

嘉南藥理大學環境工程與科學系

碩士論文

校園庭園廢棄物堆肥化之研究

Study on the Composting of Yard Waste from the Campus

指導教授：林健榮 博士

研 究 生：黃崇文

中華民國一百零三年五月

嘉南藥理大學環境工程與科學系

Department of Environmental Engineering and Science

Chia Nan University of Pharmacy and Science

碩士論文

Thesis for the Degree of Master

校園庭園廢棄物堆肥化之研究

Study on the Composting of Yard Waste from the Campus

指導教授：林健榮 博士(Dr.Chien-Jung Lin)

研 究 生：黃崇文 (Chung-Wen Huang)

中華民國一百零三年五月二十九日

29, May 2014

中文摘要

隨著世界各國城市形象營造，城市生態綠化面積不斷擴大，致庭園綠化衍生之廢棄物的數量也日益增加，已經成為城市垃圾中不容忽視的解決對象。此類庭園廢棄物(yard waste)是指在綠美化養護過程中，所產生的枯枝落葉、草坪修剪物、行道樹修剪物、雜草種子以及植物殘花等。依據我國行政院環保署 101 年全國垃圾焚化處理量 6,404,987.5 公噸估計，此類庭園廢棄物佔約有 93,512.8 公噸，若能改以堆肥化處理取代焚化，不僅省下處理費，更能促使廢棄物循環再利用，有效達成廢棄物減量及資源化應用的目的。

本研究以庭園廢棄物為主要資材，分別以庭園中常見不同的植物性基質草屑及咖啡渣配比以進行堆肥化作業，於為期 150 天堆肥化過程中以自然戶外堆置方式進行好氧堆肥，探討其堆肥化過程的物理、化學、生物特性變化，結果發現在物理性指標，觀察堆肥經翻堆後溫度不再上升接近環境溫度、外觀看不出葉片完整形狀，顏色轉為深黑褐色並具有泥土腐植氣味等作為簡易判斷堆肥是否腐熟；在化學性指標，透過分析水分、pH 值、碳氮比、導電度、有機質、有機碳等參數變化以瞭解堆肥化過程反應，並透過簡易腐熟評估指標及供試作物實際植栽試驗評估產品特性，期建立合適操作條件利於庭園廢棄物堆肥推廣與應用。

本研究顯示以落葉廢棄物為碳源，在第四槽混合落葉 Garden tree leaves、草屑 Grass Clippings 及咖啡渣 Coffee grounds(簡稱 GLT+GC+Cg)實驗組採 1：1：1

基質配比，因添加具有高氮源之草屑及咖啡渣二種基質，相較於僅以落葉為基質之實驗組具有最佳表現，各項腐熟堆肥之成分分析除 C/N 值略高及有機質含量略低外，餘各指標皆能符合我國農業委員會雜項堆肥品目規範。庭園廢棄物經堆肥化處理後確實能達廢棄物體積減少達 88.9~91.2%，堆肥腐熟試驗種子發芽率(G)高於 90%及種子發芽指數(GI) 也高達 102%，實際用於作物栽種經 27 日試驗期其供試作物皆能正常生長，顯示有助於植物綠化之應用。本研究在操作成本最低及取材方便等條件下，同樣可提供作為土壤改良劑以活化土壤品質，營造優質生態效益。

庭園廢棄物堆肥化應是繼廚餘廢棄物堆肥化再利用後，在我國值得推廣的有機廢棄物再利用選項，並可率先以綠化較為普及的校園或社區公園作為推廣對象，逐漸由點延伸至面，以提高我國廢棄物資源回收再利用比率。

關鍵詞：堆肥化、庭園廢棄物、重金屬、種子發芽率、種子發芽率指數。

Abstract

With the city image around the world to create, urban ecology green area continues to expand, which causes the number of yard waste increasing, and has become part of the city garbage which can not be neglected. Such yard waste refers to the waste comes from the greening conservation process, such as fallen leaves, grass and street trees clipping, weed seeds, withered flowers and so on. According to the Environmental Protection Administration Executive Yuan R.O.C statistics in the year of 101, the total volume 6,404,987.5 tons of nationwide garbage incineration capacity is estimated that such yard waste accounts for up to approximately 93,512.8 tons. If such yard waste incineration can be replaced by composting, it can not only save processing costs, but also promoting better waste recycling, and successfully meet the objectives of waste reduction and resource reuse.

In this study, yard waste is chosen as main study object, clippings from different common botanicals and coffee grounds were used as materials for composting study; in a period of 150 days composting process adopted by way of a natural outdoor stacking aerobic composting, to explore its physical, chemical and biological characteristics of the composting process changes. The results showed that re the physical indicators, the compost temperature does not rise close to the ambient temperature after turning, the complete leaf shape can no longer be seen, the color changes to a deep dark brown with a soil humus smell and has a simple compost which determine whether the composting is thoroughly decomposed. Re the chemistry indicators, through the analysis of moisture, pH value, carbon and nitrogen

ratio, electrical conductivity, organic matter, organic carbon and other parameters to understand the changes of the composting process reaction. Through some simple maturity evaluation indicators and actual crop planting experiments, to evaluate the characteristics and establish the appropriate operating conditions conducive to the promotion and usage of yard waste composting.

This study shows that deciduous waste as a carbon source, in the fourth slot mixed garden tree leaves, grass clippings and coffee grounds (referred to as GLT + GC + Cg) pro rata 1:1:1 as experimental group, with the adding of grass clippings and coffee grounds which provide high nitrogen, indicates better performance than only use fallen leaves. From the analysis of the various components of compost maturity, except C/N is slightly higher and organic matter is slightly lower, the remainder of the index are compliant with the miscellaneous compost rules made by Council of Agriculture Executive Yuan. Yard waste being composted can indeed reduce the volume of waste up to 88.9 ~ 91.2%, according to the experiment result, the germination rate (G) is greater than 90% and seed germination index (GI) reaches up to 102%; practically used for crops planting by duration of 27 days, the test crops is normal grows, which shows the good application in greenery use. This study, under advantageous conditions of the lowest operating cost and material conveniently, can also provide as a soil conditioner to activate the soil quality and to create high-quality ecological benefits.

Following the re-use of kitchen waste composting, yard waste composting should be a recommended option of the organic waste recycling options in our

country, and to start from popular objects such as campus and community parks greenery, gradually extending this concept and improve our waste recycling reuse rate.

Keywords: Composting, Yard Waste, Heavy Metal, Germination rate, Germination index.



誌 謝

一晃眼，為期二年的研究生生活在邊工作邊研究忙碌中順利完成，在此秉持感恩的心，寫著這篇誌謝。首先感謝恩師林健榮博士於求學期間對我這位再重返校園之研究生的指導與關懷，實讓學生受益良多。也承蒙錢紀銘博士、沈韶儀博士於論文口試期間不吝指教及細心審閱，提供許多學術研究寶貴意見，使學生的論文撰寫及表達方式更臻完整。另感謝系上多位任課老師於環工及環境科學領域課程指導與學術研究之培育，一併在此致上最深的謝意。

於研究期間，感謝任職單位主管、同事及農委會畜產試驗所新化分所的蕭庭訓博士研究團隊在實驗分析方面及堆肥技術等諸多指導與資源的提供，讓本研究能按既定規劃時程順利完成。

二年七百多個日子裡，同時也要感謝來自各產業界的同窗好友，雖僅有少數 10 人；卻能在各專業領域下相互砥礪，有你們的陪伴更豐富研究生活色彩。最後，獻上最深謝意予我的家人，在此人生學習的另階段；由於家人在身後默默無私的支持與鼓勵，捨棄許多親子聚會而促使我能順利完成碩士學位。諸多的感恩點滴在心，實無法以筆墨盡詮釋，願將本研究成果獻給我最親愛的家人以及所有關心我的人，一同分享這份喜悅與榮耀。

謹致

於府城嘉南藥理大學 環工所 103 年

目 錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	III
誌謝.....	VI
目錄.....	VII
表目錄.....	XI
圖目錄.....	XIII
第一章 緒論.....	1
1-1 前言	1
1-2 研究動機及目的.....	2
1-2-1 研究動機.....	2
1-2-2 研究目的.....	4
第二章 文獻回顧.....	5
2-1 有機廢棄物處理之碳、氮循環.....	5
2-1-1 碳循環.....	5
2-1-2 氮循環.....	6
2-2 堆肥化之概述.....	8
2-2-1 堆肥的發展.....	8
2-2-2 肥料與堆肥.....	10

2-2-3 堆肥化(composting)的概念與分類.....	12
2-2-4 好氧堆肥化原理.....	13
2-2-5 堆肥化過程中微生物的作用原理.....	17
2-2-6 影響堆肥化之操作參數.....	18
2-2-7 堆肥過程之材料變化.....	29
2-2-8 堆肥品質評估.....	32
2-2-9 堆肥肥料規範.....	37
2-3 植物營養元素	41
2-3-1 必需營養元素.....	42
2-3-2 必需營養元素的功能.....	44
2-4 國內外庭園廢棄物堆肥化概況	49
2-4-1 庭園廢棄物(Yard Waste).....	49
2-4-2 庭園廢棄物之利用.....	50
2-4-3 庭園廢棄物堆肥化之方式.....	51
2-4-4 庭園廢棄物堆肥系統設置之型式.....	52
2-4-5 國外庭園廢棄堆肥化運用概況.....	52
2-4-6 國內庭園廢棄堆肥化運作概況.....	57
第三章 研究方法與實驗設備材料	61
3-1 研究架構	61

3-2 堆肥材料與實驗設備	63
3-2-1 堆肥材料分析.....	63
3-2-2 實驗設備.....	66
3-3 實驗設計	67
3-3-1 好氧堆肥材料配比設計與操作.....	68
3-3-2 盆栽植種配比設計.....	72
3-4 實驗方法與步驟	74
3-4-1 採樣方法.....	74
3-4-2 分析方法.....	76
第四章 結果與討論	85
4-1 堆肥化過程之肥堆特性監測	85
4-1-1 溫度變化.....	85
4-1-2 pH 變化.....	88
4-1-3 含水率(Moisture Content)變化.....	91
4-1-4 導電度(EC)的變化.....	93
4-2 堆肥化過程之肥堆營養元素及重金屬含量變化	95
4-2-1 有機質(Organic matter)變化.....	95
4-2-2 總有機碳(TOC)、總氮(TN)及碳氮比(C/N)三者間的變化.....	97
4-2-3 磷(P)、全磷酞 P_2O_5 、鉀(K)、全氧化鉀 K_2O 之變化.....	104

4-2-4 重金屬含量之變化.....	109
4-2-5 植物營養元素含量之變化.....	120
4-3 堆肥體積變化及質量平衡.....	126
4-3-1 堆肥體積變化.....	126
4-3-2 堆肥質量平衡.....	127
4-4 堆肥化過程之種子發芽率(G)及種子發芽指數(GI)變化.....	131
4-5 供試盆栽試驗植物生長變化.....	137
4-6 綜合討論.....	142
4-6-1 試驗結果綜合分析.....	142
4-6-2 庭園廢棄物堆肥化操作流程.....	144
第五章 結論與建議.....	147
5-1 結論.....	147
5-2 建議.....	150
第六章 參考文獻.....	151
附錄.....	161

表目錄

表 2-1 堆肥化過程中主要有機物之微生物分解.....	18
表 2-2 美國各類庭園廢棄物堆肥原料的特性分析.....	24
表 2-3 EC 值應用於土壤及對植物與作物影響.....	36
表 2-4 雜項堆肥品目 5-11 規範.....	38
表 2-5 重金屬在土壤及植物中之臨界濃度.....	40
表 2-6 重金屬元素過量對植物之毒害症狀.....	41
表 2-7 高等植物必需營養元素及其較適合的濃度.....	43
表 2-8 植物必需營養元素主要功能.....	45
表 2-9 作物或植物必需營養元素缺乏或過多症狀.....	46
表 2-10 歐盟會員國有機垃圾堆肥化處理種類.....	55
表 2-11 國內相關庭園廢棄物之研究.....	57
表 2-12 我國 92-101 年木竹、稻草、落葉類經焚化處理量.....	59
表 2-13 我國 101 年垃圾組成百分比.....	60
表 3-1 堆肥材料成份特性分析表.....	65
表 3-2 各堆肥槽基質進料配比.....	70
表 3-3 各槽之進料基質成份特性分析.....	71
表 3-4 各槽堆肥成品與土壤進料配比及植珠數.....	73
表 3-5 檢測分析項目、實驗設備及方法.....	74

表 4-1 四個試驗組堆肥化溫度變化.....	88
表 4-2 四個試驗組堆肥化 pH 變化.....	90
表 4-3 四個試驗組堆肥化含水率變化.....	92
表 4-4 四個試驗組堆肥化 EC 變化.....	94
表 4-5 四個試驗組有機質變化.....	96
表 4-6 四個試驗組堆肥化總有機碳(TOC)、總氮(TN)及碳氮比(C/N)變化.....	101
表 4-7 四個試驗組堆肥化磷(P)、P ₂ O ₅ 、鉀(K)及 K ₂ O 變化.....	106
表 4-8 四試驗組堆肥化元素含量變化.....	124
表 4-9 四個試驗組重量及體積變化.....	127
表 4-10 四試驗組不結球白菜種子發芽率及發芽率指數生長變化.....	135
表 4-11 A 試驗組(無土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長變化.....	138
表 4-12 B 試驗組(有土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長變化.....	140
表 4-13 各試驗結果統計及比較.....	143

圖目錄

圖 2-1 有機性廢棄物碳的循環概念.....	6
圖 2-2 氮的生化循環.....	8
圖 2-3 好氧堆肥之關係流程.....	14
圖 2-4 堆肥化過程中溫度變化、二氧化碳釋放量及相的變化趨勢圖.....	15
圖 2-5 含碳有機物分解的途徑.....	31
圖 3-1 校園庭園廢棄物堆肥化之研究架構.....	62
圖 3-2 通氣式堆肥槽尺寸圖及實體外觀圖.....	67
圖 4-1 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之溫度變化.....	87
圖 4-2 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之 pH 每週變化.....	90
圖 4-3 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之 pH 每月變化.....	91
圖 4-4 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之含水率變化.....	93
圖 4-5 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之 EC 變化.....	95
圖 4-6 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗組有機質變化.....	97
圖 4-7 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT 之 TOC、TN 及 C/N 變化.....	102
圖 4-8 庭園廢棄物堆肥化過程 CGLT 之 TOC、TN 及 C/N 變化.....	102
圖 4-9 庭園廢棄物堆肥化過程 GTL+GC 之 TOC、TN 及 C/N 變化.....	103
圖 4-10 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC+Cg 之 TOC、TN 及 C/N 變化.....	103
圖 4-11 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT 之磷、鉀、 P_2O_5 及 K_2O 變化.....	107

圖 4-12 庭園廢棄物堆肥化過程 CGLT 之磷、鉀、 P_2O_5 及 K_2O 變化.....	107
圖 4-13 庭園廢棄物堆肥化過程 GTL+GC 之磷、鉀、 P_2O_5 及 K_2O 變化.....	108
圖 4-14 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC+Cg 之磷、鉀、 P_2O_5 及 K_2O 變化...	108
圖 4-15 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之砷(As)含量變化.....	110
圖 4-16 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鎘(Cd)含量變化.....	111
圖 4-17 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鉻(Cr)含量變化.....	113
圖 4-18 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之銅(Cu)含量變化.....	114
圖 4-19 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鎳(Ni)含量變化.....	116
圖 4-20 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鉛(Pb)含量變化.....	118
圖 4-21 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鋅(Zn)含量變化.....	119
圖 4-22 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鈣(Ca)含量變化.....	121
圖 4-23 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鐵(Fe)含量變化.....	122
圖 4-24 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之錳(Mn)含量變化.....	123
圖 4-25 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT 之質量平衡圖.....	128
圖 4-26 庭園廢棄物堆肥化過程 CGLT 之質量平衡圖.....	129
圖 4-27 庭園廢棄物堆肥化過程 GTL+GC 之質量平衡圖.....	130
圖 4-28 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC+Cg 之質量平衡圖.....	131
圖 4-29 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之種子發芽率(G)變化.....	133
圖 4-30 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之種子發芽率指數(GI)變化.....	133

