

腐熟有機肥料之判定法

沈韶儀

畜產試驗所畜牧經營系

前言

台灣地處亞熱帶，氣候高溫多濕，環境中微生物的活動性強，使得土壤中有機質的轉換率高，如 Jenkinson 等 (1977) 之報告中即指出非洲等熱帶地區土壤有機物的轉換率約為英國之 4 倍。依此我們可以瞭解本省土壤中的有機質不但本身含量不高，而且人為施入土壤中的有機物，還可能因分解速率偏高，而降低其效益。為了改善這種土壤肥力日低，農田日益貧脊的現象，關心台灣農業的有識之士正大力提倡「有機農業」，強調少或避免使用化學肥料及農藥，以配合綠肥作物之輪作、農業廢棄物及天然材料利用的方式來生產農業產品，如此則不但可以改善土壤的物理性、化學性和生物性並生產高品質的有機農產品，還可以將農畜廢棄物資源化。因此，將農畜產廢物堆肥化處理是農畜產廢棄物的最佳處理方式。

堆肥醱酵

農業廢棄物按照碳與氮的比值 (C/N) 高低，可分為碳源與氮源廢棄物兩種，而經過適當的組合、處理，在達到穩定 (即堆肥化) 後便能使用。稻草、玉米穗軸、樹皮廢棄物屬於碳源廢棄物，豬糞、雞糞則屬於氮源廢棄物。將這些未經醱酵的有機物進行堆積，部份有機物分解較快，部份有機物分解較慢，而不論分解速度快慢，在好氣情況下有機物分解之最終產物主要為二氧化碳 (CO₂) 與水。在分解過程中會發生轉化作用，其轉化的有機產物可分為生物體、物理性穩定有機物、化學穩定有機物三種 (Jenkinson and Rayner, 1977; Linch, 1987)，此過程即稱為堆肥化。根據 Golueke (1877) 之定義，堆肥化 (composting) 為在人為控制的情況下，將固體廢棄物經由生物分解反應，使其中的有機物分解為對環境不產生負面影響的安定、無害之成分，而適於處理、貯存及／或施用於農地。de Bertoldi 等 (1984) 的定義為經由微生物反應使有機物礦質化 (mineralization) 及部分腐質化 (humification)。

堆肥醱酵過程中所牽涉的反應包括有機廢棄物的分解、能量的釋放、微生物

(新生質 new biomass) 的合成及微生物的代謝等反應，當易分解的有機物被完全分解後，堆肥中微生物的活性就會逐漸減弱，而堆肥的成分也達到穩定。經由微生物的作用，堆肥中大分子的有機物會被分解成小分子的有機物，這些小分子的化合物或被微生物吸收、利用或更進一步礦質化 (mineralization) 而生成 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 N_2O 、 CO_2 等再進入環境 (空氣、土壤或水域) 中。

為何要用腐熟堆肥

就堆肥的生產者而言，提高堆肥醱酵的速率，以便在最短期間內將有機質廢棄物製成堆肥是最重要的；而對堆肥的使用者來說，堆肥的品質才是他們最關心的。如果施用未腐熟的堆肥可能會遭遇到下列的問題：

(1) 土壤性質劣化：

Ahrens 和 Farkasdy (1969) 指出未腐熟之堆肥會造成土壤中氧氣濃度和土壤電位降低，使得植物的根部處於厭氣和強還原性的環境中。Cottenie (1981) 報告當土壤為強還原性時，有些重金屬的溶解度會增加，而這些重金屬濃度的增加會促進植物對其的吸收，使植物所含重金屬濃度增高，甚而到達植物中毒的程度。

(2) 植毒性物質

由過去的研究指出未完熟的堆肥所造成的植毒中毒，主要為氨的散發。van der Erden (1982) 及 Okuda 及 Takahasi (1961) 指出即使少量的氨也會對植物的根部造成毒害，而影響植物的正常生長和種子的發芽。未完熟堆肥在土壤中分解所生成的氧化乙烯也會阻礙種子的發芽，此外相當濃度的有機酸如乙酸、丙酸、丁酸等也被發現對植物生長有毒害。

