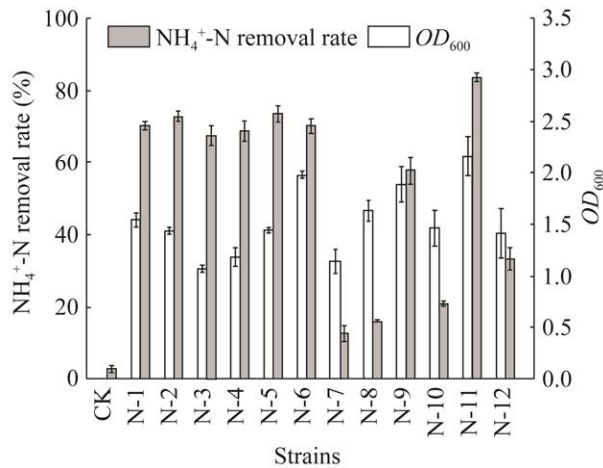


图 1 初筛菌株的除氨效果

Figure 1 Ammonia removal effect of screened strains. Error bars in figure represent standard deviation.

N-5、N-11 这 3 株菌的氨去除能力较强, 其中菌株 N-11 对氨的去除能力最强, 达到了 83.41%。

2.1.2 除硫菌的筛选结果

从硫铁矿场土壤样品中共分离得到 5 株具有除硫效果的微生物, 测序结果表明这些菌株主要属于链霉菌属(*Streptomyces*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、节细菌属(*Arthrobacter*)。如图 2 所示, 5 株微生物均可以在添加 50 mg/L S²⁻的液体培养基中生长。其中, 菌株 S-3 的长势较好, 除硫能力也最突出。在培养 48 h 后, 其 OD₆₀₀ 达到了 1.75, 硫去除率达到了 85.55%。

2.2 最佳除臭微生物组合的确定

通过分析除臭微生物的初筛结果, 选出除

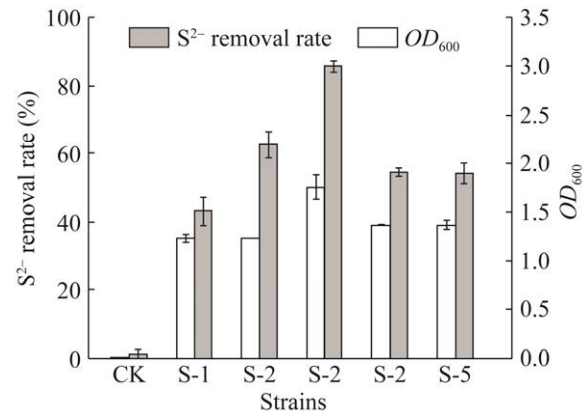


图 2 初筛菌株的除硫效果

Figure 2 Sulfur removal effect of primary screening strains. Error bars in figure represent standard deviation.

氨细菌 N-2、N-5、N-6、N-11 以及除硫细菌 S-3 共 5 株细菌进行复配组合实验, 表 2 为 5 株细菌分子鉴定结果。采用牛津杯法确定用于复配的 5 株菌之间无拮抗作用(表 3), 可进一步组合。

如图 3 所示, 将 5 种菌株进行组合后共有 14 种组合。其中 N-5+N-6+N-11+S-3 组合对 NH₄⁺-N 和 S²⁻去除率最高, 分别为 82.46%和 84.84%, 说明这 4 株菌相互协调, 组合在一起除臭效果较好。有 N-11 菌株的组合, NH₄⁺-N 去除率都在 70%以上, 说明 N-11 菌株去氨氮的效果较好。另外, 并不是组合的菌株越多除臭效果越好, 如 N-2+N-5+N-6+N-11+S-3 菌株组合, 其除氨率为 77.80%, 除硫率为 76.98%, 并不是最高。