圖 4-31 A 試驗組(無土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長狀況..... 138

圖 4-32 B 試驗組(有土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長狀況..... 141

圖 4-33 多槽輪翻堆式堆肥槽操作流程..... 145

圖 4-34 單槽翻堆式堆肥槽操作流程..... 146



附錄目錄

附錄一 四個試驗組堆肥化溫度(Temperature)監測紀錄.....	161
附錄二 四個試驗組堆肥化 pH 監測紀錄.....	162
附錄三 四個試驗組堆肥化含水率(Moisture Content)監測紀錄.....	163
附錄四 四個試驗組堆肥化導電度(EC)監測紀錄.....	164
附錄五 四個試驗組堆肥化特性分析紀錄.....	165
附錄六 四個試驗組堆肥化重金屬及營養元素含量分析紀錄.....	166



第一章 緒論

1-1 前言

英國田園都市協會理事霍華德(E.Howard)等於 1898 年創始「田園都市」(garden city)的構想，希望藉由綠化與美化，改善都市環境，提升生活環境品質，這即是庭園綠地系統納入現代都市規劃理論的開始。如今，庭園綠化是都市永續發展的重要基礎，更成爲一個國家發展與進步的永續環境指標之一^[1]。目前庭園綠化日益受到人們的重視，但在綠化養護、管理的過程中常會伴隨產生大量的庭園廢棄物，如枯枝落葉、草坪修剪物、行道樹修剪物、雜草與種子以及植物殘花等，長期以來，此類廢棄物在我國始終沒得到很好的開發和利用，甚至大部分進入廢棄物處理系統隨生活垃圾被焚化，每年需支付大筆的垃圾清運費和處理費。特別是秋冬落葉多的季節，因不能及時處理與消化，常造成亂堆、亂燒的現象發生，而我國地處多颱風侵襲之區域，強勢風雨更往往造成園林、都市、社區公園及校園等高度綠化地區無數的樹倒與葉落，嚴重情況隨土石流漫延所夾帶此類廢棄物量的急遽驟升，既破壞了整體的生態環境，也浪費了資源。

1-2 研究動機及目的

1-2-1 研究動機

隨著國民對生活品質之要求提高，致住家環境及公眾活動區域庭園綠化快速發展，其衍生之庭園廢棄物(如枯枝落葉、草坪修剪物、行道樹修剪物、花草等)也不斷增多。這些庭園廢棄物目前以焚化為主要處理方式，易造成環境污染疑慮，不利於節能減碳及永續物料管理工作之推動。而利用堆肥醱酵技術將庭園廢棄物轉化為有機肥，不僅可解決庭園廢棄物的處置難題，同時此類生物有機肥料施於土壤能夠改善土壤的物理結構、增進礦物質溶解、增進團粒作用、保水力、提高土壤肥力，並促使植物根系生長；此外還能增加土壤有益微生物數量、消滅或抑制土壤中有害雜菌等。庭園廢棄物為天然植物性殘體，其有機質含量高，並含有一定量的氮、磷、鉀等植物生長所需養分資源。與其他廢棄物如都市垃圾、污泥等相比，庭園廢棄物因大多是來自大自然植物殘體，故其潛在危害性相對較低。因此，利用堆肥資源化等技術，生產植物栽培基質、土壤改良劑、有機肥料是庭園廢棄物處理的理想途徑。

在我國垃圾性質中木竹、稻草、落葉類約佔可燃物組成 1.5%，依據環保署 101 年一般垃圾處理量 6,404,987.5 公噸估計，此類約有 93,512.8 公噸經焚化處理^[2]，相對於每噸廢棄物所需清運處理費用 2,500 元計則需花費每年約 233,782,000 元。故若能轉為堆肥化處理著實可省下一筆為數可觀處理

費用，又能降低焚化廠處理負擔、及達到減碳、減廢、資源再利用等環境營造與管理之目的。

目前，國內在廢棄物堆肥化研究及市售堆肥化產品中多數利用禽畜糞便、農作物稻稈、事業廢料、生活垃圾等具有機質為主要原料來製造生產有機肥料，而利用純植物性庭園廢棄物進行堆肥化醱酵的研究相對比較少，有鑑於此若能研究如何率先應用於校園或社區公園規劃設計易於操作、具經濟性，並且對環境友善的資源化處理方式，依循著大自然物質的循環概念，有效解決或處理此類廢棄物，不僅能舒解我國整體廢棄物處理之負荷，也能降低燃燒所衍生的空污問題，更能延長焚化爐的使用壽限，使此類廢棄物能經由妥善的處理，減輕收集、運輸與處理的成本與二次污染機率。

隨著生態及城市文明建設的快速發展，環境綠化已融為美學與現代居家生活品質一環，而綠色植物除為地球生態循環扮演重要角色外，更往往扮演著點綴妙處，提供人類乘涼與活動休閒好地方，但萬物皆有其生命週期，植物一樣也有生長與落葉、枯枝之生物循環期；在鼓勵多元綠化下無形中也伴隨許多另類廢棄物產生，更需耗時費力及金錢去再處理這些落葉及枯枝，在處理過程中也可能對環境造成一定衝擊，觀察各偌大校園及社區公園等看見勞作服務學習的學子及清潔人員，每天將成堆落葉打包往垃圾子車送，這些看似永遠清掃不完且令人頭痛的所謂「綠色廢棄物」如能

活化再利用對於校園及社區公園廢棄物減量、減碳實有莫大助益，而且產出的天然肥料更能用來作為植栽素材。

1-2-2 研究目的

基於環境永續發展概念，庭園廢棄物應當視為可再利用資源，本研究以校園及社區公園所產出之庭園廢棄物為堆肥化之基質，並藉由戶外堆置方式實地操作以探討不同基質之堆肥化操作條件對庭園廢棄物特性之影響，並探討經堆肥化後對植物營養元素含量(有機質、氮、磷、鉀等)及重金屬含量(砷、鎘、鉻、銅、鎳、鋅及鉛)之影響。

本研究預期達成目的如下：

1. 透過文獻文析以瞭解庭園廢棄物堆肥化之可行性，並探究其最適基質、配比及操作條件之建立。
2. 研究庭園廢棄物堆肥化過程之物理及化學相關特性變化。
3. 研究庭園廢棄物堆肥化之品質及腐熟指標之建立，及探討重金屬及營養元素對植物影響。

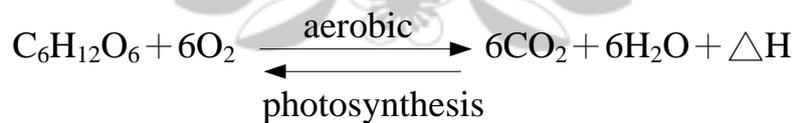
第二章 文獻回顧

2-1 有機廢棄物處理之碳、氮循環

2-1-1 碳循環

一般廢棄物依主要成分區分為無機與有機兩大類；無機廢棄物通常採用物理或化學方式處理即可，而有機廢棄物則可藉由生物方法，處理方式相對上較為多元複雜^[3]。

以有機性廢棄物而言，一般生物體有機組成含碳量約佔 50%，碳素是微生物活動的主要能源與碳源。碳素化合物經分解成單糖→有機酸→二氧化碳和微生物多醣及能量，其生化反應過程中，藉由光合作用和好氧作用之間的關係維持自然界生態的平衡關係，如下列方程式所示由左至右的方向代表好氧作用，反向則代表光合作用。



隨著能量的釋放過程中，會轉變成為二氧化碳，構成碳的循環(carbon cycle)系統，如圖 2-1 所示，有機廢棄物的循環回收即是根據此碳的循環概念進行。

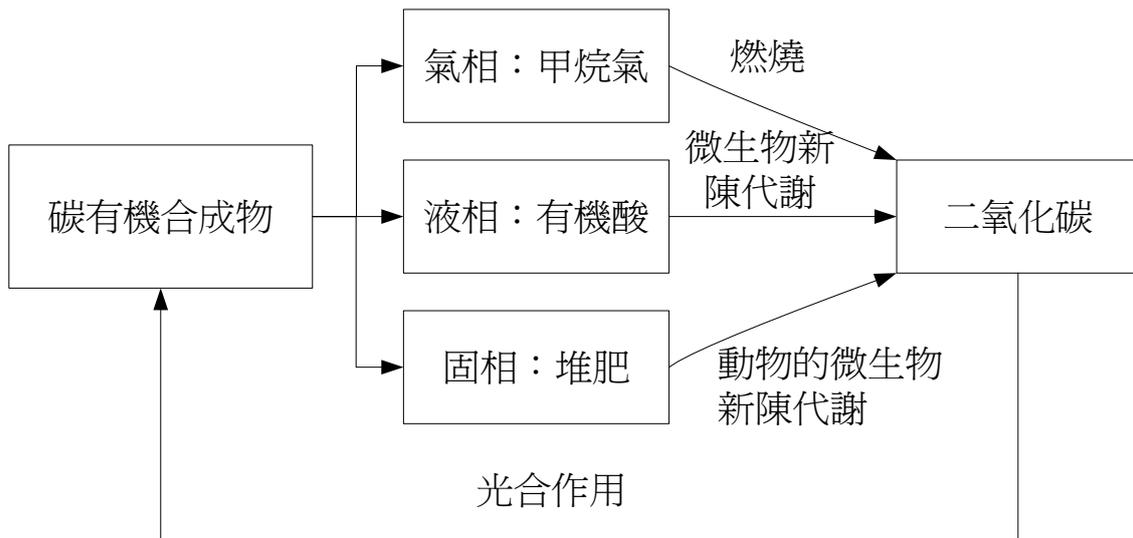


圖 2-1 有機性廢棄物碳的循環概念^[4,61]

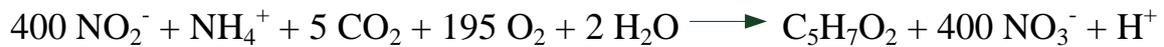
2-1-2 氮循環

有機廢棄物的另一個重要元素氮循環(nitrogen cycle)概念，也是處理有機廢棄物時的重要依據。氮是自然界中屬最常見的循環迴圈轉化過程，是生物圈內基本的物質循環之一。動物的糞便，或腐爛的植物被當作肥料施用在田間，農作物通常無法立刻吸收，而需藉由微生物將這些有機物分解成爲氨才能吸收。不過通常氨還沒被作物吸收，就先被硝化菌氧化成硝酸根，以利用反應放出的能量來生長。這個變化稱爲硝化作用，是經由兩類不同的細菌來完成的。

第一類細菌，如亞硝化單胞菌屬(Nitrosomonas)，可將氨氧化成亞硝酸根，其反應式爲^[3]：



第二類細菌，如硝化細菌(Nitrobacter)，可把亞硝酸根氧化成硝酸根，其反應式如下：



硝酸根 NO_3^- 也可以被植物吸收，不過吸收以後又要還原成爲氨才能用來合成胺基酸，進而合成蛋白質。動物必須要仰賴植物合成的蛋白質，來生成自己的組織。動、植物體內的組織腐敗以後可再被利用^[5]。藉著這些菌類的幫忙，構成一個完美的循環系統，如圖 2-2 所示。其中關鍵性的步驟就是氮的固定，藉由細菌的幫助將大氣圈中的氮氣引入這個與生物生命息息相關的循環圈。在這循環圈裡，植物吸取含氮的化合物製成植物的蛋白質，動物攝取植物製成動物蛋白質，動植物死後，藉著腐生菌或真菌的幫助又腐化成氨氣，而部份的含氮化合物也可經由細菌的脫氮作用而放出氮回到大氣中^[7]。有機廢棄物堆肥化處理運用，亦是依據此循環概念運行。

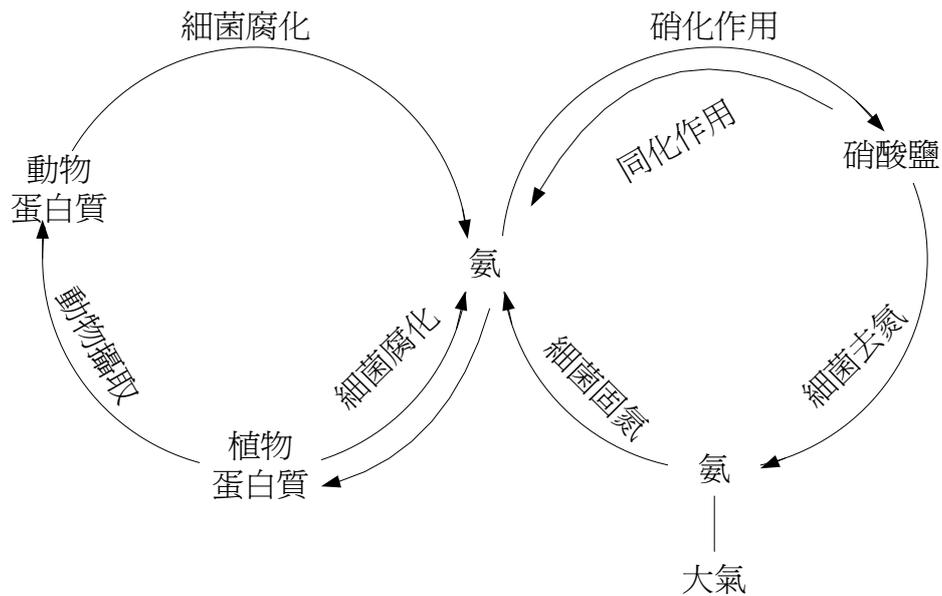


圖 2-2 氮的生化循環^[6,61]

2-2 堆肥化之概述

2-2-1 堆肥的發展

人類對堆肥技術的運用遠在數千前早已見諸於文字；世界各地的農村千百年來早將稻草、落葉、野草、海草或動物排泄物等堆積醱酵。以農立國悠久歷史的中國來說，作物生產與肥料的施用有著密切的關係。在「自然農耕-有機報告貳」一書中提到，我國最早的肥料使用的記載可追溯自商湯時代，就已知田間雜草在腐爛以後，有促進黍稷生長的作用。「齊民要術」中詳細介紹了種植綠肥的方法及豆科作物同禾本科作物輪作的方法等，還提及用作物莖稈與牛糞尿混合，經過踐踏和堆置而成肥料的方法。至春秋戰國時期，除了用糞肥施用於田外，農民也會放火燒田，以加速土地上雜草分解，增加土地養分。戰國末期的「呂氏春秋」中亦有言：「厚加糞壤，

深耕而細耨之」。秦漢朝的農人除了使用人畜糞便、草木灰，更運用豆渣來滋養土地。然而，真正有系統的發展堆肥化直到 1925 年才出現於印度，A. Howard 將樹葉、垃圾、動物排泄物混合堆成約 1.5 公尺高度，數個月翻覆 1~2 次，進行厭氧發酵，歷時 6 個月堆置後使用。後來進一步改良此法，增多翻覆次數以促進好氧發酵，將廢棄物與各材料交替堆積(滯留 4~6 個月)^[7]。

