

農業廢棄物堆肥場空氣中微生物 與內毒素分布之研究

Distribution and Characteristics of Airborne Microorganism and Endotoxin in Agricultural Waste Composting Plants

稻江科技暨管理學院
通識教育中心
副教授

楊 心 豪*

Shin-Hao Yang

稻江科技暨管理學院
通識教育中心
教理教授

黃 筱 茜

Hsiao-Chien Huang

弘光科技大學
環境與安全衛生工程系
副教授

羅 金 翔

Chin-Hsiang Luo

弘光科技大學
環境與安全衛生工程系
碩士班研究生

王 邵 麒

Shao-Chi Wang

勞動部
職業安全衛生署
副署長

陳 秋 蓉

Chiou-Jong Chen

勞動部
勞動及職業安全衛生研究所
副研究員

洪 柏 宸

Po-Chen Hung

摘 要

本研究主要針對農業廢棄物堆肥場進行空氣中微生物之調查，同時並對於細菌內毒素含量進行分析，以瞭解目前台灣之堆肥場中生物性危害之程度。研究中選取 2 間堆肥場進行採樣分析，細菌與真菌生物氣膠分佈是利用衝擊式(impactor)生物氣膠採樣器進行採樣，在於細菌內毒素則是先以懸浮微粒採樣器採集 PM_{2.5}/PM₁₀ 之微粒，在併以內毒素分析方法-鱗變形細胞之萃取物基質比色分析法(Limulus Amebocyte Lysate test, LAL test)，進行內毒素之含量分析。研究結果發現，在農業廢棄物堆肥場中，細菌生物氣膠濃度分佈在 1,001-131,944 CFU/m³ 間，真菌生物氣膠則在 353-43,793 CFU/m³ 間。菌種部分細菌類以 *Bacillus* 與 *Staphylococcus* 為主要菌屬，真菌類則都以 *Penicillium* 為主要菌屬。在兩間堆肥場所中，利用針對內毒素

*通訊作者，稻江科技暨管理學院通識教育中心副教授，61363 嘉義縣朴子市學府路二段 51 號，shinhaoyang@ntu.edu.tw

的調查結果顯示，在 PM₁₀ 以下之微粒內毒素濃度介於 16-452 EU/m³。綜合整體影響因子，可以發現翻堆是最主要影響因子，在翻堆過程中微生物隨之揚起，進而影響生物氣膠濃度。建議堆肥場應該改善其通風設備，增加通風換氣進而降低場內之生物氣膠濃度，並加強全面加強工作從業人員個人防護用具的配戴，以降低感染及暴露之風險。

關鍵詞：農業廢棄物，堆肥場，細菌，真菌，生物氣膠，內毒素。

ABSTRACT

This study aims to investigate the airborne microorganisms and bacteria endotoxins in the agricultural waste composting plants, for understanding biological hazards in Taiwan agricultural waste composting plants. Two agricultural waste composting plants were selected as the testing subjects. The bacteria and fungi bioaerosol distributions were sampling by impactor bioaerosol sampler. The universal aerosol sampler was applying to collect PM_{2.5}/PM₁₀ particles and then do the endotoxin analysis, which was using the Limulus Amebocyte Lysate test (LAL test). The results showed that in the agricultural waste composting plants, bacteria bioaerosol concentrations were in the range of 1,001-131,944 CFU/m³, and the fungi bioaerosols were about 353-43,793 CFU/m³. According to the sampling results, *Staphylococcus sp.* and *Bacillus sp.* were the major bacteria in the agriculture-waste composting plant. In these two composting plants, the endotoxin concentrations of the PM10 were 16-452 EU/m³. The sampling data showed that turning the compost is the major parameter to increase the bioaerosol concentrations. Thus, the composting plant should increase the air exchange volume for decreasing bioaerosol concentrations. And according to the questionnaire analysis, the workers were negligent in personal protection.

Keywords: Agricultural waste, Composting plants, Bacteria, Fungi, Bioaerosol, endotoxin.

一、前言

利用堆肥技術進行廢棄物處理是近年世界各國大力推廣之主要環境政策之一，就臺灣而言，近十年來利用堆肥技術處理廚餘與農業廢棄物已成為廢棄物處理之主要方式之一。以廢棄物減量、回收、再利用的角度而言，堆肥是一個非常有成效的有機廢棄物回收再利用處理方式。

有機堆肥也是國家極力推動之有機廢棄物處理方法，由於有機物製成堆肥施用，兼具消除有機廢棄物汙染，充分循環利用生質能源，增進

農地生產力，以及促進自然生態平衡等之多重功能。有機堆肥主要就是將農業及畜產產生的廢棄物進行堆肥。大量產生的農業及畜產廢棄物，如不能適當處理，不但佔用空間，又影響環境衛生，降低生活品質；若任其棄置或焚燒處理，則又有可能造成水質、土壤與空氣等的二次污染。將這些廢棄物中尚有利用價值的有機資材經堆肥化後回歸農田土壤，不但可以解決廢棄物問題，而且可以增進地力。

由於堆肥過程中使用大量有機廢棄物包括廚餘及腐敗蔬果等，並利用微生物進行好氧性發

酵分解作用，因此，堆肥程序中微生物活性作用強。在堆肥作業場所中經常利用翻堆及送風程序提供足夠氧氣以加速微生物對有機物之好氧分解，而肥堆熟成後則需進行過篩去除雜質及分裝等作業，這些擾動過程會造成微生物及其代謝產物從肥堆中逸散至空氣，進而提高現場工作人員健康危害之風險。

堆肥處理過程中產生的環境危害因子主要包括生物氣膠、有機粉塵及臭味問題，這些危害的產生及強度與堆肥之基質組成、處理程序、環境條件有極大之關聯性。雖然國外堆肥廠危害之相關研究頗多，但由於臺灣地區之氣候以及國人飲食習慣的不同，所產生之有機廢棄物成份變化極大，而與歐美等國家有所差異。同時關於國內堆肥作業環境之危害調查資料非常有限。

堆肥作業環境由於其環境具有侷限性，且內部具有土壤及廢棄物等各類型微生物來源，可能包括了細菌、真菌及病毒等。此些堆肥相關微生物則藉由人員作業、翻堆、空氣通風等途徑，逕而造成散佈，成為影響作業環境品質之因素。堆肥作業人員因作業過程中具有高度及直接接觸，特別容易暴露於微生物環境之中，有鑑於此，本計畫針對堆肥作業環境，於其中進行不同季節之微生物採樣，特別是可能影響作業人員呼吸道健康之微生物氣膠微粒進行監測，並同時針對生物氣膠之內毒素，進以評估堆肥環境作業人員之暴露情況。

因此，在本研究中，即選取兩家農業廢棄物堆肥作業環境作為實際測試環境，首先先針對實場環境生物性污染物(細菌生物氣膠與真菌生物氣膠)進行濃度分佈與環境特性調查，並同時針對堆肥環境中內毒素之分佈進行調查，進以瞭解農業廢棄物堆肥場對人體之危害特性。

二、研究背景

2.1 堆肥場生物氣膠污染特性

堆肥場中生物氣膠濃度由於環境特性之影響，其濃度較一般生活環境來的高，以下為國內外針對此環境進行調查之相關文獻。

Fracchia *et al.* (2006)針對義大利堆肥場進行

生物氣膠調查，研究結果發現在 3 個採樣的地點生物氣膠濃度如下，在第一場嗜溫性生物氣膠與嗜高溫性生物氣膠濃度為 33 與 >40,000 CFU/m³；在第二場嗜溫性生物氣膠與嗜高溫性生物氣膠濃度為 39 與 18,700 CFU/m³；在第三場嗜溫性生物氣膠與嗜高溫性生物氣膠濃度為 261 與 6,278 CFU/m³，同時在堆肥場中發現了 *Escherichia coli*、*Staphylococcus aureus*、*Clostridium perfringens*。

Recer *et al.* (2001)針對大型堆肥場中生物氣膠進行量測與比較，研究主要針對生物氣膠濃度進行量測，同時並與背景生物氣膠濃度進行比較。研究成果顯示，整體堆肥場總生物氣膠濃度明顯高於背景生物氣膠濃度，大約是背景生物氣膠濃度之 20 倍高。

Taha *et al.* (2006) 針對有機廢棄物堆肥場進行生物氣膠濃度調查，研究發現 *Aspergillus fumigatus* 與 *actinomycetes* 生物氣膠濃度在於 9.8-36.8 × 10⁶ CFU/m³ 與 18.9-36.0 × 10⁶ CFU/m³。

Byeon *et al.* (2008)針對堆肥場生物氣膠進行分階採樣，進以瞭解在不同粒徑範圍下生物氣膠之濃度，研究中是利用六階的衝擊器進行採樣。結果顯示在六個階層中生物氣膠的濃度均大於 10⁴ CFU/m³，濃度最高在 >7.0 μm；其他依序為 7.0-4.7 μm (2nd)；4.7-3.3 μm (3rd)；3.3-2.1 μm (4th)，2.1-1.1 μm (5th) and 1.1-0.65 μm。

Fischer *et al.* (2008) 針對堆肥場生物性污染物進行調查，研究結果顯示在堆肥場中生物氣膠濃度最高之菌種為 *thermophilic actinomycetes*，其濃度是 2.4 × 10⁶ CFU/m³；其他類生物氣膠濃度總和為 10⁶ CFU/m³；而在場區外生物氣膠之濃度為 10¹-10³ CFU/m³；場區外之 *thermophilic actinomycetes* 與 *thermophilic fungi* 濃度為 10¹-10⁵ CFU/m³。

Folmsbee & Strevett (1999)針對某一室外堆肥中心進行生物氣膠之調查，研究結果顯示堆肥場之生物氣膠濃度室外背景濃度之 10 倍高。細菌生物氣膠之濃度為 4952-9600 CFU/m³；革蘭氏陰性菌生物氣膠濃度為 2586-6806 CFU/m³；真菌 964-1943 CFU/m³；*actinomycetes* 生物氣膠濃度為 1755-4190 CFU/m³。

Byeon *et al.* (2008)使用生物氣膠採樣器測量堆肥場不同堆肥時段所逸散之生物氣膠濃度，測量微生物種類包含細菌、真菌和放線菌等。其研究結果發現不同堆肥時段之生物氣膠濃度並無明顯差異，但若針對堆肥篩選作業進行比較，則篩選作業會造成較高的生物氣膠濃度，採樣器每階層採得之生物氣膠平均濃度達 10^4 CFU/m³，故其總濃度約為 6×10^4 CFU/m³。而菌種鑑定則顯示細菌佔可培養性生物氣膠中之最大宗達 85.1%、真菌為 0.3%、放線菌為 14.6%。

