第五章　堆肥製造原理

林鴻淇

國立臺灣大學農業化學系教授

摘　要

堆肥是堆肥材料在堆肥化過程中的產物。堆肥材料中有一部份容易被微生物分解利用來做生長和新陳代謝。一部分比較難分解利用。在堆肥化過程中會形成較容易礦質化的營養性腐植質和較不容易礦質化的特久性腐植質。

堆肥化作用是微生物把堆肥材料轉化成堆肥的生物化學過程。決定這個過程的因子是：堆肥材料的微生物營養性狀，材料中的水分活性，在堆肥化過程中的鹼性度，維持好氣性狀態。創造堆肥化的有利條件包括接種大量的堆肥化菌群。利用一部分堆肥回流當做接種源是最方便而確實的方法。維持一段時間的微生物代謝熱燠積有利於嗜熱性微生物的堆肥化作用，並有消除病蟲害和雜草的效用。另一方面也利於消除低分子量代謝產物，增加高分子量的聚合物；提高腐熟度，消除對作物種菌的傷害。

提高持久性腐植質的比例能讓施用堆肥於土壤中時使土壤有機物含量提高。要充分利用 C/N 比大的堆肥材料時要在堆肥化過程中添加化學氮素肥料，使其轉化成營養性腐植質和持久性腐植質，因而使化學氮素肥料緩效化；同時增強堆肥化過程，增加堆肥產量。

一、製造堆肥的過去和現在

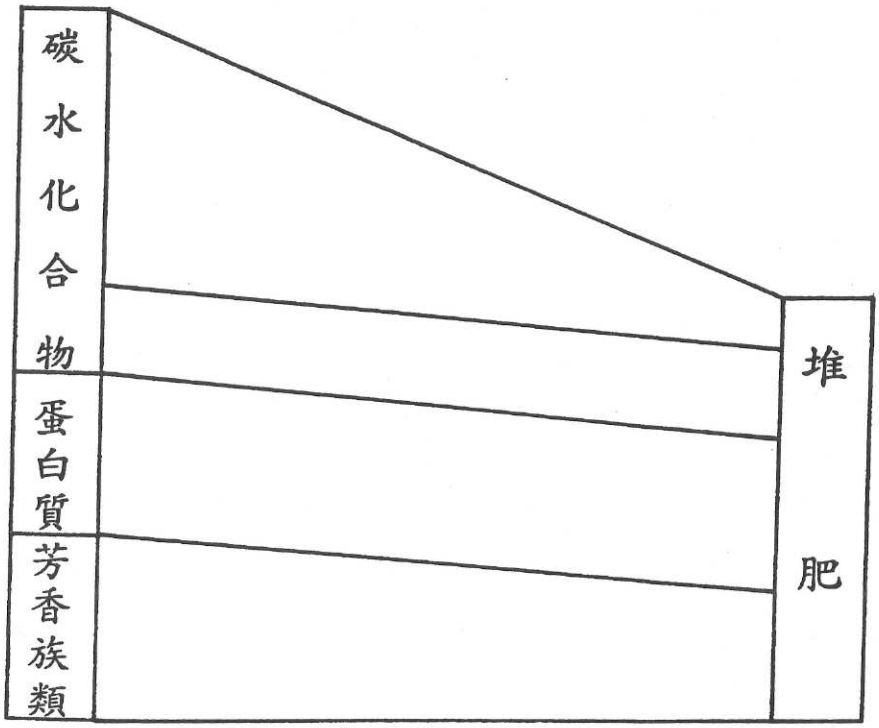
進入農業時代以後就知道製造堆肥。古代稱為糞，是有機材料經過堆積細碎成米粒大小，且性狀變異而成的。 Napoleon 因硝來源被英國切斷，下令全國農場做堆肥來生產硝。台灣在二次大戰的前後都獎勵興建堆肥舍製造堆肥。 1960 年代，台灣大量栽培洋菇而研究稻草堆肥製造技術。 1960 年代後期由台糖退休員工引進現代機 械堆肥化工程，「大同有機肥料公司」。 1980 年代後期因提倡「有機農業」，研究堆肥製造的方法再度成為熱門。

