

送風量對豬糞堆肥溫室氣體產量之影響⁽¹⁾

程梅萍⁽²⁾ 廖仁寶⁽³⁾ 李恒夫⁽⁴⁾ 蕭庭訓⁽²⁾⁽⁵⁾

收件日期：101 年 6 月 30 日；接受日期：101 年 8 月 27 日

摘要

本研究旨在了解送風對豬糞堆肥溫室氣體產量之影響。於箱型送風式堆肥舍堆置豬糞製作堆肥，試驗分為 X、Y、Z 三組，送風時間分別為每小時 3 分鐘、0.5 分鐘及 0 分鐘。堆置期間每日記錄堆肥中心溫度，每週測量 3 次溫室氣體產量，分析堆肥樣品成分 1 次。由堆肥上部空間氣體濃度分析結果估算，試驗期間 X、Y、Z 組分別產生 0.51、2.80、12.6 kg 甲烷及 0.038、0.102、0.083 kg 氧化亞氮。加計送風所消耗電力產生之二氧化碳，各組二氧化碳排放當量為 0.150、0.204 及 0.630 kg/kg 乾物重。本研究結果顯示豬糞堆肥製作時加強送風，可以促進有機質分解速率，並且減少溫室氣體產生量。

關鍵詞：送風、堆肥、溫室氣體。

緒言

依據環保署我國國家通訊第 2 版，2008 年能源部門溫室氣體排放量占臺灣總溫室氣體排放量 88.43%，工業製程部門占 6.40%，農業部門占 3.92%，廢棄物部門占 1.26%。甲烷總排放為 5,063 千公噸二氧化碳當量，廢棄物部門係甲烷的最大排放源，占 61.30%；農業部門為甲烷的第二大排放源，占 37.50% 包括水稻種植 14.88%、牲畜腸胃發酵 11.45%、畜牧排泄物處理 10.62% 和農業殘渣燃燒占 0.55%。氧化亞氮排放量約為 10,479 千公噸二氧化碳當量，其中農業部門排放約占 90.62%，係以農耕土壤排放為主（占 90.12%），畜牧排泄物處理僅占 0.43%（行政院環境保護署，2010）。畜牧排泄物處理排放估計值主要以 IPCC 之 Tier1 計算方式而來，即禽畜數目乘以排放係數。此乃假設所有的畜牧場以同樣的方式，在相同條件下處理畜牧排泄物。而禽畜排泄物處理產生之溫室氣體，會因處理條件不同而有所差異。

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 1783 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遺傳育種組。

(4) 行政院農業委員會畜產試驗所產業組。

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

一般禽畜排泄物以堆肥化處理為主，以日本為例，90% 禽畜排泄物採堆肥化、液肥化等處理，僅 8 % (約 700 萬公噸) 採用高度利用的淨化、炭化、燃燒處理方式 (農林水產省，2011)。然而，堆肥化處理過程中溫室氣體排放量，亦受到堆肥型態、碳氮比 (C/N)、水分、通氣 (aeration) 程度等因素之影響 (Brown *et al.*, 2008; Ahn *et al.*, 2011)。Tamura 等人探討添加麥桿 (wheat straw) 調整水份對牛糞靜置堆肥化 (pile-type composting) 過程中溫室氣體排放量之影響，發現堆肥化過程中甲烷及氧化亞氮排放量分別為 3.1~53.7 g CH₄/kg OM 及 3.4~30.8 g N₂O-N/kg N，水分含量高者總體密度 (bulk density) 高，溫室氣體排放量顯著較高 (Tamura and Osada, 2006)。而豬糞以強制通風、自然通風及翻堆方式較靜置堆積排放之甲烷與氧化亞氮換算為二氧化碳當量 (CO₂e) 分別為 0.14、0.24 及 0.59 倍 (Park *et al.*, 2011)，即強制通風對於堆肥過程中溫室氣體排放之減量效果最佳，惟該研究未提出強制通風所消耗電力換算為二氧化碳當量之數據。美國學者則評估將 4,360 頭養豬場廢水由傳統厭氧塘 (anaerobic lagoon) 改為好氧處理廢水與堆肥化，可以減少 96.9% 溫室氣體排放量，每頭豬每年減排 1.1 噸二氧化碳當量 (Vanotti *et al.*, 2008)。由於甲烷與氧化亞氮是在有機物質進行厭氧分解時甲烷化 (methanogenesis) 與脫硝 (denitrification) 作用的產物，以上之文獻皆提出畜牧排泄物處理時，以好氧方式處理並且強制通風可以減少溫室氣體排放量。但通風過程中，所消耗之動力 (電力或油料) 所產生之溫室氣體應評估在內。因此，若計算動力，強制通風方式是否仍能減少溫室氣體排放量，仍有待評估。本研究擬探討送風量對豬糞堆肥處理產生之溫室氣體量之影響，提出降低溫室氣體量之送風量數據供參考。