Bünger *et al.* (2007)評估德國堆肥場勞工長期暴露有機粉塵對於呼吸系統疾病以及肺部功能之影響，結果發現堆肥場中具有高濃度之嗜高溫放線菌和絲狀真菌，且有較高的結膜炎罹患率。此外，比較非吸菸勞工與對照組後發現，堆肥場勞工肺活量下降 (-5.4%)，其中有 16 名勞工，肺活量下降超過 10%，而勞工罹患慢性支氣管炎之機率也大幅上升，顯示暴露於堆肥場作業環境之有機粉塵會造成呼吸系統的慢性健康效應，包括黏膜刺激、慢性支氣管炎及加速肺活量下降等。

Chiang *et al.* (2003)利用二階生物氣膠採樣器監測美國東岸汙泥堆肥設施之生物氣膠逸散狀況，研究結果顯示在堆肥場上風之背景處好氧菌濃度為 7.5×10^1 至 1.7×10^2 CFU/m³、嗜中溫真菌 2.6×10^2 至 7.0×10^2 CFU/m³、嗜熱性真菌 5.0 至 1.4×10^1 CFU/m³，*Aspergillus* 則 2.3 至 1.2×10^1 CFU/m³，而堆肥場現場之好氧菌濃度為 4.2×10^3 CFU/m³ 至 5.0×10^4 CFU/m³、嗜中溫真菌 1.8×10^2 CFU/m³ 至 9.5×10^3 CFU/m³、嗜熱性真菌 1.4×10^2 CFU/m³ 至 3.6×10^3 CFU/m³、*Aspergillus* 則為 2.1 至 3.6×10^3 CFU/m³，顯示堆肥場現場濃度均高於背景值。此外，比較堆肥場上風處及下風處之生物氣膠濃度則發現細菌及嗜熱性真菌具有隨著風向逸散之趨勢，次於下風處呈現濃度上升之情況。

在國內堆肥場生物氣膠的調查上，洪(2006)針對堆肥場生物氣膠與內毒素濃度進行量測，研究結果顯示，可培養性微生物濃度以堆肥區為最高，濃度達 10^3 - 10^5 CFU/m³，顯著高於液肥區、

清理區、餐廳及背景上風處($p < 0.05$)。整體而言，嗜中溫細菌、革蘭氏陰性菌及嗜中溫真菌濃度呈現顯著性季節差異，以春季及夏季濃度為最高。堆肥區中不同粒徑之微粒質量濃度採樣結果顯示，包裝作業會造成粗粒徑與細粒徑有機粉塵之明顯逸散，且以粒徑 $< 0.25 \mu\text{m}$ 之微粒質量濃度的增加最為顯著。

李(2009)針對堆肥場生物氣膠以及生物氣膠對人體健康之影響進行評估，研究結果顯示，一年間 5 月至 6 月之間堆肥場中生物氣膠總菌落數最高 (4.9×10^4 CFU/m³)，其中嗜中溫細菌與麴菌的數量最多，*A. fumigatus* 孢子數也達到最高。同時並發現堆肥場生物氣膠造成呼吸道表皮細胞之發炎反應與微生物數量有關，並且影響重塑基因表現。由於呼吸道重塑反應會增加慢性呼吸道疾病之發生，如氣喘或阻塞性肺病等，因此生物氣膠對於堆肥場工作人員之健康危害值得注意。

由上述之文獻資料可以發現，於堆肥環境工作之勞工，確實有受到職業性生物氣膠暴露之可能，並且因此引發出各類呼吸道及肺部健康症狀，值得有關主管單位及學研機構關注。

此外，堆肥作業環境中之生物性污染既然來自於介質、水源、廚餘、有機廢棄物等自然物質，是故堆肥作業所在之當地氣候條件與地域特殊性即可能影響空氣中細菌或真菌濃度。是故國外之實場採樣及調查資料，無法直接援引為本土之堆肥作業環境工作人員生物性危害暴露評估之參考。

2.2 細菌內毒素健康危害與環境分佈

整體而言，生物氣膠對人體之危害則包括過敏性疾病、感染性疾病、及中毒等。可能之感染性疾病，例如退伍軍人症、肺結核病等；過敏性疾病，例如氣喘、過敏性肺炎及鼻炎等，另一部份則是革蘭氏陰性細菌之內毒素和真菌所產生之真菌毒素均可能造成人類呼吸道之健康症狀與衛生問題，因此本研究即預計針對堆肥作業環境之生物氣膠中之內毒素與真菌毒素進行調查，以下即針對內毒素與真菌毒素進行說明。

細菌內毒素主要來自革蘭氏陰性細菌之細

胞壁，其化學組成爲脂多醣體(lipopolysaccharide)化合物，其脂鏈爲 3-hydroxyfatty acids。內毒素經呼吸道侵入人體後造成之健康效應主要爲發燒、身體不適、白血球數量改變和呼吸道壓迫等(Castellan *et al.*, 1984)。

蘇(1996)利用 *Limulus Amebocyte Lysate* assay(LAL)分節針對醫院、製粉廠、棉紡織廠、汽車零件工廠及養豬場等作業場所進行空氣微粒樣本之內毒素測量。整體而言，以棉紡織廠空氣中之內毒素濃度爲最高，約達 110 至 6,649 EU/m³，其次爲汽車工業之沖床區約 194 EU/m³ 及養豬場之分娩區約 144 至 159 EU/m³，其餘各採樣點均未達 10 EU/m³。

Tanner *et al.* (1997)利用 37 mm 聚氯乙烯(PVC)配合濾紙夾在鋪設不同材料之馬廄中進行微粒採樣，再以 LAL 動力學方式分析內毒素濃度。結果顯示鋪設稻草稈之馬廄內毒素濃度爲 43.53 EU/m³，鋪設電話簿紙馬廄濃度爲 20.28 EU/m³，而鋪設木屑馬廄濃度爲 19.08 EU/m³，經統計檢定，鋪設稻草稈之馬廄之內毒素濃度顯著高於鋪設其他兩種材料者。

Vogelzang *et al.* (1998)以 171 位養豬人員爲對象進行 3 年長期追蹤，評估其暴露於含內毒素粉塵與肺功能下降之關係。粉塵樣本已 LAL 動力學方式分析內毒素含量，肺功能則是利用乾燥滾動式肺功能測定儀(n = 94)以及水密閉式肺量計(n = 77)測得，結果顯示粉塵平均暴露量爲 2.63 mg/m³，內毒素平均濃度爲 105 ng/m³，肺功能測定結果顯示於研究初期受試者第一秒吐氣量(FEV1)平均爲 3.97 L，用力肺活量(FVC)平均爲 5.06 L，而 FEV1 平均每年下降 73 ml，FVC 平均每年下降 55 ml，經由檢定結果顯示 FEV1 與內毒素暴露量呈現顯著負相關，而 FVC 則與粉塵及內毒素暴露量呈現顯著負相關。

陳(2000)以 LAL 分析不同環境(氣喘兒童住家之微粒樣本(n = 14)、穀倉之空氣樣本(n = 7)、辦公大樓之微粒樣本(n = 7)及空氣樣本(n = 12)、垃圾掩埋場之空氣樣本(n = 11)之樣本中內毒素濃度。結果顯示，其中氣喘兒童住家環境微粒樣本所含內毒素濃度爲 4.05-152.99 ng/mg，穀

倉環境空氣樣本中內毒素濃度爲 0.069-0.523 ng/m³，空氣樣本之內毒素濃度則爲 0.0005-0.0440 ng/m³，垃圾掩埋場之空氣樣本之內毒素濃度則爲 0.0001-0.0031 ng/m³。顯示微粒樣本以住家環境略高於辦公大樓，而空氣樣本則以穀倉爲最高，其次爲辦公大樓，垃圾掩埋場濃度則爲最低。

Hryhorczuk *et al.* (2001)針對大型郊區的堆肥場所進行生物氣膠與內毒素調查，研究結果發現總真菌孢子濃度在場內與場外分別爲 13,451 spores/m³與 8,772 spores/m³，細菌生物氣膠濃度場內與場外分別爲 11,879 CFU/m³與 3,204 CFU/m³，內毒素平均濃度在場內與場外分別爲 2.17 ng/m³與 0.24 ng/m³。整體結果顯示堆肥場內部在細菌生物氣膠、真菌孢子以及內毒素濃度上都明顯的高於場外。可知堆肥場之生物氣膠濃度是相當高的。

洪(2006)研究發現，堆肥區室內空氣中 PM₁₀ 所含內毒素平均濃度爲 73.2 EU/m³ (40.2-129.7 EU/m³)。由於細粒徑微粒之質量濃度高，因此單位面積空氣中存在於 PM_{2.5} 之內毒素含量高於 PM_{2.5-10}。堆肥場之翻堆及包裝等作業爲造成生物氣膠及氣懸微粒逸散之主要原因，尤其以細粒徑部分最爲顯著，因此，堆肥作業區域之頻繁活動對於現場員工可能造成潛在之健康危害。

三、研究方法

3.1 農業廢棄物堆肥場環境特性

本研究針對農業廢棄物堆肥場進行生物氣膠與內毒素之調查，以臺灣本土兩間農業廢棄物堆肥作業設施作爲目標，表 1 爲兩間堆肥場之環境特性。

圖 1 與圖 2 爲本研究所選取之農業廢棄物堆肥場設施平面圖，兩家堆肥作業場所均屬於半開放式作業場所，分別爲農業廢棄物堆肥作業場所 1 與農業廢棄物堆肥作業場所 2。每一堆肥作業設施均進行一次實地採樣，同時針對早上、中午與下午進行採樣，以比較不同時段對於作業環境之生物氣膠分佈是否具有差異。本研究在採樣過程中，對於作業環境之特性也同時進行採樣分析，分別利用風速計量測作業環境之風速，以及

表 1 兩間農業廢棄物堆肥場基本特性

堆肥場代號	農業廢棄物類	
	1	2
堆肥場面積(m ²)	1,108	2,840
堆肥主要成分	雞糞、豬糞、牛糞	豬糞
添加物	木屑	廢菇包、花生殼
混合量	1 : 0.4-0.5	1 : 1

表 2 堆肥環境內生物氣膠採集點規劃表

	農業廢棄物堆肥作業場所 1	農業廢棄物堆肥作業場所 2
廢棄物堆置區	E	C
廢棄物堆肥前處理區	F	A
堆肥半成品暫存區	C	D、E
堆肥半成品翻堆置放區	G、H、I	F、G
堆肥成品包裝區	A、B、D	B