台灣農家自製堆肥的歷史亦是久遠，製造堆肥的材料與方法皆取之於自然，可稱為「自然肥」。其方法有「火埔法」、「堆畚法」，「窖糞法」^[8]，然而最常見的自然堆肥法，是直接將收割後的稻草鋪在田間放火焚燃成灰，形成草木灰回歸於田以增進肥分。早期臺灣的農民以生活中衍生的廢棄物自製堆肥，他們深諳「肥水不落外人田」的道理，因為所有的糞便、有機廢棄物都是最自然、可使作物增產的無價之寶，在台灣此法俗語稱「坵肥」。

而在外國堆肥歷史的演進，則可遠述自舊約聖經摩西之前一千年時代的美索不達米亞聚落裡，有堆肥(compost)使用的泥板文獻留存；而兩千年前羅馬人即懂得使用堆肥概念以增加羅馬帝國土地肥沃，在聖經中亦多處有關於希臘、猶太人製造與使用堆肥的概念，著名的作家如莎士比亞，弗朗西斯培根爵士，沃爾特羅利爵士都提到了使用堆肥^[9]；至中世紀之文藝復興時代，William Caxton 將堆肥拼為 Composting，用該字以代表堆肥化過程；至 19 世紀新英格蘭地區 Stephen Hoyt 使用其他異於糞便之資材開拓新堆肥

領域，並使用堆置式堆肥(pile)，導入翻堆技術以促進腐熟觀念；而至 20 世紀，英國農業學家 Sir Albert Howard 開始進行長達 29 年之堆肥研究，以開發室內堆肥方法，並重燃人們在農業與園藝上對堆肥的興趣^[10]。

綜觀遠古時代至 21 世紀，堆肥在人類生活與生產地位上，不僅扮演供應作物生長的角色，更是一種不分中外的生存智慧與資源有效循環利用的表現。當人類科技與文明發展越形複雜，人類渴望重拾樸質的生活方法，「堆肥化」正是此種反璞歸真之處理廢棄物方式，因此重新思考有機廢棄物處理方式時，堆肥化不只是一種廢棄物管末處理的中間技術、不是避之唯恐不及的垃圾問題之解套，乃是與生活緊密結合，共存、共依、共生，資源再利用之藝術^[10]。

2-2-2 肥料與堆肥

根據我國肥料管理法第三條定義：「肥料 fertilizer」是指供給植物養分或促進養分利用之物品；它是提供一種或一種以上植物必需的營養元素，可改善土壤性質、提高土壤肥力的一類物質。肥料可被分為必需元素和微量元素兩種，氮(N)、磷(P)、鉀(K)，是三大必需元素，因為它們經常被應用在(N.P.K.)肥料中；鈣(Ca)、錳(Mn)、硫(S)等稱為微量元素，它們經常在植物組織中出現。氮(N)可以促進植物的莖和葉子的生長，磷(P)具有增進莊稼早熟及顆粒飽滿作用，鉀(K)對動植物的生長和發育起很大作用。微量營

營養素在不同的植物中所佔比例各有不同，約介於 5~100 ppm(根據其質量定)。

而「堆肥」即是指以有機質材料，經醱酵腐熟之肥料^[11]。因此，堆肥也可解釋為「凡是一切含有肥料成分的動、植物與礦物質，混合堆積，經分解或固化，而形成的產物均可稱為堆肥(compost)」^[12]。

凡含有氮、磷、鉀三要素之一種以上者均可稱為肥料，一般主要概分為有無機肥、有機肥及複合肥三大類，堆肥化所形成產品即為肥料的一種。而堆肥產品成分則常隨堆肥技術、原料、堆置週期與過程控制的不同而異，以其用途及對質量要求的差異而分類。在堆肥腐熟程度，有生肥、半熟肥、以及全熟肥的區別。在堆肥過程中雖有界限，但卻不是那麼明顯區分，據多數專家表示一般戶外堆置堆肥至少應超過 25 天以上所醱酵之堆肥物才有可能達到全熟肥(完全腐熟)^[61]。

有機廢棄物經過堆置醱酵腐熟後，由於微生物的分解作用而緩慢釋出營養要素，提供作物吸收利用^[13]，根據文獻研究若施用未腐熟之堆肥，會造成土壤過度還原及釋出有毒物質^[14]反而對作物生長有害。故儘量以不直接使用生肥(未完全腐熟)，可避免硫化氫、氨氣之產生與病原菌之繁殖等造成二次污染與危害植物。只有全熟肥才能毫無顧忌施用於耕地或土壤，因為全熟肥不再產生醱酵熱、有害氣體、病原菌及病蟲害等。

2-2-3 堆肥化(composting)的概念與分類

所謂堆肥化即使用廣泛分布於自然界之微生物，在控制的條件下，將廢棄物中不穩定的有機成分加以分解，轉換為安定的有機質成分，即腐熟的堆肥。另於經濟部工業局定義^[15]：堆肥化(composting)就是依靠自然界廣泛分布的細菌、放線菌、真菌等微生物，在一定的人工條件下，有效的控制並促進可被微生物降解的有機物質向穩定的腐植質轉化的生物化學過程，實質上是一種發酵的過程。堆肥化的過程在人工控制條件下進行，亦即採取有效促進生物分解，且於堆肥化過程中所產生的「生物穩定」(biostabilization)作用，說明了堆肥化的過程實質是生物化學作用及無害化作用，所謂的穩定，即是指堆肥產品對環境無害。

廢棄物經堆肥化處理之後，所形成的成品是一種棕色的、泥炭狀、腐植質含量相當高的疏鬆物質，其體積會變成只有原體積 50%~70%。

其在農業生產及保持地力上，兼具肥料及土壤改良的效益，故為廢棄物處理中重要的一環。而堆肥化分類方法有許多種，按堆置方式可分為間歇堆積法與連續堆積法；按原料發酵所處狀態可分為靜態發酵法與動態發酵法；按堆置過程的需氧程度可分為好氧法與厭氧法^[15]。現代化的堆肥技術，尤其是都市垃圾，基本上都採以好氧堆肥化的方式，主要原因為好氧堆肥化具有溫度高、基質分解較為徹底、堆置週期較短、臭味較少等優點。

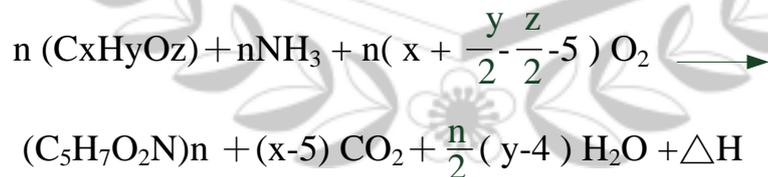
2-2-4 好氧堆肥化原理

本研究主要以庭園廢棄物為基質進行好氧堆肥化反應，而好氧堆肥化的原理則是利用存在於自然界中的細菌、放線菌、真菌等微生物，分解堆肥材料中的有機物(碳水化合物、蛋白質、脂肪、纖維素及半纖維素及木質素等)，轉化為腐植質(humus)、能量、二氧化碳及水，並利用獲取的能量及材料中的氮、磷、鉀繁衍出新的微生物，其流程關係圖如圖 2-3，此外，根據柴等^[16] 所提出好氧堆肥的化學反應式分別表示如下：

1. 有機物的氧化作用(異化作用)



2. 細胞的合成作用(同化作用)



3. 細胞的內呼吸作用(自行氧化作用)



反應式中： $(C_xH_yO_z)$ 代表材料中的有機物

$(C_5H_7O_2N)_n$ 代表菌體細胞。

x, y, z 可能為正數或零，均視有機物與細胞質之組成而定。

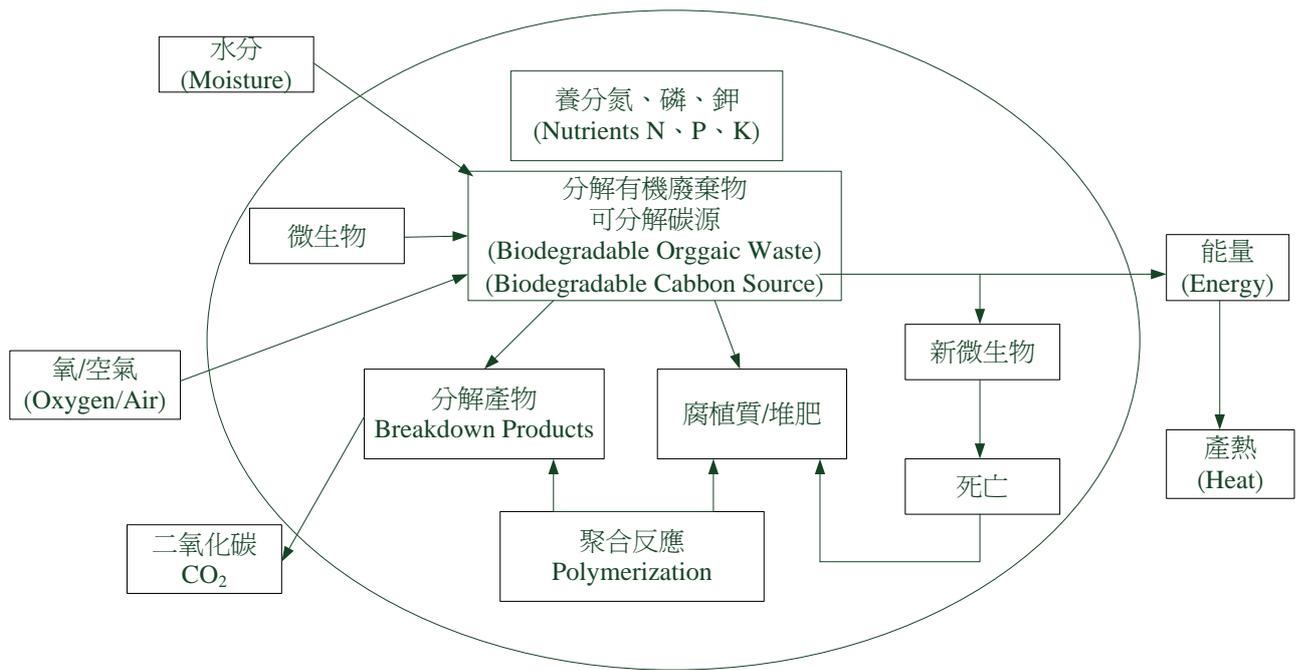


圖 2-3 好氧堆肥之關係流程^[17]

有機廢棄物好氧堆肥化過程，實際上就是基質的微生物醱酵過程。好氧堆肥化過程中，有機廢棄物中的可溶性小分子有機物質透過微生物的細胞壁和細胞膜而被微生物吸收利用；而不溶性大分子有機物質則先附著於微生物體外，由微生物所分泌的胞外酶分解為可溶性小分子物質，再傳送到細胞內供微生物應用。透過微生物的生命活動(合成與分解過程)，將一部分被吸收的有機物質氧化成簡單的無機物質，並提供微生物生命活動所需之能量，將另一部分有機物質轉化合成新的細胞物質，使微生物不斷增殖。

圖 2-4 為堆肥化過程中溫度變化、二氧化碳釋放量及相的變化趨勢圖，以下就堆肥化的溫度變化階段分述^[18,19]：

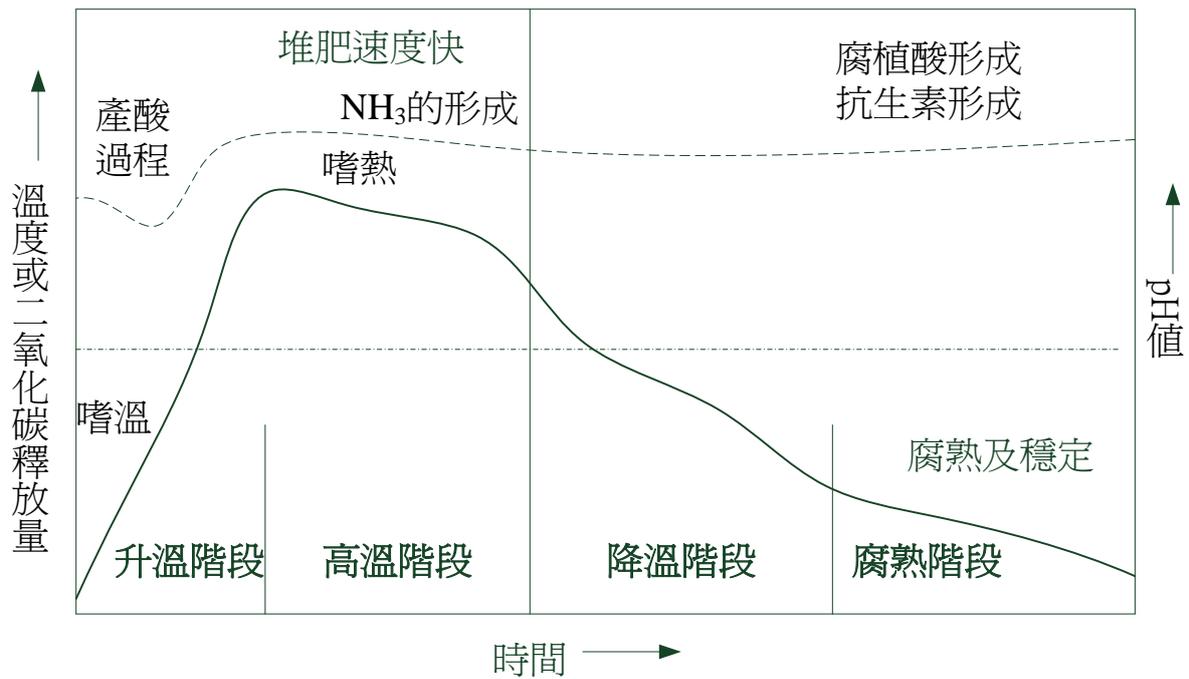


圖 2-4 堆肥化過程中溫度變化、二氧化碳釋放量及相的變化趨勢圖^[20,21]

Gray 等(1971)認為通常一個完整的堆肥過程必需歷經升溫(中溫)、高溫、降溫典型三階段及外加腐熟第四個階段^[61]：

1. 升溫(中溫)階段：是指堆肥化過程中的初期，堆層的溫度約為 15~45℃，嗜溫性(嗜中溫)微生物較為活躍，利用堆肥中可溶性有機物如醣類、澱粉作為基質不斷增殖。在轉換及利用化學能的過程中產生的能量超過細胞合成所需的能量，加上物料的保溫作用，使溫度不斷上昇進行旺盛的生命活動。而嗜溫性(嗜中溫)微生物包括真菌、細菌和放線菌。
2. 高溫階段：當堆積溫度升到 45℃ 以上時，即進入高溫階段，於此階段嗜溫性(嗜中溫)微生物受到抑制甚至死亡，取而代之的是嗜熱性(嗜高溫)微生物堆肥中所殘留和新形成的可溶性有機物質持續被氧化分解，堆肥中複雜

的有機物，如：半纖維素、纖維素和蛋白質也開始急速被分解。於高溫階段中，各種嗜熱性(嗜高溫)微生物之最適溫度亦大不相同，在溫度上升的過程中，嗜熱性(嗜高溫)微生物的類群是相互接替的。通常在 50°C 左右最爲活躍的是嗜熱性(嗜高溫)真菌和放線菌；當溫度上升到 60°C 時，真菌則幾乎完全停止活動，嗜熱性(嗜高溫)放線菌及細菌仍持續作用；而溫度上升到 70°C 以上時，對於大多數的嗜高溫性微生物已經不再適應，因而進入死亡或是休眠的狀態。現代化堆肥的最佳生產溫度一般約爲 55°C，這是因爲大多數的微生物在 45~70°C 範圍內最爲活躍，最易分解有機物質，且堆肥中的病原菌和寄生菌大多可以被殺死。

