

生物濾床除臭效率及其微生物分布⁽¹⁾

廖仁寶⁽²⁾⁽⁴⁾ 蕭庭訓⁽²⁾ 程梅萍⁽³⁾

收件日期：109 年 5 月 5 日；接受日期：109 年 7 月 31 日

摘 要

本研究目的為探討生物濾床於箱型送風式堆肥舍應用之除臭效果與其微生物組成。生物濾床分為 4 組，分別為 A 組：蛇木屑；B 組：蛇木屑混合堆肥；C 組：蛇木屑與調濕；D 組：蛇木屑混合堆肥與調濕，進行生物濾床入、出口異味檢測與濾床樣品微生物鑑定。試驗結果顯示，4 組在試驗 220 天期間，氨氣的去除率皆接近 100%，且無顯著差異。處理後排出氣體之異味則分別為 55.4、55.5、44.2 及 42.4 OU/m³，以調濕處理組較低。由 4 處理組濾料之 16S rRNA 基因序列分析結果顯示，各組之細菌皆以 *ProteoBacteria* 菌門為主，分別佔 64.3、63.2、72.4 及 65.2%。其中 D 組尚有 *Bacteroidetes*、*AcidoBacteria*、*Firmicutes* 等 3 個菌門細菌，並分別為 *Sphingobacteriales*、*Acidobacteriales*、*Bacillale* 菌科，多樣性較為豐富。古細菌分析方面，僅在 D 組發現，為 *Euryarchaeota* 菌門、*Methanomicrobia* 菌目甲烷菌。且在 D 組中亦可發現屬於 *Rhizobiales* 菌科、*Pseudolabrys* 菌屬之固氮菌與 *Nitrosomonadales* 菌科、*Nitrospira* 菌屬之硝化菌，這些微生物可能參與生物濾床之氮循環作用，達到去除堆肥異味中氨氣之效果。綜合上述，以 D 組為較佳的除臭應用選擇。

關鍵詞：除臭、生物濾床、微生物。

緒 言

畜禽舍與堆肥場產生之異味等空氣污染問題，常是畜牧場與堆肥場遭到鄰近民眾或環保團體抗爭與檢舉之原因，而異味物質包括揮發性有機酸、甲基胺、氨氣、硫化物等 (National Research Council, 2003; Feilberg *et al.*, 2010)，其中氨氣為主要的指標氣體 (UNECE/LRTAP, 2012)，其為無色、有毒、具腐蝕性惡臭成分的化合物 (USEPA, 1995)。一般常用來降低畜禽舍與堆肥場空氣異味濃度的處理方式，有物理法、化學法、生物法或複合法 (Alkokaik, 2009; 程等, 2010; 蕭等, 2014; 劉等, 2019)。複合物理性與生物性的處理方法，具成本低、效率佳之優點 (程等, 2010)。

生物濾床可設計成為一種複合物理性與生物性的處理方法，將相關微生物固著於具吸附污染物質能力的濾料上，進行連續性的分解作用，以降低污染物濃度 (Jaber *et al.*, 2014)。以酸性泥炭土與豬糞堆肥串聯的生物濾床系統，去除畜殖堆肥場異味，發現進流三甲基胺與氨氣的去除率達 85% 以上 (高等, 1996)。另將具除臭能力的 *Arthrobacter* sp. 植種於顆粒活性炭上，並填充於生物濾床，用以處理養豬廢棄物所產生的三甲基胺與氨氣，結果顯示去除率分別達 96.8 與 97.2% (Ho *et al.*, 2008)。以具調濕功能的生物濾床，進行氨氣移除試驗，期間保持濾料 pH 值小於 7.5，水分含量大於 35%，並於濾料中植種氨氧化菌，結果發現氨氣總去除率為 99.9%，異味之去除率為 96%，且生物濾床較木屑脫臭槽具有較高之經濟效益 (程等, 2010)。Das *et al.* (2019) 利用生物炭與堆肥組成的生物濾床，進行硫化氫的去除試驗，在空床停留時間為 119 s 的操作條件下，其最大的去除能力為 33 gm⁻³h⁻¹、去除效率超過 99%。若以完全腐熟的堆肥當作生物濾床的填充濾料，進行乳牛糞堆肥排氣中氨氣去除試驗，結果顯示去除率可達 97.8%，但氮素損失亦達 6.5% (Zhong *et al.*, 2020)。另有研究利用腐熟堆肥當作生物濾床填充濾料，用以去除堆肥過程中排出的硫化氫，發現濾料吸附能力是去除硫化氫的主要因子，貢獻了 64.2% 的去除效率，而微生物活性則貢獻了 35.8% (Yuan *et al.*, 2019)。

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 2645 號。

(2) 行政院農業委員會畜產試驗所經營組。

(3) 行政院農業委員會畜產試驗所主任秘書室。

(4) 通訊作者，E-mail: liawrb@mail.tlri.gov.tw。

本研究為探討生物濾床應用除臭模式，將試驗設計成 4 種處理組，包括蛇木屑組、蛇木屑混合堆肥組、蛇木屑與調濕組及蛇木屑混合堆肥與調濕組。分析各組的氨氣與異味去除效率，並以分子生物學方法進行各組微生物組成之分析，期望找出較佳的應用模式，並推廣應用於相關產業。