(3) 再度醱酵

未腐熟的堆肥施入土壤後，在環境條件(如水分) 適當時會再度醱酵，而在其分解過程中會產生高溫及有害物質與氣體，對作物生長會直接造成危害，同時也會發生臭味等問題，而污染環境。

堆肥腐熟度判斷

堆肥穩定度的判斷，主要著眼於衛生安全的考慮和對植物的影響。以有機廢棄物製造堆肥，在堆肥化的過程中，生鮮的有機質會被轉化及／或氧化成比較穩定的成分，而使堆肥達到穩定。在穩定化的過程中，除了生物性 (biotic) 的反應外，還可能有非生物性 (abiotic) 的反應參與。非生物性的反應為小分子物質經由非生物性的聚合反應而生成穩定的大分子有機物質，如腐植質等。當堆肥達到穩定時，雖然礦質化反應和固定化反應 (immobilization) 均在明顯的進行，但是反應淨值應為 0，即反應是處於平衡狀態。

在肥料品目及規格中，對堆肥成分的規定列在表 1，其中只有垃圾堆肥有腐熟度須大於 30% 的規定，其餘的堆肥則大都為一般成分的限制。

由於可以製造堆肥的農畜產廢棄物來源甚多，如禽、畜糞、蔗渣或廢菇包等。由於堆肥的來源、製作方式有相當大的差異，且即使是同類型的堆肥 (如禽、畜糞堆肥)，其基質成分也會因為不同的飼料成分、禽畜生長時期、或飼養管理方式不同而有變化。因此，欲僅以一個參數作為堆肥穩定化的指標，實際上是不太可能的。表 2 為在文獻上所找到的測定堆肥腐熟度的參數。有的指標參數可以很容易的測定，如溫度的變化、顏色的改變等，有些參數的測定則必須仰賴精密的儀器才能得到。而一般在堆肥製作現場，可以用到的堆肥腐熟度判斷方法，則敘述於下。

1. 溫度：在堆積醱酵初期，醱酵堆的溫度會急速上升，且內部溫度比表層溫度高，每當溫度達到一個高峰再下降時，即表示堆肥內部有缺氧的現象，此時需要翻堆或通氣。如此翻堆數次後，堆肥內部的溫度上升速度逐漸減緩；若水分含量適當，翻堆後溫度低於 35°C，即可視為堆肥已接近腐熟。
2. 臭氣：醱酵初期，氨氣及其他揮發性臭氣之濃度甚高，有時甚至會有噁鼻的感覺，爾後每次翻堆，氨氣味道逐漸淡化，等到僅剩微量氨味，甚

至微覺土氣時，則大致已到完熟階段。

3. 顏色：在堆積初期，堆肥顏色相當鮮明，其後隨著醱酵時間增長而逐漸成暗色。當堆肥成呈褐黑色時，亦約是堆肥完熟之時。
4. 種子發芽率測定：若欲更確認堆肥是否仍含有抑制種子發芽的毒性物質，可以進行種子發芽率試驗做為判定堆肥腐熟度指標。其方法如下：現場採回來的新鮮堆肥樣品，經 65°C 風乾後，取樣品 5 g 置於三角瓶中，加 100 ml 75~80°C 熱蒸餾水，攪拌均勻後靜置 3 小時，將浸液過濾後，取 10 ml 濾液於已放有二層濾紙及 100 顆白菜種子的培養皿中，每一堆肥樣品做 5 重覆，並以蒸餾水代替濾液當作對照組。培養皿蓋上蓋子後，置於恆溫箱中，在 25°C 培養 4~5 天，種子有長出兩個完整子葉及根及根毛者才判定有發芽。

$$\text{種子發芽率(\%)} = \frac{\text{堆肥萃取液所測得之種子平均發芽數}}{\text{對照組測得之種子平均發芽數}} \times 100\%$$

結語

由於堆肥材料的來源不同，製造方式也相當多元，因此欲由其最終成分來判斷堆肥是否完全腐熟，是一件很不容易的事，科學家經過過去數十年的研究，至今尚無法找出一個適用於各種來源堆肥的參數。如果是材料固定、醱酵方法一致，則可以由成分變化或醱酵條件的改變，來判斷是否達到腐熟。而為了保護使用者，則至少要確定堆肥在施用後，不會再釋放出對植物有害的物質，故可以發芽率作為參考。