3.降溫階段：在堆肥化反應後期，剩下的部分爲較難分解的有機物和新形成的腐植質，此時微生物的活性下降，發熱量減少，溫度下降，嗜溫性(嗜中溫)微生物再度占有優勢，對殘餘較難分解的有機物再一次進行分解，腐植質不斷增加而達到穩定狀態，此時堆肥進入腐熟階段，需氧量大爲減少，含水率亦逐漸下降。

4.腐熟階段：基本上有機物分解已大致達穩定狀態，堆肥外觀呈現棕色或黑色多纖維態及易碎，並具有泥土腐植氣味。

故本研究藉由微生物作用，將植物之有機殘體進行礦質化、腐植化、無害化，使各種複雜有機態養分，轉化爲可溶性養分和腐植質，同時利用

堆積時所產生之高溫來殺死原材料中之病菌、蟲卵和雜草種子達到無害化目的。

2-2-5 堆肥化過程中微生物的作用原理

堆肥化處理是微生物作用於有機廢棄物的堆肥化過程，而微生物是堆肥過程中的主體。堆肥微生物的來源主要有兩個方面，首先是來自有機廢棄物中原有大量的微生物族群，另一個主要來源則為人工所添加的特殊菌種。這些菌種於一定條件之下對於某些有機廢棄物具有較強的分解能力，且具有活性強、繁殖快、分解速度快等特點，能加速堆肥的反應進行，縮短堆肥腐熟穩定化的時間。

在堆肥化過程微生物相之分布與優勢菌種及數量隨著基質種類、處理方式及條件而異。參與堆肥化的微生物涵蓋嗜溫性(嗜中溫)及嗜熱性(嗜高溫)之好氧性或厭氧性微生物。通常包含細菌、真菌、放射菌等菌種。一般而言，細菌可分解溶於水之簡單醣類物質，而真菌及放射菌則對纖維素或半纖維素之分解特別有效。主要有機物之微生物分解情形如表 2-1 所示^[22]。

表 2-1 堆肥化過程中主要有機物之微生物分解^[15,22]

可分解成分	微生物	分解率	最終產物
醣類、胺基酸、 蛋白質、脂肪、 碳水化合物	多種微生物	高	H ₂ O、CO ₂ 、NH ₃ 、N ₂ (中間產物為胺基酸、有機 酸、醇類等)
半纖維素	放射菌為主	高	H ₂ O、CO ₂ (中間產物為五 碳醣及六碳醣等)
纖維素	好氣性細菌、放射 菌、真菌及高溫厭氧 菌	中	H ₂ O、CO ₂ 、CH ₄ (中間產物 為葡萄糖、醇類等)
木質素	放線菌為主	低	H ₂ O、CO ₂ (中間產物為酚 類化合物等)

就整個堆肥化反應而言，初始以嗜溫性(嗜中溫)菌為優勢菌種，當溫度由 20°C 上昇至 40~50°C 時，優勢菌種漸為嗜熱性(嗜高溫)菌所取代。當溫度超過 65°C 以上，將造成微生物活性銳減，放熱反應衰弱，導致溫度下降，此時嗜溫性(嗜中溫)菌即逐漸取代嗜熱性(嗜高溫)菌成為優勢菌種。此時系統中可分解之有機物已相當少，故溫度仍會持續下降直至與環境溫度平衡，如此即完成堆肥化過程。

2-2-6 影響堆肥化之操作參數

控制堆肥條件於適合微生物的生長環境下，才能有效處理廢棄物堆肥反應。而好氧堆肥為一有效、簡單及成熟的處理方法，並廣泛運用在堆肥

製作及土壤改良中。好氧堆肥反應過程複雜，包含物理、化學性反應及生物作用，根據文獻堆肥化過程中常以下列操作因子，作為判斷堆肥反應之參考。各項影響因子分別如下所述：

1.溫度

溫度是堆肥化過程中影響微生物活動最重要的參數之一，主要會影響微生物生長速率、繁殖方式、形態、代謝反應、甚至營養需求。溫度條件也是堆肥過程的一個關鍵控制指標，它是一個微生物發酵過程，微生物代謝產熱，使堆體溫度產生變化^[23]。微生物之生長溫度有其合理範圍，一般在-5°C~+80°C均可以成長增殖，30°C以上時微生物增殖率隨著溫度上升顯著成長。應用於好氧堆肥的微生物包含：嗜溫性(嗜中溫)菌及嗜熱性(嗜高溫)菌，嗜溫性(嗜中溫)菌的生長範圍介於 15~45°C之間，而嗜熱性(嗜高溫)菌則介於 45~60°C之間。堆肥溫度的變化來自於微生物利用堆肥中的有機物及氮、磷、鉀等營養物質，釋放出熱能及增生新的微生物，另一方面，因堆肥材料會因微生物代謝而有熱蓄積現象使溫度的上升，不過好氧堆肥尚需要強制通風、攪拌或翻堆，以作為氧氣供給，故亦會產生降溫效應，所以在實務上堆肥槽體可增設保溫設施或增加堆肥的體積，以達到控制微生物最適生長之溫度範圍。

微生物種類不同，其適合的繁殖溫度也不同，堆積材料的高溫度並不是微生物作用的必要條件，溫度提高有助於殺除雜草種子、消除病蟲害，

一般微生物活動之溫度上限為 65~80°C。而依據文獻顯示 55~65°C 高溫是保證完全殺死病原菌基本條件，也是無害化處理庭園廢棄物的要求。溫度超過 65°C 會對微生物活性產生抑制，可透過通氣或翻堆來控制，溫度過高會過度消耗有機物，並降低堆肥產品質量。

2. pH 值

pH 主要影響微生物分解有機物的活性，因各種微生物能適合生長的酸鹼值並不一致。堆肥過程酸鹼值之變化大多受有機酸生成影響，有機酸的濃度越高酸鹼值愈低，非游離酸也隨之愈多，因而更易滲入細胞內抑制微生物的生長。一般而言，微生物最適合生長及代謝的 pH 值介於 6.5~7.5 之間，其中大多數細菌介於 6~7.5，黴菌介於 5.5~8.0。故微生物對 pH 之變化很敏感，通常在強酸或強鹼的狀況是不利於細菌的繁殖。但部分有機質其分解時所產生的物質會造成 pH 值變化。

pH 值是微生物生長繁殖的重要因素之一，多數微生物適宜在中性和弱鹼環境中生長，過酸和過鹼的環境均會影響微生物的生長繁殖，進而影響堆肥發酵的時程，影響物料的腐熟。堆肥原料或醱酵初期，pH 為弱酸到中性，腐熟時呈中性偏弱鹼性，但 pH 值也受堆肥原料和條件的影響而有變動，只能作為堆肥腐熟度的必要條件，而非充分條件，故堆肥應維持在偏微鹼性的環境下即 pH 值約介於 7~8 之間為原則。而依據文獻顯示通常庭園廢棄物醱酵後 pH 值約在 7.5~7.8 左右。

3.水分

水分是微生物生長所必需的條件，只有保持適宜的水分含量才有利於保持微生物的活性，促進微生物分解有機物，並能使堆體溫度處於穩定性，否則將影響堆肥的品質^[24]。故微生物需要從周圍環境中不斷吸收水分以維持其生長代謝活動，且微生物只能攝取溶解性養分，所以如何控制適當的含水率，是決定好氧堆肥過程中有機物分解速率及微生物生長繁殖的重要關鍵因素之一。微生物在乾燥環境下，活性顯著下降，一般當水分含量低於 40% 以下時，微生物增殖受到抑制，一般堆肥製程之混合物水分含量最好保持在 50~60% 之間，不過在控制水分含量的過程中，需注意原物料本身的含水率，以及原物料的顆粒大小與孔隙度，決定是否需要額外添加副資材，以維持堆肥堆結構的完整性與多孔性。水分含量若少於 45~50% 會抑制生化反應速率，若低於 10~15% 時微生物代謝將停止。相對地，水分含量過高時會降低堆肥材料通氣量，導致堆肥環境氧氣供應量不足的現象，直接影響好氧細菌、真菌及放射菌等堆肥優勢菌種之生長，導致厭氧菌生長繁殖，嚴重時產生厭氣發酵，產生有害物質及氣體，使有機物分解停頓。因此，水分含量太高不利於堆肥之發酵腐熟，合適水分含量有益好氧性微生物生長，但過低的水分含量則不利微生物繁衍，會延長堆肥化過程所需時間^[26]。本研究中其水分含量可透過加水、通風、攪拌或翻堆、含水量高之樹葉或含水量低之樹枝等方式來調控。

4.碳氮比(C/N)

在好氧堆肥過程中，碳氮比扮演重要的控制參數，其中碳源主要是提供微生物生長能量及產生新微生物所需，氮源主要是細胞生長與代謝所需之蛋白質、核甘酸、胺基酸及酵素中不可缺少的元素。根據文獻可知，堆肥碳氮比初始設定在 30 為理想的條件^[25]，因為在好氧堆肥過程中，C/N 比值過高，微生物雖然有足夠的碳源作為生長能量，但是缺乏足夠的氮源產生新的微生物，微生物生長緩慢，使碳源的利用率也相對降低，連帶也使 C/N 下降率減低，使整個堆肥反應時間延長^[15]。反之，C/N 比值偏低時(亦即低於 20 : 1)，堆肥反應的時間較短，但是於嗜熱反應期中，部份的氮元素會被微生物轉變成氨氣而揮發，不但造成氮素的流失，亦會產生難以接受之臭味。另外，以堆肥成品施用於農作物來解釋，C/N 若大於 30，氮之生物同化作用(Immobilization)速率會大於其礦化作用(Mineralization)速率。如此，微生物反而自環境中攝取氮素成份來分解多餘的碳(氮固定作用)。換言之，C/N 高(亦即高於 40 : 1)之有機資材，不僅無法提供作物養分，反而和作物競爭養分，造成農作物缺氮(即氮飢餓)現象^[26]，對於作物的生長產生不良影響。以整體趨勢來看，隨著堆肥醱酵的進行整個過程中碳氮比會逐漸下降。故為保證成品的堆肥中含有一定量的碳氮比(一般約為 10~20 : 1)和在堆肥過程中使分解速度有序的進行，必須調整好堆肥原料的初始碳氮比。

當有機原料的碳氮比為已知條件，一般混合原料之碳氮比之調整可依下列公式計算^[15]：

$$C/N = \frac{C1+C2}{N1+N2}$$

C/N：為混合後原料之碳氮比

Cn：為有機原料與添加原料的有機碳含量

Nn：為有機原料與添加原料的氮含量

而本研究以落葉為主要基質，參照表 2-2 美國各類庭園廢棄物堆肥原料的特性分析，其碳氮比約為 40~80，屬高有機碳資材，可選擇高氮含量資材調整以取得適當的進料混合物之碳氮比。在堆肥過程中，碳源被消耗轉變為二氧化碳和腐植質，而氮則以氨氣形式逸散，或變成硝酸鹽和亞硝酸鹽，或被生物體同化吸收，因此，碳和氮的變化是堆肥化基本特徵之一^[27]。微生物生長需要最適的碳氮比，因此控制堆肥化過程中初始 C/N 在合適範圍，能夠對堆肥產生良好的促進作用^[28]。

表 2-2 美國各類庭園廢棄物堆肥原料的特性分析^[29]

材料	N% (dry weight)	C:N ratio	含水率 Moisture content %	體積密度 (Pound/M ³) Bulk density
作物殘留物和水果/蔬菜加工廢棄物 (Crop residues and fruit/vegetable-processing wastes)				
蘋果濾餅(Apple filter cake)	1.2	13	60	1,197
蘋果渣(Apple pomace)	1.1	48	88	1,559
蘋果加工污泥 (Apple-processing sludge)	2.8	7	59	1,411
可可豆殼(Cocoa shells)	2.3	22	8	798
咖啡渣(Coffee grounds)	-	20	-	-
玉米棒(Corn cobs)	0.4-0.8	56-123	9-18	557
玉米秸稈(Corn stalks)	0.6-0.8	60-73	12	32
棉粕(Cottonseed meal)	7.7	7	-	-
蔓越莓濾餅(Cranberry filter cake)	2.8	31	50	1,021
米糠(with rice hulls)	1.2	42	71	1,298
蔓越莓果蔓植物(莖， 葉)(Cranberry plant (stems, leaves)	0.9	61	61	-
剔除馬鈴薯(Cull potatoes)	-	18	78	1,540
水果廢棄物(Fruit wastes)	0.9-2.6	20-49	62-88	-

表 2-2 美國各類庭園廢棄物堆肥原料的特性分析(續)^[29]

材料	N% (dry weight)	C:N ratio	含水率 Moisture content %	體積密度 (Pound/M ³) Bulk density
橄欖外皮(Olive husks)	1.2-1.5	30-35	8-10	-
馬鈴薯外皮(Potato tops)	1.5	25	-	-
稻殼(Rice hulls)	0-0.4	113-1120	7-12	185-219
豆粕(Soybean meal)	7.2-7.6	4-6	-	-
番茄加工廢棄物 (Tomato-processing waste)	4.5	11	62	-
蔬菜農產品(Vegetable produce)	2.7	19	87	1,585
蔬菜廢棄物(Vegetable wastes)	2.5-4	11-13	-	-
秸稈，乾草，青貯飼料(Straw, hay, silage)				
玉米青貯飼料(Corn silage)	1.2-1.4	38-43	65-68	-
一般乾草(Hay-general)	0.7-3.6	15-32	8-10	-
豆科乾草 (Hay-legume Range)	1.8-3.6	15-19	-	-
非豆科乾草 (Hay-non-legume Range)	0.7-2.5	32	-	-
一般秸稈(Straw-general)	0.3-1.1	48-150	4-27	58-378
燕麥秸稈(Straw-oat)	0.6-1.1	48-98	-	-
小麥秸稈(Straw-wheat)	0.3-0.5	100-150	-	-

表 2-2 美國各類庭園廢棄物堆肥原料的特性分析(續)^[29]

材料	N% (dry weight)	C:N ratio	含水率 Moisture content %	體積密度 (Pound/M ³) Bulk density
木材和紙製品(Wood and paper)				
硬木樹皮 (Bark-hardwoods)	0.10-0.41	116-436	-	-
軟木樹皮(Bark-softwoods)	0.04-0.39	131-1,285	-	-
瓦楞紙板(Corrugated cardboard)	0.10	563	8	259
伐木場廢物(Lumbermill waste)	0.13	170	-	-
報紙(Newsprint)	0.06-0.14	398-852	3-8	195-242
紙纖維污泥(Paper fiber sludge)	-	250	66	1140
造紙污泥(Paper mill sludge)	0.56	54	81	-
紙漿(Paper pulp)	0.59	90	82	1403
木屑(Sawdust)	0.06-0.8	200-750	19-65	350-450
電話簿(Telephone books)	0.7	772	6	250
木片(Wood chips)	-	-	-	445-620
木材硬木(芯片，刨花 等)(Wood-hardwoods(chip s, shavings, and so on))	0.06-0.11	451-819	-	-
木材軟木(芯片，刨花等) (Wood-softwoods(chips, shavings, and so on))	0.04-0.23	212-1313	-	-

表 2-2 美國各類庭園廢棄物堆肥原料的特性分析(續)^[29]

材料	N% (dry weight)	C:N ratio	含水率 Moisture content %	體積密度 (Pound/M ³) Bulk density
庭院廢棄物和其他植被(Yard wastes and other vegetation)				
草屑(Grass clippings)	2.0-6.0	9-25	82	-
松(Loose)	-	-	-	300-400
葉(Leaves)	0.5-1.3	40-80	-	-
海草(Seaweed)	1.2-3.0	5-27	-	-
灌木修剪物(Shrub trimmings)	1.0	53	15	429
樹修剪物(Tree trimmings)	3.1	16	70	1,296
新鮮水葫蘆(Water hyacinth-fresh)	-	20-30	93	405

