

不同堆肥化日數之雞糞可見近紅外光光譜特徵 與腐熟度相關性評估⁽¹⁾

吳卓穎⁽²⁾⁽³⁾ 吳柏輝⁽²⁾ 李欣蓉⁽⁴⁾ 許正一⁽²⁾⁽⁵⁾

收件日期：113 年 11 月 13 日；接受日期：114 年 4 月 23 日

摘 要

堆肥化可使雞糞之含水量、氨氣濃度與碳氮比降低，進而減少生雞糞施用所引發的農作物危害，及環境品質和公共衛生疑慮。然而，堆肥腐熟度評估需依靠多項實驗室分析數據，不利於提供快速且客觀的雞糞腐熟度判定。相較之下，可見—近紅外光譜 (visible and near infrared spectroscopy, vis-NIR) 法可透過量測官能基之分子振動，即刻反映雞糞的物化性質，因而被視為具有發展潛力的腐熟度鑑定工具。有鑒於此，本研究收集來自五個雞糞堆肥場，涵蓋生雞糞、不同堆置天數之雞糞及粒肥等樣品，並量測其 vis-NIR 光譜及堆肥品質參數 (含水量、氨氣濃度、pH 值、電導度、總有機碳含量及總氮含量)，以釐清光譜特徵及堆肥性質之關聯。相關性分析與主成分分析結果皆顯示，代表水分子 (1,450 及 1,900 nm)、胺類化合物 (1,450 及 1,930 nm) 及有機質 (1,170、1,780 及 2,275 nm) 的波長反射率除了與含水量及氨氣濃度呈顯著負相關 ($P < 0.01$)，亦可有效劃分不同腐熟度的雞糞樣品。相對於依賴濕化學分析及雞糞堆肥場自主紀錄的堆肥性質，本研究證實 vis-NIR 光譜法可提供客觀的腐熟度評估依據。未來可望藉由結合本研究篩選的 vis-NIR 光譜波長與機器學習演算法，開發雞糞腐熟度鑑定技術，有益於其源頭管理及畜牧業永續發展。

關鍵詞：雞糞、堆肥化、腐熟度、近端感測。

緒 言

將未腐熟的生雞糞作為肥料，除了肥效高之外，還兼備取得容易及價格便宜的優點。然而，生雞糞所含有的病原體及異味與容易形成還原環境而導致作物根部缺氧的問題導致田間施用生雞糞存在農作物損害、土壤及水污染，並有公共衛生的疑慮 (Huang *et al.*, 2017)。堆肥化是一個由微生物作用所促進的高溫氧化過程。此過程涉及有機質的礦化及部分的腐質化，從而提高腐熟雞糞中有機質的穩定性提高，且導致二氧化碳及含氮氣體揮發。此外，堆肥化作用亦可使雞糞之水分含量的下降，因而可大幅降低作物病蟲害發生及人類病媒蚊孳生的機率，同時減少了雞糞儲存與清運之重量與體積 (Ashworth *et al.*, 2020)。因此，堆肥化處理被視為生雞糞管理及資源化的必要策略之一 (Azim *et al.*, 2018)。除了堆肥化處理之外，生雞糞添加廢菇包與米糠後，以 70°C 以上高溫持續乾燥 30 分鐘，以達殺滅病原之目的，再輔以壓實造粒，例如我國雞糞加工肥料 (品目編號 5-08) 亦為達到上述生雞糞管理的管道之一。

雞糞的腐熟度為涵蓋物理、化學及生物性質之綜合表現，其評量標準包含氣味、顏色、水分含量、醱酵溫度、pH、碳氮比、電導度 (electrical conductivity, EC) 及種子發芽率等 (Wu *et al.*, 2000; Bernal *et al.*, 2009)。然而，化學及生物性質仰賴實驗室分析，堆置時間、醱酵溫度及水分則依靠堆肥場自行檢核與執法人員查驗，皆不利於提供即時且客觀的雞糞腐熟度鑑定結果，進而輔導堆肥場妥善清運及農民正確使用雞糞。相較之下，可見—近紅外光譜法 (visible and near infrared spectroscopy, vis-NIR) 透過測量可見光波段 (350 – 700 nm) 及近紅外光波段 (700 – 2,500 nm)，由堆肥中不同組成份官能基的 O-H、C-H、C=O 及 N-H 等分子振動所產生的能階躍遷 (energy level transition)

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2824 號。

(2) 國立臺灣大學農業化學系。

(3) 東海大學環境科學與工程學系。

(4) 農業部畜產試驗所飼料作物組。

(5) 通訊作者，E-mail: zyhseu@ntu.edu.tw。

之能量差，在僅需要少量樣品前處理的情況下（例如，攪拌混勻），可於稽查現場進行量測，並準確反映前述評估堆肥品質的各項參數變化，為腐熟度的判斷提供具有發展潛力之整合性乾化學量測方案 (Cruz-Conesa *et al.*, 2022)。Ueno *et al.* (2008) 發現牛糞的堆置天數在 2,303 nm 的特徵峰吸收率呈現顯著 ($r = -0.79$; $P < 0.01$) 的負相關；Vergnoux *et al.* (2009) 研究顯示，工業廢水污泥堆肥隨著堆置時間的增加，其水分含量與代表水分子特徵峰的 1,450 nm 及 1,900 nm 之吸收率，皆隨著堆置時間的增加而逐漸下降；Rueda *et al.* (2023) 指出相對於未經堆置的橄欖油渣，半腐熟與完成腐熟堆肥的脂肪族化合物位於 2,200 nm 的特徵峰吸收率由 2.0 下降至 0.4 – 0.8，對應隨著堆肥腐熟度提高，脂肪族化合物會被微生物分解為二氧化碳及水分。上述的研究均顯示，vis-NIR 光譜數據可於堆肥化過程中反映有機物及水分之變化之事實。