材料與方法

I. 濾床模型試驗

應用先前研究結果所設計之 4 個圓柱型模型濾床，連接至送風式的箱型堆肥舍，其中 C、D 組模型槽連接具有 0.7 mm 噴頭之調濕設備 (程等, 2010)，利用水分天平快速檢測濾材樣品水分含量，並使其水分含量保持在約 60%。A、C 組填充濾料為蛇木屑，B、D 組填充濾料為蛇木屑混合堆肥。雞及豬糞堆肥依一般堆肥程序進行送風 (2 min/30 min)，並監測堆肥深度 10 cm 與 30 cm 的溫度，當 10 cm 溫度下降至 45℃ 以下時，則進行翻堆，翻堆時間如圖 1 所示；而產生之臭氣則由與送風機同步之鼓風機抽出後，經分配及經由流量計調整流量後送入 4 個模型濾床，使空床停留時間 (empty bed retention time) 皆為 60 s。定期分析各處理組濾床進氣中與排氣中之氨氣濃度，以計算氨氣之去除效率。

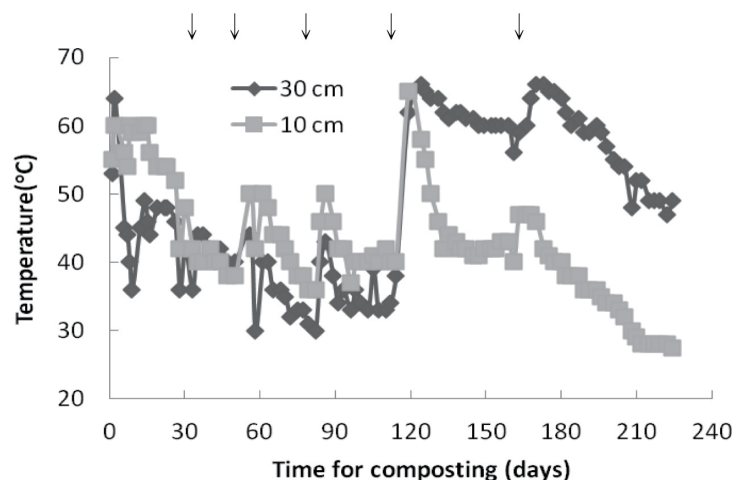


圖 1. 箱型送風式堆肥舍堆肥深度 10 cm 與 30 cm 的溫度。箭頭所指為翻堆時間。

Fig. 1. Composting temperatures at depths of 10 cm and 30 cm in an aerated and in-vessel composting house. Arrows mean the days of turning.

II. 氨氣分析方法

排氣中氨氣濃度測定採用空氣中氨氣之檢測方法—靛酚 / 分光光度計法 (NIEA A426.71B)；進氣中氨氣濃度以氣體檢知器 (GV-100S, Gastec, Japan) 與北川式氣體檢知管 (No. 105SD, Kitagawa, Japan) 測定。

III. 異味官能測定

以環保署公告之異味污染物官能測定法—三點比較式嗅袋法 (NIEA A201.14A) 進行異味測定。

IV. 統計分析

利用 SAS 統計分析系統 (SAS, 1988) 之一般線性模式程式 (general linear model procedure, GLM) 進行氨氣去除效率數據變異分析，並以鄧肯氏多次變域法 (Duncan's multiple range test)，比較處理間之差異顯著性。

V. 菌數分析

取濾料樣品 10 g 溶於 100 mL 無菌水中，震盪 1 h 後，連續以無菌水稀釋，取稀釋液 0.1 mL 塗抹於固態培養基。培養基成分、培養時間、溫度，則參考室內空氣中總細菌數檢測方法 NIEA E301.11C (行政院環保署環境檢驗所, 2008a)，與室內空氣中總真菌數檢測方法 NIEA E401.11C (行政院環保署環境檢驗所, 2008b)。自營性氨氧化菌菌數測定則參照 Schmidt and Besler (1982) 之方法，取 10 g 樣品加入 100 mL 無菌水作成懸浮液，以無菌水 10 倍連續稀釋，每一稀釋度取 1 mL 菌液於液態培養基中 (每 L 含量： $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 mg, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 13.4 ng, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 40 ng, Bromothymol blue 2 ng, KH_2PO_4 0.204 mg, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.46 ng, EDTA- Na_2 3.31 ng,

NaMo · 2H₂O 0.1 ng, MnCl₂ 0.2 ng, CoCl₂ · 6H₂O 0.002 ng, ZnSO₄ · 7H₂O 0.1 ng, CuSO₄ · 5H₂O 0.02 ng), 進行 3 重複, 連續 6 週測定亞硝酸及硝酸呈色反應, 結果穩定後以對照表計算菌數。

VI. 濾料菌相分析

試驗第 180 天採各組濾料樣品, 每組採 5 點樣品共約 100 g 混合均勻後, 秤取 10 g 樣品, 加 100 mL 無菌水, 100 rpm 下震盪 30 min 後, 以 5,000 rpm 轉速離心後, 沉澱物以 DNA 萃取套組 (PowerSoil® DNA Isolation Kit, Mobio Lab. Co.) 萃取 DNA, 並參考先前實驗室建立之方法進行 (廖等, 2017)。有關細菌、古細菌及真菌專一之 16S 或 18S rRNA 基因片段選殖、定序及序列處理與比對分析, 則參考廖等 (2009) 所建立的操作流程進行。

結果與討論

I. 氨氣去除效率

試驗所用之箱型送風式堆肥舍共有 2 槽, 試驗 1 至 110 天 (即第 1 批) 2 槽皆堆置雞糞堆肥, 第 111 天至 220 天 (即第 2 批) 堆置豬糞堆肥, 其溫度變化如圖 1。堆肥中心溫度在第 1 次翻堆後, 皆可達 60°C, 顯示發酵作用正常進行。