表 2 除臭微生物鉴定结果

Table 2 Identification results of deodorizing microorganisms

Strain	Primer	BLAST results
N-2	27F/1492R	<i>Bacillus simplex</i> strain EGI87
N-5	27F/1492R	<i>Brevibacterium frigoritolerans</i> strain WTB14
N-6	27F/1492R	<i>Arthrobacter bambusae</i> strain P1-B12-2
N-11	27F/1492R	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> strain NBRC 103162
S-3	27F/1492R	<i>Arthrobacter</i> sp. strain K8

表 3 菌种之间的拮抗性

Table 3 Antagonism between strains

Strain	N-2	N-5	N-6	N-11	S-3
N-2	-	-	-	-	-
N-5	-	-	-	-	-
N-6	-	-	-	-	-
N-11	-	-	-	-	-
S-3	-	-	-	-	-

—: No antagonistic effect.

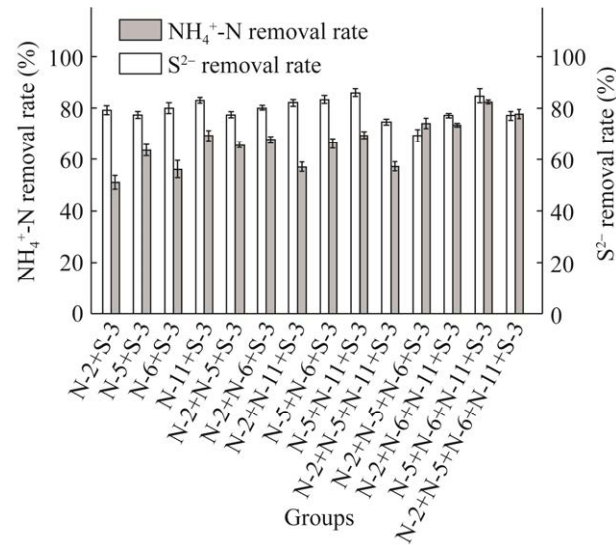
图 3 不同组合对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 S^{2-} 的去除效果

Figure 3 Removal effect of different combinations on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and S^{2-} . Error bars in figure represent standard deviation.

2.3 复合微生物除臭剂在牛粪堆肥中的应用

牛粪堆肥应用实验结果表明, 微生物除臭剂按堆体质量 5% 喷洒加入, 不仅没有影响牛粪堆肥正常起温, 而且使得堆肥温度高于与对照组(图 4)。图 4 中箭头表明翻堆时间节点, 堆肥过程中翻堆后堆肥温度出现短暂的持平后迅速起温。如图 5 所示, 在整个堆肥过程中实验组的 NH_3 释放量均低于对照组, 尤其是在第 4 天和第 7 天, NH_3 的去除率分别达 43.61% 和 62.84%。在微生物除臭剂处理组中, 堆肥第 7 天 H_2S 的释放量降低了 53.12%。同时, 与对照组相比, 实

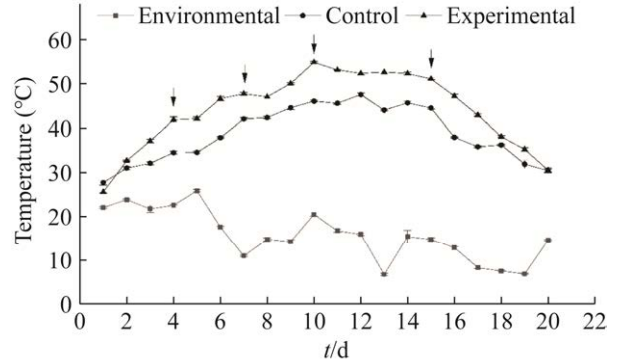


图 4 堆肥过程中温度的变化

Figure 4 Temperature change during composting. Error bars in figure represent standard deviation.