快速、操作容易且客觀的雞糞腐熟度判定標準及檢測技術，是農業部「加強推廣禽畜糞肥料」和「輔導農民正確使用腐熟雞糞肥料」政策方向，及達到畜牧業的永續發展與促進循環經濟的重要關鍵。因此，本研究收集臺灣不同堆肥場之不同處理樣態雞糞樣品的堆肥品質參數及 vis-NIR 光譜資料，旨在：(1) 建立在地化不同腐熟度雞糞 vis-NIR 光譜資料庫；(2) 釐清堆肥物理及化學性質和光譜特徵之關聯；(3) 篩選可用於開發雞糞腐熟度快篩方法的特定波段。

材料與方法

I. 樣品收集及前處理

本研究收集來自臺灣五個雞糞堆肥場 (A、B、C、D 及 E 雞糞堆肥場) 共 51 個雞糞樣品，其中包含生雞糞 ($n = 4$)、添加調整材的不同堆肥化天數雞糞 ($n = 42$) 及乾燥雞糞肥料樣品 ($n = 5$)。所有樣品除了生雞糞 ($n = 4$) 之外，皆含有 60% 純雞糞及 40% 廢菇包、稻殼或麩皮等混合料源之調整材。所收集之雞糞樣品，皆經風乾、磨碎及利用篩目為 0.425 mm 之篩網過篩的前處理，以備實驗室性質分析。

II. 樣品性質分析

雞糞之水分含量及氨氣濃度皆於樣品未經前處理之時進行檢測。水分含量以水分儀 (M-700S, RiXEN, New Taipei City, Taiwan) 之探針 (15 cm) 完全沒入雞糞樣品量測；氨氣濃度以 1 L 塑膠封口袋盛裝 200 g 雞糞樣品，靜置 30 分鐘後，以氨氣檢測儀 (AR8500, Smart Sensor, Guangdong Province, China) 量測。儀器量測所得之單位為體積濃度 (ppm)，根據以下計算式轉換為質量濃度 (mg/m^3)：

$$\text{質量濃度 (mg/m}^3\text{)} = \text{體積濃度 (ppm)} \times \frac{\text{氨氣分子量}}{(\text{室溫} \times \text{理想氣體定律常數})} \quad (\text{式一})$$

氨氣分子量：17 g/mole

室溫：假定為 25°C，298.15 K

1 atm 下理想氣體定率常數：0.082

樣品之 pH 值及 EC 值分別參考農業部農糧署 (2020) 公告之肥料檢驗方法—AFS2904-1 與 AFS2905-1，以粉碎後樣品 (粒徑 < 0.45 mm) 和去離子水以 1:10 (w/v) 比例混合，配合玻璃電極及電導度計分別測量。總氮 (total nitrogen, TN) 含量參考農業部農糧署公告之肥料檢驗方法—AFS1110-1，以水楊酸—硫代硫酸鈉分解，再以凱氏定氮法 (Kjeldahl method) 定量 (農業部農糧署，2020)。總有機碳 (total organic carbon, TOC) 含量參考國際標準化組織公告方法—ISO 10694:1995，以總碳分析儀 (multi N/C 2100S, Analytik Jena, Jena, Germany) 定量 (International Organization for Standardization, 1995)。上述性質根據農業部農糧署公告之「肥料種類品目及規格部分規定修正規定」，每十個樣品進行一次重複性實驗，相對誤差皆小於 10% (農業部農糧署，2020)。

III. vis-NIR 光譜數據收集及前處理

未經風乾及研磨之雞糞樣品先於樣品袋中混合，再盛滿直徑 9.5 cm，厚度 2 cm 之玻璃培養皿，以確保樣品厚度均一，再以 NaturaSpec™ Portable Spectroradiometer (Spectral Evolution, MA, USA) 內建鎢鹵素光源 (tungsten halogen light source) 之接觸探針 (contact probe) 直接貼合樣品表面，收集其 350 – 2,500 nm 的反射光譜資料。此外，考量未經前處理之新鮮雞糞樣品的不均質性，所有樣品皆經三點 120° 之三重覆 vis-NIR 全波段光譜資料測定。

本研究所使用的光譜儀於 350 – 1,000 nm (vis-NIR 波段) 使用矽光二極體陣列 (silicon photodiode array) 為

偵測器，於 1,000 – 2,500 nm (NIR 波段) 使用則砷化銦鎵二極體 (InGaAs photodiode) 為偵測器。光譜之偵測解析度於 350 – 700 nm、701 – 1,500 nm 及 1,501 – 2,100 nm 分別為 2.7、5.5 及 5.8 nm，而最終輸出的光譜解析度則為 1 nm。此外，於樣品分析前，利用白色標準板 (NaturaSpec™ White Reflectance Plate P/N STDWP-0505, Spectral Evolution, MA, USA) 進行空白校正，且每測量 20 個樣品即重新進行空白校正，其校正的反射率差異皆小於 2%。