而第 1 批雞糞堆肥在發酵第 2 天產生氨氣濃度最高, A、B、C、D 組分別為 3,000、3,500、2,900、2,800 ppm (圖 2 左); 第 2 批豬糞堆肥產生之氨氣最高在第 8 天, 分別為 150、140、110、80 ppm (圖 2 右), 雞糞堆肥在發酵過程中產生氨氣濃度較高。C、D 組經過調濕處理, 氨氣濃度略低於 A、B 組, 表示噴霧調濕可去除部分氨氣, 惟經測定各組生物濾床樣品, 各組水分含量約為 60%。經過生物濾床反應後, 排出氣體中的氨氣濃度則大幅降低 (圖 3), 平均值分別為 0.096、0.100、0.100、0.093 ppm, 組間無顯著差異, 皆在 1 ppm 以下, 低於周界氨氣排放標準值—固定污染源空氣污染物排放標準 (行政院環保署, 2013)。整理多篇探討畜牧場空氣品質及污染物削減效率的文獻 (Van der Heyden *et al.*, 2015), 結果發現雞舍內氨氣為 1—50 ppm; 豬舍內則為 2—87 ppm, 以椰殼、泥炭 (peat)、木片 (wood chip) 等為濾料的生物濾床處理豬舍氨氣, 在空床停留時間 2.6—40 s 條件下, 去除率為 -40—90%; 而雞舍異味在空床停留時間 3 s 條件下, 去除率為 -60—93% (平均值為 62%), 去除率差異甚大。相對而言, 使用腐熟堆肥作為濾料有較為一致的氨氣去除效果。Pagans *et al.* (2005) 利用腐熟堆肥當作生物濾床的濾料, 在氨氣承載率為 846—67,100 mg NH₃ m⁻³ biofilter h⁻¹ 的操作條件下, 生物濾床的整體氨氣移除效率可達 95.9%, 亦可發現, 在堆肥溫度較高時, 氨氣的釋放量較多。同樣地, Zhong *et al.* (2020) 以完全腐熟的堆肥當作生物濾床的填充濾料, 進行乳牛糞堆肥排氣中氨氣去除試驗, 結果顯示去除率可達 97.8%, 但氮素損失亦達 6.46%。因此, 利用腐熟的堆肥當作生物濾床的填充濾料, 可以有效降低堆肥過程排放氣體中氨氣的濃度。此外, 利用纖維素當作生物濾床襯墊, 以垂直或水平型式的生物濾床結合排氣系統及廢水循環的處理方式, 皆可有效降低豬舍內氨氣濃度, 去除效率分別為 98.5% 與 98.7% (Febrisiantosa *et al.*, 2019)。

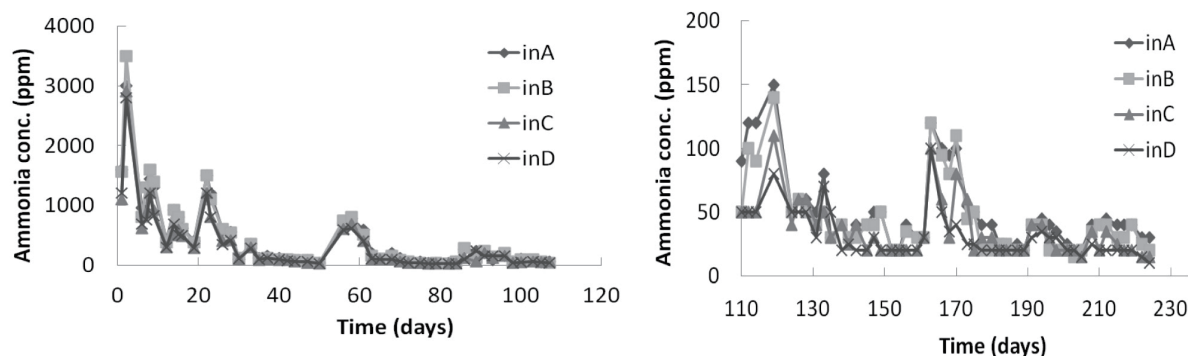


圖 2. 生物濾床進氣中的氨氣濃度。

左圖：雞糞堆肥；右圖：豬糞堆肥。A 組：蛇木屑；B 組：蛇木屑混合堆肥；C 組：蛇木屑與調濕；D 組：蛇木屑混合堆肥與調濕。

Fig. 2. The ammonia concentrations detected in the inlet gas from biofilters.

Left: chicken manure compost; Right: swine manure compost. A: Biofilter composed of fern chips; B: Biofilter composed of fern chips and matured compost; C: Biofilter composed of fern chips and humidified; D: Biofilter composed of fern chips and matured compost and humidified.