验组 H_2S 的释放量均在 1.00 mg/m^3 以下。图中第 4 天、第 7 天、第 10 天及第 15 天 NH_3 和 H_2S 浓度出现明显的上升趋势与翻堆有关。牛粪堆肥过程中营养元素含量变化见表 4。堆肥结束时, 对照组和实验组处理有机质含量分别为 19.38% 和 17.15%, 相比于堆肥开始时分别降低了 62.00% 和 67.14%。全氮含量略微有所增加, 但氨氮的含量降低明显, 对照组氨氮降低了 9.00%, 实验组氨氮降低了 39.82%, 远高于对照组。

3 讨论

3.1 除臭微生物的筛选和除臭效果

除臭微生物是生物除臭技术的关键, 已有研究表明, 能够有效进行脱臭的主流功能菌群有芽孢杆菌类、乳酸菌类、光合细菌类、放线菌类、酵母类等^[6]。目前对于除臭微生物的筛选方法主要是通过感官法定性初筛, 使用 NH_3 和 H_2S 选择性培养基复筛除臭微生物, 例如李彪等筛选的 ZY-1 的 NH_3 去除率达 47.70%, WJ-2 的 H_2S 去除率为 62.5%^[13]; 张生伟等筛选的菌株 BX3 对 NH_3 和 H_2S 的去除率分别达到 80.07% 和 76.92%^[14]; 曾苏等配制的复合菌剂对 NH_3

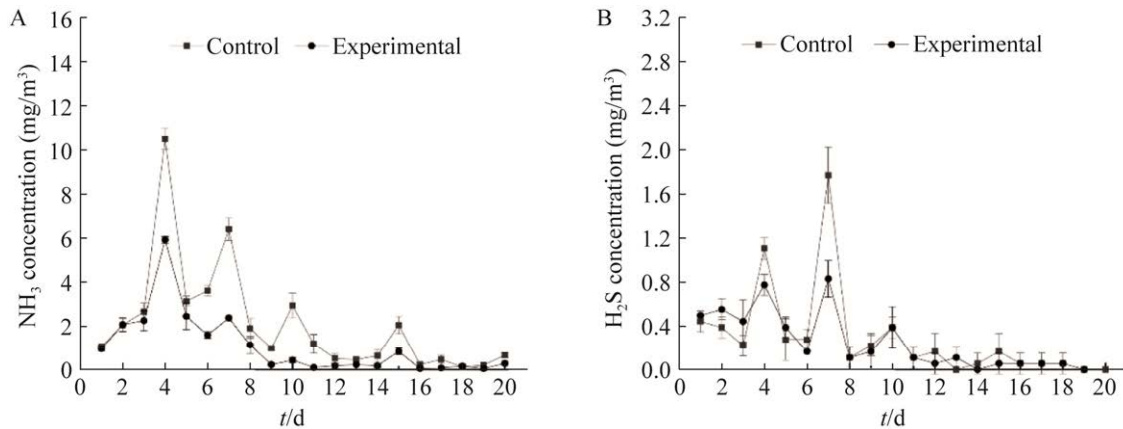


图 5 堆肥过程中氨气(A)和硫化氢(B)的动态变化

Figure 5 Dynamic changes of ammonia (A) and hydrogen sulfide (B) during composting. Error bars in figure represent standard deviation.

表 4 堆肥物料营养物质检测结果

Table 4 Results of nutrients in compost materials

Changes of compost materials	Time (d)	Organic matter (%)	Total nitrogen (%)	Ammonium nitrogen (%)	Moisture content (%)	C/N
Control	Initial	50.84±1.61	11.15±0.89	3.39±0.06	67.42±0.57	23.85±1.48
	End	19.38±0.57	12.60±0.94	3.07±0.06	47.36±1.18	16.68±1.30
Experimental	Initial	52.18±1.63	11.38±1.16	3.39±0.05	67.05±0.75	24.74±0.48
	End	17.15±0.89	13.93±0.07	2.04±0.07	47.02±1.51	18.60±2.03