所有雞糞樣品之光譜數據皆以 R studio version 4.1.0 中 ‘prospectr’ 所包含的函數，根據下列步驟進行前處理，以凸顯光譜特徵 (R Core Team, 2024)：(1) 三重複光譜反射率取平均值；(2) 修剪光譜邊界，僅保留 404 – 2,451 nm 波長範圍，以消除邊緣效應 (edge effect)；(3) 標準常態變數轉換 (standard normal variate transformation, SNV)，以校正光散射。

IV. 統計分析

以皮爾森相關係數分析 (Pearson’s correlation coefficient) 檢定雞糞的物化性質及經 SNV 處理後的波長反射率之間的線性關係，其顯著水準表達方式如下：* $P < 0.05$ 、** $P < 0.01$ 及 *** $P < 0.001$ 。此外，為了建立雞糞物化性質與 vis-NIR 特徵光譜反射率之關聯，因此在沒有相關前人文獻供查找之前提下，以無需額外解釋變數之主成分分析 (principal component analysis, PCA) 量化上述變異數間的交互關係，及其與雞糞樣品腐熟度之關聯。以上統計分析皆利用 R studio version 4.1.0 進行 (R Core Team, 2024)。

結果與討論

I. 雞糞樣品物理化學性質

本研究收集堆肥化處理 0 – 88 天不等的雞糞與雞糞粒肥樣品，其中水分含量及氨氣濃度以溼基 (wet matter basis) 測定，而 pH、EC 值、TOC 含量及 TN 含量則以乾基 (dry matter basis) 分析 (表 1)。所有樣品之水分含量介於 12.9 – 46.7%，而氨氣濃度則介於 1.46 – 69.4 mg/m³。來自不同堆肥場之樣品的水分及氨氣濃度，隨著堆置天數增加而下降，顯示堆肥腐熟度的提高，使雞糞逐漸乾燥且氨氣逐漸揮發 (Bernal *et al.*, 2009)。此外，雞糞樣品 pH 值涵蓋酸性至鹼性 (pH 5.1 – 9.5)，且隨著堆置天數增加，堆肥 pH 值皆出現先下降後上升的趨勢 (表 1)。上述 pH 值的變化，推測是由於雞糞於堆肥化初期，有機質被分解釋出有機酸，導致酸性增強，而後，由於易分解的有機質被微生物消耗和含氮化合物的礦化，使 pH 值逐漸上升，且受到腐植質所提供的緩衝作用影響，雞糞的 pH 值變化趨於穩定 (Azim *et al.*, 2018；表 1)。另一方面，樣品的 EC 值、TOC 含量和 TN 含量範圍，分別介於 2.6 – 15.6 dS/m、16.4 – 94.9% 和 1.03 – 8.22% (表 1)。相對於水分含量、氨氣濃度及 pH 值，雞糞受到起始組成成分與堆肥化條件所影響，因此，相同堆肥場樣品之 EC 值、TOC 含量和 TN 含量出現高度同質性。此外，縱使上述測值與堆置天數呈現不規則變化，B-1-6、C-1-6、C-2-6、C-3-9、D-2-5 及 D-3-7 等各堆肥場堆置天數最長的雞糞和 A-1-5 雞糞粒肥之 C/N 比 (C/N ratio) 為 6 – 16 (表 1)，符合多數研究所支持的穩定且完全腐熟之堆肥 C/N < 20 標準 (Bernal *et al.*, 2009; Antil *et al.*, 2014; Azim *et al.*, 2018)。

表 1. 雞糞樣品之堆置時間及物化性質 (n = 51)

Table 1. Composting time and physiochemical properties of chicken manure samples (n = 51)

Sample	Composting time	Moisture ^a	NH ₃ ^a	pH ^b	EC ^{bc}	TOC ^{bd}	TN ^{be}	C/N ^{bf}
	Day	%	mg/m ³		dS/m	%	%	
A-1-1	0	45.1	13.9	9.2	3.63	27.2	3.83	7.1
A-1-2	1	44.6	18.5	9.3	5.38	26.9	4.24	6.3
A-1-3	2	15.4	8.5	9.1	4.60	30.3	3.85	7.9
A-1-4	High temperature drying preprocessed	14.4	14.8	8.9	5.23	33.3	4.92	6.8
A-1-5	Granulated manure product	12.9	1.5	8.1	5.13	26.1	4.34	6.0
B-1-1	0	46.7	69.4	8.8	7.20	22.7	2.21	10.3
B-1-2	10	43.3	16.6	8.8	5.66	41.3	1.72	24.0
B-1-3	20	45.8	14.7	7.6	7.93	27.9	1.58	17.7
B-1-4	30	44.2	51.6	7.9	7.27	27.1	1.67	16.2
B-1-5	40	41.1	16.4	8.4	7.02	23.8	1.86	12.8

表 1. 雞糞樣品之堆置時間及物化性質 (n = 51) (續)

Table 1. Composting time and physiochemical properties of chicken manure samples (n = 51) (continued)