Q-trak (TSI inc.)量測作業環境之溫度、相對濕度與二氧化碳。若依各作業場所內之工作內容進行區分，可進一步將採樣點與工作內容進行整理，如表 2 所示。

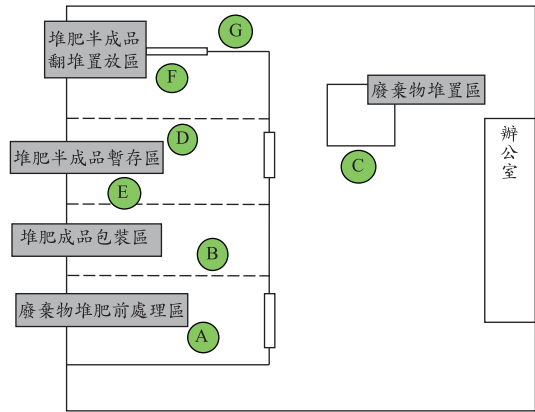


圖 2 農業廢棄物類堆肥作業場所 2 平面圖

3.2 生物氣膠採樣分析方法

堆肥場內部之採樣位置，依照我國環保署 NIEA E301.13C「室內空氣中總細菌檢測方法」及 NIEA E401.13C「室內空氣中總真菌數檢測方法」之規範，採樣高度則為距離地面 1.0-1.5 m 高 (由於考量堆肥作業人員均為彎腰或直立進行作業，故設定較此高度模擬人體呼吸)，以模擬人類

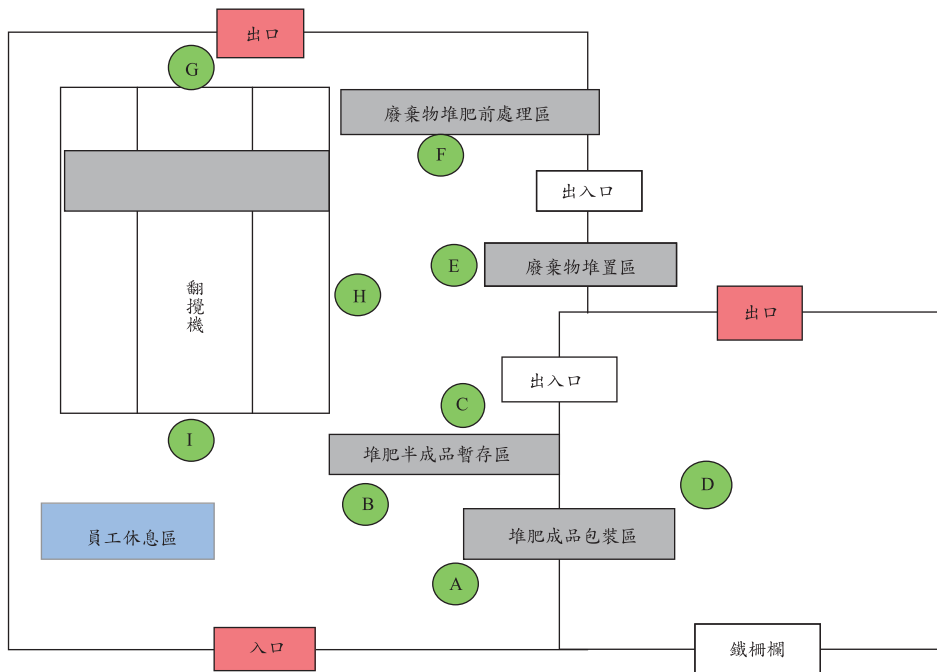


圖 1 農業廢棄物類堆肥作業場所 1 平面圖

呼吸帶之暴露。採樣位置數目之規劃原則上以每 500-1,000 平方公尺設立一個採樣位置，並且依照堆肥場內部勞工作業及污染來源狀況，增加採樣位置。

此外，本研究在每一個採樣點，亦同步紀錄採樣工作進行時之溫度、濕度、二氧化碳濃度以及風速等環境條件，以及工作人員數目及行為，以利進行生物氣膠濃度影響推估。

堆肥場之生物氣膠採樣及監測工作，以分為第一次(夏季)、第二次(秋)、第三次(冬季)等三個時段中執行。每一個時段中，均前往堆肥場進行採樣及監測工作至少一次。

本研究之生物氣膠採樣及監測工作，參考美國 ACGIH, 1999, Bioaerosols: Assessment and Control 及我國環保署 NIEA E301.13C、NIEA E401.13C 等建議及規範，使用衝擊式 (impactor) 生物氣膠採樣器(Biostage with Quick Take 30, SKC Inc., USA)，此採樣器上有 400 孔，孔徑為 0.25 mm，採樣時以充電電池啟動內置馬達抽取空氣，當氣流轉變方向時，細菌及真菌因慣性被收集到培養基上，採樣流量是 28.3 L/min，採樣前後該機器本身會自行校正其流量，使用之採樣介質為倒入 27 mL 培養基之直徑 90 mm 可拋棄式塑膠培養皿。本研究中採用二種培養基，Malt Extract Agar (MEA)及 Trypticase Soy Agar (TSA)。其中 MEA 為美國工業衛生師協會 (American Conference of Government Industrial Hygienists, ACGIH)推薦使用的廣效性培養基，可提供大部份的真菌生長，而 TSA 則用以收集培養空氣中之細菌。每個採樣點進行三次早上、中午與下午採樣，除在每個採樣點均附以重複試驗進行。樣後將培養基放入恆溫培養箱中培養。採樣時間經堆肥作業設施實施前測後設定為 15 秒鐘，以避免培養基破出 (break through)造成無法計數(too many to count, TNTC)之情形。

針對採集培養細菌使用之 TSA 及真菌使用之 MEA 培養基之配置方法，將按照兩種培養基之標準配方秤取所需之培養基成分加上適量之去離子水均勻混合後，放入加壓滅菌釜以 121°C 高溫進行滅菌 20 分鐘。滅完菌後，待培養基冷

卻之 55~60°C，分裝至 27 ml 的培養基至培養皿 (90 × 15 mm)中，待其凝固後儲存於 4°C 冰箱中備用。每一批次配製完成之培養基均以 1/10 比例進行抽樣，將其於 30°C 下溫度下培養 48 ± 2 小時 (TSA)以及於 25 ± 1°C 培養箱內培養 4 ± 1 天 (MEA)，觀察是否有微生物生長。以作為培養基之品管檢驗。確保培養基之可用性。若培養時間經過後並無菌落生長，該批培養基為通過品管檢驗，方可用於後續實際採樣行動中。

TSA 細菌培養基必須於 30 ± 1°C 培養 48 ± 2 小時後計數菌落數，而 MEA 真菌之培養則必須於 25 ± 1°C 培養箱內培養 4 ± 1 天後計數。根據環檢所最新公告之室內空氣中總細菌數檢測方法 (NIEA E301.13C)，細菌培養基最佳量之菌落數為 25-250 個菌落之間。室內空氣中總真菌數檢測方法 (NIEA E401.13C)，培養基最佳量之菌落數為 10-100 個菌落之間。

為進一步瞭解實際採集之活性細菌與真菌菌落之品種，因此本研究在實際細菌與真菌採樣培養後，細菌部分初步先經分離純化後將型態相同者進行分類，再進一步則是以革蘭氏染色法初步進行分子生物菌種鑑定。真菌則是初步先將型態相同者進行分離純化及分類，再轉殖純化後進行分子生物菌種鑑定，菌種鑑定中，細菌是利用抽取 DNA 進行 16S rDNA 比對鑑定，另真菌則是以抽取 DNA 進行 18S rDNA 比對鑑定。

3.3 細菌內毒素採樣分析

在本研究中懸浮微粒採樣是為利用 Model 300 系列泛用型採樣器 (UASTM)作為 PM_{2.5} 與 PM₁₀ 之採樣器，設定流量以 300 lpm 進入採樣器，經由虛擬衝擊分徑器將微粒分徑，所採集的粒徑 2.5-10 μm 範圍間之微粒，可收集在 2.5 inch × 6.5 inch 之濾紙上，而小於 2.5 μm 之微粒，則收集在 8 inch × 10 inch 之濾紙上，使用之濾紙為 PALL TISSUQUARTZ 2500 QAT-UP 石英濾紙。

濾紙採樣前先置於溫度 22.5°C 相對濕度 40%之恆溫恆濕乾燥箱中，調理 25 小時以上，於採樣前取出進行秤重，並放置於濾紙保存盒中，並以封口膜密封運送至採樣點進行採樣。懸浮微

表 3 堆肥環境內毒素與真菌毒素採集點規劃表

	農業廢棄物堆肥作業場所 1	農業廢棄物堆肥作業場所 2
廢棄物堆置區	E	C
廢棄物堆肥前處理區	F	A
堆肥半成品暫存區	C	E
堆肥半成品翻堆置放區	H	G
堆肥成品包裝區	B	B

粒採樣器則是每個採樣點採集兩個小時。採樣完畢後，將濾紙取下置於濾紙保存盒中以封口膜密封運送回實驗室後，將濾紙連同保存盒置於溫度 22.5°C 相對濕度 40%-恆溫恆濕乾燥箱中，調理 25 小時後進行秤重，再以封口膜密封置於 4°C 冰箱中保存，以待內毒素分析時使用。在採樣點選擇部分則如表 3 所示，進行採樣。

使用目前國際公認且廣泛使用的內毒素分析方法-巯變形細胞之萃取物基質比色分析法 (Limulus Amebocyte Lysate test, LAL test)，之動力學方式分析內毒素含量。

本實驗所使用之內毒素標準品 (CSE)來源為 Escherichia coli O113:H10，檢量線濃度單位為 EU/ml (Endotoxin Unit/ml)，本實驗所使用之 CSE 每 ng 等於 11 EU，圖 3 為內毒素之檢量線。

應用以下公式將樣本濃度換算為每立方公尺空氣中有多少 EU 之內毒素：

$$C2 = (C1 \times \text{樣本溶液體積}) / V$$

$$C1 = \text{樣本經檢量線推估之濃度 (EU/ml)}$$

$$C2 = \text{樣本換算後之濃度 (EU/m}^3\text{)}$$

$$V = \text{採樣體積 (m}^3\text{)}$$

四、結果與討論

4.1 農業廢棄物堆肥場生物氣膠分佈特性

本研究為進行農業廢棄物堆肥場生物氣膠之分佈特性，特選取 2 間堆肥場進行採樣分析，農業廢棄物堆肥作業場所 1 為一南部大型之堆肥作業環境。採樣時間分別在第一次(6月-8月)、第二次(9月-10月)以及第三次(11月-12月)三個時段