5.通風的控制條件

好氧堆肥化分解有機物主要作用為好氧微生物之生物化學代謝作用，故堆肥化期間必須保持通氣良好，供給充足氧氣，增快微生物繁殖速率以縮短堆肥時間^[30]。故通風是好氧堆肥成功與否的重要因素之一，其主要的的作用在於：(1)提供氧氣，以促進微生物的醱酵過程；(2)通過供氣量的控制，調節在最適溫度環境之下；(3)在最適溫度之下，增加通風量有助於水分的去除^[15]。

有機物分解期間必須提供適當氧氣量，提供微生物在代謝過程中所需要的氧。如果氧供給量不足，會使堆肥環境變成厭氧狀態且好氧菌之活性會隨之降低，若氧的供給量太大，則增加材料水分散失且降低堆肥環境的溫度，因此，適當氧氣量為影響好氧堆肥反應重要控制條件。在通風過程控制中，首要注意的是供氧的濃度，堆肥過程中合適的氧濃度應大於 18%，最低的氧濃度不得低於 8%，一但氧濃度低於 8%，氧氣就會成為好氧堆肥中微生物活動的限制因素，還會產生惡臭。好氧堆肥的通風供應方式可分為下列數種^[15]：

- (1)自然擴散：利用空氣的對流自然擴散，氧氣由堆積材表面向內部擴散，一般而言，藉由表面擴散的供氧方式，在第一階段發酵過程中僅能供應表層下約 20 公分厚度的物料之氧氣。因此，利用自然擴散的方式於堆層內的供氧量明顯不足，會呈現厭氧狀態。
- (2)翻堆：將堆料翻倒或攪拌，把空氣包裹到固體顆粒的孔隙中，此種通風方式較為有效。
- (3)強制通風：反應槽中設有正壓鼓風、負壓抽氣設備或正壓鼓風和負壓抽氣混合設備。與其他方法比較起來，強制通風較易操作和控制，為堆料供氧之最佳的通風方式。
- (4)翻堆與強制通風之結合。

(5)被動通風：由於熱空氣上升所引起的“煙囪”效應而使空氣通過堆積材的方式。主要是利用中空管狀物插入堆體中，堆體中的熱空氣上升時所形成的抽吸作用，使外部空氣進入堆體中，達到自然通風的效果，不需翻堆及通風設備系統，可大為減少設備費用。

2-2-7 堆肥過程之材料變化

有機材料經堆肥化過程，其有機組成分會經由微生物作用，逐漸分解並轉變至穩定化。一般而言，有機物中的碳、氮成分總量，因被微生物利用吸收，故在堆肥化過程會逐減少，其中碳成分損失率約 55~65%，氮成分損失率約 30~40%，而乾物重損失率則約 50% 左右^[31]。綜合歸納其變化如下：

- 1.物理性質的變化：透過微生物發酵造成揮發性有機物質的分解、轉化，使得堆肥原料產生較大的變化。首先是堆肥碳素的分解與轉化，使得堆肥的體積和重量減少 1/3~1/2。有機廢棄物中包括植物的纖維結構變得較為鬆散，用手指碾磨時有清脆感，大顆粒的數量減少，小顆粒的數量增加。隨著堆肥逐漸腐熟，原始材料變黑，直到發酵結束後，所得到的是暗棕色的產品，而且產品原有的有機廢棄物不良的氣味消失了，呈現腐植土和土壤的氣味。
- 2.水分的變化：堆肥混合原料的水分變化一般應控制在 50~60% 之間，最適宜的水分含量控制則取決於堆肥原組成、性質和有機質含量。一般而言，

堆肥中有機質含量越高，則所需要控制的水分也越高。此為對於堆肥物料中的有機物性質亦與水分含量高低有關，堆肥過程中由於堆肥原料有機質含量和組成原料有所差異，但堆肥過程中由於高溫與通氣的作用，通常隨著熱量的損失與排放的氣體，而會有一部分的水分蒸發掉。因此，實際上堆肥的過程中，水分含量是下降的。故為保持堆肥有較高的物理化學反應速度之進行需適時水分補充。

3.pH 值的變化：在堆肥化開始後的最初階段，由於利用能量的物質較多，微生物繁殖很快，其活動所產生的有機酸使堆肥物料 pH 值不斷下降，乙酸、丁酸隨著堆肥的持續進行，溫度的升高而揮發，同時含氮的有機物質所產生的氨使得堆肥物料中的 pH 值又開始上升，最後達穩定平衡。故含氮有機物經微生物水解成氨氮，而含碳有機物經微生物分解轉變為二氧化碳揮發，使得 pH 值逐漸升高。

4.含碳有機物變化：一般生物體有機組成中約有 50%的碳含量，堆肥材料中含碳物質主要用於微生物活動的能源與碳源，含碳有機物分解的途徑如圖 2-5 所示，在堆肥化的過程中，微生物首先利用容易分解的有機物質和簡單的有機物質進行新陳代謝及礦化作用。這些容易被分解的有機物質主要是可溶性糖類、有機酸和澱粉，其次開始分泌特殊的水解酶來分解纖維素、半纖維素和木質素，因種種條件不同而異。複雜之木質素分解極緩，往往有可能不分解而殘留為腐植質之主體^[32]。



圖 2-5 含碳有機物分解的途徑^[32]

5.含氮有機物變化：含氮有機物中含氮百分率高之化合物如糞尿中之尿素、尿酸等易於分解者，即變為氨；含氮低如落葉、蒿稈中之複雜氮素化合物，先分解成各 19 種氨基酸，再變為氨；此種氨又可被微生物吸收利用，合成為蛋白質及類似化合物，而為細胞之原生質，成為微生物體之氮素仍可再度分解。

6.氮素變化：堆肥氮素的轉化主要是為生物活動的結果，並決定最終堆肥產品的腐熟度。堆肥化過程中，氮素的轉化主要包括兩大方面，分別為氮素的固定與釋放。通常在堆肥化結束之後，氮素會有一定的損失，這主要是由於有機氮的礦化、持續性氨的揮發以及硝酸態氮的脫硝作用。

在堆肥化中氮素會逐漸損失，然其損失百分率遠較有機質分解為少，故百分率反而增加。堆肥化材料中之各種氮素化合物，大部分已變為生存或已死亡之微生物體，主要為蛋白質。

7.碳氮比(C/N)逐漸減少變化：在堆肥化過程中，有機物所含碳水化合物會迅速被微生物作用而分解，全碳含量呈現下降情形，氮及磷等要素之濃度會因此濃縮效應而呈現增加趨勢，最後其組成分包括 C/N、pH 及 EC 值等特性呈現穩定。又一般腐熟度標準雖受不同有機物材質特性影響在一般情

況下，初始 C/N 為 25-30，被認為是理想的堆肥^[33]，但大多數仍以 C/N<20 為重要的腐熟標準之一^[34]。

8.體積逐漸減少變化：體積減少顯示出材料腐熟之進度，其減少程度可依材料種類、堆積之密度及發熱溫度狀況而異。一般而言，經堆肥化後可縮小至原來體積之 30~50%。包含因堆肥材料之軟化，自身重量之壓積，其體積漸漸減少，堆體堆積高度明顯下降。體積減小於堆積後十日至二週間通常最為顯見，然對本研究因其基質屬較難分解材料，故其體積減少之變化需費時較久。

2-2-8 堆肥品質評估

堆肥的穩定性和腐熟度，通常被稱為堆肥品質^[35]，有機質材料經過微生物的發酵作用製成有機質肥料，其最重要目的在安定有機質材料的性質。而在堆肥產製有機肥料的安定過程，特別稱為「熟成作用」，而已達到安定程度的產品則稱為腐熟堆肥或堆肥化有機質肥料。新鮮未腐熟或穩定性差的堆肥施用於農地會引起作物缺氮、根圈缺氧、形成還原環境、重金屬溶解增加、氨、環氧乙烯、有機酸或還原性物質產生等現象，因而抑制種子萌發和根的生長，進而影響作物代謝、根呼吸、養分吸收、細胞分裂素合成，並且傳播病原菌、雜草叢生等，導致作物生長不良^[36]。而腐熟過度則有效養分減少，肥效降低，甚至造成腐植酸含量的降低^[37]。

目前對於堆肥品質、腐熟度或穩定度，並未有統一的指標，大部分文獻推薦專一的指標，都只基於一組在相似堆肥化條件和原料下，擬定之參數在堆肥化過程中，不再變化或變化很小，或溫度達到某高溫，並持續數天後，視為腐熟。少數文獻以實際植栽試驗觀察植物反映來評估堆肥的品質。堆肥的腐熟度是衡量堆肥質量的尺度，準確地評估堆肥腐熟度關係到堆肥能否安全使用^[38]。一般而言，堆肥腐熟度的判斷標準，可分為物理方法、化學方法、光譜分析法，以及生物評價指標四大類^[24]。物理性指標的判斷標準包含了堆肥的溫度、氣味、色度、光學特性、與導電度等，而化學性指標包含了 pH 值、揮發性固體含量、固相或液相的碳氮比、陽離子交換量、二氧化碳釋放量、水溶性有機酸含量、水溶性醣含量、生化需氧量、有機質腐質化程度、生物可降解指數、及銨的含量等，生物性指標的判斷標準則以種子發芽試驗測定堆肥植物毒性，是一種直接而又快速的方法^[15]。本研究僅選定物理性腐熟指標包含堆肥溫度變化、氣味及導電度等，化學性指標包含 pH 值、C/N 等，生物性指標則以種子發芽率(G)及種子發芽指數(GI)作為堆肥品質之評估依循。

1.物理性判別指標

以觀察法，利用視覺、嗅覺、感覺，依下列現象判別堆肥外觀物理狀況變化。

(1) 堆肥末期溫度自然降低。

- (2) 不再吸引蚊蠅。
- (3) 不再有令人討厭的臭味，有類似泥土香味。
- (4) 出現白色或灰色的菌絲。
- (5) 堆肥產品呈現疏鬆的團粒結構。

2.化學性判別指標

以堆肥化過程物質之化學變化特性，如下各項選定指標所列，作為腐熟的判斷依據。

- (1) pH 值：許多研究者提出 pH 值可以作為評價堆肥品質或腐熟度的一個指標^[39]，堆肥化過程 pH 值逐漸增高，但增幅並不一致，堆肥 pH 值受到堆肥原料和堆積條件的影響，一般而言，堆肥原料或醱酵初期的 pH 值為酸性，腐熟的堆肥應為中性或弱鹼性。
- (2) 碳氮比(C/N)：這是評價腐熟度的一個傳統經典參數。長久以來 C/N 被用作為有機質降解的指標，一個腐熟的堆肥產品，若含有高的碳氮比，其在土壤中分解速率較慢，但能提供較多穩定的腐植質。堆肥其全碳量和全氮量與所用原料有直接關。有研究者認為，理論上腐熟堆肥的碳氮比應趨向於微生物菌體的碳氮比，即 16 左右。堆體的初始碳氮比若為 30，一般認為下降至 20 以下即表示該堆肥已穩定或腐熟，但有些學者認為應小於 12^[40]。施用未腐熟高碳氮比之堆肥，由於堆肥經礦化釋出的無機態氮被土壤中微生物吸收固定合成其生質量的一部分，因而導致氮

素的生物固定化作用，而施用未腐熟低碳氮比堆肥，可產生氨毒害。眾多研究者也提出從<12 到<25 的各種理想堆肥碳氮比值，但最適值通常須由供試原料決定^[41]，所以欲成功施用堆肥作為土壤改良資材，必須充分了解其分解和釋放養分的速率，關鍵因子在於碳氮比，碳氮比能於介於理想值 25-30，對提供土壤養分和改善土壤物理性質較有幫助。堆肥碳氮比適宜作為養分供應或改良資材使用之指標，而不適合作為產品腐熟度或穩定度的指標。

- (3) 導電度(Electrical Conductivity, EC)：在農業領域中 EC 的量測值是一種重要指標，可用以代表水質，土壤或其他介質的相關性質。EC 值的意義代表在一定體積內溶液內離子的導電能力，可移動而且帶正負電的離子愈多，電阻就愈小，導電能力愈強，因此 EC 值就愈高。介質或是水質內的離子濃度如果太高，作物則處於應力狀態，導致作物生產力下降。作物出現的特徵即是葉片末端或邊緣變成焦黑狀，嚴重時造成落葉與萎凋。對作物而言，多餘的離子鹽份可能來自水，土壤，介質，肥料等。EC 值是很好的肥力指標，在導電度大於 4 ms/cm 時多數作物生長會受到阻礙。美國鹽度研究室對 EC 值應用於土壤及對植物與作物影響如表 2-3 所示^[42,43]。

表 2-3 EC 值應用於土壤及對植物與作物影響^[42,43]

EC ms/cm	對土壤意義	對作物與植物影響
<2	極低鹽份	一般作物可以正常生長。
2-4	低鹽份	對鹽分反應敏感作物，會有鹽份阻礙生長現象。
4-8	中鹽份	多數作物生長會出現鹽分障礙。
8-16	高鹽份	只有耐鹽作物可以正常生長。
>16	極高鹽份	少數極耐鹽作物可以正常生長，大多數的作物無法生長。

3. 生物性判別指標

- (1) 種子發芽率(G) (Germination rate)試驗法：Jimenez 和 Garcia^[40]以種子發芽率如大於 50%時，即表示該堆肥為可接受腐熟度。
- (2) 種子發芽率指數(GI) (Germination index)試驗法：植物在未腐熟的堆肥中成長會受到抑制，在腐熟的堆肥中生長可得到促進。發芽率指數已被證實是堆肥腐熟與否的最敏感指標，可以用來說明堆肥低毒性(影響根生長)和高毒性(影響發芽)的綜合表現^[44]，是評價堆肥腐熟度最具說服力的方法^[45]，並指出許多植物種子在堆肥原料和未腐熟堆肥萃取液中生長受到抑制，而在腐熟的堆肥中生長得到促進，以種子發芽率與根長度計算發芽率指數(GI)，當 GI 大於 50%時，堆肥對植物已基本沒有毒性，堆肥已基本腐熟；而當 GI 大於 80%時，可認為堆肥已完全腐熟，施用既不抑

制種子萌芽，也不會影響根系生長，甚至還能促進根系生長^[46]。文獻研究指出未腐熟生物固體堆肥的植物毒性顯示，根長度被抑制程度較發芽率敏感。因此，在發芽率試驗中將根長併入考量，計算種子發芽率指數是堆肥腐熟的最直觀指標，其腐熟度評估準確性將可提升^[47,48]。

$$\text{種子發芽率指數GI(\%)} = \frac{C \times L}{C_0 \times L_0} \times 100\%$$

C：堆肥萃取液中小白菜發芽率(%)

L：堆肥萃取液中小白菜平均根長(cm)

C₀：對照組(去離子水)中小白菜發芽率(%)

L₀：對照組(去離子水)中小白菜平均根長(cm)

2-2-9 堆肥肥料規範

庭園廢棄物經堆肥化後所產出之有機肥料，為確保其品質能符合具有機質但又不具危害成分標準，依據我國農業委員會農糧署所公告之各類肥料品目歸類為雜項堆肥(品目編號 5-11)^[49]，其品目規範為表 2-4 所示。

表 2-4 雜項堆肥品目 5-11 規範^[49]