材料與方法

I. 豬糞堆肥化試驗

於箱型送風式堆肥舍 (堆肥面積 190 x 204 cm) 堆置豬糞製作堆肥，試驗分為 X、Y、Z 三組，分別以 1 Hp 鼓風機送風，參考林 (1999) 設定送風時間為每小時 3 分鐘、0.5 分鐘及 0 分鐘 (風量為 1000 L/min)。堆肥化期間每日記錄堆肥中心溫度，於堆肥中心溫度降低時進行翻堆作業，即分別於第 24、43、58 天翻堆。另外，每週量測堆肥高度並以採樣器採取 6 處堆肥樣品混合後，分析其成分。

II. 甲烷及氧化亞氮產生量

每週測量 3 次豬糞堆肥上部空間氣體之甲烷與氧化亞氮濃度，採樣方式為在堆肥表面放置採氣罩 (30 x 30 x 90 cm；採樣面積為 900 cm²)，採氣罩底部插入堆肥 1cm，50 分鐘後 (採樣時數為 0.83 小時) 分別由採樣口抽取氣體樣品 50 mL，送回實驗室進行氣體成分分析。每次採樣至下次採樣時間，所經過之時間為醱酵時數。由豬糞堆肥上部空間氣體之甲烷與氧化亞氮濃度，估算豬糞堆肥於醱酵期間產生之甲烷與氧化亞氮總量。其計算式為：

$$\text{排放總量} = \Sigma \text{濃度 (mg/m}^3\text{)} * \text{採樣器體積 (m}^3\text{)} * \text{堆肥面積/採樣面積} * \text{醱酵時數/採樣時數}$$

III. 分析方法

(i) 氣體成分分析

甲烷以氣相層析儀 GC-FID (Varian CP3400) 定量分析，分析條件注射器 150℃、管柱 120℃、偵測器 150℃，攜帶氣體為氮氣。氧化亞氮以氣相層析儀 GC-ECD (Varian CP3800) 定量分析，分析條件注射器 100℃、管柱 80℃、偵測器 200℃，攜帶氣體為 P10。

(ii) 堆肥成分分析

堆肥樣品以 55℃ 烘乾磨粉後，取 1 g 加 10 mL 蒸餾水混勻，1 小時後以 pH 計 (THM210, Radiometer) 及攜帶式電導度計 (Winlab) 測定酸鹼值及電導度。水分含量以常壓乾燥法 (105℃)；

灰分以乾灰化法（600℃ 燃燒 4 小時）；總氮以凱式法（regular Kjeldahl method, Bremner and Mulvaney, 1982）；總碳以總碳分析儀（Total Carbon Analyzer, multiEA4000, Analytikjena）分析之。

結果與討論

I. 不同送風量豬糞堆肥醱酵情形

各組豬糞堆肥醱酵期間溫度變化如圖 1，以翻堆時間區分為不同醱酵階段，則第一階段 24 天內，以 Y 組溫度最高 60℃ 維持約 15 天，X 組最快達到最高溫 58℃，未送風之 Z 組亦能達到 58℃，但需時 10 天。第二階段仍以 Y 組溫度最高，可達 58℃；X 組達 52℃ 僅維持 2 天即開始降溫；Z 組則在翻堆後溫度下降，後期才稍回升。第三階段，Y 組仍能升溫至 56℃，顯示其有機物仍在分解當中；X 組則僅小幅度升溫，表示其分解作用已趨向穩定。

