

發展廚餘堆肥教學模組－落實綠色校園

黃富昌¹、許哲豪²、王錦堂²、
林諒昭³、吳承恩³、陳淳圓³、賴允偉³、劉彥君³、蕭博瑞³

1 南亞技術學院土木系環工組 副教授 2 南亞技術學院土木系環工組 學士 3 南亞技術學院土木系環工組 學生

摘要

廚餘係泛指果皮葉菜殘渣，甚至茶葉、蛋殼等可被微生物分解之有機物都可算是廚餘。當廚餘與其他的垃圾混在一起時，因其具有發臭、滲水的特性，常會造成他種資源垃圾的無法回收。若能將廚餘與其他的垃圾分開，並回收製作成有機肥加以運用，則不僅廚餘，其他種類的垃圾，如紙類、塑膠、金屬、玻璃等，均可成為有用的資源加以回收再利用。有鑑於此，學校單位更應發揮知能傳播之功能，將校園廚餘堆肥化之經驗傳授至各家庭、社區，大家一起為垃圾減量盡份心力。校園中的花園，極適合做為廚餘堆肥化及落葉堆肥化之最終施肥處；配合校園整體的綠化美化，規劃一處自然生態有機園區，做為學生實習之處所，並可作為戶外教學之活教室，落實綠色校園。本研究收集學校廚餘，然後製程之堆肥，其溫度(初期 60°C、末期 25°C)、水分(60%)及 pH 值(7.5)均能控制在適當範圍，成品發芽率皆為對照組的 90%以上，發芽指數及蚯蚓腐熟度鑑定均達堆肥成品應用之規範。同時透過氮氣吸/脫附等溫線及 X-ray 繞射測定獲得有機堆肥基本構造，對後續應用於土壤污染整治可提供重要訊息。同時依據廚餘堆肥實作情景製成一套立體模型作為教學之輔助教具。最後彙整一套廚餘堆肥資源化教學模組，藉由網路教學平台分享至各處，擴大教學成效，落實廚餘回收工作，減輕環境負荷。本研究有系統的建置一套廚餘堆肥資源化理論與實務並重之教學模組，無論最後在有機農業教育、環境教育或土壤復育、工程應用與學術理論的建立上，都具有相當重要的參考價值。

關鍵字：廚餘、堆肥、環境教育、綠色校園

一、前言

近年來世界各國，尤其是農業先進國家，均積極在推動永續農業、有機農業等，此等農業制度，最重要之措施為設法多施用有機質肥料，藉以培育土壤的生產力，並達成落葉歸根，返樸歸真之農業。農業是國家的基本產業，具有必要維持且持續發展的重要性，現代的農業是講求生產、生活、生態等三種功能為三生一體的產業，即是在追求農業發展的同時，也必須重視生活的品質及生態環境的維持。由於台灣處於高溫多雨及多溼的環境下，土壤中的有機質分解比較快，需要補充有機物質來維持農地的生產力。利用農牧廢棄物堆肥化生產有機質肥料，能夠充分供應培育地力所需要之腐植質外，對於農作養分磷、鉀等之循環利用更有重要的意義，農牧廢棄物之資源化不但可以改善農業環境，農牧產業也因而可獲得繼續發展。有鑑於此，希望藉由本研究之執行，結合環保理念與農業技術，將垃圾化為有機肥，解決環保問題的同時，亦提昇地力，改善農業環境。進而將堆肥教育納為環境教育之一環，將堆肥操作與蔬菜園區，化為生態、環境關懷最好的教材，以落實資源回收再利用，推動綠色校園。

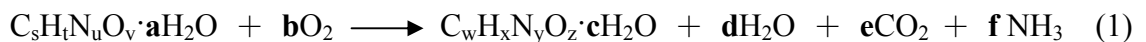
二、文獻回顧

校園廚餘堆肥化，其堆肥化過程係指堆肥材料上微生物族群繁殖的過程(如圖 1 所示)。堆肥化發酵處理的條件相當的複雜，一般必要條件為空氣、含水率、pH 值、溫度、營養源等。即堆肥材料必須具有(1)微生物所需的能源；(2)微生物生長所需的 N、P、S 及 K 等養分；(3)能使堆肥材料被微生物利用的水分；(4)供微生物生長呼吸和維持呼吸所需的氧氣；(5)供代謝產物氧化聚合的氧氣、高 pH 值和較高溫度。一般廚餘具備上述條件，極適合作為堆肥材料，有必要配合政策大力推動。