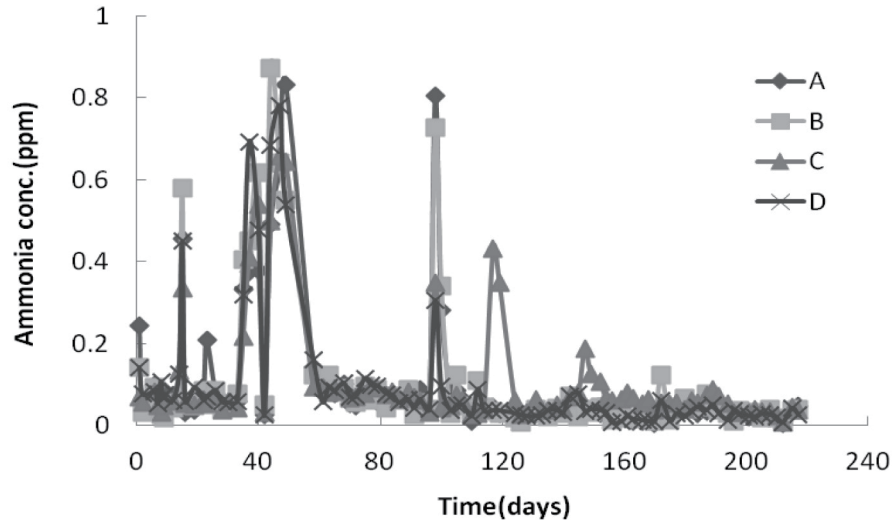


圖 3. 各組生物濾床排氣中的氨氣濃度。

A 組：蛇木屑；B 組：蛇木屑混合堆肥；C 組：蛇木屑與調濕；D 組：蛇木屑混合堆肥與調濕。

Fig. 3. The ammonia concentrations detected in the outlet gas from the biofilters.

A: Biofilter composed of fern chips; B: Biofilter composed of fern chips and matured compost; C: Biofilter composed of fern chips and humidified; D: Biofilter composed of fern chips and matured compost and humidified.

II. 異味去除效率

表 1 為各組生物濾床進氣及排氣中之異味，在第一批雞糞堆肥翻堆後（第 9、26、56、84 天）進氣中異味皆大於檢測範圍（3,000 OU/m³），僅在第 84 天經噴霧後，異味降為 634 OU/m³。而在翻堆前，發酵作用趨於緩和時（第 19、54、79 天），未經噴霧之 A、B 組進氣異味為 736.4 – 1,605.0 OU/m³，而經噴霧之 C、D 組進氣異味為 484.3 – 813.7 OU/m³，由上述資料比較推得噴霧可以有效降低異味。在經過生物濾床作用後，A、B、C、D 組異味之平均值分別為 55.4、55.5、44.2、42.4 OU/m³，其中 C、D 組較 A、B 組低，但無統計分析之顯著差異性。

表 1. 各處理組進氣及排氣中異味檢測值

Table 1. The odor of inlet and outlet gas among all treatment groups

Day	Inlet odor (OU/m ³)		Outlet odor (OU/m ³)			
	A, B	C, D	A	B	C	D
9	>3,000.0	>3,000.0	40.5	78.2	30.0	54.6
19	1000.0	813.7	22.9	48.4	15.1	36.6
26	>3,000.0	>3,000.0	24.2	100.0	20.9	25.1
54	736.4	484.3	16.3	30.0	25.1	50.1
56	>3,000.0	>3,000.0	120.2	44.7	47.0	54.6
79	1605.0	666.5	66.6	81.3	63.4	58.3
84	>3,000.0	634.0	81.4	54.6	44.7	36.6
113	1,247.4	545.9	73.6	44.7	99.3	30.2
157	447.5	100.0	48.4	30.0	66.7	48.2
205	2,289.3	2,290.9	59.5	43.4	30.0	30.0
Average			55.4	55.5	44.2	42.4

A: Biofilter composed of fern chips; B: Biofilter composed of fern chips and matured compost; C: Biofilter composed of fern chips and humidified; D: Biofilter composed of fern chips and matured compost and humidified.

本試驗之生物濾床去除異味效率大多為 90% 以上，而文獻中指出以質譜氣相層析儀（GC-MS）測定畜牧場異味物質約有 300 種化合物，經過兩種生物濾床處理分別剩下 45 與 30 種化合物，以官能測定法生物濾床去除率

為 82 – 99% (Luo and Agnew, 2001)。而以椰子纖維加泥炭 (1 : 1) 濾料去除豬舍異味平均去除率為 81% (31.6 – 96.7%) (Hartung *et al.*, 2001)；以大於 20 mm 木片當作濾料時，豬舍異味與氨氣去除效率分別為 77 – 95% 及 53 – 93% (Sheridan *et al.*, 2002)；以糞尿堆肥及椰子殼 1 : 1 作為濾料，去除牛糞堆肥產生之氨氣，在試驗 19 天期間，去除率可達 100% (Hong and Park, 2005)。有關畜牧場異味處理效率文獻 (Van der Heyden *et al.*, 2015)，結果發現雞舍內異味為 278 – 3,032 OU/m³；豬舍內則為 517 – 18,063 OU/m³，以生物濾床處理豬舍異味在空床停留時間 2.6 – 40.0 s 條件下，去除率為 -5 – 95%，差異甚大；而雞舍異味在空床停留時間 3 s 條件下，去除率為 46 – 92%。另有研究以 2 份軟木、樹皮與 1 份堆肥混合後當作生物濾床填充物，進行去除商業鴨舍異味評估試驗，結果發現試驗期整體平均異味去除效率高達 95 ± 3% (Lau and Cheng, 2007)。這些試驗雖濾料、空床停留時間、進氣異味濃度等條件各不相同，但與本研究皆有相似之結果，即當濾料中添加微生物 (堆肥) 時，便可更有效降低畜牧生產所產生之異味。

III. 菌相分析

以培養計數法測定濾料中活菌數，D 組在真菌數 $12.0 \pm 1.6 \times 10^5$ CFU/g (CFU: colony forming unit) 及細菌數 $30.0 \pm 12.0 \times 10^5$ CFU/g 皆高於其他各組 (表 2)。此外，以 MPN 法 (MPN: most probable number) 測定濾料中自營性氨氧化菌數，D 組亦明顯高於他組。D 組濾料較適合微生物之生長，其中自營性氨氧化菌數較其他組明顯高出 100 倍以上，以微生物生長的狀況評估，D 組對異味物質尤其氨氣應有較佳的去效果。