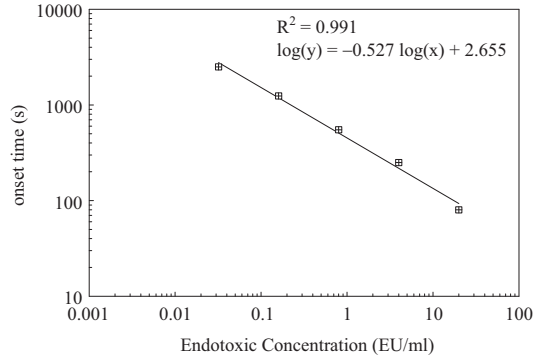


圖 3 內毒素檢量線

進行生物氣膠採樣，針對農業廢棄物堆肥作業場所 1 共規劃 10 各採樣點，J 點為場外採樣點(主要是作為比對場內生物氣膠之用途)，而 A 點-I 點則為室內採樣點。在每一點的採樣，均是選擇採樣高度為 1.5 m。每個採樣點均有三次採樣，分別為早上、中午及下午三時段，每次採樣均為重複採樣以確保實驗數據。

表 4 即是第一次農業廢棄物堆肥作業場所 1 所針對 10 個採樣點細菌類生物氣膠濃度分佈之統計表，結果顯示在堆肥作業設施外採樣點細菌類生物氣膠濃度在 5,052-7,015 CFU/m³，在場內採樣點部分細菌類生物氣膠濃度在 5,176-64,681 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 B 之上午濃度為 64,681 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 H 中午濃度為 5,176 CFU/m³。

第二次採樣結果顯示在堆肥作業設施外採樣點細菌類生物氣膠濃度在 3,052-6,329 CFU/m³，在場內採樣點部分細菌類生物氣膠濃度在 1,001-80,266 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 B 之上午濃度為 80,266 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 F 上午濃度為 1,001 CFU/m³。

第三次採樣結果顯示在堆肥作業設施外採樣點細菌類生物氣膠濃度在 801-1,032 CFU/m³，在場內採樣點部分細菌類生物氣膠濃度在 353-24,735 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 B 之下午濃度為 24,735 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 H 下午濃度為 353 CFU/m³。

表 4 農業廢棄物堆肥場 1 細菌生物氣膠分佈

第一次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
半成品暫存區	採樣點 A	33,239	1,313	6,080	3,823	28,862	2,465
	採樣點 B	64,681	3,982	21,894	5,739	30,752	1,253
	採樣點 C	24,217	1,432	13,903	2,145	42,789	4,155
成品包裝區	採樣點 D	44,523	2,319	11,630	1,257	24,181	3,510
廢棄物堆置區	採樣點 E	23,187	1,707	6,952	1,623	16,075	4,867
堆肥前處理區	採樣點 F	52,556	3,210	14,846	566	15,734	2,046
翻堆置放區	採樣點 G	34,822	1,484	43,100	1,582	22,688	5,685
	採樣點 H	40,893	3,361	5,176	1,496	22,709	2,600
	採樣點 I	22,052	1,657	17,934	1,635	16,009	3,785
場外	採樣點 J	5,052	522	5,932	432	7,015	784
第二次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
半成品暫存區	採樣點 A	48,989	4,284	26,886	1,038	26,756	1,054
	採樣點 B	26,907	2,417	36,872	6,838	26,929	8,307
	採樣點 C	22,787	1,649	23,373	1,810	33,819	1,019
成品包裝區	採樣點 D	10,697	5,633	35,166	7,365	18,145	1,876
廢棄物堆置區	採樣點 E	20,457	1,340	35,131	1,586	29,868	8,998
堆肥前處理區	採樣點 F	1,001	316	12,017	6,573	34,478	1,030
翻堆置放區	採樣點 G	42,184	2,060	9,552	2,389	2,667	106
	採樣點 H	14,141	1,123	16,532	8,488	24,113	3,802
	採樣點 I	29,373	9,730	80,266	18,687	16,203	1,663
場外	採樣點 J	3,052	621	6,329	623	6,157	874
第三次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
半成品暫存區	採樣點 A	4,134	335	6,572	816	742	35
	採樣點 B	1,767	277	4,240	777	24,735	2,742
	採樣點 C	636	282	3,993	226	4,735	506
成品包裝區	採樣點 D	5,618	596	19,717	3,759	4,099	696
廢棄物堆置區	採樣點 E	2,191	353	4,311	268	2,191	190
堆肥前處理區	採樣點 F	1,378	106	3,675	413	742	35
翻堆置放區	採樣點 G	4,382	282	3,816	424	9,823	848
	採樣點 H	5,442	685	7,385	821	353	282
	採樣點 I	2,014	742	5,583	706	3,922	459
場外	採樣點 J	850	652	1,032	543	801	347

*單位：CFU/m³

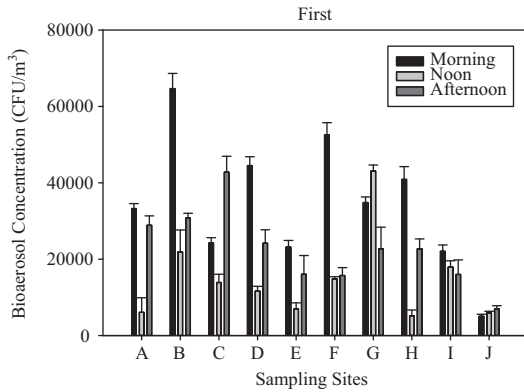


圖 4 農業廢棄物堆肥場 1 細菌生物氣膠分佈(第一次採樣)

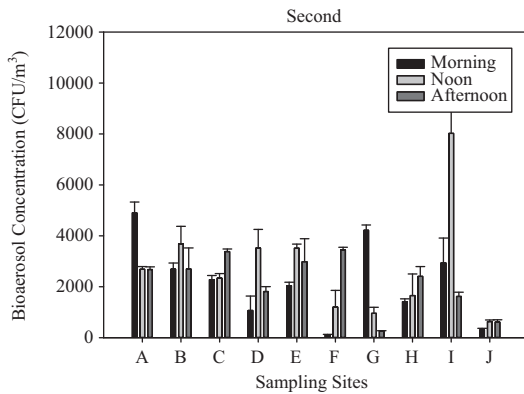


圖 5 農業廢棄物堆肥場 1 細菌生物氣膠分佈(第二次採樣)

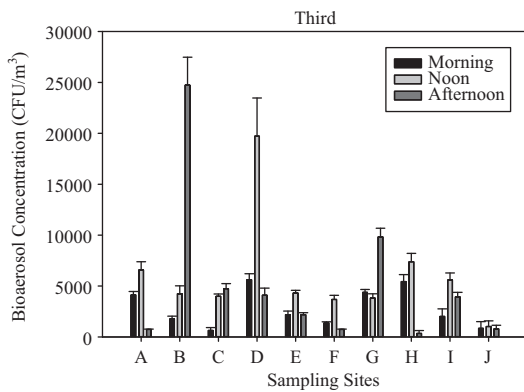


圖 6 農業廢棄物堆肥場 1 細菌生物氣膠分佈(第三次採樣)

圖 4、圖 5 及圖 6 分別顯示農業廢棄物堆肥場 1 細菌生物氣膠第一次至第三次採樣結果分佈。整體而言，場內細菌生物氣膠濃度是高於場外細菌生物氣膠濃度，不同採樣時段對於細菌生物氣膠濃度無顯著影響($p>0.05$)，在場內不同採樣點之採樣結果並無顯著差異。同時進一步比較場內有翻堆之區域細菌生物氣膠與無翻堆之細菌生物氣膠之差異，結果發現有翻堆區域之細菌生物氣膠濃度顯著高於未翻堆部分($p<0.05$)，主要原因應是由於翻堆時微生物被捲起所致。此部分與廚餘堆肥作業場 1 之情形是相同的。

表 5 即是第一次農業廢棄物堆肥作業場 1 針對 10 個採樣點真菌類生物氣膠濃度分佈之統計表，結果顯示在堆肥作業設施外採樣點真菌類生物氣膠濃度在 1,012-1,131 CFU/m³，在場內採樣點部分真菌類生物氣膠濃度在 872-24,730 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 E 中午濃度為 24,730 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 C 中午濃度為 872 CFU/m³。

第二次採樣結果顯示在堆肥作業設施外採樣點真菌類生物氣膠濃度在 1,014-1,231 CFU/m³，在場內採樣點部分真菌類生物氣膠濃度在 424-4,843 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 E 下午濃度為 4,843 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 H 上午濃度為 424 CFU/m³。

第三次採樣結果顯示在堆肥作業設施外採樣點真菌類生物氣膠濃度在 987-1231 CFU/m³，在場內採樣點部分真菌類生物氣膠濃度在 565-2,792 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 I 下午濃度為 2,792 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 I 中午濃度為 565 CFU/m³。

圖 7、圖 8 及圖 9 分別顯示農業廢棄物堆肥場 1 真菌生物氣膠第一次至第三次採樣分佈。整體而言，場內真菌生物氣膠濃度是高於場外真菌生物氣膠濃度，不同採樣時段對於真菌生物氣膠濃度不無顯著影響($p>0.05$)，在場內不同採樣點之採樣結果並無顯著差異。同時進一步比較場內有翻堆之區域真菌生物氣膠與無翻堆之真菌生物氣膠之差異，結果發現有翻堆區域之真菌生物氣膠濃度顯著高於未翻堆部分($p<0.05$)，主要原