肥料種類	適用範圍	保證成分之上下限%	有害成分高限 (mg/kg)	其他規定
雜項堆肥 (品目編號5-11)	本品目適用於以植物渣粕、動物廢渣、魚廢物、副產動物質、副產植物質、廚餘或事業廢棄物等為原料，經過翻堆、醱酵腐熟、調配成分、堆置風乾等程序所製成之堆肥。	有機質： >50.0 全氮： $0.6-5.0$ 全磷： $0.3-6.0$ 全氧化鉀： $0.3-4.0$	砷： 25 鎘： 2.0 鉻： 150 銅： 100 汞： 1.0 鎳： 25.0 鉛： 150 鋅： 500	1.不得混入化學肥料或礦物。 2.水分40.0%以下。 3.pH值5.0以上，9.0以下，並應標示pH值。 4.碳氮比10以上，20以下。 5.以廚餘為原料者，應登記本品目，且鈉不得超過4.0%，氮不得超過6.0%。

其中有害成分重金屬更是有機廢棄物堆肥化重要觀察指標之一，重金屬進入大氣、水體和土壤中，會對環境產生污染，屬不易被微生物降解，在環境中只發生形態之間的轉化，重金屬污染的消除就更為困難，所產生

的環境污染問題及對人體健康影響更加受到人們的重視，由於重金屬其中有害成分一般係指工業及農業上常用且比重較大(大於 5)之砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛及鋅等金屬，此外，砷雖為非金屬但因理化性質與金屬類似，亦被歸類於重金屬中。重金屬中砷、鎘、鉻、汞及鉛皆不是作物生長所需之元素，如作物吸收過量，則會直接對作物產生毒害，或間接影響食用安全。

重金屬在環境中不易降解，會累積於土壤中，引起重金屬污染。其對作物之危害機制為：(1)改變作物之生理，(2)與微量元素如鐵或其他必需元素如氮、磷等產生競爭作用。作物受重金屬毒害常發生如幼葉葉片黃白化，但葉脈仍呈綠色，嚴重者葉緣產生壞疽(缺鐵症狀)，或呈紅紫色條紋(缺磷症狀)，根系生長受阻，鬚根無法生長，根系呈刺鐵絲狀，產量下降等現象。比較不同作物中重金屬含量與土壤中重金屬含量之比，發現以米類吸收重金屬較多，而蔬菜類其次^[50]。

堆肥中的重金屬會對微生物產生抑制作用，影響到堆肥的進行。經過堆肥發酵生產的有機肥料若重金屬含量過高，長期施入到土壤後會使土壤的重金屬含量增加而影響到土壤品質，並隨地表徑流而污染地表水體，更進一步被植物吸收後不僅會抑制其生長還可能造成籽實中重金屬含量增加，進入食物鏈後對動物或人體的健康產生危害。重金屬在土壤及植物中之臨界濃度如表 2-5。概括言之，重金屬對植物或作物之危害機制主要為改變其

之生理，或與其他必要元素，如鐵、氮或磷產生競爭作用。不過，部分重金屬則屬於植物生長之微量要素，例如銅、鋅即是。其中銅是氨基酸合成酵素及氧化還原酵素之重要成分，與氨基酸及蛋白質代謝有密切關係，亦是葉綠素形成所必需的元素，並直接參與呼吸作用。鋅則與蛋白質代謝酵素及生長荷爾蒙的合成有關；但植物對這些元素的需要量甚低，如含量過高即可能出現毒害症狀^[50]，表 2-6 為重金屬元素過量對植物之毒害症狀。

表 2-5 重金屬在土壤及植物中之臨界濃度(全量)^[51,52,53]

元素	土壤中正常	土壤中臨界	植物體之正常	植物體之臨界濃度	
	濃度範圍	毒害濃度	濃度範圍	-----mg/kg-----	
	-----mg/kg-----			毒害	10%減產
砷 (As)	0.1-40	20-50	0.02-7	5-20	1-20
鎘 (Cd)	0.01-2.0	3-8	0.2-2.4	5-30	4-200
鉻 (Cr)	5-1500	75-100	0.03-14	5-30	2-18
銅 (Cu)	2-250	60-125	5-20	20-100	5-64
汞 (Hg)	0.01-0.5	0.3-5	0.005-0.17	1-3	1-8
鎳 (Ni)	2-750	100	0.02-5	10-100	8-22
鉛 (Pb)	2-300	100-400	0.2-20	30-300	-
鋅 (Zn)	1-900	70-140	1-400	100-400	100-900

堆肥中的微生物種類繁多，大量的微生物會對重金屬產生吸附作用，而堆肥不能降解重金屬，但能使重金屬發生形態上的變化，充分利用這些性質可有效地降低重金屬的危害。

表 2-6 重金屬元素過量對植物之毒害症狀^[50]

重金屬元素	毒害症狀
砷 (As)	老葉產生紅棕色壞疽斑點，根黃化或棕色化，新芽受抑制，稻實不稔。
鎘 (Cd)	葉片黃化或呈棕色斑塊，葉脈及葉柄紅化，葉卷曲，根呈棕色變型。
鉻 (Cr)	幼葉黃化、根生長受阻，植株生長受抑制。
銅 (Cu)	葉部先出現濃綠色後再出現缺鐵黃化現象，葉片變厚，根呈刺鐵絲狀，分蘖受阻。
汞 (Hg)	嚴重阻礙發芽及發根，葉片黃化及呈棕色斑點。
鎳 (Ni)	幼葉葉脈間黃化，老葉呈灰綠色，根呈棕色且無法產生鬚根。
鉛 (Pb)	葉片濃綠，老葉萎凋，葉片生長受阻，根短且呈棕色。
鋅 (Zn)	葉尖黃化壞疽，幼葉葉脈間黃化，植株生長受阻，根呈刺鐵絲狀。

2-3 植物營養元素

化學肥料的施用曾對提高耕地單位面積產量做出很大貢獻，據世界糧農組織統計從 1961~1995 年世界穀物總量隨肥料施用量增加而增加，但不斷施用化肥不僅在資源利用和不符合經濟效益，而且還易導致土壤性質惡化、作物品質下降、環境污染及食用安全疑慮等問題，要解決這些矛盾，需透過有機廢棄物堆肥化方式來改善環境土壤肥力。有機肥成分中大多為有機態存在，需經礦化才能釋放，其礦化作用速率受氣候、季節、水分及

土壤性質等因素的影響，若養分提供過早，則有淋洗損失現象發生，若在作物最大養分需求期釋出遲緩或少量，則會造成作物生長不良。德國科學家李比希於「化學在農業和生理學上的應用」一文提出了「養分歸還學說」指出：「土壤肥力不下降就必須歸還自土壤中取走的養分」^[54]。

2-3-1 必需營養元素

必需營養元素，係指在植物正常生長過程中所不可缺少的元素。植物根據其自身生長發育特性來決定通常存在土壤中的養分大多以化合物形式，植物或作物需從土壤中汲取各種滋養元素以供生長，其營養元素所需適合之濃度可概分如表 2-7 所示。其中氫(H)、碳(C)、氧(O)三類元素主要是從空氣和水中獲得，其餘元素則可從土壤中吸收。氮(N)、磷(P)、鉀(K)三類元素由於植物需求量較多，而土壤可提供有效含量又較少，通常成爲限制植物生長發育重要因素，也常需要藉由肥料來補充。一般對必需營養元素的分類，多以在植物體內的含量和植物生理需求的多寡區分爲三級^[54]：

- 1.大量營養元素(major element) (主要元素)：氮(N)、磷(P)、鉀(K)爲作物需求大宗，故稱爲植物營養三要素或肥料三要素，具有其中之一元素者皆可稱爲肥料。
- 2.中量營養元素(次要元素)：鈣(Ca)、鎂(Mg)、硫(S)等三類元素植物需求量少於其他大量營養元素，故稱之爲中量營養元素或次要元素。

3. 微量營養元素(trace element)：如氯(Cl)、硼(B)、鐵(Fe)、錳(Mn)、鋅(Zn)、銅(Cu)、鎳(Ni)、鉬(Mo)等元素也為作物生長所必需之元素，但其需求量甚微，故稱之微量元素。

表 2-7 高等植物必需營養元素及其較適合的濃度^[55,56]

營養元素	植物可利用的形態	在乾物質中的含量		
		百分率(%)	ppm	
大量營養元素	碳(C)	CO ₂	45.0	450000
	氧(O)	O ₂ , H ₂ O	45.0	450000
	氫(H)	H ₂ O	6.0	60000
	氮(N)	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1.5	15000
	鉀(K)	K ⁺	1.0	10000
	鈣(Ca)	Ca ²⁺	0.5	5000
	鎂(Mg)	Mg ²⁺	0.2	2000
	磷(P)	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	0.2	2000
	硫(S)	SO ₄ ²⁻	0.1	1000
微量營養元素	氯(Cl)	Cl ⁻	0.01	100
	鐵(Fe)	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	0.01	100
	錳(Mn)	Mn ²⁺	0.005	50
	硼(B)	BO ₃ ³⁻ , B ₄ O ₇ ²⁻	0.002	20

表 2-7 高等植物必需營養元素及其較適合的濃度^[55,56] (續)

營養元素	植物可利用 的形態	在乾物質中的含量		
		百分率(%)	ppm	
微量	鋅(Zn)	Zn ²⁺	0.002	20
營養	銅(Cu)	Cu ²⁺ , Cu ⁺	0.0006	6
元素	鉬(Mo)	MoO ₄ ²⁻	0.00001	0.1

2-3-2 必需營養元素的功能

植物每種必須營養元素都有其特定作用與功能，如下表 2-8 所示，其各種功能一般會通過植物外部型態表現出來，當缺少某一營養元素時，往往會表現出特定外部症狀。

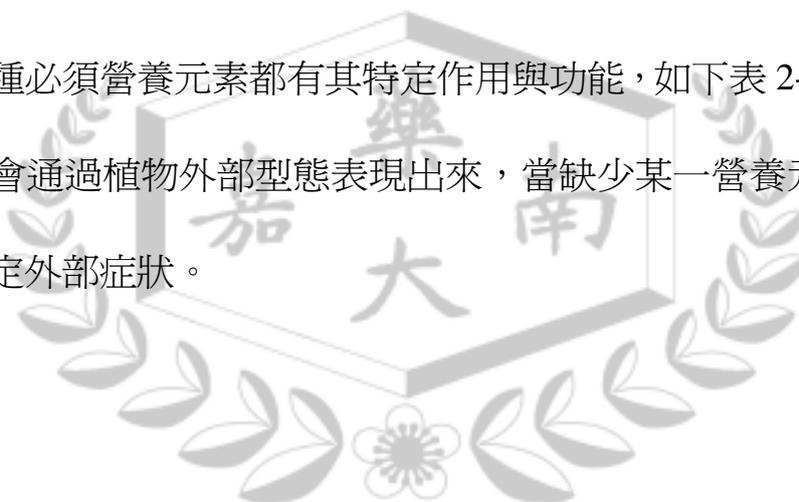


表 2-8 植物必需營養元素主要功能^[57]

營養元素類別	植物主要吸收形式	主要生理生化功能
碳、氫、氧、氮、硫	CO_2 , HCO_3^- , H_2O_2 , O_2 , NO_3^- , NH_4^+ , N_2 , SO_4^{2-} , SO_2	植物體的有機物組成，植物進行光合作用參與被同化過程的主要元素。
磷、硼	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , H_2BO_3^-	以無機陰離子或酸根形式被植物吸收，會於植物體內參與酯化反應。
鉀、鈣、鎂、錳、氯	K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Cl^-	以離子形式被植物吸收，並常以無機形態在植物汁液中，有調節滲透壓、有活化酵素或輔酶的功能。
鐵、銅、鋅、錳、鎳、鉬	Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , MoO_4^{2-} 或嵌合形式	於植物體內多以嵌合物形式存在，參與氧化還原反應與活化酵素等功能。

必需營養元素在植物體內的含量常受植物種類、年齡以及環境中其它礦質元素含量等元素的影響，尤其是環境條件的影響，可使體內各種營養元素的含量發生很大的變化。當植物體內過量存在某一元素，也會出現特定症狀，這就是元素毒害症如表 2-9 所示，一方面直接干擾植物正常代謝活動，另一方面也會因通過影響其他元素作用而間接造成另一元素缺乏，微量元素尤其容易引起毒害症狀，是因為植物體對微量元素需求較少之故。

表 2-9 作物或植物必需營養元素缺乏或過多症狀^[50,58]

元素別	吸收型態	缺乏	過多
氮(N)	NO_3^- , NH_4^+	植株矮小，全株葉色淡綠，老葉枯黃。	葉色淡綠，大而軟弱，抵抗病蟲害能力降低。
磷(P)	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	生長受阻，葉片較小，葉色成暗綠色，有些作物在老葉片或葉柄呈紅色或紫色。	可能有缺鐵、鋅症狀。
鉀(K)	K^+	老葉的葉緣或尖端成燒焦狀。	可能有缺鐵、鈣、鎂症狀。
鈣(Ca)	Ca^{2+}	常發生在新葉或頂芽上，開始時葉片尖端部分黃白化，生長停止，尖端缺鈣時葉易繃捲。	可能有缺鐵、鈣、鎂症狀。
鎂(Mg)	Mg^{2+}	老葉之葉脈間有黃化現象，但葉脈仍保持綠色。	可能有缺鈣症狀。
硫(S)	SO_4^{2-}	植株矮小，黃色由淡綠而黃化。	
鐵(Fe)	Fe^{2+}	老葉正常，新葉黃化，初期葉脈保持綠色而葉肉黃化，隨著缺乏程度，逐漸呈黃白化。幼葉葉脈間黃白化，嚴重時葉脈間及葉緣產生褐色壞疽。	可能有缺錳症狀。

表 2-9 作物或植物必需營養元素缺乏或過多症狀(續)^[50,58]

元素別	吸收型態	缺乏	過多
錳(Mn)	Mg ²⁺	老葉正常，新葉脈保持綠色而葉肉呈淡綠色或黃色，嚴重缺乏時，葉緣有黃色及暗棕色小斑點。	全株葉片之葉尖及葉緣黃化、燒焦、捲曲等，下位葉通常較嚴重。
鋅(Zn)	Zn ²⁺	首先出現於新梢葉片，一般而言，中度至嚴重缺乏時葉片小而畸形，葉脈間黃化節間縮短，而呈小葉簇生狀。	可能引發鐵、錳缺乏症狀。
銅(Cu)	Cu ²⁺	不同作物種類缺乏症狀有很大差異，一般首先出現在新葉片，葉片變小葉肉黃化，葉片自葉緣向內捲曲。	可能引發鐵缺乏症狀。
氯(Cl)	Cl ⁻	葉尖或葉緣焦枯。 穀類根部發生凋萎或生長受阻，呈叢生狀。番茄整株或老葉之葉緣向下彎曲，葉片主脈間產生黃褐色斑點壞疽。	

表 2-9 作物或植物必需營養元素缺乏或過多症狀(續)^[50,58]

元素別	吸收型態	缺乏	過多
硼(B)	H_3BO_3	<p>新葉畸形，葉柄變厚亦脆裂，生長點及幼嫩組織停止生長或枯死。</p> <p>幼葉黃白化及褐化，根前端或生長點壞死，植株變矮、簇生，葉柄及莖微裂，不開花或開花而不稔實(受粉不良)，莖及根之中心呈褐色或中空，果實畸形，如蕪菁之褐心病，葡萄及蘋果之縮果病(果實內部木栓化)，木瓜果實表皮畸形或流膠。</p>	<p>全株葉片之葉尖及葉緣黃化、燒焦、捲曲等，下位葉通常較嚴重，與錳過多之症狀相似。</p>
鉬(Mo)	MoO_4^{2-}	<p>下位葉首先變淡或出現黃化，柑橘類則有橢圓形病斑，中央褐變。</p> <p>易發生於老葉，葉脈間有斑點壞疽，局部黃化，十字花科蔬菜產生鞭狀葉；豆科產生杯狀葉，類似缺氮之症狀，如整株黃化，生長受阻，產量下降等。</p>	