表 2. 生物濾床濾料中之真菌、細菌及氨氧化菌數

Table 2. Number of fungi, *Bacteria*, and ammonia oxidizing *Bacteria* in the media of biofilters

No. of microorganisms	A	B	C	D
Fungi ($\times 10^5$ CFU/g)	4.3 ± 4.9	9.0 ± 9.5	3.4 ± 5.7	12.0 ± 1.6
Bacteria ($\times 10^5$ CFU/g)	5.0 ± 1.5	5.5 ± 1.9	2.1 ± 1.3	30.0 ± 12.0
Ammonia oxidizing bacteria (MPN/g)	92	46,000	150	4,600,000

A: Biofilter composed of fern chips; B: Biofilter composed of fern chips and matured compost; C: Biofilter composed of fern chips and humidified; D: Biofilter composed of fern chips and matured compost and humidified. CFU: colony forming unit. MPN: most probable number.

進一步分析，濾料中微生物的種類，由四組濾料之小次單位核糖體核糖核酸 (small subunit ribosomal RNA, ssu rRNA) 基因序列分析結果顯示，各組之細菌皆以 *ProteoBacteria* 菌門為主 (表 3)，分別佔 64.3、63.2、72.4 及 65.2%。其中 D 組尚有 *Bacteroidetes*、*AcidoBacteria*、*Firmicutes* 3 個菌門細菌，分別為 *Sphingobacteriales*、*Acidobacteriales*、*Bacillales* 菌科，菌屬則有 *Thermobacillus* 與 *Nitrosospira*，多樣性較豐富。另僅在 D 組發現古細菌，屬於 *Euryarchaeota* 菌門、*Methanomicobia* 目之甲烷菌。D 組中之固氮菌 *Rhizobiales Pseudolabrys* 菌屬及硝化菌 *Nitrosomonadales* 菌科 *Nitrosospira* 菌屬，可能參與生物濾床之氮循環作用，達到去除堆肥異味中氨氣之效果。

Yin and Xu (2009) 探討生物濾床填充堆肥或污泥作為濾料對氨氣去除的效果，發現去除效率分別為 97 – 99% 與 95 – 99%，且以變性梯度凝膠电泳 (denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE) 分析技術比較不同樣品間的條帶差異，並以定序方式解析所代表的可能微生物種類，以堆肥為濾料之生物濾床，其中之優勢菌為 *Nitrosospira* sp.，然以污泥作為濾料生物濾床中的優勢菌則為 *Nitrosomonas* sp.。Chen and Wu (2010) 利用 DGGE 技術分析濾料中細菌多樣性的差異，結果發現多樣性的高低如下：污水污泥加腐熟堆肥組 > 污水污泥加木片組 > 污水污泥組，且將特異性的 DNA 條帶定序與資料庫比對，所代表的微生物有 *Nitrosomonas* sp.、*Nitrosospira* sp.、*Nitrospira* sp.、*Thermoactinomyces* sp. 及 *Terrabactes* sp.；同樣發現堆肥中的優勢菌門為 *ProteoBacteria*。

在真菌之菌相分布方面，A 組之真菌菌相最為單純，40 個株系僅分成 3 個操作分類單元 (operational taxonomic unit, OTU) (表 4)。其中 95% (38/40) 株系為同一種 OTU，其序列與 *Allomyces macrogynus* 有 92% 相同度。B 組 37 個株系中分屬 19 個 OTUs，*Lacrymaria velutina* 所占的比例最高，為 16%。C 組 38 個株系中分屬 10 個 OTUs，OTU C105 佔 58%，其序列與 *Paecilomyces* sp. 和 *Acremonium* sp. 有 99% 相同度。D 組 39 個株系中分屬 10 個 OTUs，OTU D134 佔 49%，其序列與 *Stilbella fimetaria*、*Galactomyces geotrichum*、*Neurospora crassa* 有 98% 相同度。目前為止，極少研究探討生物濾床中真菌相與異味去除的相關性。有研究應用接種特定真菌 (*Pleurotus ostreatus* IRAN 1781C) 之生物濾床，以去除空氣中揮發性化合物如甲苯，並發現去除能力較接種特定細菌 (*Pseudomonas putida* PTCC 1694) 之生物濾床為高 (Ghasemi *et al.*, 2020)。一般發現，以生物過濾法處理水

溶性高的低濃度揮發性化合物有較佳的效果，然細菌性生物濾床處理較低水溶性分子的表現，則較真菌性生物濾床為差 (Vergara-Fernández *et al.*, 2018)。Zhang *et al.* (2013) 分析水庫底泥微生物多樣性時，多個樣品中可發現 *A. macrogynus* 為優勢菌種，但此菌扮演的角色與具有的功能則屬未知，更早的研究曾經利用此菌合成幾丁質 (Porter and Jaworski, 1966)。另需關注的菌株為 *G. geotrichum*，此菌具有生物降解與生物修護的特性，可用作有害物質如 DTT 的分解、廢水的處理、乳品的加工，甚至亦可用於生質燃料生產 (Grygier *et al.*, 2017)。因此，生物濾床若含有此類真菌將可能增進異味物質的分解。