1.堆肥化原理

堆肥化係藉微生物的生化作用，在控制條件下，將廢棄物中的有機物分解、腐熟，轉換成安定似腐植質土的方法。堆肥化處理之原理大致可分為厭氧性和好氧性兩大類(代謝過程如圖 2 所示)：(1)厭氧性方式：係將垃圾堆積以減少與空氣之接觸，促使有機物安定化之處理方式，傳統式的自然堆積法即屬之，此法之反應緩慢需要數個月才能完成堆肥化為其缺點；(2)好氧性方式：係利用翻堆或強制送風、抽風，促使有機物安定化的方式，因反應快可減少堆肥化之處理時間，又稱為高速堆肥法。

堆肥化發酵處理之化學反應式如式(1)所示：其中生成堆肥 $C_wH_xN_yO_z \cdot cH_2O$ 與堆肥原料 $C_sH_tN_uO_v \cdot aH_2O$ 之比約 0.3 ~ 0.5, $w = 5 \sim 10$, $x = 7 \sim 17$, $y = 1$, $z = 2 \sim 8$ 。



2.堆肥之生理變化

堆肥的製成可分為四個階段：(1)中溫期(Mesophilic stage)；(2)嗜熱期(Thermophilic stage)；(3)冷卻期 (Coolingdown stage)；及(4)完熟期(Maturing stage)。

第一階段的中溫期，真菌與細菌開始分解有機物，並利用釋放之養分生長繁殖，隨著時間，其族群大量增加並使堆肥堆的溫度逐漸升高，pH 值則隨之降低，當溫度升高超過 40°C 時，即嗜熱期的開始；肥堆的溫度仍會一直升高，此時真菌因熱漸漸失去活力，微生物相發生改變，反應改由耐高溫的放射菌接手，溫度可以超過 60°C，醣類、澱粉、油脂與蛋白質等大分子被分解，pH 值也升高變成鹼性，氨氮氣體也在此階段生成，等到反應速率因物質被分解殆盡而慢慢下降，反應即進入冷卻期，真菌重新活躍起來，纖維質被分解。

從開始到冷卻期，只需幾個星期即可完成，但最後的完熟期，卻需要數個月來生成穩定的腐植質與腐植酸。這段期間，微生物間會有強烈的競爭，大型的生物如螞蟻、蟲、蚯蚓等開始進入，幫助消化分解其餘的物質。最後當溫度一直保持在 40°C 以下，顏色呈現黑褐色，原來物質的形狀崩解成為黑土狀，並有一種特殊的香氣時，即表示堆肥完成，可直接混入土壤中使用。