一般而言，有機堆肥可被視為具長效性之肥料，在土壤中藉由礦化與生物固定作用來扮演能源庫之功能^[59]。長期施用有機肥料，土壤性質將日漸改變，諸如；土壤酸鹼值、導電度值、鹽基飽和度、陽離子交換容量會緩慢增加，土壤團粒也會逐漸形成，使土壤總體密度降低，鬆化土質而易於農耕。

2-4 國內外庭園廢棄物堆肥化概況

2-4-1 庭園廢棄物(Yard Waste)

隨著生活水平及經濟物質等條件的提高，人們對居住生活品質與周遭環境綠美化也日益重視，城市庭園綠化的快速發展及綠地面積增加，間接產生一些值得關注的問題和矛盾，植物生態循環產物庭園廢棄物的處置就是其中之一。在現今綠化的快速發展當下也衍生許多庭園廢棄物(Yard Waste)其主要是指植物自然凋落或人工修剪所產生的植物殘體，主要包括枯枝落葉、草坪修剪物、行道樹修剪物、雜草、花屑等，此類廢棄物在中國亦稱為園林廢棄物(Green Waste)，其主要成分為木質纖維素。

隨着此類廢棄物日益增多，在國內長期將庭園廢棄物視為垃圾，不僅增加環境管理的壓力，更使綠地生態系統物質循環和能量流動缺失，影響綠地自我調控和發展能力，也降低綠地改善城市環境的功能和作用。庭園廢棄物對綠地生態系統具有物質循環、能量流動、土壤肥力、污染物吸附、

粉塵控制和野生動物棲息等功能已得到許多共識。從生態資源角度而言，研究和推廣庭園廢棄物資源化，優化綠地生態系統結構，這是更好發揮庭園廢棄物生態功能的目標和途徑，也是城市綠化轉型發展的重要面。

2-4-2 庭園廢棄物之利用

庭園廢棄物的主要成分是有機物質，是不可多得的有機資源。將其進行堆置醱酵後，可作為土壤改良物質還原到樹林下和綠地中；經加工後可用作植物育苗、花卉栽培基質；粒徑較大的處理物則可用於樹掩和裸露土地的覆蓋，保護且防止揚塵；還可以添加於廐肥或其他肥分物質等加工製成有機肥料，用於庭園綠化和農業生產，其再利用分述如下^[60]：

1. 原地利用：庭園廢棄物中之枯枝及落葉的形成和分解過程基本上可視為動態平衡，在自然循環過程中形成自我維持和自然肥的生態機制。因此，城市綠地可保持枯枝落葉的自然形態，利用自然過程分解利用。同時，枯枝及落葉也是營造綠地野趣和景觀的重要面向，更是許多小型野生動物的棲息地和食物。原地利用途徑可以應用於城市綠帶、公園、郊區森林等大型綠地。
2. 粉碎覆蓋：庭園廢棄物中之樹幹和樹枝分解較慢，尤其是行道樹修剪物，將切割粉碎後的木片和木屑覆蓋在綠地土壤表面，通過分解過程，能促進綠地生態系統物質循環，可明顯改善綠地土壤質量，鈍化重金屬污染，並

對降低大氣懸浮物(尤其是近年值得關注 PM2.5 空氣污染物問題)具有積極效果。粉碎覆蓋途徑可廣泛應用於公園綠地、居住區綠地和道路綠帶等。

3.堆肥利用：利用堆肥技術是推廣庭園廢棄物再利用新興發展主要途徑，庭園廢棄物堆肥化就是將其中產生的樹枝、落葉、草與花屑等廢棄物經過一定的處理和混合配比，在適合的操作條件下經過好氧發酵，形成有機肥料和土壤改良劑的過程，達到無害化(無雜草、寄生蟲等)、減量化、資源再利用的目的。近年來，此類堆肥化處理已逐漸成爲可降解有機物的再生利用，廢棄物減量和廢棄物資源化的最佳途徑。

2-4-3 庭園廢棄物堆肥化之方式

人類堆肥運用歷史久遠，發展出各式堆肥方法不勝枚舉，因而，堆肥方法分類眾多。以堆肥過程對氧需求可區分爲好氧堆肥與厭氧堆肥。以堆置速度或形式可區分爲野積堆肥法(windrow composting)、半高速堆肥法(semi-high-rate composting)、高速堆肥法(high-rate composting)。依堆肥化系統配置的差異可區分爲野積堆肥法(windrow composting)、通氣靜堆式堆肥法(aerated static-pile composting)、槽式堆肥法(in-vessel composting)等。綜觀目前國內一般使用的有機堆肥方法主要有：樹圈堆肥法、蚯蚓堆肥法、大樹堆肥法、PP 袋堆肥法、廚餘桶發酵法、堆肥箱發酵法等、廚餘機發酵法等^[61]。

2-4-4 庭園廢棄物堆肥系統設置之型式

綜合國內外歸納各類通氣式堆肥系統類別有：攜帶式木頭和網線堆肥箱(portable wood & wood & wire composting bin)、旋轉筒堆肥箱(rotating barrel composter)、木頭棧板箱(wooden pallet bin)、水泥磚堆肥箱(cinder block bin)、水泥磚堆肥場(cinder block turning unit)、木頭和固定線圈的三箱系統(wood and wire stationary 3-bin system)、雙桶的生物反應裝置(Building a Two-Can Bioreactor)、網線堆肥箱(wire mesh compost bins)等^[62,63]，而本研究採通氣式堆肥槽系統來進行庭園廢棄物堆肥化之操作。

2-4-5 國外庭園廢棄堆肥化運用概況

為實現資源生態循環利用，許多西方國家如奧地利、比利時、丹麥、芬蘭、德國、瑞典等相繼推出對於有機物含量高的廢棄物禁止直接掩埋之規定。如澳大利亞於 2004 年目標是將有機物含量超過 5% 的垃圾禁止掩埋；比利時禁止直接掩埋可燃燒的城市生活垃圾；德國到 2005 年禁止對有機物含量超過 5% 的垃圾進行掩埋；荷蘭禁止對可燃燒垃圾進行掩埋。也因此近年來美國、加拿大、比利時和澳大利亞等西方國家在庭園廢棄物收集利用方面已經有很好的成效。在美國，城市綠化已經走出了利用自然土壤的傳統年代，取而代之的是利用城鄉廢棄物如枯枝落葉、工廠下腳料、生活垃圾等來生產再生土、堆肥來替代自然土壤用於城市綠化用土和土壤改良。

各國庭園廢棄物堆肥化概況如下述：

1.美國

依據美國環保署資料顯示，於 1996 年產生之 2.09 億公噸之城市生活廢棄物中，有機廢棄物佔 23.8%(庭園廢棄物 10.4%，食物廢棄物 13.4%)，其他如木材廢棄物佔 5.2%，相當於 6,060 萬公噸的有機廢棄物產生，其中經堆肥系統處理者約 27%，相當於 1,636 萬公噸^[64]。直至 2010 年則約有 2.5 億噸城市生活廢棄物量產生，有機廢棄物佔 27.3%(庭園廢棄物 13.4%，食物廢棄物 13.9%)，可見有機廢棄物仍是美國城市生活廢棄物中最大的組成部分，經堆肥系統處理者約 34.1%，超過 8,500 萬公噸，相當於可減少 186 萬公噸的二氧化碳當量的排放^[65]。美國每年都市庭園廢棄物產量約 21.74 百萬公噸，過去大都以掩埋處理，自掩埋場面臨飽和危機後，美國環境保護署於 1994 年頒布了庭園廢棄物和城市固體廢棄物堆肥的 EPA530-R-94-003 法則，對庭園廢棄物的操作程序，包括原材料的收集、分類到發酵和後加工，相關的法令和標準都有嚴格規定，從立法的角度為庭園廢棄物的堆肥化提供了政策保障，目前全國有 26 州訂定「庭園廢棄物掩埋禁令」(Yard Waste Bans)，明令禁止將庭園廢棄物掩埋處理^[66]。由於該項強制性規定促使這些州內庭園廢棄物堆肥計畫能快速成長。

2. 歐盟

歐盟於 1997 年草擬之「廢棄物衛生掩埋指導原則」(Directive on The Landfill)，指導原則中限制有機廢棄物進入掩埋場掩埋比例時程，並於 1999 年 7 月正式生效，成為歐盟具有強制性之法令規章。由於此強制性之掩埋場禁令將使得有機廢棄物堆肥處理快速發展。以德國、荷蘭、義大利、法國、丹麥、比利時、西班牙、葡萄牙等國家最積極活躍於堆肥之發展，其整體歐洲都市廢棄物堆肥化處理已達 35%。目前歐洲堆肥模式多以農業、工業或商業廢棄物等大量經分類之堆肥原料為主，亦有庭園廢棄物與都市分類有機垃圾(學校、市場)之堆肥場，然而家戶分類有機垃圾收集與處理僅 10%，仍屬起始階段。唯一例外為芬蘭之赫爾辛基已實施全都市家戶垃圾產源分類，並將所有有機廢棄物堆肥化處理，建立歐洲良好典範^[10]。歐洲政策以「產源分類有機廢棄物集中堆肥處理」之快速趨勢。有些國家政策更是鼓勵家戶於後院或自家進行堆肥(Home composting)。

由表 2-10 所示，奧地利每年可回收堆肥 110 萬公噸、比利時 32 萬公噸、丹麥 50 萬公噸，德國 4 萬公噸，荷蘭 180 萬公噸等，這些回收量較大、回收率高之國家因具有完整有機廢棄物政策，並有良好的分類收集系統，佔有歐洲堆肥產量之 85%。這些國家有機廢棄物處理量約 1,000 萬公噸，然而卻僅佔歐盟有機廢棄物總量之 16.67%^[67]。

表 2-10 歐盟會員國有機垃圾堆肥化處理種類^[10,61,67]

方法	種類	原料	採用國家
好氣 堆肥法		都市有機垃圾(包括下水道污泥)	法國、義大利、希臘
	生物性垃圾 (Biowaste)	經分類家戶有機垃圾、 庭園廢棄物	荷蘭、芬蘭、奧地利、 英國
		家庭廚餘	瑞典
		家庭廚餘、庭園廢棄物	德國
	綠色垃圾 (Green waste)	庭園、公園廢棄物	丹麥、比利時等
	生物污泥 (Biosolid)	下水道污泥	德國
		下水道污泥、庭園廢棄物 混合堆肥	義大利、挪威、法國
厭氧 消化	生物性垃圾 (Biowaste)	工業有機廢棄物	德國等
		分類收集之生物性垃圾	
		農業有機廢棄物	

3. 澳洲

澳洲於 2000 年開始進行回收有機廢棄物，目前已經有 60% 的有機廢棄物使用堆肥方式處理，預計在 2010 年時，廚餘與庭園堆肥每年可產生 95,000 噸。庭園廢棄物(含落葉)已納入堆肥處理，並訂定 2010 年達到「零廢棄」的目標^[63]。

4.加拿大

加拿大多倫多市，從 2002 年 9 月由 Etobicoke 社區開始執行有機廢棄物(腐壞的水果、蔬菜、廚餘、咖啡渣等等)收集及循環利用。目前維多利亞城市庭院的堆肥製作，則已將落葉納入堆肥化處理^[68]。

3.中國

根據中國城市園林綠化行業市場前瞻與投資戰略規劃分析報告顯示，2001 年以來中國園林綠地面積逐漸擴大，截至 2011 年底，中國擁有園林綠地面積 245.27 萬公頃，是 2001 年(94.7 萬公頃)的 2.59 倍，而總有機固體廢棄物年排放量約為 41.3 億~43.3 億公噸，其中蘊含有機質為 12.3 億公噸。因此中國建設部於 2007 年 8 月 30 日建城[2007]215 號「關於建設節約型城市園林綠化的意見」中指出「鼓勵通過堆肥、發展生質燃料、有機營養基質和深加工等方式處理修剪的樹枝，減少佔用垃圾填埋庫容，實現循環利用」。目前中國一些大城市如上海、北京、廣州和深圳等已經開始進行庭園廢棄物(中國稱為園林廢棄物)的再利用，但和美國庭園廢棄物再利用完善的政策制度和運行機制相比確實仍有段差距。雖是如此由於中國當局的重視，並積極學習西方國家採先進庭園廢棄物堆肥化之操作技術、政策擬定及相關品質標準之建立，幾大城市也陸續展現出不錯成效，如廣州市成立園林基質廠，該廠將枯枝落葉等庭園廢棄物變為植物生長基質土壤，年處理庭園廢棄物占廣州市庭園廢棄物的 40%，河南焦作市選用 36 型粉碎機對樹葉

集中粉碎處理，然後進行高溫腐熟，最終生成優良的腐葉土，供庭園花木基肥和盆土使用^[69]。

2-4-6 國內庭園廢棄堆肥化運作概況

在國內，堆肥運作主要是以禽畜糞或有機污泥等含大量氮、磷、鉀等元素之原料為主，以堆肥化技術處理庭園廢棄物相關運作與研究並不多見，茲羅列國內相關庭園廢棄物之研究如表 2-11 所示：

表 2-11 國內相關庭園廢棄物之研究

作者、年代	混合材料比	堆肥方式與研究結果
鄭惠文 ^[70] 2012	落葉、木屑、豆渣及 堆肥成品植種	採強制通風與無通風之野堆方式互為對照，為期 120 天堆肥操作，以建立簡易腐熟判定方法。
施學集 ^[71] 2011	落葉：豆渣=1：2 落葉：廚餘=1：3	採強制通風，顯示生廚餘只需約一週、有豆渣即可達到初步穩定。
蔡宜峯等 ^[72] 2009	落葉：菜籽粕=25：2 落葉：尿素=1000：9	落葉先經破碎處理並植種，約 60 日可初步完熟。
陳月青 ^[68] 2007	落葉與副資材米糠、 穀殼，前期堆肥依所 需之容量配比(6：3： 2：1)相混合	進行好氧堆肥化試驗。試驗結果落葉堆肥化可在 25 天內完成。

表 2-11 國內相關庭園廢棄物之研究(續)

作者、年代	材料混合比	堆肥方式與研究結果
張定生 ^[73] 2003	混合樹枝葉及禽畜糞	樹枝葉先粉碎後再假堆三個月，混合禽畜糞以抽氣式堆肥箱醱酵處理。試驗結果混合之禽畜糞較單一之禽或畜糞反應為佳，樹枝葉比例過高會使反應速率下降。
賀偉雄 ^[61] 2004	混合草、葉及生廚餘	採野積堆肥方式，升溫快速約 1.5~2 個月可完熟。

目前在我國有機廢棄物資源堆肥化處理，以廚餘再利用有較高成效，於 101 年整體廚餘堆肥化再利用量為 243,840 公噸，佔總體廚餘回收量之再利用率為 29.2%，而在庭園廢棄物再利用部分僅有大型枯枝回收作為廚餘堆肥的副資材，僅有少數的學校及社區有回收此類廢棄物堆肥化再利用，及學術性研究外，此類廢棄物再利用甚少。依據環保署 102 年環保統計年報顯示^[2]我國 92 至 101 年經焚化處理木竹、稻草、落葉庭園廢棄物統計如表 2-12 所示，以 101 年為例約佔可燃物組成 1.5%如表 2-13，101 年焚化處理量 6,404,987.5 公噸計，該類約有 93,512.8 公噸經焚化處理，相對若以每噸廢棄物所需清運處理費用 2,500 元計則需花費每年約 233,782,000 元，而這些焚化處理數據僅是官方可查之統計資料，其他未經處理數量相信遠比表