表 5 農業廢棄物堆肥場 1 真菌生物氣膠分佈

第一次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
半成品暫存區	採樣點 A	1,413	416	1,013	33	1,033	199
	採樣點 B	1,178	260	1,508	433	1,008	62
	採樣點 C	1,121	308	872	317	1,051	337
成品包裝區	採樣點 D	2,363	604	3,859	196	2,436	461
廢棄物堆置區	採樣點 E	17,029	1,390	24,730	4327	23,538	5945
堆肥前處理區	採樣點 F	4,568	175	6,938	497	11,284	817
翻堆置放區	採樣點 G	1,696	218	1,237	189	1,699	231
	採樣點 H	1,399	234	1,658	239	1,119	274
	採樣點 I	1,060	152	1,538	261	636	152
場外	採樣點 J	1,055	225	1,131	233	1,012	252
第二次採樣							
採樣區域	採樣點	早上	中午	下午			
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
半成品暫存區	採樣點 A	2,035	676	2,702	654	2,954	451
	採樣點 B	1,084	233	1,878	374	2,177	296
	採樣點 C	1,013	120	1,699	93	1,618	383
成品包裝區	採樣點 D	1,494	320	3,444	382	4,648	421
廢棄物堆置區	採樣點 E	848	264	4,726	469	4,843	558
堆肥前處理區	採樣點 F	589	185	2,704	258	2,365	546
翻堆置放區	採樣點 G	683	272	3,270	270	1,651	143
	採樣點 H	424	152	3,055	129	1,998	563
	採樣點 I	1,630	684	2,462	503	1,618	426
場外	採樣點 J	1,055	265	1,231	243	1,014	222
第三次採樣							
採樣區域	採樣點	早上	中午	下午			
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
半成品暫存區	採樣點 A	1,731	247	707	70	1,802	200
	採樣點 B	1,484	124	919	70	1,802	247
	採樣點 C	1,696	294	601	106	1,661	242
成品包裝區	採樣點 D	989	118	742	76	1,731	388
廢棄物堆置區	採樣點 E	1,979	206	1,237	247	1,767	289
堆肥前處理區	採樣點 F	1,944	388	919	141	2,014	530
翻堆置放區	採樣點 G	1,873	312	707	82	1,413	353
	採樣點 H	1,625	144	742	35	1,838	70
	採樣點 I	1,413	282	565	282	2,792	495
場外	採樣點 J	987	225	1,231	323	1,012	325

*單位：CFU/m³

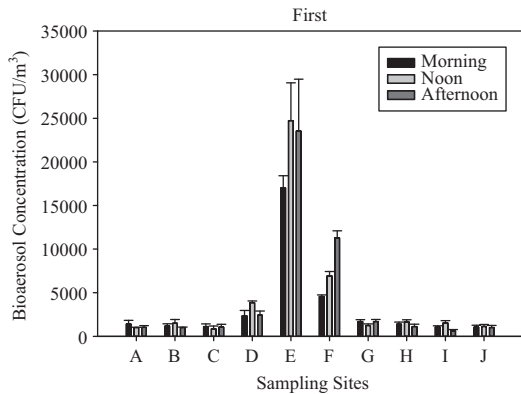


圖 7 農業廢棄物堆肥場 1 真菌生物氣膠分佈(第一次採樣)

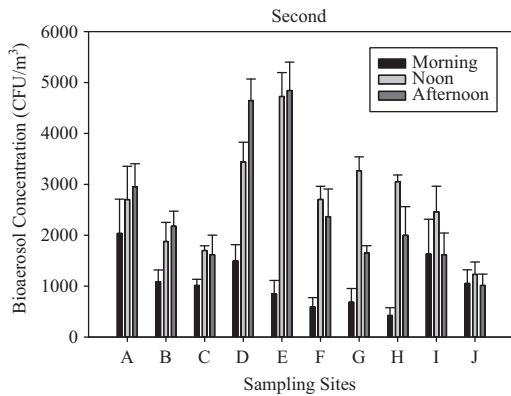


圖 8 農業廢棄物堆肥場 1 真菌生物氣膠分佈(第二次採樣)

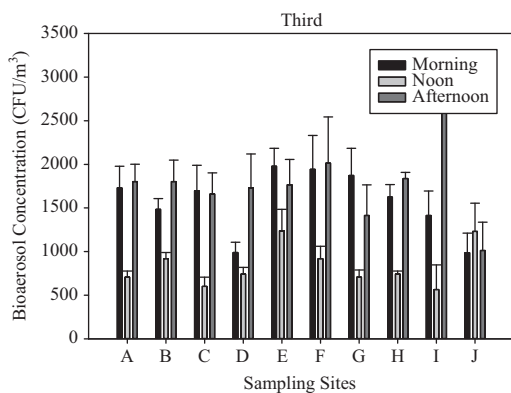


圖 9 農業廢棄物堆肥場 1 真菌生物氣膠分佈(第三次採樣)

因應是由於翻堆時微生物被捲起所致。

三次採樣之個點環境條件如表 6 所示，同時併以綜合農業廢棄物類堆肥作業場所 1 三季之採樣資料統計分析後，發現比較溫度、濕度、風速與二氧化碳對生物氣膠分佈之影響。發現溫度、二氧化碳及風速對於細菌生物氣膠之分佈具有相關性($p < 0.01$)。而溫度對於真菌生物氣膠之分佈也呈現相關性($p < 0.05$)。整體而言，農業廢棄物類堆肥作業場所 1 三季生物氣膠採樣所呈現結果中，可發現當堆肥場從事堆肥翻攪、包裝及會引起粉塵飛揚之行為時，都會造成生物氣膠濃度之升高。由於農業廢棄物類堆肥作業場所 1，場內生物氣膠濃度比室外區域高出許多，場內之生物氣膠又以細菌類為大多數。

本研究在實際菌種鑑定部分發現，在堆肥場 1 中細菌部分主要包含 *Bacillus sp.*、*Bacillus cereus*、*Agromyces sp.*、*Jeotgalicoccus sp.*、*Dietzia sp.*、*Staphylococcus sp.*、*Nocardiosis sp.*。其中 *Bacillus* 菌屬為桿菌類，另 *Staphylococcus* 為葡萄球菌類。由鑑定結果中可發現 *Staphylococcus* 菌屬佔大多數，其次為 *Bacillus* 菌屬；另在真菌主要為 *Penicillium sp.*、*Penicillium sclerotiorum*、*Penicillium verruculosum*、*Acremonium sp.*、*Aspergillus sp.*、*Aspergillus aculeatus*、*Aspergillus sclerotiorum*、*Aspergillus tubingensis*、*Meira argovae*、*Trichoderam asperellum*。其中 *Penicillium sp.*、*Aspergillus sp.* 均屬於致過敏性菌種。由鑑定結果中可發現 *Penicillium* 菌屬佔大多數，其次為 *Trichoderam* 菌屬。

農業廢棄物堆肥作業場所 2 為一南部部小型之堆肥作業環境。分別在第一次(6 月-8 月)、第二次(9 月-10 月)以及第三次(11 月-12 月)三個時段進行生物氣膠採樣，針對農業廢棄物堆肥作業場所 1 共規劃 8 個採樣點，H 點為場外採樣點(主要是作為比對場內生物氣膠之用途)，而 A 點-G 點則為室內採樣點。在每一點的採樣，均是選擇採樣高度為 1.5 m。每個採樣點均有三次採樣，分別為早上、中午及下午三時段，每次採樣均為重複採樣以確保實驗數據。

表 6 農業廢棄物堆肥場 1 採樣過程環境條件

第一次採樣													
採樣區域	採樣點	早上				中午				下午			
		溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)
半成品暫存區	採樣點 A	29.3	74	428	0	31.4	72	383	0	31.4	71	432	0.1
	採樣點 B	29.9	76	422	0.1	32.0	71	461	0.1	31.3	69	419	0.1
	採樣點 C	30.3	75	503	0.1	32.4	68	470	0.1	32.5	71	506	0
成品包裝區	採樣點 D	30.7	75	559	0.7	33.1	71	583	0	32.7	70	529	0.2
廢棄物堆置區	採樣點 E	31.7	72	519	0	33.3	68	504	0	33.0	67	564	0.1
堆肥前處理區	採樣點 F	32.9	72	550	1.1	34.7	67	689	1.2	33.3	68	565	0.6
翻堆置放區	採樣點 G	32.7	72	843	2.0	34.3	71	1049	2.4	34.0	69	1115	0.3
	採樣點 H	32.4	68	522	0.1	33.1	68	459	0.1	34.1	66	535	0
	採樣點 I	32.9	66	410	0	33.6	68	399	0.1	33.6	66	406	1.1
場外	採樣點 J	32.9	70	350	1.3	34.6	65	389	1.2	33.3	68	385	1.6
第二次採樣													
採樣區域	採樣點	早上				中午				下午			
		溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)
半成品暫存區	採樣點 A	32.6	64.8	428	0	35.1	53.1	383	0	35.4	54.9	432	0.1
	採樣點 B	33.5	62.3	422	0	34.9	55.9	461	0.1	35.3	55.3	419	0.1
	採樣點 C	33.4	62.9	503	0.1	35.2	54.8	470	0.1	35.1	56.2	506	0
成品包裝區	採樣點 D	34.1	63.4	559	1.1	35.0	55.9	583	0.1	35.5	56.6	529	0.2
廢棄物堆置區	採樣點 E	34.1	59.3	519	0	35.0	57.6	504	0.1	35.2	56.9	564	0
堆肥前處理區	採樣點 F	34.0	59.8	550	0.7	35.3	57.6	689	0	35.6	56.8	565	0.3
翻堆置放區	採樣點 G	34.2	58.2	843	7.6	35.5	55.2	1049	1.2	35.8	57.1	1115	0.1
	採樣點 H	34.6	56.5	522	0	35.5	55.7	459	0.1	35.7	56.8	535	0
	採樣點 I	34.7	55.5	410	0	35.7	52.2	399	4.2	35.7	53.3	406	2.2
場外	採樣點 J	33.9	62.3	450	1.3	35.6	55.5	489	1.2	35.3	55	485	1.2
第三次採樣													
採樣區域	採樣點	早上				中午				下午			
		溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)
半成品暫存區	採樣點 A	30.3	63.1	711	0.01	31.4	56.9	635	0	28.1	66.7	458	0.3
	採樣點 B	29.9	63.7	759	0	31.3	57.5	700	0	28.0	68.1	458	0.3
	採樣點 C	29.8	64.4	769	0	31.2	58.1	709	0	27.7	68.6	471	0
成品包裝區	採樣點 D	30.0	64.2	882	0	31.1	59.1	793	0	28.0	69.7	515	0
廢棄物堆置區	採樣點 E	30.0	63.6	840	0	31.1	59.5	840	0	27.9	69.3	506	0
堆肥前處理區	採樣點 F	30.1	63.7	973	0	31.0	60.4	942	0	27.7	70.0	570	0
翻堆置放區	採樣點 G	29.8	59.8	778	0.01	31.2	57.3	774	0	28.2	71.1	835	0
	採樣點 H	29.8	62.5	876	0	31.2	59.1	889	0	28.7	67.8	769	0
	採樣點 I	30.2	61.4	870	0	31.3	59.6	944	0	28.1	67.5	537	0
場外	採樣點 J	30.9	64.2	450	0.8	31.6	60	489	1.2	30.3	66	385	1.6