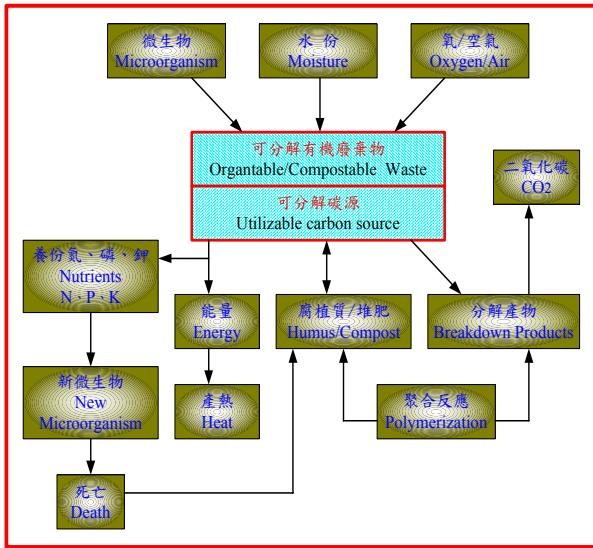


圖 1 堆肥化過程示意圖

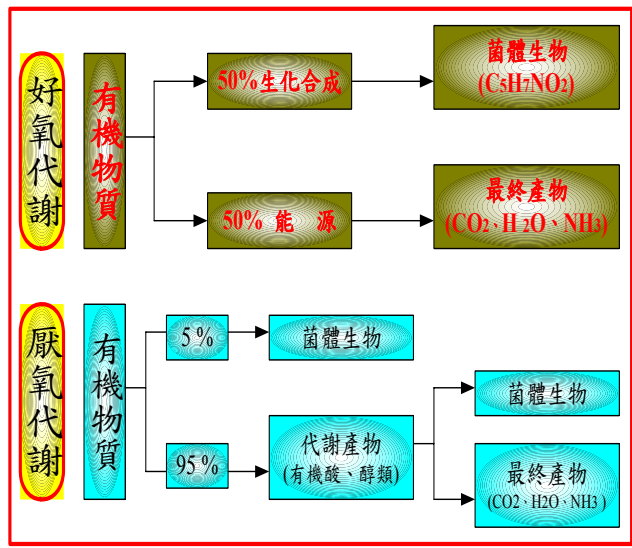


圖 2 堆肥化代謝過程示意圖

3. 製作堆肥之醱酵條件

堆肥製作過程是把有機廢棄物予以適當堆積，在控制條件下，利用微生物作用，將有機材料醱酵分解，轉變為有機質肥料。有機材料在適當的條件下堆積醱酵，可以縮短有機物分解的時間，而生產出物理性均一，化學成分穩定的高品質有機堆肥。在堆肥化的過程中，氧氣、水分、主成份碳氮比、以及溫度的變化與控制，會影響堆肥最終的品質。根據許多經驗與研究發現，將堆肥原料組成調整在碳氮比(C/N)25：1~30：1 之間，水分維持在 55~60%，經常性的翻堆，並維持溫度不使之超過 65°C，即可保證堆肥的成功。

4. 堆肥簡易腐熟度鑑定法

(1) 感官鑑定法

- (a)外觀、顏色：質地細緻無大團塊狀物。
- (b)手感：用手緊握，放開不會結成一團也不粘手。
- (c)嗅感：用手抓一把，略近鼻孔，嗅不到濃氨味，也嗅不到糞臭味。

(2) 氣體與臭味鑑定法

- (a)測定游離氨濃度：堆肥 300g 裝於 20×33cm PE 袋，放在室溫下，約一小時後，伸入氨氣檢知管測定袋內游離氨濃度小於 15ppm(最好的狀況為小於 5ppm)。
- (b)氣體發生試驗：堆肥 300g 裝於 20×33cm PE 袋，放在室溫下，一天後袋子仍不鼓起。
- (c)發臭試驗：在 100ml 試管內裝入約 30ml 堆肥，再放入蒸餾水 30ml，然後加蓋，於室溫(或 35°C 恆溫箱中)一天後取出，聞不到氨臭和糞臭。

(3) 發芽試驗法

- (a)堆肥 5g 與 100g 60°C 溫水共混，放在 60°C 溫浴中保溫三小時後，用多層紗布過濾，取得濾液供試。
- (b)取濾紙兩張，置於 9cm 培養皿內，加入 5ml 供試濾液，然後在濾紙上約等距離放入 40

粒清梗白菜種子(發芽率 95%以上者)。

(c)將已播種之培養皿移入 25°C 植物培養箱中培養三天，然後取出記錄正常發芽之種子數。另外用尺概略量取每粒正常發芽之根長。

(d)發芽試驗設有對照組，以煮沸後放冷之自來水為對照溶液。

5.堆肥過程基本性質的變化

有機廢棄物堆肥化處理過程中，其基本性質會隨堆肥反應過程而異，藉由性質之變化可提供堆肥腐熟程度之判定，並作為堆肥過程控制參數之依據。

(1)堆肥過程氮的變化

依據文獻指出堆肥應用於土壤調整時，主要依其無機氮之多寡而定，其中總氮含量不超過 10%，且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 應少於 0.04%(乾基)。氮氣的產生對微生物活性有所限制。堆肥過程當溫度降至 40°C，硝化作用進行產生 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，而硝化作用強度與 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度有關。另一方面，硝化作用在高溫時不易發生，大部分出現與大氣溫度相近時。氮含量會隨堆肥過程氮氣的揮發而漸漸損失，堆肥末期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的產生會使導電度增加，就農業的角度而言，增加導電度可增加營養鹽，對調整土壤是有利的。不同型態之氮和硝化過程會影響 pH 值和導電度，而 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ 比值亦可作為堆肥腐熟之指標。Qiao(1997)研究發現紅土之高氮量、低 C/N 比，導致堆肥過程氮氣的揮發增加，然若額外提供碳源，則可增加 C/N 比，並減少氮氣之揮發。