和 H_2S 的最大去除率为 83.56%和 70.25%^[15]。本研究使用 NH_4^+-N 和 S^{2-} 选择性培养基分别来进行除氨微生物和除硫微生物的筛选, 再将二者结合复配, 获得的复合微生物除臭剂 NH_4^+-N 和 S^{2-} 去除率分别为 82.46%和 84.84%, 相对于已报道的研究, 保持了较高的除氨效率的同时提高了除硫效率。

3.2 除臭微生物在堆肥中的应用

本研究获得的微生物除臭剂应用于牛粪堆肥后的第 7 天 NH_3 释放量减少了 62.84%, H_2S 释放量减少了 53.12%。刘标等筛选的除臭菌株 YX-3 [暹罗芽孢杆菌(*Bacillus siamensis*)], 在 30 d 的病死猪堆肥实验中 NH_3 和 H_2S 的去除率分别为 56.9%和 8.6%^[16]; 张生伟等获得的复合微生物除臭剂在猪粪和鸡粪堆肥中应用后, 在

堆肥的前 20 d 对 NH_3 和 H_2S 的去除率高达 70%和 60%以上^[17]。由于堆肥原料和堆肥时间的不同, 我们无法定量地比较微生物除臭剂的效果, 相对比较之下张生伟等获得的微生物除臭剂除臭效果较好。同时, 已有报道中微生物除臭剂的应用效果均在 80%以下, 还存在很大的进步空间, 微生物除臭剂的商品化和市场化仍然存在挑战。

粪便堆肥过程中, 尤其是堆肥开始的一周, 随着有机物的降解, 堆肥温度的上升, 氨气的释放达到最大值, 与本研究结果相似。氨气的释放不仅给堆肥场所造成臭气的困扰而且还是氮元素损失的主要原因。总氮损失的 90%由 NH_3 挥发造成^[18]。堆肥过程中, 气体排放量主要受翻堆的影响。有研究表明, 堆肥过程中加

入除臭菌剂可以增加微生物群落多样性,同时降低肥料 pH 值,促进硝化作用,减少 NH_3 的排放,兼顾除臭、保氮 2 个要求^[19-20]。 H_2S 在堆肥过程中由厌氧细菌降解含硫有机物产生硫化物进一步转化而成,其阈限值为 16.6 mg/m^3 ,但大多数人在 0.22 mg/m^3 时即可嗅到硫化氢,严重影响工作人员身心健康^[21]。张生伟等的研究表明在堆肥结束后,除臭微生物添加组的 SO_4^{2-} 含量显著高于自然堆肥^[14],由此推断除臭微生物促进含硫恶臭气体向 SO_4^{2-} 形式的转换。研究表明,只有含硫物先转换成 SO_4^{2-} 形式才能转换为地土壤中可利用的有机硫作为植物有效硫的重要来源^[22]。

在国际上,堆肥倾向于封闭容器内堆肥,在管道末端处理臭气,常见除臭方法有生物过滤器、生物洗涤器和生物滴滤器^[23-24]。目前,较新的技术是生物滴滤器,其氨气和硫化氢的生物降解效率通常达到 95%–99%^[24];但是,生物滴滤器反应器体积大,设备要求高,需精确控制,同时填料需要定期更换^[7]。我国大量的中小型畜禽养殖场中,由于场地和技术的限制,微生物除臭制剂因操作简单无需复杂设备,环境适应力强除臭效果持久,所以较生物滴滤器更受欢迎。粪便堆肥过程中,除臭菌剂不仅降低了氨气和硫化氢的释放量同时减少了氮元素的损失,并促进硫离子向有机硫转化^[10],这对有机肥的生产具有重要意义。

4 结论

(1) 从沼渣和硫铁矿土壤中分离获得 12 株除氨微生物和 5 株除硫微生物,挑选出 5 株效果较好的微生物 N-2、N-5、N-6、N-11 和 S-3 进行拮抗实验和复配组合后,由 N-5+N-6+N-11+S-3 组成的微生物除臭剂对 NH_4^+-N 和 S^{2-} 去除率最高,分别为 82.46%和 84.84%。