目前台灣地區所使用的堆肥製造方法相當多，有靜置式的、有送風式的、有攪拌式的、有接種微生物製的，不一而足。不論採用何種方式，其對堆肥醱酵的速度及代謝的途徑可以改善，但是對於最終腐熟時的狀態則無法改變，而且堆肥醱酵是微生物醱酵反應，改變環境因素可以提高醱酵速率，縮短醱酵時間，但是亦有其限制。想在短短數日中即達到腐熟，以生物反應而言，應是不可能的。

表 2. 堆肥穩定化評估參數

測定參數		穩定化條件	文獻來源
1. 醱酵條件			
1-1. 溫度		穩定	Stickelberger (1995)
1-2. pH		鹼性(嫌氣, 55°C, 24 h)	Jann <i>et al.</i> (1959)
2. 顯微鏡			
2-1. 直接觀察		微生物量	Jones & Mollison (1948)
2-1. 影像分析		微生物量、殘渣	岡野等 (1990)
3. 培養微生物		減少, 趨穩定(高溫菌)	Citernesi & de Bertoldi (1979)
4. 原料及或微生物成分			
4-1. COD		COD < 700 mg/g 乾堆肥	Lossin (1971)
4-2. C/N	4-2-1. 碳氮比	< 20	Juste (1980)
	4-2-2. 終碳氮比 初碳氮比	< 0.75	Juste (1980)
4-3-1. 水液之總有機碳 總有機氮		5 < 比值 < 6	Chanyasak <i>et al.</i> (1982)
4-3-2. 固定態氮		< 1.56% (乾基)	Wang (1978)
4-4. ATP		減少、穩定	Colin (1977)
5. 微生物其其活性水解酵素活性			
5-1. 呼吸率		0 < 10 mg/g 堆肥 (7 天) 0 < 7.5 mg/g 堆肥 (7 天)	Morel <i>et al.</i> (1979) Germon <i>et al.</i> (1980)
5-2. 顏色		暗棕色, $11 \leq * \leq 13$	Sugahara <i>et al.</i> (1977)
5-3. 臭味		無刺鼻味、具土味	Chanyasak <i>et al.</i> (1982)
5-4. 上部空間氣體		穩定	Wang & Tzeng (1986)
5-5. NO/NO ₃		開始出現, 硝化反應開始	Finstein & Miller (1975)
5-6. 還原物		不存在	Spohn (1978)
5-7. 有機酸		不存在	Chanyasak <i>et al.</i> (1982,1983)
5-8. 醣類	5-8-1. 易水解多醣類	30~50 mg glucides/g 乾物	Morel <i>et al.</i> (1979)
	5-8-2. 還原碳醣 總碳	< 35%	Inoko <i>et al.</i> (1979)
	5-8-3. 總有機碳 水溶性醣 發酵時間	I.D.** < 2.4 穩定 I.D.** < 27 不穩定	Morel <i>et al.</i> (1979)
5-9. 腐質化有機物	5-9-1. 腐植質碳 總碳	> 5	Watanabe & Kurihara (1982)
	5-9-2. 絃可溶腐植質	> 110 mg/g 總有機物	Witt (1982)
	5-9-3. 圓形濾紙法	中心暗, 周圍亮且呈不規則狀	Herttendy (1974) Inoko (1979)
	5-9-4. 光學比色	鹼性抽出物吸光穩定性 Humic material 出現	Morel (1982) Sheen & Wang (1992)
5-10. 陽離子交換能力		> 60 meq/100 乾有機物	Harada <i>et al.</i> (1981)
5-11. 水解酵素活性		緩慢增加	Colin (1978)
6. 生物測試			
6-1. 發芽率		G.I. *** > 50	Zucconi <i>et al.</i> (1985)

* Y = The stimulus value (degree of lightness)

** I.D.= 3.166 - (0.011 AGE) + (0.059 TOC) + (0.832 PH₅)

AGE = 發酵日期

TOC = 總有機碳

PH_s = 熱水可溶之醣

*** G.I. = Germination Index