Fang(1999)研究指出在堆肥開始時， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 會明顯隨溫度和 pH 值增加而增加，隨後因揮發或微生物之固氮作用而減少；而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在堆肥開始時幾乎不存在，在高溫期後 $\text{NO}_3\text{-N}$ 會明顯增加。

(2)堆肥過程 pH 值的變化

pH 值為堆肥成品品質重要之判定指標，一般而言，為維持微生物作用之最佳活性，堆肥過程 pH 值多控制在中性範圍，且腐熟堆肥最佳 pH 值介於 7-8.5。pH 值之降低主要在於有機物質形成有機酸或氮氣揮發。

三、研究方法

本研究主要目的是建置一套廚餘堆肥資源化理論與實務兼具之教學模組，使同學由做實驗中學習、瞭解有機堆肥之做法。同時藉由教學模組之知識分享、講義及教材之詳細說明，並透過立體模型讓同學更加瞭解廚餘堆肥資源化之重要性，全力推動環境教育，落實綠色校園，減輕環境負荷(研究流程如圖 3 所示)。本研究團隊從設置廚餘桶收集同學用餐所剩之菜飯，然後切碎、瀝乾、壓實、加除臭劑，重複上述動作，直至廚餘桶約 8~9 分滿為止(製作過程如圖 4 所示)。製作期間，廚餘桶頂部需加蓋以避免臭味溢出及引來蚊蟲。約一星期左右，可收集廚餘水(營養液)加以稀釋，做為清潔排水溝等用途。