Sample	Composting time	Moisture ^a	NH ₃ ^a	pH ^b	EC ^{bc}	TOC ^{bd}	TN ^{be}	C/N ^{bf}
	Day	%	mg/m ³		dS/m	%	%	
B-1-6	High temperature drying preprocessed	45.2	3.9	8.0	4.92	35.2	2.62	13.4
C-1-1	3	45.7	4.7	6.4	10.97	37.5	5.78	6.5
C-1-2	7	40.5	2.4	6.3	11.97	32.1	5.92	5.4
C-1-3	14	35.1	2.4	6.5	12.43	30.2	6.35	4.8
C-1-4	21	37.6	4.2	6.3	14.26	31.3	5.83	5.4
C-1-5	28	41.2	2.4	5.4	12.34	38.7	5.12	7.6
C-1-6	> 28	32.5	2.4	5.2	13.68	36.5	5.01	7.3
C-2-1	9	43.1	4.2	6.5	13.73	32.8	3.77	8.7
C-2-2	17	34.2	2.8	6.1	13.87	35.0	4.07	8.6
C-2-3	34	46.3	3.0	6.0	15.56	34.4	4.04	8.5
C-2-4	48	44.2	1.7	5.1	13.68	41.6	2.77	15.0
C-2-5	60	43.7	2.6	5.2	15.30	32.6	5.33	6.1
C-2-6	> 60	40.4	3.3	5.6	13.93	94.9	8.22	11.5
C-3-1	0	41.8	5.9	6.9	7.93	34.6	6.96	5.0
C-3-2	14	33.5	5.0	6.7	9.42	36.1	6.14	5.9
C-3-3	28	38.3	6.0	6.7	9.00	33.5	5.45	6.2
C-3-4	40	45.2	9.5	6.5	12.64	32.1	3.47	9.3
C-3-5	52	45.3	9.1	6.3	14.04	32.7	3.36	9.7
C-3-6	64	44.1	35.2	7.5	12.51	30.9	5.61	5.5
C-3-7	76	43.7	45.2	7.7	13.12	30.4	2.72	11.2
C-3-8	88	41.6	37.1	7.6	10.58	31.1	2.45	12.7
C-3-9	> 88	16.5	10.1	6.3	14.03	28.0	2.99	9.4
D-1-1*	1	43.8	4.3	6.6	2.55	36.6	1.03	35.5
D-2-1	7	46.0	69.4	7.8	7.65	29.1	2.22	13.1
D-2-2	11	45.9	69.4	7.5	7.79	25.9	2.44	10.6
D-2-3	20	43.7	69.4	8.0	7.55	27.6	2.35	11.7
D-2-4	27	40.6	15.9	7.8	7.09	24.7	2.66	9.3
D-2-5	> 27	43.8	13.1	9.5	3.81	28.3	1.73	16.3
D-3-1	3	46.2	69.4	7.8	6.35	34.1	3.58	9.5
D-3-2	8	45.2	69.4	8.1	6.48	31.3	2.68	11.7
D-3-3	15	45.7	69.4	8.2	6.38	38.7	3.75	10.3
D-3-4	22	45.1	69.4	8.3	4.00	16.4	2.94	5.6
D-3-5	29	45.8	69.4	8.9	4.55	32.7	2.44	13.4
D-3-6	36	45.9	69.4	9.3	6.19	22.6	1.78	12.7
D-3-7	> 36	44.8	11.2	8.0	7.72	21.8	1.54	14.2
E-1-1	0	44.3	2.4	7.1	4.81	32.6	3.26	10.0
E-1-2	7	44.5	6.0	6.9	6.06	31.2	4.08	7.6
E-1-3	14	43.0	2.4	7.1	6.58	31.4	2.84	11.1
E-1-4	21	44.3	1.7	6.5	5.57	44.0	3.80	11.6
E-1-5	28	43.9	3.2	6.6	6.54	32.4	3.64	8.9
E-1-6	35	41.9	1.5	6.9	6.15	37.8	3.88	9.7

* Mixed with rice husk.

^a wet matter basis.^b dry matter basis.^c electrical conductivity.^d total organic carbon.^e total nitrogen.^f total organic carbon/ total nitrogen.

II. 雞糞之 vis-NIR 光譜特徵

雞糞之 vis-NIR 光譜以經 SNV 前處理的反射率呈現於圖 1，初步利用 SNV 處理後訊號強弱判定特徵峰，且根據不同波長的特徵峰所對應之官能基，可分為下列三組：(1) 1,170 nm、1,780 nm 及 2,275 nm；(2) 1,450 nm 及 1,900 nm；(3) 1,450 nm 及 1,930 nm。第一組 1,170 nm 及 1,780 nm 處所出現的波峰，分別來自烷基本 C-H 的第二及第一倍頻 (overtone)，而 2,275 nm 則為脂肪族化合物 C-H 第一倍頻的特徵峰，三個波長皆對應雞糞中結構單純的有機質 (Weyer, 1985; Viscarra Rossel and Behrens, 2010)。第二組位於 1,450 nm 的特徵峰由水分子中的 O-H 第一倍頻所貢獻，1,900 nm 的波峰來自水分子 O-H 伸縮 (stretching) 與 H-O-H 彎曲 (bending) 的合頻 (combination)，此兩波長處明顯的吸收峰，意味著堆肥樣品中普遍大於 40% 的含水量 (表 1；圖 1；Vergnoux *et al.*, 2009)。第三組之波長與第二組相近，不過，環狀胺類化合物的第一倍頻同樣位於 1,450 nm，而在 1,930 nm 觀察到的微弱波峰則為胺類化合物 N-H 伸縮與 H-N-H 彎曲的合頻 (Weyer, 1985)，顯示樣品中含氮化合物的存在。