二、堆肥材料

堆肥材料來自草木。如穀類作物之槁桿、枯枝落葉、食品飼料、樹皮、鋸屑、荳萁及蔗渣等等。這些是初級材料。禽獸等排泄物則為已經通過初步堆肥化的次級材料。初級材料中醣類，蛋白質類，和一些脂類容易堆肥化；芳香族類化合物不易堆肥化。前者轉化成容易礦質化的〝營養性腐植質 nutritive humus〞 後者則轉化成〝持久性腐植質 durable humus〞。

三、堆肥化 (composting)

堆肥化作用是堆肥材料由生物予以消化，水解後利用這些生質能源來做繁殖，生長和新陳代謝。用化學和生物化學過程合成次生產物，再經過氧化聚合而成腐植質。飼料通過動物胃腸予以消化，吸收同化，代謝異化後排泄的糞尿可看成一種堆肥化過程。經過此過程消耗大量能源並大量繁殖微生物族群， 使排泄物之後續堆肥化過程更容易。



圖一、堆肥材料之堆肥化過程

一般所認識的堆肥化過程可簡約地說：堆肥化是堆肥材料中微生物族群的繁殖過程。菌體和小分子代謝物構成營養性腐植質，一些由材料分解來的產物和代謝產物經化學反應而環狀化，再經過氧化聚合而形成持久性腐植質。腐植質含碳約 58 % 含氧較少， C/N 比在營養性腐植質為 10 - 12 ；在持久性腐植質為 8 - 10 。

表一、持久性腐植質含量與 Ch / Nh 比值

(Scheffer 等， 1941)

	Ch : Nh	持久性堆肥 (%)
黑　　土	6 - 8 : 1	70 - 80
棕　　土	6 - 8 : 1	40 - 60
灰　　壤	20 : 1	30 - 60
沼 澤 土	16 - 30 : 1	30 - 45
堆　　肥	9 : 1	31
廄　　肥	12 : 1	33