廚餘堆肥教學模組—紮根有機農業教育

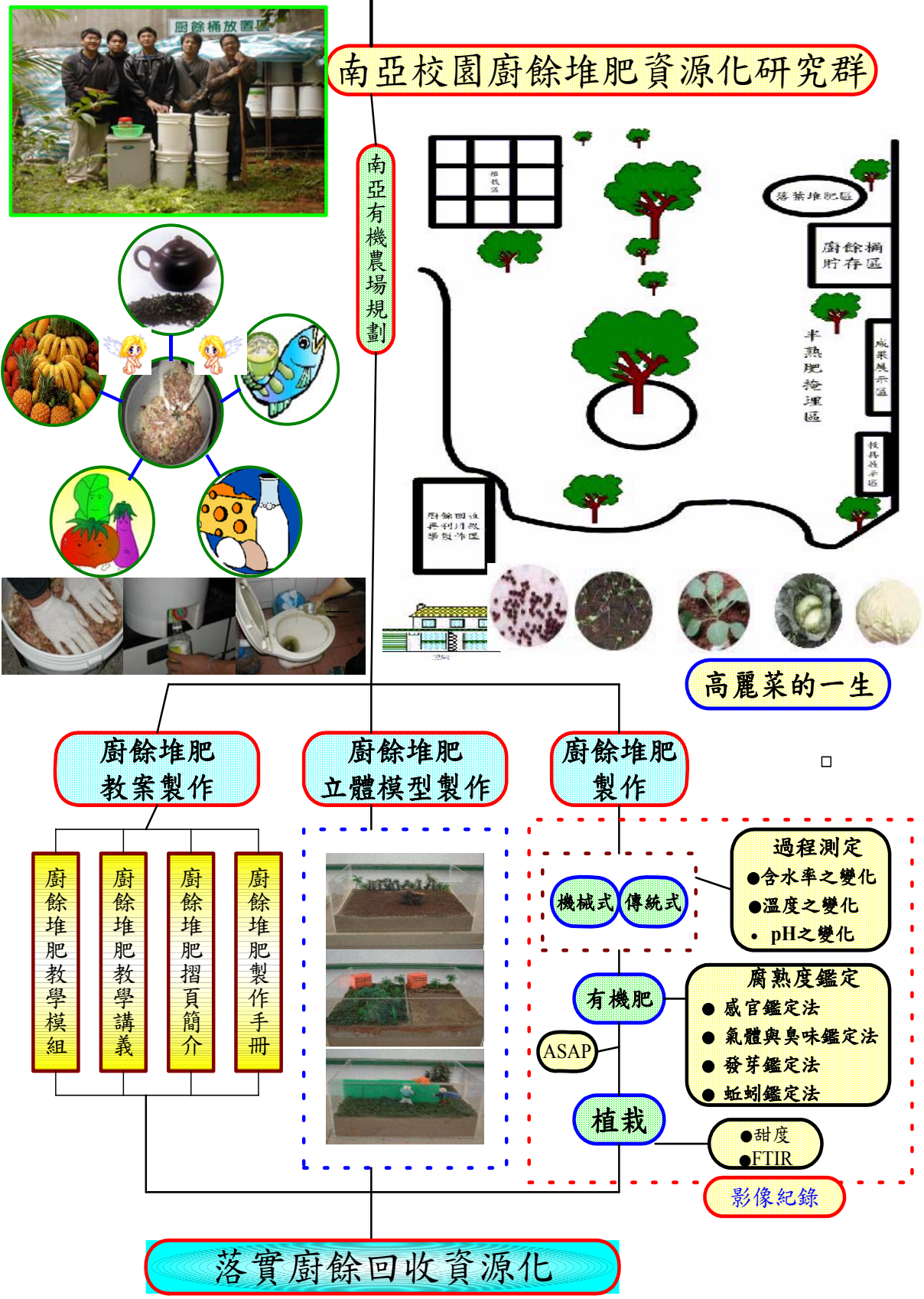


圖 3 研究流程示意圖

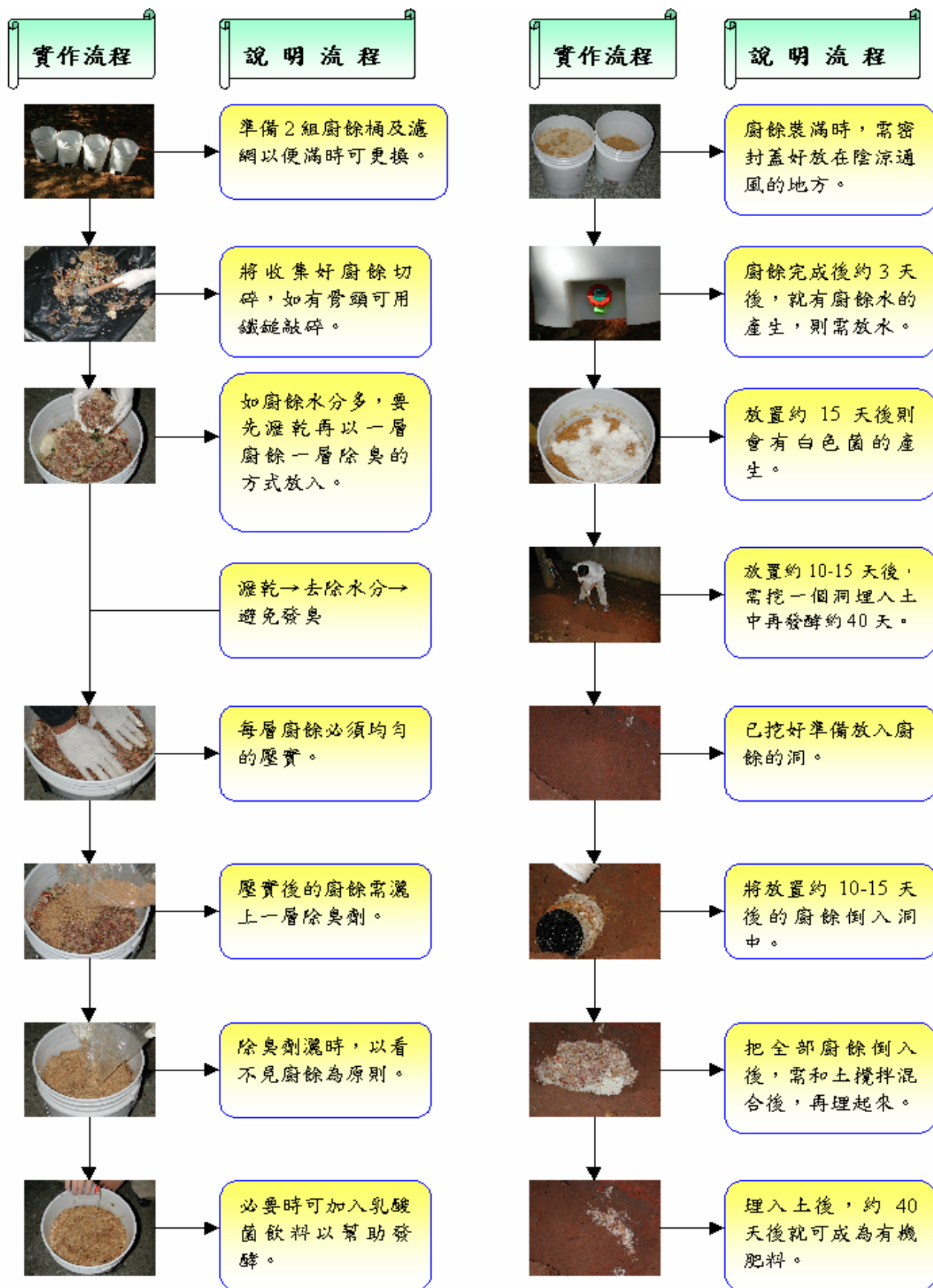


圖 4 廚餘堆肥製作流程示意圖

四、結果與討論

1.堆肥過程溫度之變化

堆肥化期間，溫度變化出現三個階段：(1)高溫階段：堆肥溫度於 36 小時內從 30°C 升至 55°C，高溫延續至第 16 天，最高溫達到 71°C，平均溫度 65°C；(2)降溫階段：溫度於第 19 天開始下降，至第 50 天降至室溫；(3)穩定階段：從第 50 天直至堆肥結束，堆肥溫度與室溫接近(如圖 5 所示)，顯示已趨近腐熟。1992 年 Rynk 等人研究指出，55°C 之溫度至少維持 3 天，可以摧毀堆肥內致病菌，63°C 以上則可殺死大部分之雜草種子。

2.堆肥過程含水率之變化