表 7 農業廢棄物堆肥場 2 細菌生物氣膠分佈

第一次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
堆肥前處理區	採樣點 A	4,099	334	29,823	3,653	16,302	3,915
成品包裝區	採樣點 B	91,025	2,679	33,828	3,512	41,484	1,978
廢棄物堆置區	採樣點 C	3,424	173	3,392	322	6,667	1,115
半成品暫存區	採樣點 D	12,322	1,123	19,435	4,735	26,042	1,374
	採樣點 E	10,671	1,367	15,006	4,670	10,141	954
翻堆置放區	採樣點 F	11,987	1,632	19,872	2,932	19,431	2,012
	採樣點 G	6,461	440	8,198	1,305	12,792	1,164
場外	採樣點 H	2,463	241	287	1,305	3,877	1,098
第二次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
堆肥前處理區	採樣點 A	TNTC	-	11,519	1,413	41,979	4,060
成品包裝區	採樣點 B	TNTC	-	8,693	3,853	21,696	1,978
廢棄物堆置區	採樣點 C	10,671	3,393	3,251	1,201	17,550	5,930
半成品暫存區	採樣點 D	9,010	1,731	9,929	1,095	15,018	4,417
	採樣點 E	10,459	2,826	8,363	2,457	16,926	5,830
翻堆置放區	採樣點 F	21,246	4,349	24,829	5,377	26,572	3,251
	採樣點 G	16,843	5,184	TNTC	-	13,944	6,057
場外	採樣點 H	987	214	1,078	850	1278	891
第三次採樣							
採樣區域	採樣點	早上		中午		下午	
		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
堆肥前處理區	採樣點 A	TNTC	-	11,731	2,473	15,018	6,961
成品包裝區	採樣點 B	19,965	2,579	8,551	1,413	8,799	176
廢棄物堆置區	採樣點 C	4,841	2,155	6,431	1,766	5,936	353
半成品暫存區	採樣點 D	22,332	2,332	12,085	1,978	36,608	636
	採樣點 E	7,209	7,208	12,332	2,579	29,505	6,749
翻堆置放區	採樣點 F	39,894	3,922	13,958	7,102	TNTC	-
	採樣點 G	18,304	4,098	23,145	883	18,728	1,696
場外	採樣點 H	1,305	584	1,856	958	1,877	989

*單位：CFU/m³

表 7 即是農業廢棄物堆肥作業場 2 所針對 8 個採樣點細菌類生物氣膠濃度分佈之統計表，結果顯示在堆肥作業設施外採樣點細菌類生物氣膠濃度在 287-3,877 CFU/m³，在場內採樣點部分細菌類生物氣膠濃度在 3,392-91,025 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 B 之上午濃度為 91,025

CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 C 中午濃度為 3,392 CFU/m³。進一步比較場內有翻堆之區域細菌生物氣膠與無翻堆之細菌生物氣膠之差異，結果發現有翻堆區域之細菌生物氣膠濃度顯著高於未翻堆部分(p<0.05)，主要原因應是由於翻堆時微生物被捲起所致。此部分與農業廢棄物堆肥

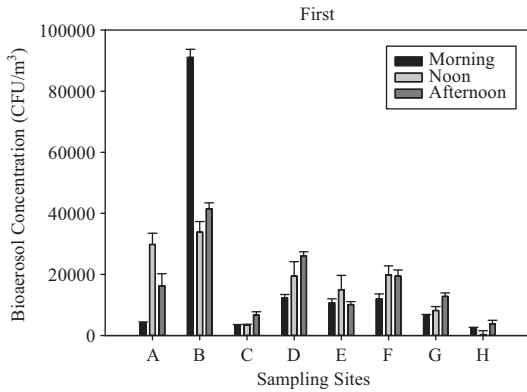


圖 10 農業廢棄物堆肥場 2 細菌生物氣膠分佈(第一次採樣)

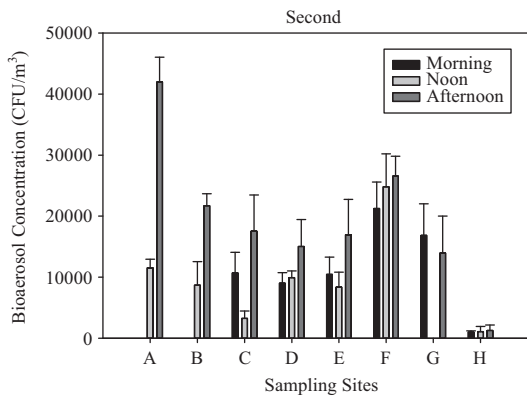


圖 11 農業廢棄物堆肥場 2 細菌生物氣膠分佈(第二次採樣)

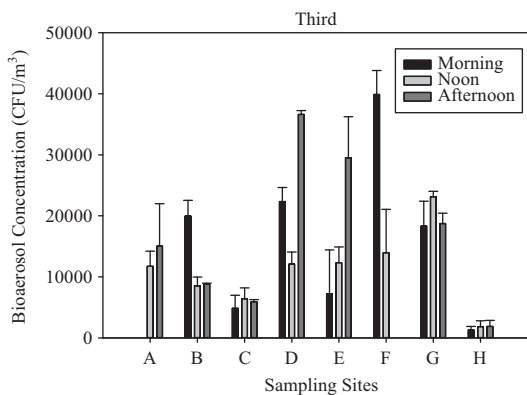


圖 12 農業廢棄物堆肥場 2 細菌生物氣膠分佈(第三次採樣)

作業場 1 之情形是相同的。

第二次採樣顯示在堆肥作業設施外採樣點細菌類生物氣膠濃度在 987-1,278 CFU/m³，在場內採樣點部分細菌類生物氣膠濃度在 3,251 CFU/m³ 以上，採樣點 A、B 上午及 G 中午之樣本菌落數過多無法計算濃度(TNTC, too numerous to count)，可量化之最高濃度出現於採樣 G 下午濃度為 131,944 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 C 中午濃度為 3,251 CFU/m³。

第三次採樣顯示在堆肥作業設施外採樣點細菌類生物氣膠濃度在 1,305-1,877 CFU/m³，在場內採樣點部分細菌類生物氣膠濃度在 4,841 CFU/m³ 以上，採樣點 A 上午及 F 中下午之樣本菌落數過多無法計算濃度(TNTC)，可量化之最高濃度出現於採樣 F 之上午濃度為 39,849 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 C 上午濃度為 4,841 CFU/m³。

圖 10、圖 11 及圖 12 分別為農業廢棄物堆肥場 2 細菌生物氣膠第一次至第三次採樣分佈，整體而言，場內細菌生物氣膠濃度是高於場外。

表 8 為第一次農業廢棄物堆肥作業場 2 針對 8 個採樣點真菌類生物氣膠濃度分佈之統計表，結果顯示在堆肥作業設施外採樣點真菌類生物氣膠濃度在 3571-4533 CFU/m³，在場內採樣點部分真菌類生物氣膠濃度在 3651-43,793 CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 D 下午濃度為 43,793 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 A 下午濃度為 3651 CFU/m³。

第二次採樣顯示在堆肥作業設施外採樣點真菌類生物氣膠濃度在 2,175-3,354 CFU/m³，在場內採樣點部分真菌類生物氣膠濃度在 1,885-13,875 CFU/m³ 間，採樣點 A 上午之樣本菌落數過多無法計算濃度(TNTC)，可量化之最高濃度出現於採樣 B 之下午濃度為 13,875 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 B 中午濃度為 1,885 CFU/m³。

第三次採樣顯示在堆肥作業設施外採樣點真菌類生物氣膠濃度在 961-1,201 CFU/m³，在場內採樣點部分真菌類生物氣膠濃度在 954-38,834

表 8 農業廢棄物堆肥場 2 真菌生物氣膠分佈

第一次採樣							
		早上		中午		下午	
採樣區域	採樣點	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
堆肥前處理區	採樣點 A	6,761	1,940	3,557	523	3,651	1,712
成品包裝區	採樣點 B	13,286	814	6,313	2,539	3,638	347
廢棄物堆置區	採樣點 C	3,654	774	3,660	328	3,699	483
半成品暫存區	採樣點 D	23,981	1,680	32,132	2,890	43,793	2,225
	採樣點 E	23,958	2,719	31,307	2,848	23,428	2,791
翻堆置放區	採樣點 F	34,158	3,207	31,119	2,947	28,104	1,103
	採樣點 G	5,348	366	12,320	816	3,649	448
場外	採樣點 H	3,571	398	3,911	982	4,533	1,192
第二次採樣							
		早上		中午		下午	
採樣區域	採樣點	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
堆肥前處理區	採樣點 A	TNTC	-	3,557	523	3,651	1,712
成品包裝區	採樣點 B	5,701	622	1,885	753	13,875	2,572
廢棄物堆置區	採樣點 C	5,230	1,479	1,908	793	3,911	1,080
半成品暫存區	採樣點 D	5,395	834	TNTC	-	4,405	881
	採樣點 E	3,251	720	1,979	57	3,699	1,327
翻堆置放區	採樣點 F	5,866	999	3,204	536	6,360	702
	採樣點 G	5,630	808	11,802	3,229	10,247	1,851
場外	採樣點 H	2,175	489	3,119	728	3354	829
第三次採樣							
		早上		中午		下午	
採樣區域	採樣點	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
堆肥前處理區	採樣點 A	16,325	2,332	2,862	530	10,954	2,897
成品包裝區	採樣點 B	3,074	813	3,216	177	3,852	1,590
廢棄物堆置區	採樣點 C	954	177	4,382	1,131	3,993	388
半成品暫存區	採樣點 D	9,364	106	3,039	424	6,431	848
	採樣點 E	5,654	283	3,216	389	5,371	424
翻堆置放區	採樣點 F	38,834	5,569	10,353	5,406	9,753	3,289
	採樣點 G	16,325	2,332	2,862	530	10,954	2,897
場外	採樣點 H	961	203	1,036	330	1,201	295

*單位：CFU/m³

CFU/m³ 間，最高濃度出現於採樣 F 之上午濃度為 38,834 CFU/m³，最低濃度出現於採樣點 F 下午濃度為 954 CFU/m³。

根據圖 13、圖 14 及圖 15 濃度變化結果顯示農業廢棄物堆肥場 2 真菌生物氣膠第一次至第三次採樣分佈為場內高於場外。

堆肥場 2 之各季採樣環境條件 如表 9 所示，併以綜合農業廢棄物類堆肥作業場所 2 三季

之採樣資料統計分析後，發現比較溫度、濕度、風速與二氧化碳對生物氣膠分佈之影響。發現二氧化碳對於細菌生物氣膠之分佈具有相關性 (p<0.05)。而相對濕度對於真菌生物氣膠之分佈也呈現相關性(p<0.05)。觀察整體實驗結果，場內細菌生物氣膠濃度與真菌生物氣膠濃度並無顯著差異(p>0.05)，這是四個場區中唯一無差異之堆肥作業設施，主要原因可能在於此一場區為