送風量較高的 X 組，可能造成醱酵熱的散失，使堆肥溫度較低，同時水分蒸散較快，使堆肥較快達到趨向。然而，過多的送風量與頻率，會使初期醱酵溫度達不到 50，停止送風後溫度即會上升（Park *et al.*, 2011）。

以堆肥之高度變化（圖 1）亦可評估堆肥中有機物分解情形，在堆肥化過程中隨著有機質之分解與水分蒸散堆肥高度會降低。第一次翻堆後，增加堆積之孔隙度堆肥高度略有回升，再次翻堆這種效應則不明顯。以堆肥高度降低的速率評估，有機物分解速率 X 組稍大於 Y 組，Z 組分解速率最慢。

以翻堆的方式提供氧氣，可以提高有機質的分解率與乾燥速率；在添加稻草的豬糞堆肥試驗 4 個月期間，每月翻堆一次者有機質分解率為 57%，靜置不翻堆則僅有 40%（Szanto *et al.*, 2007）。雞糞加木屑堆肥化過程中強制送風，送風量 0.3 L/min/kg organic matter（OM）時，有機質分解為 14%（Gao *et al.*, 2010）。

由本試驗期間堆肥中成分變化（圖 2），由堆肥成分變化的情形也可以看出，送風可以加速水分揮發，並使 pH、EC、C/N 等值較快達到穩定。X 組在送風量較大的條件下，堆肥水分含量第一、二階段快速下降，第三階段開始（43 天）水分及已降至 40% 以下，因此之後有機質分解趨向穩定的原因之一。送風較少的 Y 組在第三階段開始時，水分含量仍有 57%，因此第三階段溫度仍能升高至 56℃（圖 1），表示有機質之分解作用仍旺盛。Z 組水分則緩步下降，主要是未送風僅靠醱酵熱與自然蒸散水分，至第 64 天仍有 52% 水分。

以固液分離後之豬糞製作堆肥未添加其他調整材，起始之碳氮比約為 18，堆肥化過程中比值會下降，X、Y、Z 組分別降至 10.9、9.8、11.7，此結果表示 Y 組有機質分解時，有機碳的損失最高，Z 組最低。

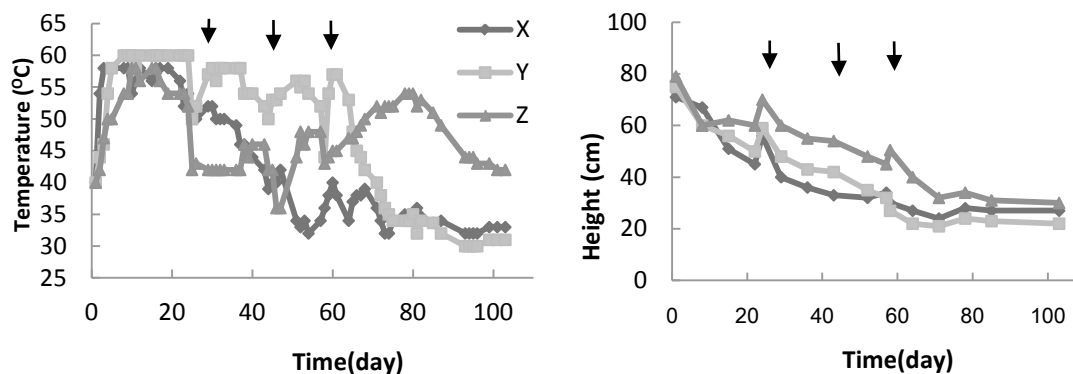


圖 1. 豬糞堆肥醱酵期間溫度及高度變化圖。

Fig. 1. Temperature and height of the piles during the composting process of swine manure.