本研究所收集的雞糞樣品之特徵吸收峰皆來自 NIR 區段，其所代表的官能基能準確對應影響腐熟度的堆肥性質，例如，水分、氨氣濃度、TOC 含量與 TN 含量 (圖 1)。然而，NIR 區段主要由重疊嚴重的弱吸收峰所組成 (Workman and Weyer, 2012)，容易出現前述水分子與含氮化合物之倍頻和合頻波長相同或相近的情況。換言之，僅憑肉眼不易識別雞糞的特色光譜指紋，進而判斷其組成分及腐熟度差異。有鑑於此，本研究以統計工具，輔助解釋 vis-NIR 光譜對於堆肥樣品的定性結果，以進一步釐清不同特定光譜波長於雞糞腐熟度鑑定的實用性。

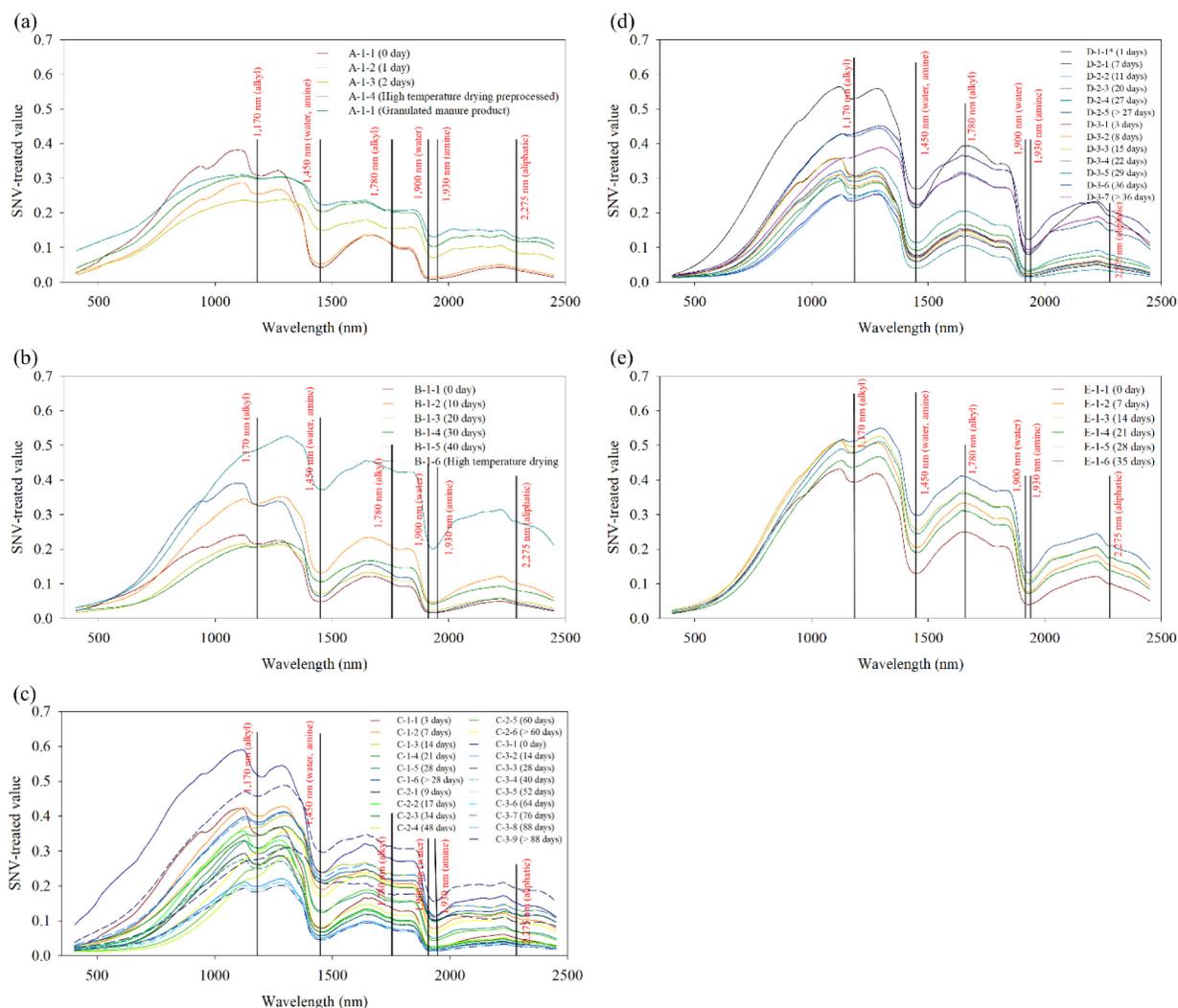


圖 1. 雞糞樣品經標準常態變數轉換之 vis-NIR 光譜 (a) A 堆肥場；(b) B 堆肥場；(c) C 堆肥場；(d) D 堆肥場；(e) E 堆肥場。

Fig. 1. Vis-NIR spectra of chicken manure composts after standard normal variate transformation (a) A poultry farm; (b) B poultry farm; (c) C poultry farm; (d) D poultry farm; (e) E poultry farm.