含水率高低會影響堆肥反應的進行，當含水率過高時，則水分會阻塞堆肥間隙，形成厭氧狀態，延長堆肥時間；含水率過低時，將影響微生物活性，不利堆肥反應的進行。在堆肥過程中，因微生物分解有機物產生熱會使水分蒸發，因此，本研究藉由加蓋壓實，以維持堆肥反應最佳之含水率在 60% 左右(如圖 6 所示)。

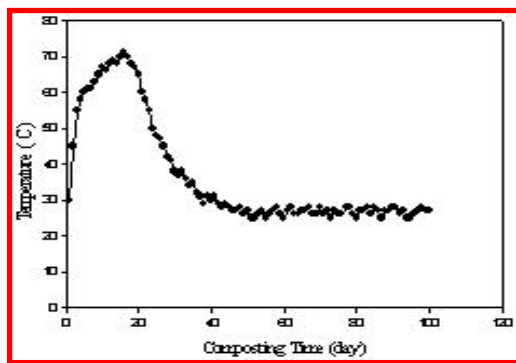


圖 5 堆肥過程溫度之變化

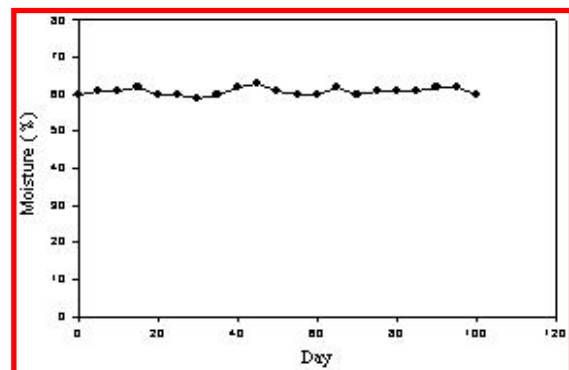


圖 6 堆肥過程含水率之變化

3.種子發芽率及發芽指數之變化

堆肥成品腐熟與否及施用於土壤對植物生長之影響，為堆肥應用於農地亟待探討之重點。因此本實驗分別利用，小白菜之種子發芽率(Seed Germination Rate, GR)及其種子發芽指數(Seed Germination Index, GI)來評估各試驗組之堆肥成為對植物生長之影響。種子發芽率係指置於堆肥濾液中發芽種子數佔原來種子數目之百分比，GI 值則是表示【堆肥濾液中種子發芽率乘上種子根長】除以【去離子水中種子發芽率和種子根長之乘積】的百分比。