II. 不同送風量豬糞堆肥之溫室氣體排放量

堆肥化期間第一、二階段（1 - 42 天）豬糞堆肥上部空間氣體中氧化亞氮濃度相當低。除了 Z 組在第 3 天測得 11.03 mg/m^3 外，其餘之測值皆在 $0\text{--}3.43 \text{ mg/m}^3$ （圖 3）。此時為醱酵之高溫期，期間 3 組堆肥溫度皆在 42°C 以上。Chadwick *et al.* (2011) 指出糞尿堆肥化初期高溫時，產生氧化亞氮量很少，是因為會導致氧化亞氮產生的硝化菌與脫硝微生物（nitrifying and denitrifying microorganism）通常都不是高溫菌。本研究在堆肥化第四階段（58 - 103 天），X 組開始有較多的氧化亞氮產生；Y 組則在溫度下降（70 天）後（圖 1），才開始有明顯較多的氧化亞氮產生，最高峰在 78 天時，濃度為 25.0 mg/m^3 ；Z 組在此階段也有較多氧化亞氮產生，但產生量較不穩定，最高濃度則為 36.2 mg/m^3 。整體而言，在停止翻堆的第四階段及前三階段翻堆之前為檢出氧化亞氮之時期，此時可能堆肥內部形成厭氧的狀態，導致先前形成之亞硝酸或硝酸鹽進行脫硝作用。

由豬糞堆肥化期間上部空間氣體之甲烷濃度（圖 3）可知，豬糞堆肥化過程中產生之甲烷量與送風量呈負相關，即送風量為 0 的 Z 組產生甲烷量最多，而送風量最多的 X 組則僅在堆肥第一次階段（1 - 24 天）有一次產生甲烷的高峰，最高濃度為 370 mg/m^3 ，翻堆後產生甲烷量即逐步降低，不再上升。Y 組則在第一、二、三階段各有一次產生甲烷的高峰，最高濃度分別為 520 、 780 、 917 mg/m^3 ，此種甲烷產生型態與豬糞混合木屑在無強制通風時相同（Fukumoto *et al.*, 2003）。Z 組在各階段都有數次的高峰出現，且隨堆肥日數漸增，高峰之甲烷濃度有漸增的趨勢，最高濃度出現在第 76 天，為 $6,249 \text{ mg/m}^3$ 。

由豬糞堆肥上部空間氣體之甲烷與氧化亞氮濃度（圖 3）估算不同送風量豬糞堆肥於醱酵期間產生之溫室氣體總量。估算結果在 103 天堆肥期間，X 組產生之甲烷與氧化亞氮總量最少，分別為 0.511 及 0.038 kg 。未送風之 Z 組產生之甲烷量最高，為 12.6 kg （表 1）。由此結果推測，送風可以提供氧氣，減少堆肥內部厭氧的環境，而減少甲烷的產生。氧化亞氮之產生則分別在好氧的硝化反應及厭氧的脫硝反應，因此加強送風不一定可減少氧化亞氮，此可能為 Y 組氧化亞氮產生量較高之原因。而將送風所消耗電力以 1 度電產生 0.612 kg 二氧化碳當量（經濟部能源局，2011）計算，仍以 3 分鐘送風所產生的溫室氣體最少。試驗期間 103 天總計排放二氧化碳當量，換算為每公斤乾豬糞產生之二氧化碳當量 X、Y、Z 組分別為 0.15 、 0.204 及 0.63 kg 。