III. 雞糞 vis-NIR 波長與物化性質之關係

皮爾森相關係數分析結果顯示，氨氣濃度隨著水分含量上升而增強 (表 2)，凸顯在農田施用未經妥善堆置腐熟的生雞糞，恐帶來的惡臭逸散隱憂 (Huang *et al.*, 2017)。另一方面，氨氣濃度與 pH 呈顯著正相關 ($r = 0.53$, $P < 0.001$)，與 TOC 和 TN 則呈現顯著負相關 ($P < 0.05$)。此結果是由於生雞糞所含的氨，在堆肥化初期會逐漸揮發，同時有機質分解產生的二氧化碳及有機酸使 pH 降低，而二氧化碳的揮發使 TOC 降低；然而，隨後礦化作用所產生的銨離子 / 氨使 pH 上升，同時造成氨氣濃度增強，TN 亦因為氨的揮發而降低 (Azim *et al.*, 2018)。

表 2. 雞糞之物化性質及經 SNV 前處理後之特定波長反射率的皮爾森相關係數 (r) ($n = 51$)

Table 2. Pearson's correlation coefficient (r) for selected chicken manure properties and the reflectance after SNV preprocess of selected wavelengths ($n = 51$)

	Moisture ^a	NH ₃ ^a	pH ^b	EC ^{bc}	TOC ^{bd}	TN ^{bc}	1,170 nm	1,450 nm	1,780 nm	1,900 nm	1,930 nm	2,275 nm
Moisture ^a												
NH ₃ ^a	0.32*											
pH ^b	-0.01	0.53***										
EC ^{bc}	-0.04	-0.30*	-0.74***									
TOC ^{bd}	0.01	-0.30*	-0.44**	0.28*								
TN ^{bc}	-0.27	-0.43**	-0.49***	0.46***	0.51***							
1,170 nm	0.02	-0.46***	-0.17	-0.30*	0.07	0.15						
1,450 nm	-0.37**	-0.50***	-0.15	-0.14	0.05	0.20	0.79***					
1,780 nm	-0.15	-0.45***	-0.09	-0.30*	0.05	0.04	0.89***	0.95***				
1,900 nm	-0.44**	-0.48***	-0.12	-0.12	0.02	0.22	0.74***	0.99***	0.91***			
1,930 nm	-0.46***	-0.47***	-0.11	-0.11	0.01	0.22	0.71***	0.98***	0.88***	1.00***		
2,275 nm	-0.21	-0.43**	-0.03	-0.30*	0.00	0.03	0.84***	0.97***	0.99***	0.94***	0.93***	

^a wet matter basis.

^b dry matter basis.

^c electrical conductivity.

^d total organic carbon.

^e total nitrogen.

由於本研究的 vis-NIR 光譜資料以不同波長的反射率呈現，因此，可觀察到代表水分子的 1,900 nm、代表胺類化合物的 1,930 nm，以及同時由上述兩種組成分所貢獻的 1,450 nm 波長反射率與雞糞的水分含量和氨氣濃度呈顯著負相關 ($P < 0.01$; 表 2)。此統計結果呼應先前所描述之堆肥品質參數間的關聯，意即堆肥化過程除了使雞糞水分含量降低，礦化作用所引起的部分氨氣揮發，會導致臭味增強。另一方面，儘管來自有機質的 1,170、1,780 及 2,275 nm 反射率未與 TOC 呈顯著相關，其反射率皆隨著氨氣臭味增加而下降 (表 2)，意味著生雞糞及堆肥化天數較短者氨氣濃度較高，較易分解的有機質尚未因為腐植化作用而分解，並生成具有高度穩定性的腐植質 (Antil *et al.*, 2014)。

IV. 雞糞之 vis-NIR 波長與腐熟度之關聯

腐熟度是判斷雞糞的醱酵程度，以評估其是否適合施用於農田的綜合性指標 (Wu *et al.*, 2000)。因此，本研究利用 PCA 量化堆肥品質參數與 vis-NIR 波長間的交互關係，並將上述變數在特徵值 (eigenvalue) 大於 1 的三個主成分中的負荷量 (loading) 列於表 3。

PC1 可解釋 50.06% 的變異量，而含水量、氨氣濃度與象徵水分子、胺類化合物及有機質的 vis-NIR 波長反射率除了在此主成分中具有較強的負荷量之外，水分與氨氣濃度及反射率分別具有負及正特徵向量 (eigenvector; 圖 2)，再次證明 vis-NIR 波長可反映雞糞性質變化。另一方面，PC2 可解釋 23.02% 的變異量，其中，pH 值的負荷量為正值，而 EC 值、TOC 含量及 TN 含量則為負值，此四項堆肥品質參數正負相反的特徵向量呼應相關性分析所得到的顯著負相關 ($P < 0.01$; 表 2)。

表 3. 雞糞之物化性質及經標準常態變數轉換後之特定波長反射率的 PCA 結果 (n = 51)

Table 3. Results of PCA for selected chicken manure properties and the reflectance after standard normal variate transformation of selected wavelengths (n = 51)