表 3. 生物濾床濾料中之細菌與古細菌之分類

Table 3. Classification of *Bacteria* and archaea in the media of biofilters^a

Group	Domain	Phylum	Order	Genus
A	<i>Bacteria</i> (14) ^b	<i>Bacteroidetes</i> (1)	<i>Sphingobacteriales</i> (1)	<i>Burkholderia</i> (1)
		<i>Verrucomicrobia</i> (2)	<i>Verrucomicrobiales</i> (2)	<i>Hyphomicrobium</i> (1)
		<i>Proteobacteria</i> (9)	<i>Burkholderiales</i> (1)	
			<i>Rhizobiales</i> (1)	
			<i>Rhodospirillales</i> (1)	
B	<i>Bacteria</i> (19)	<i>Firmicutes</i> (3)	<i>Bacillales</i> (3)	<i>Burkholderia</i> (3)
		<i>Bacteroidetes</i> (3)	<i>Sphingobacteriales</i> (2)	
		<i>Proteobacteria</i> (12)	<i>Xanthomonadales</i> (3)	
			<i>Rhizobiales</i> (3)	
			<i>Sphingomonadales</i> (1)	
			<i>Burkholderiales</i> (3)	
C	<i>Bacteria</i> (29)	<i>Firmicutes</i> (1)	<i>Bacillales</i> (1)	<i>Burkholderia</i> (6)
		<i>Acidobacteria</i> (4)	<i>Acidobacteriales</i> (4)	<i>Fulvimonas</i> (1)
		<i>Proteobacteria</i> (21)	<i>Rhodospirillales</i> (3)	
			<i>Xanthomonadales</i> (2)	
			<i>Burkholderiales</i> (8)	
D	<i>Archaea</i> (5)	<i>Euryarchaeota</i> (5)	<i>Methanomicrobia</i> (4)	<i>Methanothrix</i> (3)
				<i>Methanocorpusculum</i> (1)
	<i>Bacteria</i> (23)	<i>Bacteroidetes</i> (2)	<i>Sphingobacteriales</i> (2)	<i>Thermobacillus</i> (1)
		<i>Acidobacteria</i> (2)	<i>Acidobacteriales</i> (2)	<i>Nitrosospira</i> (1)
		<i>Firmicutes</i> (3)	<i>Bacillales</i> (3)	<i>Pseudolabrys</i> (1)
		<i>Proteobacteria</i> (15)	<i>Xanthomonadales</i> (2)	
			<i>Rhodospirillales</i> (1)	
			<i>Rhizobiales</i> (6)	

^a The confidence threshold for classification in RDP Naive Bayesian rRNA Classifier is 80%.

^b The number of clones are shown in parentheses. If the clones belonging to the unclassified are not shown in the table.

表 4. 生物濾床濾料中之真菌分類

Table 4. Classification of fungi in the media of biofilters

OTU ^a	Clone no.	Closest species	Identity (%)
A131 ^b	38/40	<i>Allomyces macrogynus</i>	92
A119	1/40	<i>Aspergillus ustuis</i>	100
A117	1/40	<i>Lentomitella cirrhosa</i>	98
B133 ^c	1/37	<i>Mortierella wolffi</i>	97
B132	6/37	<i>Lacrymaria velutina</i>	99
B103	5/37	<i>Psathyrella gracilis</i>	99
B127	3/37	<i>Trichophyton longifusum</i> , <i>Arthroderma uncinatum</i> , <i>Microsporum canis</i> , <i>Penicillium viridicatum</i>	100
B114	1/37	<i>Assulina seminulum</i> , <i>Placocista spinosa</i>	96
B134	3/37	<i>A. macrogynus</i>	92

表 4. 生物濾床濾料中之真菌分類 (續)

Table 4. Classification of fungi in the media of biofilters (continue)

OTU ^a	Clone no.	Closest species	Identity (%)
B144	2/37	<i>Ascobolus crenulatus</i>	99
B110	1/37	<i>Rhizophlyctis rosea</i> , <i>Rhizophydium sphaerotheca</i>	98
B123	1/37	<i>R. rosea</i>	96
B102	1/37	<i>Chamaeota sinica</i> , <i>Tulostoma macrocephala</i>	96
B121	1/37	<i>Candida maltosa</i>	98
B138	4/37	<i>Monacrosporium geophyropagum</i> , <i>Dactylella rhopalota</i> , <i>Arthrobotrys musiformis</i> , <i>Monacrosporium doedycoides</i>	99
B120	1/37	<i>A. unguis</i>	99
B108	1/37	<i>Euglypha rotunda</i>	95
B106	1/37	<i>L. cirrhosa</i>	98
B115	1/37	<i>Hypocrea koningii</i> , <i>Trichoderma viride</i>	99
B107	1/37	<i>Saccharomycopsis selenospora</i> , <i>Arthroascus schoenii</i>	92
B111	2/37	<i>Cordyceps sphecocephala</i> , <i>Hymenostilbe odonatae</i> , <i>Ophiocordyceps tracentri</i> , <i>Myrothecium roridum</i>	98
B116	1/37	<i>Trinema lineare</i>	100
C119 ^d	1/38	<i>Cercomonas phylloplana</i>	94
C105	22/38	<i>Paecilomyces sp.</i> , <i>Acremonium sp.</i>	99
C138	2/38	<i>A. schoenii</i>	91
C125	1/38	<i>Cercomonadida sp.</i>	99
C146	1/38	<i>Rhizophlyctis rosea</i>	97
C113	2/38	<i>Paecilomyces sp.</i> , <i>Acremonium sp.</i>	94
C129	6/38	<i>P. gracilis</i> , <i>L. velutina</i> , <i>Coprinus comatus</i>	99
C123	1/38	<i>Amylocarpus encephaloides</i> , <i>Cryptovalsa ampelina</i>	96
C136	1/38	<i>Galactomyces geotrichum</i>	100
C135	1/38	<i>Bodomorpha sp.</i>	94
D129 ^e	4/39	<i>P. gracilis</i> , <i>L. velutina</i> , <i>Coprinus comatus</i>	99
D134	19/39	<i>Stilbella fimetaria</i> , <i>G. geotrichum</i> , <i>Neurospora crassa</i>	98
D145	4/39	<i>Chaetomium elatum</i> , <i>Trichocladium asperum</i>	99
D143	5/39	<i>Hypocrea pseudokoningii</i> , <i>T. viride</i>	99
D114	1/39	<i>Orbilia auricolor</i> , <i>Monacrosporium geophyropagum</i> , <i>Dactylella rhopalota</i> , <i>Arthrobotrys superba</i>	98
D125	1/39	<i>Rhizophlyctis rosea</i> , <i>Endogone pisiformis</i>	99
D112	1/39	<i>L. cirrhosa</i> , <i>Rhamphoria delicatula</i> , <i>Papulosa amerospora</i>	98
D108	2/39	<i>Amaurascopsis perforatus</i> , <i>Arachniotus littoralis</i>	97
D121	1/39	<i>Paecilomyces sp.</i> , <i>Acremonium sp.</i>	99
D101	1/39	<i>Leuconeurospora pulcherrima</i> , <i>Pseudeurotium spzonatum</i>	99