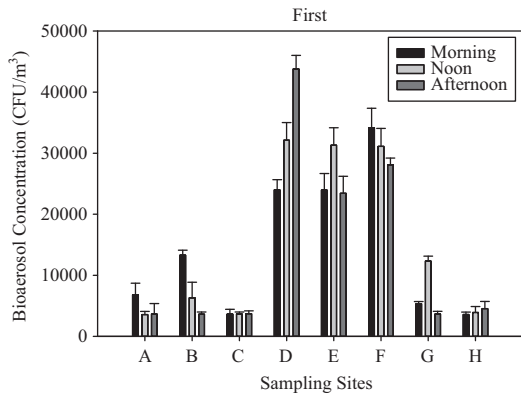


圖 13 農業廢棄物堆肥場 2 真菌生物氣膠分佈(第一次採樣)

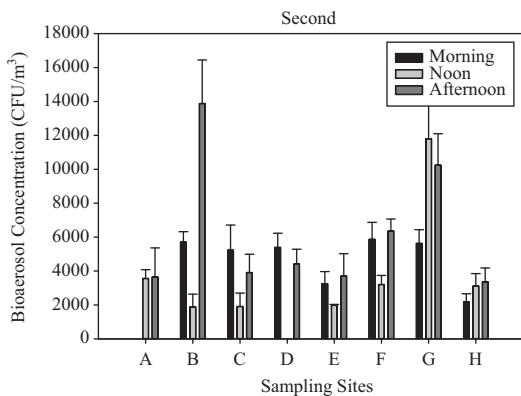


圖 14 農業廢棄物堆肥場 2 真菌生物氣膠分佈(第二次採樣)

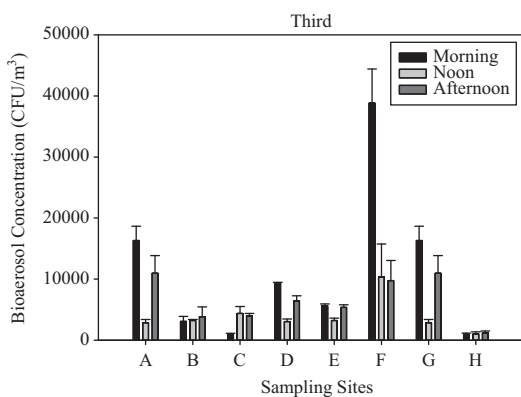


圖 15 農業廢棄物堆肥場 2 真菌生物氣膠分佈(第三次採樣)

菇類廢棄物之堆肥作業設施所致。

綜合農業廢棄物類堆肥作業場所 1 之採樣結果，與 Folmsbee & Strevett (1999) 及 Byeon *et al.* (2008) 之研究結果比較後，發現本場次之細菌與真菌濃度分佈情形都較來的高，而與 Reinthaler *et al.* (1997) 相較，本場之結果細菌及真菌高濃度之結果有著相似情況。

本研究在堆肥場 2 中之細菌與真菌菌種鑑定結果如下所述，細菌部分主要包含 *Agromyces sp.*、*Nocardioopsis sp.*、*Bacillus sp.*、*Bacillus subtilis*、*Staphylococcus sp.*、*Jeotgalicoccus sp.*、*Dietzia sp.*、*Chryseobacterium sp.*。其中 *Bacillus* 菌屬為桿菌類，另 *Staphylococcus* 為葡萄球菌類。由鑑定結果中可發現 *Bacillus* 菌屬佔大多數，其次為 *Staphylococcus* 菌屬；另在真菌主要為 *Penicillium sp.*、*Penicillium sclerotiorum*、*Penicillium verruculosum*、*Aspergillus sp.*、*Aspergillus sclerotiorum*、*Aspergillus aculeatus*、*Acremonium sp.*、*Catenulostroma protearum*、*Cladophialophora bantiana*、*Meira argovae*、*Trichoderma asperellum*。其中 *Penicillium sp.*、*Aspergillus sp.* 均屬於致過敏性菌種。由鑑定結果中可發現 *Penicillium* 菌屬佔大多數，其次為 *Cladophialophora* 菌屬。

本研究收集國外文獻後發現 Schlosser *et al.* (2009) 所進行之研究方法與本篇最為類似，而該文獻中綜整 200 多篇過往調查，結果顯示堆肥作業設施工作人員上呼吸道發炎與眼部過敏與生物氣膠暴露相關，但尚無確立證據。而其收集所得之資料顯示，空氣中總細菌與總真菌濃度最高可達 10^9 CFU/m³，中位數為 10^5 數量級，高於週邊環境 10-1,000 倍。其中革蘭氏陰性菌與 *A. fumigatus* 最高均可達 10^7 CFU/m³ 之數量級。此外，該研究亦發現夏季生物氣膠濃度高於冬季，且密閉式場區之生物氣膠濃度、內毒素濃度均高於開放式場區，趨勢與我國狀況相符。本研究調查結果亦顯示夏季生物氣膠濃度分佈高於冬季，唯我國各堆肥作業設施採樣所得之生物氣膠濃度均低於國外調查結果。

Schlosser *et al.* (2009) 調查研究中針對法國 6 座、2 座英國與 1 座西班牙堆肥作業設施之聯合

表 9 農業廢棄物堆肥場 2 採樣過程環境條件

第一次採樣													
採樣區域	採樣點	早上				中午				下午			
		溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)
堆肥前處理區	採樣點 A	29.3	74	539	0	31.4	72	551	0	31.4	71	591	0.1
成品包裝區	採樣點 B	29.9	76	571	0.1	32.0	71	552	0.1	31.3	69	565	0.1
廢棄物堆置區	採樣點 C	30.3	75	545	0.1	32.4	68	502	0.1	32.5	71	524	0
半成品暫存區	採樣點 D	30.7	75	521	0.7	33.1	71	555	0	32.7	70	548	0.2
	採樣點 E	31.7	72	558	0	33.3	68	622	0	33.0	67	589	0.1
翻堆置放區	採樣點 F	32.9	72	869	1.1	34.7	67	542	1.2	33.3	68	552	0.6
	採樣點 G	32.7	72	596	2.0	34.3	71	519	2.4	34.0	69	552	0.3
場外	採樣點 H	32.9	70.1	578	1.0	34.7	70.6	533	2.1	34.1	71.0	552	0.3
第二次採樣													
採樣區域	採樣點	早上				中午				下午			
		溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)
堆肥前處理區	採樣點 A	34.2	59.7	765	0.1	38.8	50.3	670	0.4	34.7	57.1	552	3.9
成品包裝區	採樣點 B	34.1	58.4	632	0.1	37.7	48.9	612	0	34.5	57.4	572	0.1
廢棄物堆置區	採樣點 C	34.4	56.9	615	1.5	37.4	47.2	593	0.5	34.6	57.6	572	2.1
半成品暫存區	採樣點 D	36.1	54.3	651	0.2	38	44.1	592	0.1	34.4	59.3	619	0
	採樣點 E	34.5	56.0	767	0.1	37.3	48.7	625	0.3	34.7	59.4	618	0.1
翻堆置放區	採樣點 F	35.7	60.0	947	0.7	37.3	51.3	1463	1.4	35.1	50.9	981	0.3
	採樣點 G	36.5	57.8	845	4.7	37.7	50.4	1446	9.3	35	57.3	899	1.0
場外	採樣點 H	35.7	72.0	558	0.6	37.3	68	622	0.3	35.0	61.0	589	0.1
第三次採樣													
採樣區域	採樣點	早上				中午				下午			
		溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)	溫度 (°C)	濕度 (%)	CO ₂ (ppm)	風速 (m/s)
堆肥前處理區	採樣點 A	28.7	52.1	492	0.3	30.7	54.0	533	2.3	32.2	52.1	523	0.1
成品包裝區	採樣點 B	28.4	57.2	535	1.9	31.5	52.9	556	4.9	32.1	52.8	543	1.9
廢棄物堆置區	採樣點 C	29.8	52.5	520	1.0	31.3	51.6	532	3.7	31.5	51.6	511	1.5
半成品暫存區	採樣點 D	32.0	50.8	666	0	31.8	52.8	561	0.1	31.1	50.1	601	0
	採樣點 E	30.1	52.7	572	1.1	32.4	53.2	628	2.3	31.5	51.2	589	0.4
翻堆置放區	採樣點 F	32.2	55.8	808	0	32.9	53.9	719	0.1	31.0	52.5	699	0.2
	採樣點 G	32.9	55.9	850	0.6	33.4	51.9	757	0.4	31.1	53.1	711	2.5
場外	採樣點 H	31.3	69.1	565	0.7	30.3	75.2	545	0.5	30.7	75.0	521	0.7

調查，顯示空氣中革蘭氏陰性細菌濃度最高為 10^9 CFU/m³，中位數為 10^8 CFU/m³ 顯示，設施作業區塊中以 mixing-fermentation (混合發酵) 與 shredding (破碎) 兩區塊為高濃度區域。而在本研

究中則發現翻堆為生物氣膠濃度最高之區塊。混合發酵、破碎與翻堆均為使用機械力針對堆肥物料進行處理，而在機械力處理過程中，微生物可能隨之揚起，進而影響生物氣膠濃度。

菌種鑑定報告中，2 家堆肥場中，1 家細菌類以 *Staphylococcus* 為主要菌屬外，另 1 家細菌類都以 *Bacillus* 為主要菌屬，真菌類則都以 *Penicillium* 為主要菌屬。國外相關研究中則主要以革蘭氏陰性菌為主要監測目標，本研究則有一家農業廢棄物堆肥作業場所革蘭氏陽性菌 *Staphylococcus* 為主要菌屬，其餘以革蘭氏陰性之 *Bacillus* 為主要菌屬。

彙整 2 家堆肥場之致病菌種及致病原因結果發現，細菌類以 *Staphylococcus* 菌屬、*Bacillus* 菌屬及 *Nocardiopsis* 菌屬較有可能致病，*Staphylococcus* 菌屬中金黃色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)毒素為食物中毒的常見原因。真菌類則是以 *Aspergillus* 麴菌屬與 *Penicillium* 菌屬為主，均是屬於致過敏性的真菌。

目前世界各國針對堆肥作業場所生物氣膠濃度尚無訂定一致之職業暴露限值(Occupational Exposure Limit, OEL)，僅有學術單位建議針對污染狀況訂定衛生管理計畫並且提出建議值。北歐斯堪地那維亞國家建議細菌空氣中總菌落數限制於 10^4 CFU/m³ 以下，而革蘭氏陰性菌則建議限制於 10^3 CFU/m³ 以下。波蘭則建議細菌空氣中總菌落數限制於 10^5 CFU/m³ 以下，而革蘭氏陰性菌則建議限制於 2×10^3 CFU/m³ 以下，總真菌菌落數則限制低於 5×10^4 CFU/m³ 以下，未來可作為我國探討生物性污染議題之參考。