	PC1	PC2	PC3
Moisture ^a	-0.15	0.08	-0.80
NH ₃ ^a	-0.24	0.31	-0.01
pH ^b	-0.08	0.50	0.22
EC ^{bc}	-0.06	-0.51	0.06
TOC ^{bd}	0.04	-0.38	-0.25
TN ^{be}	0.10	-0.45	0.13
1,170 nm	0.35	0.07	-0.36
1,450 nm	0.40	0.03	0.04
1,780 nm	0.39	0.12	-0.19
1,900 nm	0.40	0.03	0.13
1,930 nm	0.39	0.03	0.16
2,275 nm	0.39	0.13	-0.10
Eigenvalue	6.01	2.76	1.19
% of variation	50.06	23.02	9.92
% of accumulative variation	50.06	73.08	83.00

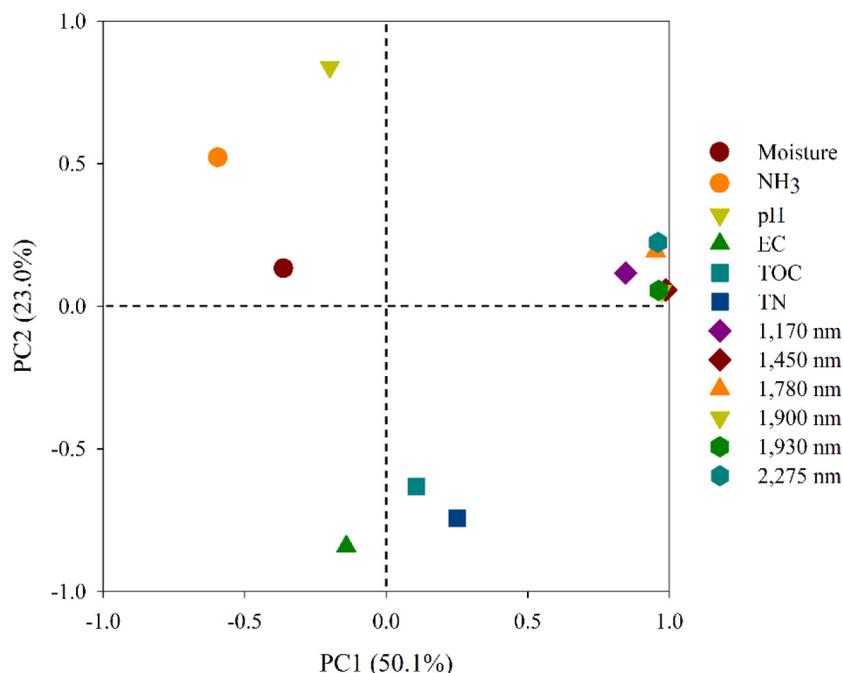
^a wet matter basis.

^b dry matter basis.

^c electrical conductivity.

^d total organic carbon.

^e total nitrogen.

圖 2. PCA 之負荷圖 (n = 51)。NH₃：氨氣濃度；EC：電導度；TOC：總有機碳；TN：總氮含量。Fig. 2. The loading plot of the PCA results (n = 51). NH₃: ammonia concentration; EC: electrical conductivity; TOC: total organic carbon; TN: total nitrogen.

在以 PC1 和 PC2 重新繪製的座標平面中 (圖 3)，A-1-5、B-1-5、C-1-6、C-2-6、C-3-9、D-2-4、D-2-5、D-3-7、E-1-5 及 E-1-6 等堆置天數較長的雞糞樣品和雞糞粒肥集中於第一及第四象限，意味著其具有較高的反射

率 and 較低的水分含量及氨氣濃度 (Ueno *et al.*, 2008; Vergnoux *et al.*, 2009; Rueda *et al.*, 2023)。此外，A、B、D 及 E 等四個堆肥場的堆肥樣品根據其來源分別群聚，且由於樣品具有較高的 pH 值 (pH 6.5 – 9.5)，因而分布於座標平面的第一及第二象限；來自 C 堆肥場的雞糞則是因為 pH 值明顯較低 (pH 5.1 – 7.7)，而集中於第三及第四象限 (表 1；圖 3)。此樣品分群結果，推測是由於 pH 值、EC 值、TOC 含量及 TN 含量隨雞糞堆置天數改變，呈現不規則變化，且容易受到堆肥場各異的雞糞組成份與堆肥化條件所影響 (Antil *et al.*, 2014)，因此在本研究中不易用於區分堆肥之腐熟度。根據 PCA 結果顯示的變數負荷量與樣品分群可歸納得知，PC1 代表雞糞的腐熟度，而 PC2 則顯示堆肥來源 (圖 2、3)，且凸顯 vis-NIR 光譜波長相對於傳統堆肥品質參數，可以有效區分不同腐熟度之雞糞。