^a OUT: operational taxonomic unit.^{b, c, d, e} A###, B###, C###, and D### are the representatives for the same OTU, respectively.

參考文獻

行政院環保署。2013。固定污染源空氣污染物排放標準。https://oaout.epa.gov.tw/Law/LawContent.aspx?id=FL015350。
 行政院環保署環境檢驗所。2008a。室內空氣中總細菌濃度檢測方法，NIEA E301.11C。

- 行政院環保署環境檢驗所。2008b。室內空氣中總真菌濃度檢測方法，NIEA E401.11C。
- 高銘木、李春樹、鄭春長、吳新富、蘇振昇。1996。生物濾床去除畜殖堆肥場異味之模廠試驗研究。第十三屆空氣污染控制技術研討會論文集，中華民國環工年會，第 175-179 頁。
- 程梅萍、廖仁寶、蕭庭訓。2010。以生物濾床去除堆肥場異味之研究。畜產研究 43：259-271。
- 廖仁寶、陳若菁、吳明哲、李佳音。2017。乳牛瘤胃細菌多樣性分析與新穎脂解酵素基因篩選。畜產研究 50：124-133。
- 廖仁寶、黃文瑛、吳明哲、李佳音、程梅萍。2009。臺灣水牛瘤胃微生物多樣性分析。畜產研究 42：171-179。
- 劉雅醇、康獻仁、王紓愍、梁筱梅。2019。不同比例稻殼及草炭墊料對白肉雞生長性狀、接觸性皮膚炎及欄舍氨氣濃度之影響。畜產研究 52：241-248。
- 蕭庭訓、黃裕益、沈韶儀、程梅萍。2014。生物濾材去除豬舍氨氣與異味之評估。畜產研究 47：33-42。
- Alkokaik, F. N. 2009. Ozone treatment of animal manure for odor control. American J. Environ. Sci. (China) 5: 765-771.
- Chen, L. and X. W. Wu. 2010. Reduction of ammonia, hydrogen sulfide, and short-chain fatty acids emission during the sewage sludge composting. Clean (Weinh) 38: 998-1005.
- Das, J., E. R. Rene, C. Dupont, A. Dufourny, J. Blin and E. D. van Hullebusch. 2019. Performance of a compost and biochar packed biofilter for gas-phase hydrogen sulfide removal. Bioresour. Technol. 273: 581-591.
- Febrisantosa, A., H. L. Choi, A. Renggan, S. I. A. Sudiarto and J. Lee. 2019. The investigation of combined ventilation-biofilter systems on odor reduction efficiency by using recycled treated wastewater. Asian-Australas. J. Anim. Sci. doi: 10.5713/ajas.19.0777. [Epub ahead of print].
- Feilberg, A., L. Dezhao, A. Adamsen, M. Hansen and K. Jonassen. 2010. Odorant emissions from intensive pig production measured by online proton-transfer-reaction mass spectrometry. Environ. Sci. Technol. 44: 5894-5900.
- Ghasemi, R., F. Golbabaie, S. Rezaei, M. R. Pourmand, R. Nabizadeh, M. J. Jafari and E. Masoorian. 2020. A comparison of biofiltration performance based on *Bacteria* and fungi for treating toluene vapors from airflow. AMB Express 10: 8.
- Grygier, A., K. Myszk, and M. Rudzińska. 2017. *Galactomyces geotrichum* - moulds from dairy products with high biotechnological potential. Acta Sci. Pol. Technol. Aliment. 16: 5-16.
- Hartung, E., T. Jungbluth and W. Buscher. 2001. Reduction of ammonia and odor emissions from a piggery with biofilters. Trans. ASAE. 44: 113-118.
- Ho, K., Y. Chung and C. Tseng. 2008. Continuous deodorization and *Bacterial* community analysis of a biofilter treating nitrogen-containing gases from swine waste storage pits. Bioresour. Technol. 99: 2757-2765.
- Hong, J. H., and K. J. Park. 2005. Compost biofiltration of ammonia gas from bin composting. Bioresour. Technol. 96: 741-745.
- Jaber, M. B., B. Anet, A. Amrane, C. Couriol, T. Lendormi, P. L. Cloirec, G. Cogny and R. Fillières. 2014. Impact of nutrients supply and pH changes on the elimination of hydrogen sulfide, dimethyl disulfide and ethanethiol by biofiltration. Chem. Eng. J. 258: 420-426.
- Lau, A. and K. Cheng. 2007. Removal of odor using biofilter from duck confinement buildings. J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard Subst. Environ. Eng. 42: 955-959.
- Luo, J. and M. P. Agnew. 2001. Gas characteristics before and after biofiltration treating odorous emissions from animal rendering processes. Environ. Technol. 22(9): 1091-1103.
- National Research Council. 2003. Air Emissions from Animal Feeding Operations: Current Knowledge, Future Needs. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10586>.
- Pagans, E., X. Font and A. Sánchez. 2005. Biofiltration for ammonia removal from composting exhaust gases. Chem. Eng. J. 113: 105-110.
- Porter, C. A. and E. G. Jaworski. 1966. The synthesis of chitin by particulate preparations of *Allomyces macrogynus*. Biochemistry 5: 1149-1154.
- SAS. 1988. SAS/STAT 6.03. SAS Institute Inc., Cary, NC. USA.
- Schmidt, E. L. and L. W. Besler. 1982. Nitrifying *Bacteria*. In: Method of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. ed. Page, A. L., Madison, USA, pp. 1027-1042.
- Sheridan, B., T. Curran, V. Dodd and J. Colligan. 2002. Biofiltration of odour and ammonia from a pig unit-pilot-scale study. Biosyst. Eng. 82: 444-453.
- UNECE/LRTAP. 2012. European Union emission inventory report 1990e2010 under the UNECE Convention on Long-range

- Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Technical report no 8/2012. European Environment Agency.
- USEPA. 1995. Control and pollution options for ammonia emissions. EPA-4561R-95-002.
- Van der Heyden, C., P. Demeyer and E. I. P. Volcke. 2015. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: state-of-the-art and perspectives. *Biosyst. Eng.* 134: 74-93.
- Vergara-Fernández, A., S. Revah, P. Moreno-Casas and F. Scott. 2018. Biofiltration of volatile organic compounds using fungi and its conceptual and mathematical modeling. *Biotechnol. Adv.* 36: 1079-1093.
- Yin, J. and W. Xu. 2009. Ammonia biofiltration and community analysis of ammonia-oxidizing *Bacteria* in biofilters. *Bioresour. Technol.* 100: 3869-3876.
- Yuan, J., L. Du, S. Li, F. Yang, Z. Zhang, G. Li and G. Wang. 2019. Use of mature compost as filter media and the effect of packing depth on hydrogen sulfide removal from composting exhaust gases by biofiltration. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 26: 3762-3770.
- Zhang, H., T. Huang and T. Liu. 2013. Sediment enzyme activities and microbial community diversity in an oligotrophic drinking water reservoir, Eastern China. *PLoS ONE* 8: e78571.
- Zhong, X. Z., Z. Y. Sun, S. P. Wang, Y. Q. Tang, K. Kida and A. Tanaka. 2020. Minimizing ammonia emissions from dairy manure composting by biofiltration using a pre-composted material as the packing media. *Waste Manag.* 102: 569-578.

Odor removal efficiency and microbial profiling of the biofilter ⁽¹⁾

Ren-Bao Liaw ⁽²⁾⁽⁴⁾ Ting-Shun Hsiao ⁽²⁾ and Mei-Ping Cheng ⁽³⁾

Received: May 5, 2020; Accepted: Jul. 31, 2020

Abstract

The purpose of the study aims to evaluate the odor removal efficiency and microbial composition of biofilters applied to ventilating compost depots. The biofilters were divided into four groups, namely A: fern chips, Group B: mixture of fern chips Group C: matured compost, fern chips with humidifying, and Group D: mixture of fern chips and matured compost with humidifying. The odor of inlet and outlet gas were measured, and the microorganisms in the filter samples were identified. The results showed ammonia removal efficiencies of the all treatments were nearly 100% without significant difference during 220 days of operations. The odor concentrations detected in the outlet of the four treatments were 55.4, 55.5, 44.2 and 42.4 OU/m³, respectively, while the latter two biofilters with humidify were lower in odor emission. The data from ssu rRNA gene sequence analysis of the four biofilters showed the phylum *ProteoBacteria* as dominants, which account for 64.3, 63.2, 72.4 and 65.2% of domain *Bacteria* in biofilter A, B, C, D, respectively. In particular, phyla *Bacteroidetes*, *Acidobacteriales*, and *Firmicutes* in biofilter D were classified as orders *Sphingobacteriales*, *Acidobacteriales*, and *Bacillale* with relatively high diversity. The methanogenic archaea classified as phylum *Euryarchaeota* and class *Methanomicrobia* was only found in biofilter D. Moreover, the nitrogen fixation bacterium affiliated to family *Rhizobiales* and genus *Pseudolabrys* and the ammonia oxidizing bacterium affiliated to family *Nitrosomonadales* and genus *Nitrosospira* were also found in biofilter D. Those microorganisms might participate in the nitrogen cycles occurred in the biofilter and help to remove the ammonia produced from the composting process. In summary, D biofilter will be the better choice for odor removal application.

Key words: Odor Removal, Biofilter, Microorganism.

(1) Contribution No. 2645 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

(2) Livestock Management Division, COA-LRI, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(3) Chief Secretary Office, COA-LRI, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(4) Corresponding author, E-mail: liawrb@mail.tlri.gov.tw.