(2) 本研究复配得到的微生物除臭剂应用到牛粪堆肥中,在堆肥前期的第 7 天翻堆的过程中氨气和硫化氢释放量相对于对照组减少了 62.84%和 53.12%,堆肥结束后,微生物除臭剂组氨氮含量低于对照组 33.62%,证明其有良好的除臭功效,可广泛应用。

参考文献

- [1] SONG CH, LI MX, XI BD, WEI ZM, ZHAO Y, JIA X, QI H, ZHU CW. Characterisation of dissolved organic matter extracted from the bio-oxidative phase of co-composting of biogas residues and livestock manure using spectroscopic techniques[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 103: 38-50.
- [2] 裴廷权, 梅峰. EM 菌处理垃圾渗滤液的微生物生态学及机理分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(8): 65-70.
PEI TQ, MEI F. Microbial ecology and mechanism of landfill leachate treatment with EM[J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(8): 65-70 (in Chinese).
- [3] 解晶钧, 徐凤花, 齐婧媛, 张晴, 代欢. 除臭菌系对沼液和尿污处理中 NH_3 、 H_2S 释放量和重金属含量变化的影响[J]. *中国沼气*, 2012, 30(5): 14-18.
XIE JJ, XU FH, QI JY, ZHANG Q, DAI H. Effect of deodorization microorganisms on release of NH_3 , H_2S and heavy metals in biogas slurry and urine sewage treatment[J]. *China Biogas*, 2012, 30(5): 14-18 (in Chinese).
- [4] GWYTHYER CL, WILLIAMS AP, GOLYSHIN PN, EDWARDS-JONES G, JONES DL. The environmental and biosecurity characteristics of livestock carcass disposal methods: a review[J]. *Waste Management*, 2011, 31(4): 767-778.
- [5] CHEN XG, GENG AL, YAN R, GOULD WD, NG YL, LIANG DT. Isolation and characterization of sulphur-oxidizing *Thiomonas* sp. and its potential application in biological deodorization[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2004, 39(6): 495-503.
- [6] 王茄灵, 吕青阳, 刘杨, 许力山, 秦维, 闫志英. 基于原位控制技术的粪污除臭菌剂研发现状[J]. *应用*