4.2 農業廢棄物堆肥場細菌內毒素分佈特性

本研究中針對選取之兩間堆肥場進行內毒素之採樣分析，研究中利用 PM_{2.5} 懸浮微粒採樣器進行採樣，可以瞭解不同採樣點在不同懸浮微粒粒徑區域中內毒素分佈之特性。在每個堆肥作業設施所中均選擇 5 個點進行採樣，分別在五大類作業區域之內(如表 10 所示)，進以瞭解在不同作業區域中細菌內毒素之含量。

研究結果顯示，農業廢棄物堆肥作業場所 1 最高值在第一次採樣之堆肥半成品翻堆置放區，PM_{2.5} 內毒素濃度為 378 EU/m³，PM_{2.5-10} 內毒素濃度為 54 EU/m³，PM₁₀ 內毒素濃度為 432 EU/m³；最低值在第三次採樣之堆肥半成品暫存

表 10 堆肥作業場所中懸浮微粒採集點

	農業廢棄物堆肥作業場所 1	農業廢棄物堆肥作業場所 2
廢棄物堆置區	E	C
廢棄物堆肥前處理區	F	A
堆肥半成品暫存區	C	E
堆肥半成品翻堆置放區	H	G
堆肥成品包裝區	B	B

區，PM_{2.5} 內毒素濃度為 12 EU/m³，PM_{2.5-10} 內毒素濃度為 4 EU/m³，PM₁₀ 內毒素濃度為 16 EU/m³。農業廢棄物堆肥作業場所 2 最高值在第一次採樣之堆肥成品包裝區，PM_{2.5} 內毒素濃度為 389 EU/m³，PM_{2.5-10} 內毒素濃度為 63 EU/m³，PM₁₀ 內毒素濃度為 452 EU/m³；最低值在第一次採樣之廢棄物堆置區，PM_{2.5} 內毒素濃度為 23 EU/m³，PM_{2.5-10} 內毒素濃度為 6 EU/m³，PM₁₀ 內毒素濃度為 29 EU/m³ (表 11 所示)。

由採樣分析結果顯示內毒素主要分佈在 PM_{2.5} 成分中，此一部分又是主要人體可吸入的部分，對人體健康影響較大之懸浮微粒粒徑範圍，因此可知堆肥場中內毒素是可能對人體健康造成影響的。

在兩間堆肥場所中，利用針對內毒素的調查結果顯示，在 PM₁₀ 以下之微粒內毒素濃度介於 16-452 EU/m³。內毒素濃度最高區域則是在堆肥成品包裝區。目前在國外針對內毒素亦有為 OEL 之規範，Rylander, 1997 之研究指出呼吸道症狀以革蘭氏陰性菌及內毒素為主要風險因子，內毒素對於造成黏膜刺激之急性暴露閾值為 100 EU/m³，若空氣中濃度超過 2,000 EU/m³ 則有機微粒中毒症候群之案例發生。

Schlosser *et al.* (2009) 研究中針對法國 6 座、兩座英國與 1 座西班牙堆肥作業設施之聯合調查，顯示空氣中內毒素濃度最高為 1.5×10^6 EU/m³，中位數為 15,549 EU/m³，均遠高於 2,000 EU/m³ 則暴露閾值，但呼吸道及眼部等黏膜症狀之發生率不如預期，建議應該進行後續長期追蹤及調查。而該聯合調查所得之內毒素濃度均遠高於本研究結果，顯示我國堆肥作業場所勞工之暴露風險較低。

表 11 農業堆肥場之內毒素濃度分佈特性

第一次採樣							
堆肥作業設施		粒徑	廢棄物堆置區	廢棄物堆肥前處理區	堆肥半成品暫存區	堆肥半成品翻堆置放區	堆肥成品包裝區
農業廢棄物	1	PM _{2.5}	153	256	231	378	145
		PM _{2.5-10}	34	43	45	54	44
		PM ₁₀	187	299	276	432	189
	2	PM _{2.5}	23	42	136	152	389
		PM _{2.5-10}	6	11	26	27	63
		PM ₁₀	29	53	162	179	452
第二次採樣							
堆肥作業設施		粒徑	廢棄物堆置區	廢棄物堆肥前處理區	堆肥半成品暫存區	堆肥半成品翻堆置放區	堆肥成品包裝區
農業廢棄物	1	PM _{2.5}	346	20	37	121	135
		PM _{2.5-10}	56	5	10	23	24
		PM ₁₀	402	26	47	144	159
	2	PM _{2.5}	129	136	228	206	336
		PM _{2.5-10}	39	30	38	40	48
		PM ₁₀	168	166	266	246	384
第三次採樣							
堆肥作業設施		粒徑	廢棄物堆置區	廢棄物堆肥前處理區	堆肥半成品暫存區	堆肥半成品翻堆置放區	堆肥成品包裝區
農業廢棄物	1	PM _{2.5}	23	31	12	28	125
		PM _{2.5-10}	8	12	4	10	41
		PM ₁₀	31	43	16	38	165
	2	PM _{2.5}	122	116	205	185	302
		PM _{2.5-10}	31	40	39	41	49
		PM ₁₀	153	156	244	225	351

*單位：EU/m³

五、結 論

農業廢棄物堆肥場中，細菌生物氣膠濃度分佈在 1,001-131,944 CFU/m³ 間，真菌生物氣膠則在 353-43,793 CFU/m³ 間。菌種部分細菌類以 *Bacillus* 與 *Staphylococcus* 為主要菌屬，真菌類則都以 *Penicillium* 為主要菌屬。在兩間堆肥場所中，利用針對內毒素的調查結果顯示，在 PM₁₀ 以下之微粒內毒素濃度介於 16-452 EU/m³。結果發現作業人員確實受到較高生物氣膠與細菌內毒素之暴露。其中機械力翻攪堆肥物料則是使得作業人員受到生物氣膠暴露之風險行為。然而，針對作業人員所實施之健康問卷調查結果顯示僅有高生物氣膠濃度暴露與眼部黏膜組織症狀

具有相關性，且較諸歐洲相關調查結果可發現，本土設施之生物氣膠濃度分佈低於法國、英國與西班牙等地區。

謝 誌

感謝勞動部勞動及職業安全衛生研究所提供經費(IOSH101-H313)贊助此研究，研究團隊致上最高敬意。

參考文獻

1. Byeon, J.H., Park, C.W., Yoon, K.Y., and Park, J.H., “Hwang J. Size distributions of total airborne particles and bioaerosols in a municipal composting facility,” *Bioresource Technology*, 99,

- 11, 5150-5154, 2008.
2. Chiang, C.F., Yang, H.H., and Chi, T.W., "Monitoring of bioaerosol emission from a sludge composting facility," *International Journal of Applied Science and Engineering*, 1, 2, 148-159, 2003.
 3. Fischer, G., Albrecht, A., Jäckel, U., and Kämpfer, P., "Analysis of airborne microorganisms, MVOC and odour in the surrounding of composting facilities and implications for future investigations," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211, 1-2, 132-142, 2008.
 4. Folmsbee, M., and Strevett, K.A., "Bioaerosol concentration at an outdoor composting center," *Journal of Air & Waste Management Association*, 49, 5, 544-561, 2003.
 5. Fracchia, L., Pietronave, S., Rinaldi, M., and Martinotti, M.G., "The assessment of airborne bacterial contamination in three composting plants revealed site-related biological hazard and seasonal variations," *Journal of Applied Microbiology*, 100, 5, 973-984, 2006.
 6. Hryhorczuk, D., Curtis, L., Scheff, P., Chung, J., Rizzo, M., Lewis, C., Keys, N., and Moomey, M., "Bioaerosol emissions from a suburban yard waste composting facility," *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 8, 2, 177-85, 2001.
 7. Bünger, J., Schappler-Scheele, B., Hilgers, R., and Hallier, E., "A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants," *International archives of occupational and environmental health*, 80, 4, 306-312, 2007.
 8. Recer, G.M., Browne, M.L., Horn, E.G., Hill, K.M., and Boehler, W.F., "Ambient air levels of *Aspergillus fumigatus* and thermophilic actinomycetes in a residential neighborhood near a yard-waste composting facility," *Aerobiologia*, 17, 2, 99-108, 2001.
 9. Schlosser, O., Huyard, A., Cartnick, K., Yanez, A., Catalan, V., and Do Quang, Z., "Bioaerosol in composting facilities: occupational health risk assessment," *Water Environment Research*, 81, 9, 866-877, 2009.
 10. Taha, M.P.M., Drew, G.H., Longhurst, P.J., Smith, R., and Pollard, S.J.T., "Bioaerosol releases from compost facilities: Evaluating passive and active source terms at a green waste facility for improved risk assessments," *Atmospheric Environment*, 40, 6, 1159-1169, 2006.
 11. Tanner, M.K., Swinker, A.M., Beard, M.L., Cosma, G.N., Traub-Dargatz, J.L., Martinez, A.B., and Olenchock, S.A., "Effect of phone book paper versus sawdust and straw bedding on the presence of airborne gram-negative bacteria, fungi and endotoxin in horse stalls," *Journal of Equine Veterinary Science*, 18, 7, 487-461, 1997.
 12. Vogelzang, P.F.J., Van Der Gulden, J.W.J., Folgering, H., Kolk, J.J., Heederik, D., Preller, L., Tielens, M.J.M., and Van Schayck, C.P., "Endotoxin exposure as a major determinant of lung function decline in pig farmers," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 157, 15-18, 1998.
 13. 李宗儒, 「廚餘堆肥廠生物氣膠對於人類呼吸道上表皮細胞重塑基因之影響」, 國立清華大學生醫工程與環境科學研究所, 碩士論文, 2009。
 14. 洪雪芬, 「堆肥廠之生物氣膠特性及其危害性研究」, 行政院國家科學委員會, 專題研究計劃成果報告, 2007。
 15. 陳嘉惠, 「利用GC-MS與LAL基質比色法技術分析環境中細菌內毒素」, 國立成功大學環境醫學研究所, 碩士論文, 2000。
 16. 蘇慧貞, 「勞工作業環境生物性氣膠之危害評估(II): 細菌內毒素分析方法之確立與評估」, 行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所, 84年度研究報告, 1996。

收稿日期：民國 102 年 10 月 14 日

修正日期：民國 102 年 12 月 26 日

接受日期：民國 103 年 1 月 10 日