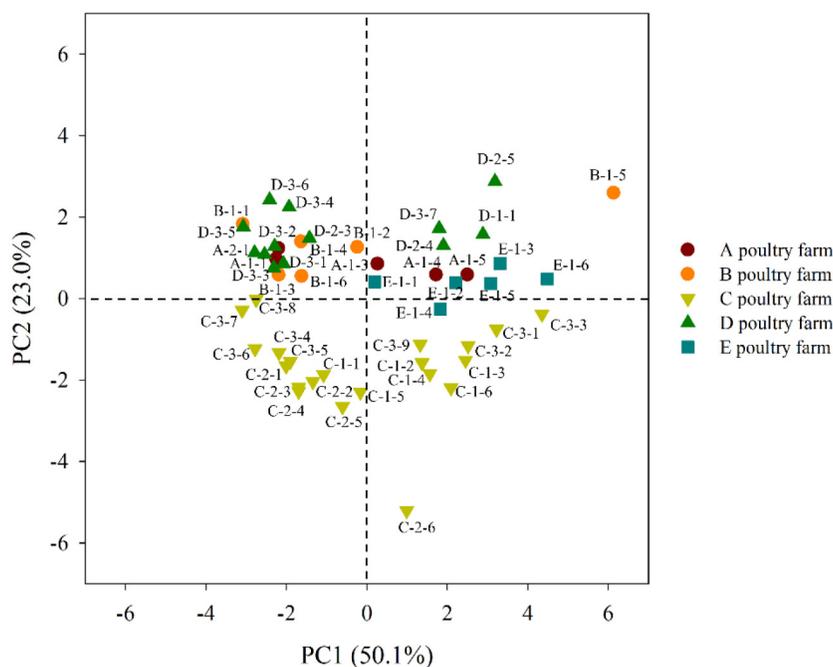


圖 3. 主成分分析之分數圖 (n = 51)。

Fig. 3. The score plot of the PCA results (n = 51).

結 論

堆肥化過程中，雞糞的水分含量、氨氣濃度、pH 值、EC 值、TOC 含量和 TN 含量皆會隨著堆置天數增加而變化。然而，上述堆肥品質參數除了容易受到雞糞來源與堆肥化條件所影響，亦需要依賴實驗室分析才得以判斷雞糞肥的腐熟度。本研究收集不同來源及不同堆肥化天數之雞糞樣品與雞糞粒肥的 vis-NIR 光譜資料，並透過統計工具連結光譜特徵峰與堆肥品質參數，達到堆肥組成定性，且篩選出可用於腐熟度判定的 6 個特徵波長。未來可望以本研究為基礎，並將 vis-NIR 光譜法結合機器學習演算法，針對雞糞的物化性質個別建立數值預測模型，再根據雞糞樣品之不同堆置天數，利用上述性質的模型推估值，建立雞糞腐熟程度的綜合判定指標分數。利用 vis-NIR 光譜儀單一樣品檢驗時間僅需 3 秒鐘，再精進後可應用於堆肥廠稽查，以發展快速的雞糞腐熟度 vis-NIR 光譜鑑別技術。

誌 謝

本研究承農業部畜產試驗所計畫 (編號：113 農科 -14.1.2- 畜 -04) 經費補助，特此誌謝。

參考文獻

號公告修正。

- Antil, R. S., D. Raj, N. Abdalla, and K. Inubushi. 2014. Physical, chemical and biological parameters for compost maturity assessment: a review. pp. 83-101. In: *Composting for sustainable agriculture*. Maheshwari, D. K. (ed.) Springer, Berlin, Germany.
- Ashworth, A. J., J. P. Chastain, and P. A. Moore Jr. 2020. Nutrient characteristics of poultry manure and litter. pp. 63-87. In: *Animal manure: production, characteristics, environmental concerns, and management*. Waldrip, H. M. P. H. Z. Pagliari, and Z. He (eds.). Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.
- Azim, K., B. Soudi, S. Boukhari, C. Perissol, S. Roussos, and I. Thami Alami. 2018. Composting parameters and compost quality: a literature review. *Org. Agric.* 8: 141-158.
- Bernal, M. P., J. A. Albuquerque, and R. Moral. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour. Technol.* 100: 5444-5453.
- Cruz-Conesa, A., J. Ferré, A. M. Pérez-Vendrell, M. P. Callao, and I. Ruisánchez. 2022. Use of visible-near infrared spectroscopy to predict nutrient composition of poultry excreta. *Anim. Feed Sci. Technol.* 283: 115169.
- Huang, J., Z. Yu, H. Gao, X. Yan, J. Chang, C. Wang, J. Hu, and L. Zhang. 2017. Chemical structures and characteristics of animal manures and composts during composting and assessment of maturity indices. *PloS One* 12: e0178110.
- International Organization for Standardization. 1995. Soil quality: determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- R Core Team. 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rueda, M. P., F. Comino, V. Aranda, M. J. Ayora-Cañada, and A. Domínguez-Vidal. 2023. Understanding the compositional changes of organic matter in torrefied olive mill pomace compost using infrared spectroscopy and chemometrics. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 293: 122450.
- Ueno, M., E. Taira, Y. Kawamitsu, Y. Komiya, and K. Kikuchi. 2008. Application of FT-NIR spectroscopy to the evaluation of compost quality. *Eng. Agric. Environ. Food.* 1: 51-56.
- Vergnoux, A., M. Guiliano, Y. Le Dréau, J. Kister, N. Dupuy, and P. Doumenq. 2009. Monitoring of the evolution of an industrial compost and prediction of some compost properties by NIR spectroscopy. *Sci. Total Environ.* 407: 2390-2403.
- Viscarra-Rossel, R. and T. Behrens. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 158: 46-54.
- Weyer, L. G. 1985. Near-infrared spectroscopy of organic substances. *Appl. Spectrosc. Rev.* 21: 1-43.
- Workman, J. and L. Weyer. 2012. *Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy*. CRC press, Boca Raton, FL, USA.
- Wu, L., L. Q. Ma, and G. A. Martinez. 2000. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *J. Environ. Qual.* 29: 424-429.