- 与环境生物学报, 2022, 28(5): 1357-1366.
WANG JL, LÜ QY, LIU Y, XU LS, QIN W, YAN ZY. Research and development status of fecal microbial deodorant based on *in situ* control technology[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(5): 1357-1366 (in Chinese).
- [7] BARBUSINSKI K, KALEMBA K, KASPERCZYK D, URBANIEC K, KOZIK V. Biological methods for odor treatment—a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 152: 223-241.
- [8] DHAMODHARAN K, VARMA VS, VELUCHAMY C, PUGAZHENDHI A, RAJENDRAN K. Emission of volatile organic compounds from composting: a review on assessment, treatment and perspectives[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 695: 133725.
- [9] 闫志英, 许力山, 李志东, 刘晓风, 袁月祥, 韦秀丽. 畜禽粪便恶臭控制研究及应用进展[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(2): 322-327.
YAN ZY, XU LS, LI ZD, LIU XF, YUAN YX, WEI XL. Progress in research and application of controlling odor from livestock manure[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, 20(2): 322-327 (in Chinese).
- [10] 余鹏举, 曹先贺, 王宏志, 李少杰. 微生物在恶臭污染治理中的研究及应用[J]. 微生物学通报, 2021, 48(1): 165-179.
YU PJ, CAO XH, WANG HZ, LI SJ. Microbial deodorization: mechanisms and application[J]. Microbiology China, 2021, 48(1): 165-179 (in Chinese).
- [11] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 多种微生物复合的微生态制剂研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(4): 80-83.
LIU XM, NIE JH, WANG QR. Research progress in the probiotics of compound microorganisms[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(4): 80-83 (in Chinese).
- [12] 朱永光, 杨柳, 张火云, 廖银章, 李旭东. 微生物菌剂的研究与开发现状[J]. 四川环境, 2004, 23(3): 5-8, 12.
ZHU YG, YANG L, ZHANG HY, LIAO YZ, LI XD. Progress of research and development of microorganisms agents for bioaugmentation[J]. Sichuan Environment, 2004, 23(3): 5-8, 12 (in Chinese).
- [13] 李彪, 熊焰. 猪粪中除臭微生物的筛选和鉴定[J]. 家畜生态学报, 2008, 29(1): 74-76.
LI B, XIONG Y. Isolation and identification of deodorant microorganism to the swine manure[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2008, 29(1): 74-76 (in Chinese).
- [14] 张生伟, 姚拓, 黄旺洲, 杨巧丽, 滚双宝. 猪粪高效除臭微生物菌株筛选及发酵条件优化[J]. 草业学报, 2015, 24(11): 38-47.
ZHANG SW, YAO T, HUANG WZ, YANG QL, GUN SB. Optimization of fermentation conditions of swine manure and screening for efficient microbial deodorant strains[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(11): 38-47 (in Chinese).
- [15] 曾苏, 李南华, 贺琨, 胡子全. 垃圾微生物除臭剂的筛选、复配及其培养条件的优化[J]. 微生物学杂志, 2015, 35(2): 72-77.
ZENG S, LI NH, HE K, HU ZQ. Screening, combination of microbial deodorant for garbage & optimization of its culture conditions[J]. Journal of Microbiology, 2015, 35(2): 72-77 (in Chinese).
- [16] 刘标, 尹红梅, 刘惠知. 病死猪堆肥降氨除臭微生物的筛选与鉴定[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(34): 248-252.
LIU B, YIN HM, LIU HZ. Screening and identification of deodorant microorganism for dead-pig composting[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(34): 248-252 (in Chinese).
- [17] 张生伟, 黄旺洲, 姚拓, 杨巧丽, 王鹏飞, 李生贵, 闫尊强, 滚双宝. 高效微生物除臭剂在畜禽粪便堆制中的应用效果及其除臭机理研究[J]. 草业学报, 2016, 25(9): 142-151.
ZHANG SW, HUANG WZ, YAO T, YANG QL, WANG PF, LI SG, YAN ZQ, GUN SB. Effects of efficient microbial deodorizer in livestock manure composting and its deodorizing mechanism[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(9): 142-151 (in Chinese).
- [18] BAI F, WANG XC. Nitrogen-retaining property of compost in an aerobic thermophilic composting reactor for the sanitary disposal of human feces[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2010, 4(2): 228-234.
- [19] MAO H, LV ZY, SUN HD, LI RH, ZHAI BN, WANG ZH, AWASTHI MK, WANG Q, ZHOU LN. Improvement of biochar and bacterial powder addition

- on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 195-202.
- [20] WANG Y, BI LL, LIAO YH, LU DD, ZHANG HD, LIAO XD, LIANG JB, WU YB. Influence and characteristics of *Bacillus stearothersophilus* in ammonia reduction during layer manure composting[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 80-87.
- [21] 周志俊. 化学毒物危害与控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
ZHOU ZJ. *Chemical Poison Hazard and Control*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007 (in Chinese).
- [22] 杜耀, 方圆, 沈东升, 龙於洋. 填埋场中硫化氢恶臭污染防治技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 269-275.
- DU Y, FANG Y, SHEN DS, LONG YY. Review on pollution control technologies of hydrogen sulfide odor in landfill[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 269-275 (in Chinese).
- [23] WEI YM, LI JY, SHI DZ, LIU GT, ZHAO YC, SHIMAOKA T. Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: a critical review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 51-65.
- [24] BARBUSIŃSKI K, PARZENTNA-GABOR A, KASPERCZYK D. Removal of odors (mainly H₂S and NH₃) using biological treatment methods[J]. *Clean Technologies*, 2021, 3(1): 138-155.