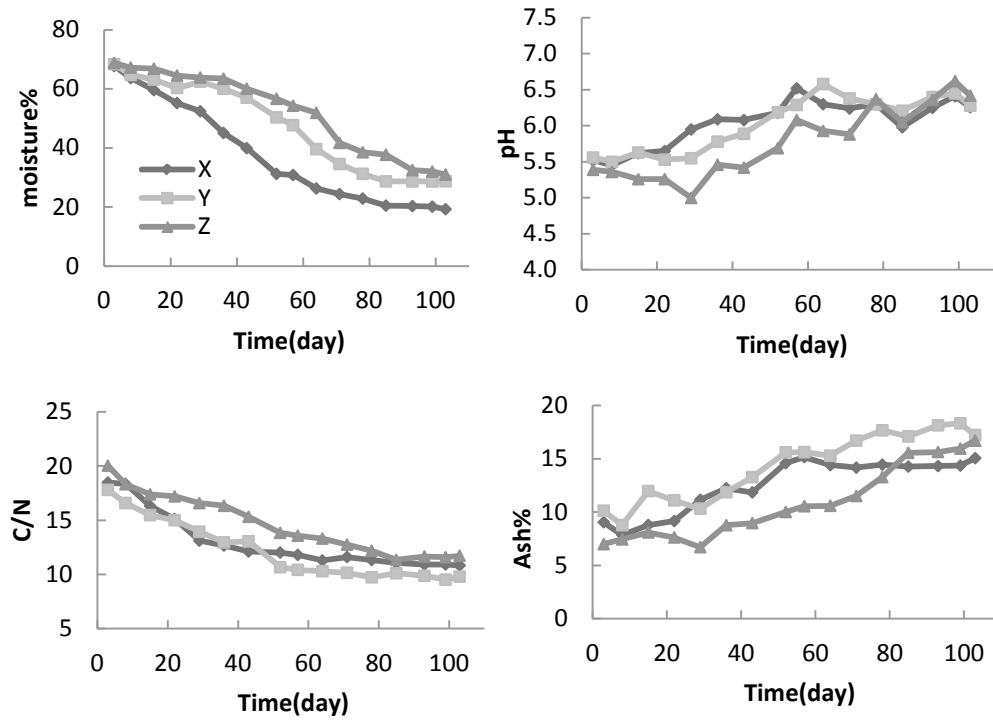


圖 2. 豬糞堆肥期間堆肥成分變化圖。

Fig. 2. Components changes during composting process of swine manure.

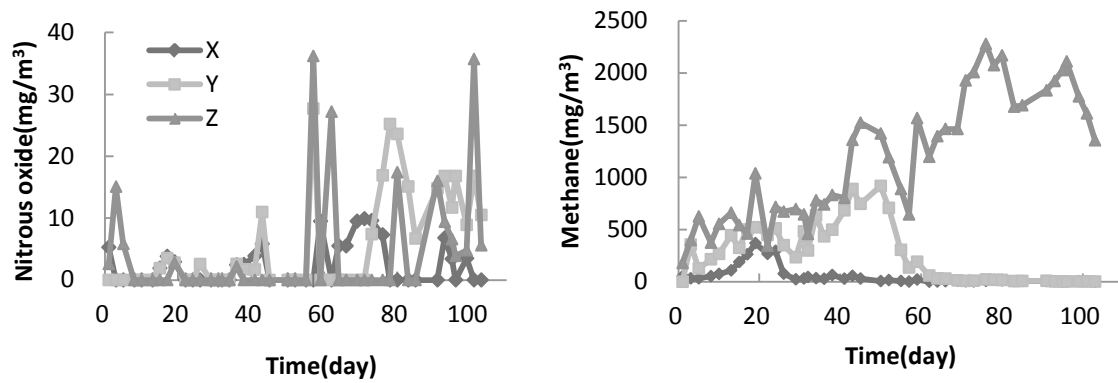


圖 3. 豬糞堆肥化期間上部空間氣體之氧化亞氮及甲烷濃度。

Fig. 3. The nitrous oxide and methane concentrations of the headspace gas during composting process of swine manure.

表 1. 不同送風量豬糞堆肥於醱酵期間產生之溫室氣體總量估算

Table 1. Estimated amounts of GHG production during composting processes with various aeration rate

	Aeration	Power consumed	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ e
	min/hr	kwh	-----kg-----		kg/kg
X	3.0	92.7	0.511	0.038	0.150
Y	0.5	15.5	2.80	0.102	0.204
Z	0	0	12.6	0.083	0.630

$$\text{CO}_2\text{e} = (\text{power} * 0.612\text{kg} + \text{CH}_4 * 25 + \text{N}_2\text{O} * 298) / (1700\text{kg} * 31.7\% \text{ dry matter})$$