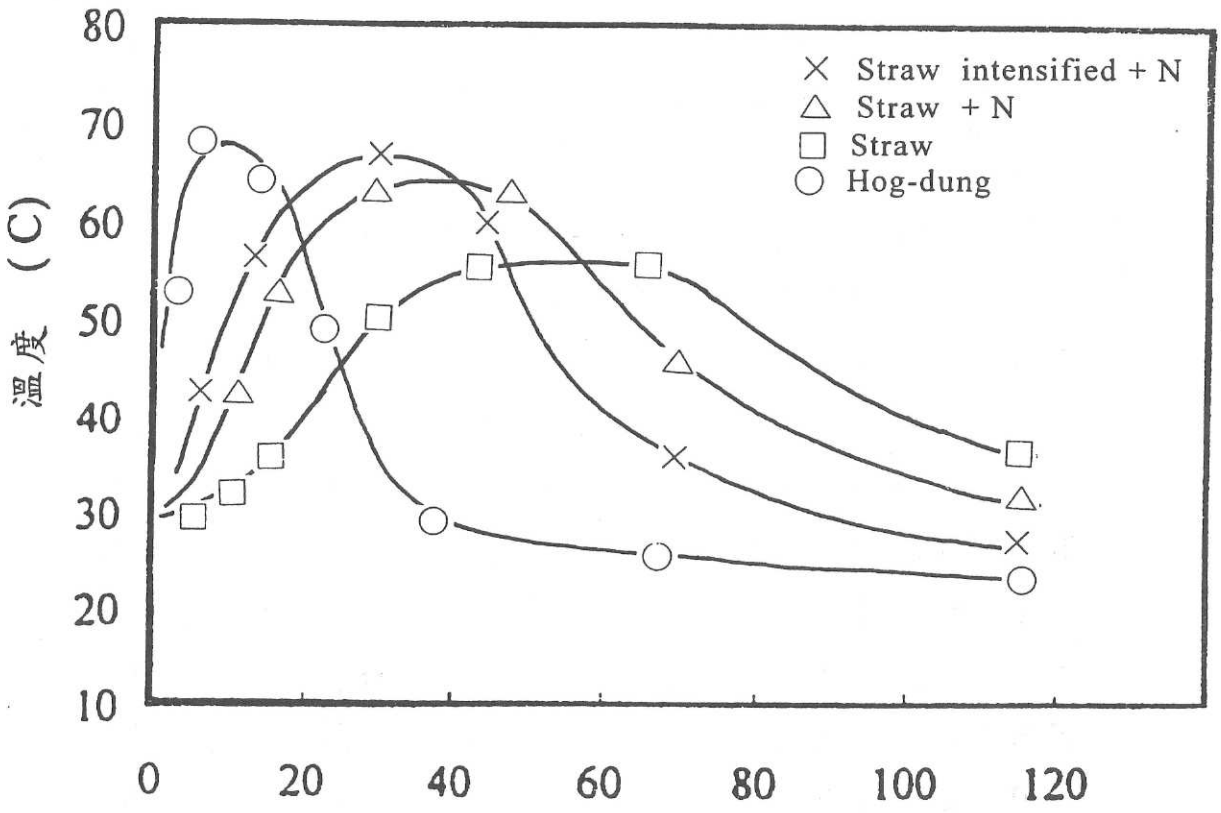
四、堆肥化過程

堆肥化過程是在堆肥材料上微生物族群繁殖的過程。堆肥材料要具有：

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活性。
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。

堆肥材料須含有 60 % 的水分。堆肥的目的之一就是保持適當的水分含量。存在堆積材料中的菌落開始繁殖。菌群繁殖的容量極限受可利用氮源量限。在 P ， S 及 K 等不為限制因子下，易利用性能源多，氮源多則繁殖快。如雞糞。微生物族群繁殖過程中，生長呼吸和維持呼吸產生的代謝熱的燠積會使堆積體溫度

升高。呼吸使氧氣耗竭。高溫使水分逸散。菌群社會由中溫菌群 (mesophilics) 遞擅至高溫菌群 (thermophilics) 易利用性能源逐漸消耗，次生產物逐漸蓄積。堆肥的性狀品質用腐熟度來評定。



圖二、堆肥化過程 (天)

以下是堆肥化過程中的有利條件，但不是必要條件

1. 接種菌苗

堆肥材料本身已感染很多的菌種。在良好的堆肥條件下各菌種開始繁殖。如果已浸潤的堆肥材料中含有足夠的易利用性能源和 N ， P ， S 及 K 等養分時，菌群社會很快繁殖。

由嗜溫性菌群和嗜熱性菌群遞擅 (successive dominance) 。在堆肥材料中接種主要在改善起始點的菌群密度以加速整個堆肥化過程。用純粹培養的菌群做為接種源 (inoculum) 必須要這些菌種能壓制材料中原已存在的菌。經過殺菌手續而接種的例如豆瓣醬或味噌。接種特殊菌種使產生抗生素來抑制馬鈴薯痂皮病 (scabby disease) 。目前國內外也有製造堆肥的各種接種劑。大致上都沒有顯著效果。堆肥製造過程中回流部分堆肥與新鮮材料混合是最有效的實用方法。

2. 高溫

堆肥材料的每克乾物質含 4 - 5 Kcal 的熱量。呼吸掉一克葡萄糖產生 4.2 Kcal 。隨著堆肥材料中菌群的繁殖，生長呼吸和 維持呼吸急速增加。假定一噸乾草含一噸水分，則這堆材料在絕熱狀態下呼吸掉 10 kg 所產生的熱足可以把整堆從 30 ℃ 加熱到 70 ℃ 。在靜態堆積條件下，菌群大到所產生的熱量大於逸散熱量時，經過一段時間後就可使中心部燠熱到 70 ℃ 。假如初始菌 群密度不大，堆肥材料 C/N 比又很大，堆積體的比散熱面積很大，則會使堆肥化失敗。隨著堆積體的溫度升高，擅場菌群 (dominant microflora) 也會由嗜溫菌群變換為嗜熱菌群。通常嗜溫群是很有效率的。所以堆積的高溫度不是必要的良好條件。高溫也不是消除病源和殺除雜草種子必要條件。但是高溫加速化學反應，如氧化聚合反應形成次生大分子腐質素 (humin) 。