腐熟堆肥的發芽率測試中，文獻指出若試驗組的發芽率為對照組發芽率的 90% 以上，且根的延長不受抑制，則該堆肥成品可視為腐熟。在本實驗中，對照組所測得之發芽率為 85%，而堆肥成品中控制組之堆肥成品，其發芽率均在 90% 以上，可得發芽率皆為對照組發芽率的 90% 以上，顯示各試驗組之堆肥成品皆已達腐熟。試驗組的發芽率均為對照組發芽率的 90% 以上，可知本研究團隊所製成之堆肥成品應用於土壤均有助於植物之生長。

4.堆肥腐熟度鑑定—蚯蚓法

本研究團隊收集廚餘所製成之有機堆肥均受到蚯蚓的喜愛(如圖 7 所示)，初步判定這些堆肥之腐熟度都符合標準。



圖 7 堆肥腐熟度鑑定—蚯蚓法示意圖

5. 有機堆肥 BET 比表面積

物質的孔隙結構在自然界的現象與實際應用扮演著重要的角色。由標準氮氣吸/脫附等溫線，可獲得有機堆肥 BET 比表面積等基本結構資訊。BET 比表面積是吸附劑吸附能力的重要指標，當吸附劑表面積愈大，就有更多位置可供吸附質吸附，故有機會吸附較大量氣體。圖 8 為有機堆肥氮氣吸/脫附等溫線，其吸/脫附曲線幾乎重合，表示樣品間沒有由大塊板狀粒子連接而形成得狹縫孔隙，表示樣品之結構穩定。此結果可作為後續應用於土壤污染整治之重要訊息。

6. X-ray 繞射分析

為更進一步探討生廚餘及有機堆肥間結構之差異，進行 XRD 繞射測定。圖 9 顯示之結構差異不是那麼明顯，且其強度隨角度之變化呈現一規則性之變動，值得進一步的深入探討。

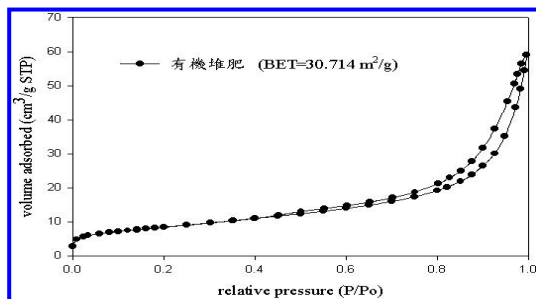


圖 8 為有機堆肥氮氣吸/脫附等溫線

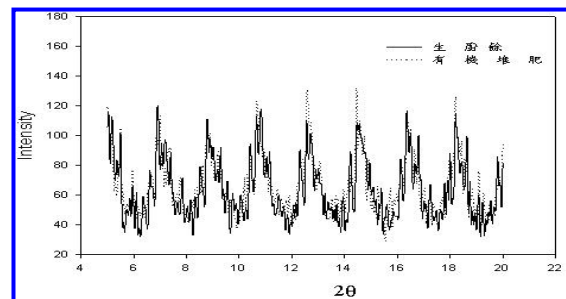


圖 9 生廚餘與有機堆肥之 XRD 繞射圖譜

7. 課程網頁規劃初步成果(含課程資料網化、網路討論、學生修課回饋與建議等)

本校已設置有 e-learn 南亞網路學園，網址為 <http://dlearn.nanya.edu.tw>。利用此平台將廚餘堆肥資源化之教學模組在網頁上公告(如圖 10 所示)，同時將專家學者之演講與重點摘要、教學活動、指定閱讀或學生優良研究成果報告、作業等也一併在網頁上公告。同學可藉由網路之無遠弗界與同學分享學習心得，並可與外校同學進行技術交流，同時可擴及社區民眾，擴大學習層面，增進堆肥製作技術，全面推動有機農業，減輕環境負荷。