以起始堆肥的總氮量每組為 16.4 kg 估算氧化亞氮的排放係數 (emission factor, EF)，則 X、Y、Z 組分別為 0.30、0.81、0.66 %。Chadwick *et al.* (2011) 人整理多篇報告包括靜置與送風處理牛及豬糞堆肥化期間，氧化亞氮的排放係數在 0.1 – 4.3% 之間。其中，豬糞水分 75.4% 靜置 3 個月無翻堆，排放係數為 0.5 – 2.0%。在添加稻草的豬糞堆肥試驗 4 個月期間，每月翻堆一次者氧化亞氮的排放係數為 2.5%，靜置不翻堆則高達 9.9% (Szanto *et al.*, 2007)。Brown *et al.* (2008) 整理多篇報告，其中豬糞添加調整材堆肥化期間，氧化亞氮的排放係數在 0.1 – 4.6% 之間。Tamura and Osada (2006) 估算添加麥桿的牛糞靜置堆肥化過程，氧化亞氮排放量 3.4-30.8 g N₂O-N/kg N，換算為排放係數則為 0.5 – 4.8 %。IPCC 2006 之排放係數在有強制通風之堆肥化過程為 0.006 kg N₂O-N/kg N，可換算為 0.94% N₂O；未強制通風僅翻堆則為 0.01 kg N₂O – N/kg N，可換算為 1.57% N₂O。國內資料則指出由豬糞固體廢棄物所含氮素計算衍生之 N₂O-N 依次佔廢棄物含氮量之 0.069% (趙, 1999)，換算為 N₂O 則為 0.11%。

以起始堆肥的總碳量每組為 237 kg (1700 kg * 31.7% dry matter * 44% total carbon) 估算甲烷係數 (emission factor, EF)，則 X、Y、Z 組分別為 0.22、1.18、5.31 %，送風量愈大甲烷排放係數愈低，主要原因推測為厭氧的條件下有利於甲烷的產生。Brown *et al.* (2008) 整理多篇報告，其中豬糞、牛糞添加調整材堆肥化期間，甲烷的排放係數在 0.2-2.5% CH₄ loss/initial C 之間。另有研究指出，豬糞混合木屑共 778.9 kg，水分約 68%，無送風堆積每 1-2 周翻堆一次，70 天堆肥期間產生 399.1 g 甲烷 (Fukumoto *et al.*, 2003)，估算甲烷排放係數為 0.051% CH₄ loss/initial fresh wt.；本試驗相對應的估算值 X、Y、Z 組則分別為 0.030、0.16、0.74%。與以上文獻相較，本試驗無送風組甲烷排放係數較高，可能與未添加調整材，導致總體密度較高，堆肥內部氧氣濃度較低有關。

結論

箱型送風式堆肥舍堆置豬糞製作堆肥，送風時間分別為每小時 3 分鐘、0.5 分鐘及 0 分鐘，試驗期間分別產生 0.51、2.80、12.6 kg 甲烷及 0.038、0.102、0.083 kg 氧化亞氮。加計送風所消耗電力產生之二氧化碳，各組二氧化碳排放當量為 0.150、0.204、0.630 kg/kg 乾物重，結果顯示豬糞堆肥製作時每小時送風 3 分鐘，較未送風組可以減少溫室氣體產生量。