3. 高 pH 值

在堆積體中多濕少氧之處容易產生一些有機酸。假定所產生酸當量大於堆肥材料中的鹼性度 (alkalinity) 則此處會有酸

性反應。這種條件對細菌的繁殖不利。在堆積過程中所產生的小分子物種對植物幼根有害。這些小分子化合物在高 pH 值下容易氧化聚合成大分子因而得以消除其植物毒性。對堆肥材料加入石灰以提高其鹼性度是適當的手段。

4. 翻堆

靜態堆積體的外圍容易散熱和失水，所以必需翻堆加水把它包到堆的中心部進行堆肥化同時補充氧氣使整堆菌群能夠繁殖。假定堆肥化工程的設計能改善這些缺點就可以不必要把堆積體翻堆。例如在旋轉筒中控制水分，氧氣分壓和溫度在 40 – 50 ℃ 就能均勻地進行堆肥化。抽氣式堆積方則從上面灑水和抽入空氣到堆積體中。

五、臭氣

堆肥材料含有高濃度的含氮化合物時，尤其像魚肉或禽畜排泄物，則堆肥化過程中會有臭氣逸散出來。這些主要是有機 氨。消化管道來的排泄物中膽汁含有 indole ， skatol 及 tyramine 等，這些氣體會誘引蒼蠅。油脂的分解物也有臭味。在良好的堆肥化條件下，有臭味的氣體會被吸附後被微生物分解利用。用一些簡單的設施能把這些氣體吸附分解，如利用正在堆肥化的物料可以做成生物濾紙 (biofilter) 。常用的生物濾紙是採用樹皮做成骨幹的堆肥化中的薄層。

六、腐熟度

堆肥化的過程中可以獲得各種腐熟度的堆肥。堆肥化的目的就是要把容易分解利用的生質能源例如醣類，蛋白質類等藉微生

物的同化，代謝予以轉換成腐植質。在這過程中所產生的小分子物種對植物幼根的發育，生長有害。這些小分子物種經過氧化聚合成較為穩定而無害的腐植酸，腐植素 (humin) 。

腐熟度低的堆肥施用到土壤中仍會產生小分子代謝物，仍會造成土壤中無機養分的固定化 (immobilization) 。腐熟度的特徵能由顏色判斷。例如剛排出的糞便是黃色的，經過氧化聚合後 顏色逐漸變成黃褐色，深褐色。這個可以用對 400 nm 和 600 nm 光波的吸收度 (absorbance) 來判定。因為分子要大於光波波長的一半才會引起干擾。所以可以由 E4/E6 的變化做為腐熟度的指標。C/N 比值也是常用的指標。

表二、低分子量脂肪酸對水稻生長之影響(植後 28 天)
Chandrasekaran and Yoshida (1973)

低分子脂肪酸 (用量為 1 mmol/100 g soil)	乾重 (克) 根	秧株
空白	1.70	4.56
乙酸	1.40	3.70
丙酸	1.00	3.54
丁酸	0.90	2.99
戊酸	0.29	1.20

七、製造質好量多的堆肥

許多 C/N 比很大的堆肥材料會造成生質能源的浪費。假定在堆肥化稻草時能外加化學肥料把 C/N 比由大於 60 調到小於

40 時，可以充分利用醣類做成腐植質，增加堆肥的產量，也能提高品質。假定用堆肥的目的是要增加土壤有機物的含量時，要延長腐熟化時間來增加大分子腐植素的比例。堆肥化也能把植酸 (phytin) 水解由微生物轉換成容易利用的磷酯類，避免植酸固定成鐵鋁鹽類，提高堆肥中磷的有效性。