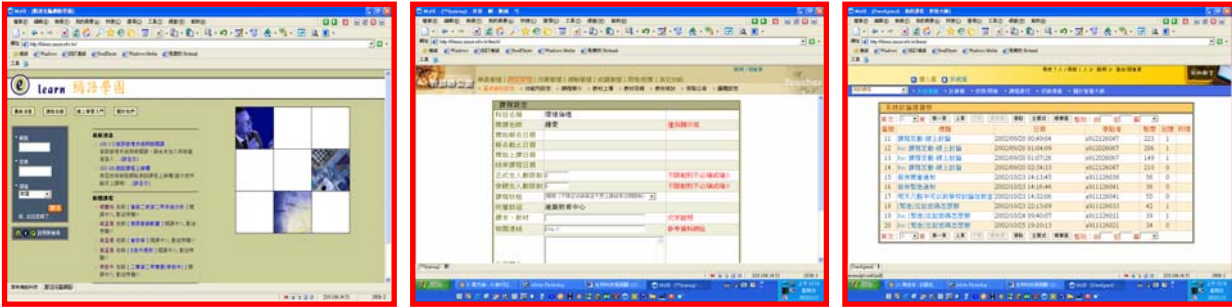


圖 10 廚餘堆肥資源化教學模組網頁內容示意圖

五、結論與建議

- 1.本研究，在堆肥製作中其溫度(25°C)、水分(60%)及 pH 值(7.5)均可控制在適當之範圍。
- 2.本研究中利用堆肥成品之濾液做發芽率試驗，評估堆肥成品是否對植物具抑制性，結果顯示皆為對照組的 90%以上，發芽指數均達堆肥成品應用之規範。
- 3.本研究中利用蚯蚓鑑定堆肥之腐熟度均符合標準。
- 4.本研究由 BET 比表面積及 XRD 繞射測定獲得有機堆肥基本結構部分資訊，後續研究可進一步探討，其相關訊息可作為土壤污染整治之重要參考依據。
- 5.傳統式與機械式比較，觀察植物生長情形，並無明顯差異。後續研究可針對植物體分析其營養鹽及甜度以進一步比對。
- 6 後續研究，可針對土壤施用有機堆肥前後物化性質之變化情形，進一步探討土壤吸附附能力，評估堆肥處理土壤污染之可行性。
- 7.堆肥過程所產生之 CO₂，宜使用 CO₂ 監測棒，以有效監測 CO₂ 產氣濃度之變化。
- 8.完成之立體模型，將廚餘堆肥過程透明化，對於教學有莫大的助益。後續可朝動態模型製作努力。
- 9.完成廚餘堆肥資源化網路教學模組，對推動環境教育，落實廚餘回收工作有極大之貢獻。同時將持續更新、補充相關資料，擴大其效益。

參考文獻

- 1.連深、李豔琪，“有機質肥料之重金屬含量及肥料規格之有關規範”，土壤與肥料污染研討會論文集，第 158-173 頁(1994)。
- 2.袁紹英，“廢棄物堆肥化過程的微生物作用”，堆肥技術及其利用研討會論文集，第 67-83 頁(1994)。
- 3.楊萬發，“有機廢棄物堆肥處理技術”，經濟部工業局編印(1997)。
- 4.林殿琪，“論台灣家庭廚餘堆肥現況及未來發展探討”，碩士論文，國立台灣大學環境工程研究所，台北(2000)。
- 5.Chefetz, B., P. G. Hatcher, Y. Hadar, and Y. Chen, “Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste”, J. Environ. Qual., 25, pp.776-785 (1996).

6. He, X. T., S. J. Traina, and T. J. Logan, "Chemical properties of municipal solid waste compost", *J. Environ. Qual.*, 21, pp.318-329 (1992).
7. He, X. T., T. J. Logan, and S. J. Traina, "Physical and chemical characteristics of selected U.S. municipal solid waste composts", *J. Environ. Qual.*, 24, pp.543-552 (1995).
8. Inbar, Y., Y. Hadar, and Y. Chen, "Recycling of cattle manure: The composting process and characterization of maturity", *J. Environ. Qual.*, 22, pp.857-863 (1993).
9. Narayan, R., "Biodegradation of polymeric materials during composting", *Science and Engineering of Composting* (1993).
10. Tisdell, S. E., and V. T. Breslin, "Characterization and leaching of elements from municipal solid waste compost", *J. Environ. Qual.*, 24, pp.827-833 (1995).