參考文獻

- 經濟部能源局。2011。99 年我國電力排放係數。Accessed May 20, 2012。
Shttp://www.moeaboe.gov.tw/promote/greenhouse/PrGHMain.aspx?PageId=pr_gh_list
- 行政院環境保護署。2010。中華民國第二版國家通訊（草案）。
- 林財旺。1999。禽畜糞堆肥之製造。堆肥製造技術。行政院農業委員會農業試驗所出版。台中，台灣。
pp.107-141。
- 趙震慶。1999。畜產廢棄物堆積及施用之氧化亞氮之釋放及減量對策。溫室氣體通量測定及減量對策
（楊盛行編），pp.128-146。國立台灣大學全球變遷中心、農業化學系和農業陳列館，台北，台灣。
- 農林水產省生産局。2011。畜産部家畜排せつ物法施行状況調査結果。平成 23 年 3 月 30 日公表，農
林水産省生産局畜産企画課畜産環境・経営安定対策室。
- Ahn, H. K., M. Mulbry, J. W. White and S. L. Kondrad. 2011. Pile mixing increases greenhouse gas
emissions during composting of dairy manure. *Bioresour. Technol.* 102: 2904-2909.
- Bremner, J. M. and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-Total. in: *Method of Soil Analysis Part 2*. ed. Page. A. L.
Academic Press. NY. USA. pp.610-616.
- Brown, S., C. Kruger and S. Subler. 2008. Greenhouse gas balance for composting operations. *J. Environ.
Qual.* 37:1396 -1410.
- Chadwick, D., S. Sommerd, R. Thorman, D. Fangueroe, L. Cardenas, B. Amon and T. Misselbrook. 2011.
Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Anim. Feed Sci. and Technol.* 166-167:
514- 531.
- Fukumoto, Y., T. Osada, D. Hanajima and K. Haga. 2003. Patterns and quantities of NH_3 , N_2O and CH_4
emissions during swine manure composting without forced aeration—effect of compost pile scale.
Bioresour. Technol. 89 : 109-114.
- Gao, M., B. Li, A. Yub, F. Liang , L. Yang and Y. Sun. 2010. The effect of aeration rate on forced-aeration
composting of chicken manure and sawdust. *Bioresour. Technol.* 101: 1899-1903.
- Park, K. H., J. H. Jeon, K. H. Jeon, J. H. Kwag and D. Y. Choi. 2011. Low greenhouse gas emissions during
composting of solid swine manure. *Anim. Feed Sci. and Technol.*: 166 -167: 550- 556.
- Szanto, G. L., H. V. M. Hamelers, W. H. Rulkens and A. H. M. Veeken. 2007. NH_3 , N_2O and CH_4 emissions
during passively aerated composting of straw-rich pig manure. *Bioresour. Technol.* 98: 2659-2670.
- Tamura, T. and T. Osada. 2006. Effect of moisture control in pile-type composting of dairy manure by adding
wheat straw on greenhouse gas emission. *International Congress Series* 1293: 311- 314.
- Vanotti, M. B., A. A. Szogi and C. A. Vives. 2008. Greenhouse gas emission reduction and environmental
quality improvement from implementation of aerobic waste treatment systems in swine farms. *Waste
Manage.* 28: 759-766.

Effect of aeration on greenhouse gas emission from the composting process of swine manure⁽¹⁾

Mei-Ping Cheng⁽²⁾ Ren-Bao Liaw⁽³⁾ Herng-Fu Lee⁽⁴⁾
and Ting-Hsun Hsiao⁽²⁾⁽⁵⁾

Received: Jun. 30, 2012; Accepted: Aug. 27, 2012

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the effect of aeration condition on the greenhouse gas (GHG) mission from the composting process of swine manure. The swine manure was piled in the composting plant X, Y and Z with 3, 0.5 and 0 min/hr of aeration, respectively. The temperature of compost was recorded daily. The GHG from the compost was measured triple a week. The composition of compost was analyzed once weekly. Total amounts of the green house gases emitted during the composting processes were calculated by the GHG concentration of headspace gas of compost plants. The results showed plant X, Y and Z produced 0.51, 2.80 and 12.6 kg of methane, and 0.038, 0.102 and 0.083 kg of nitrous oxide, respectively. Taking the power consumed into account, the total carbon dioxide equivalent of plant X, Y and Z were 0.15, 0.204, 0.63 kg/kg initial dry matter. The results of this study showed aeration during the compost process could accelerate the degradation of organic matters and reduce the production of the GHG from the compost.

Key words: Aeration, Compost, Greenhouse gas.

(1) Contribution No. 1783 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

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

(3) Breeding and Genetics Division, COA-LRI, Hsinhua, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(4) Animal Industry Division, COA-LRI, Hsinhua, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(5) Corresponding author, E-mail: hsiaosir@mail.tlri.gov.tw