列更多。故若能轉為堆肥化處理著實可省下一筆為數可觀處理費用，又能降低焚化廠處理負擔，及達到減碳、減廢、資源再利用等環境營造目的。

表 2-12 我國 92-101 年木竹、稻草、落葉類經焚化處理量^[2]

年度/量	焚化(處理)量 (公噸)	木竹、稻草、 落葉類比例%	木竹、稻草、 落葉類量(公噸)
92	5,470,736.0	3.9	212,264.6
93	5,611,504.8	4.9	275,524.9
94	5,614,930.1	1.9	108,368.2
95	5,683,032.8	1.7	98,884.8
96	5,948,764.7	1.8	108,862.4
97	6,110,838.0	2.0	121,605.7
98	6,092,928.6	1.8	107,235.5
99	6,235,389.7	1.7	108,495.8
100	6,355,422.1	1.4	88,340.4
101	6,404,987.5	1.5	93,512.8

表 2-13 我國 101 年垃圾組成百分比^[2]

物理組成	項目	百分比(%)
可燃物	紙類	38.9
	廚餘類	38.3
	塑膠類	15.6
	纖維布類	2.5
	皮革橡膠類	0.2
	木竹、稻草、落葉類	1.5
	其他可燃物類	0.5
不可燃物	鐵金屬類	0.3
	非鐵金屬類	0.2
	玻璃類	1.3
	其他不可燃物類	0.8



第三章 研究方法與實驗設備材料

3-1 研究架構

本研究以好氧堆肥方式處理庭園落葉、草屑及咖啡渣等有機廢棄物，其中庭園落葉來自台灣南部某科技大學種植之植物落葉，草屑來源為附近社區公園收割之草屑、咖啡渣來源則為超商及咖啡飲品連鎖店之濾渣。於堆肥化過程中，藉觀察堆肥材料外觀及堆肥材料之物理化學性質變化，評估堆肥化之最適操作條件。本研究的架構如圖 3-1 所示。



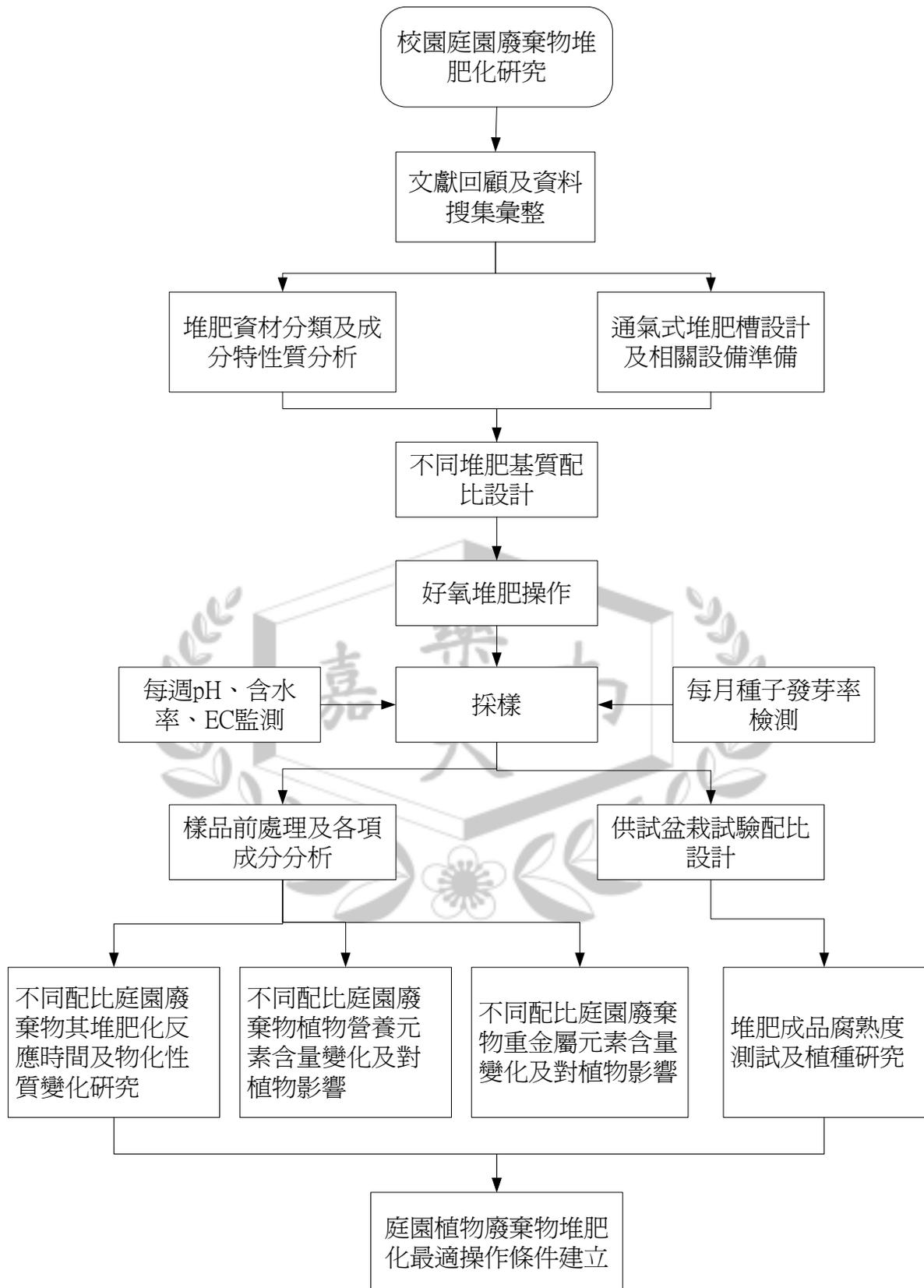


圖 3-1 校園庭園廢棄物堆肥化之研究架構

根據堆肥材料的物化性質分析，作為材料配比設計依據，並參考國內外庭園廢棄物以好氧堆肥之相關研究，進行堆肥材料配比、好氧堆肥槽設計。

堆肥化過程中，為了維持微生物生長條件，每週針對溫度、水分、導電度(EC)及 pH 值進行必要監測及分析。最後，根據實驗結果，進行以下項目的討論：

- 1.依據溫度、pH 值及堆肥前後材料性質變化，探討庭園廢棄物好氧堆肥化最適操作條件。
- 2.利用好氧堆肥化處理後的堆肥材料外觀、物理化學性質變化，以雜項堆肥品目之規範為參考依據，進行堆肥化結果之綜合探討。
- 3.依據堆肥材料重量及體積變化、營養元素(有機質、氮、磷、鉀、鈣等)含量變化及重金屬(砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛及鋅)含量變化，評估產品對植物生長之影響。

3-2 堆肥材料與實驗設備

3-2-1 堆肥材料分析

本研究的堆肥資材來自校園及社區公園易取得包含庭園落葉、草屑及咖啡渣，針對使用的堆肥材料的性質、配比及實驗參數作以下分析及設計，表 3-1 為堆肥材料成份特性分析。

根據表 3-1 所示可觀察到庭園落葉、草屑及咖啡渣三種基質是具備高有機質廢棄物特性，適合好氧堆肥化再利用，然其三者之 C/N 介於 25.4~29.1，並未達到文獻所提理想的碳氮比的範圍，因此需作適當配比調整。

在營養元素部份，TN 的含量介於 0.8%~2.1%，可見草屑及咖啡渣之氮含量相較於庭園落葉具備有高氮含量可作為氮源補注之材料，也是碳氮比調整的有利基質。 P_2O_5 的含量介於 0.2%~0.4%、 K_2O 的含量介於 0.3%~0.5%， P_2O_5 及 K_2O 的部份三者差異性不大，其他營養元素部分草屑中之磷、鉀、及鈣都略高其他二者，另外，在鐵及錳含量則以庭園落葉最高。在重金屬部份，庭園落葉含量也都略高其他二者。



表 3-1 堆肥材料成份特性分析表

材料名稱 分析項目	庭園落葉		草屑		咖啡渣	
	Garden tree leaves		Grass Clippings		Coffee grounds	
	content		content		content	
Ec(ms/cm)	2.4		5.7		1.2	
pH	7.3		6.8		5.9	
比重	0.1		0.1		0.5	
水分(%)	38.6		59.5		60.9	
灰分(%)	32.3		6.4		2.3	
有機質(%)	67.7		93.6		97.7	
有機碳(%)	22.6		38.9		57.7	
TN(%)	0.8		1.5		2.1	
碳氮比(C/N)	29.1		25.4		28.0	
P ₂ O ₅ (%)	0.2		0.4		0.3	
K ₂ O (%)	0.3		0.5		0.3	
分析項目	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a
磷 P (mg/kg)	832.6	0.1	1621.9	0.1	1324.7	0.3
鉀 K (mg/kg)	2320.8	1.0	4268.3	1.0	2125.3	0.1
砷 As (mg/kg)	0.8	10.6	0.1	10.5	ND	-
鎘 Cd (mg/kg)	0.2	0.8	0.1	0.4	ND	-
鉻 Cr (mg/kg)	90.4	0.7	23.0	0.4	0.1	15.5
銅 Cu (mg/kg)	11.8	0.5	5.8	0.4	16.7	0.4
汞 Hg (mg/kg)	ND	-	ND	-	ND	-
鎳 Ni (mg/kg)	13.5	0.3	5.4	0.5	0.5	0.7

ND：表示低於偵測極限值， a 為 R.S.D.相對標準偏差(%)。

表 3-1 堆肥材料成份特性分析表(續)

材料名稱 分析項目	庭園落葉		草屑		咖啡渣	
	Garden tree leaves		Grass Clippings		Coffee grounds	
	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a
鉛 Pb (mg/kg)	8.0	0.6	0.9	3.5	0.1	6.9
鋅 Zn (mg/kg)	64.3	0.3	36.5	0.5	7.4	0.2
鈣 Ca (mg/kg)	24483.0	0.2	4077.4	0.6	1386.1	1.1
鐵 Fe (mg/kg)	5678.3	0.1	314.3	0.3	34.2	0.5
錳 Mn (mg/kg)	113.1	0.4	41.9	0.01	33.3	0.3

ND：表示低於偵測極限值，a 為 R.S.D.相對標準偏差(%)。

3-2-2 實驗設備

觀察大部分學校及社區公園通常具有大量植栽落葉之特性，故本研究利用好氧堆肥化反應原理，參考文獻中木頭和固定線圈三箱堆肥系統，採用自然戶外堆置方式設置通氣式堆肥反應槽進行庭園廢棄物好氧堆肥化之研究。實驗設備設計尺寸圖及實體槽體外觀如圖 3-2 所示，相關所用設備分述如下：

- 1.通氣式堆肥槽：木質自然通風式堆肥槽 1 座(以廢棄木材建置)，總尺寸大小 2.8m (W) × 1.2m (L) × 1.5m (H)，計分為 4 槽堆肥實驗槽，每槽尺寸大小為 0.7m (W) × 1.2m (L) × 1.5m (H)。
- 2.堆肥操作設施：溫度監測用溫度計 1 支、磅秤 1 座、採樣用鏟子 1 支、翻堆用鏟子 1 支、灑水設施 1 組等。

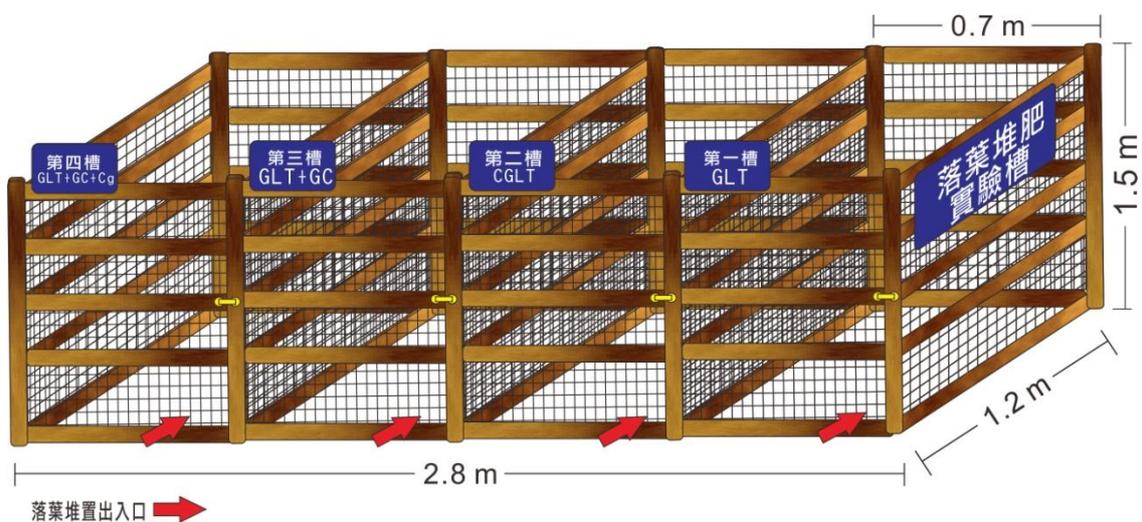


圖 3-2 通氣式堆肥槽尺寸圖(上)及實體外觀圖(下)

3-3 實驗設計

本研究的實驗設計分為兩個部份，第一部份為基質配比設計，主要目的透過堆肥基質的適量配比混合達到理想的初始碳氮比，以利好氧堆肥的進行。第二部份為瞭解混合不同基質實驗參數設計，透過操作因子來探討對堆肥材料特性之影響。

3-3-1 好氧堆肥材料配比設計與操作

1.好氧堆肥材料配比設計

本研究設計有四槽作為對照實驗組，第一槽為不分類之落葉 Garden tree leaves 為對照組(簡稱 GLT)(包含大葉楠 *Machilus kusanoi*、羊蹄甲 *Bauhinia variegata*、台灣欒樹 *Koelreuteria elegans*、菩提樹 *Ficus religiosa* 及鳳凰木 *Delonix regia* 等)，第二槽為具有革質之落葉 Coriaceous Garden tree leaves (簡稱 CGTL) (以榕樹 *Ficus microcarpa*、變葉木 *Codiaeum variegatum*、印度橡膠樹 *Ficus elastica* 等為主)，第三槽則混合落葉 Garden tree leaves 及草屑 Grass Clippings(簡稱 GLT+GC)(草屑包含百慕達草 *Cynodon dactylon*、巴西地毯草 *Axonopus compressus*、假儉草 *Eremochloa ophiuroides* 等為主)，第四槽則混合落葉 Garden tree leaves、草屑 Grass Clippings 及咖啡渣 Coffee grounds(簡稱 GLT+GC+Cg)(咖啡渣為連鎖咖啡店及超商販售咖啡濾渣)。

經由表 3-1 得知庭園落葉、草屑及咖啡渣三種基質之 C/N 介於 25.4~29.1，則利用氮含量較高的草屑及咖啡渣，將碳氮比調整至被認為是理想堆肥的初始 C/N 比值 25~30 為設計基準，以作為第三槽及第四槽混合基質進料條件，各堆肥槽基質進料配比如表 3-2 所示，並對四堆肥槽之進料基質進行成份特性分析如表 3-3 所示。四試驗 P_2O_5 含量介於 0.3~0.4%； K_2O 含量介於 0.2~0.5%，重金屬含量第一槽 GLT 以鋅(Zn)含量最多(77.0 mg/kg)，第二

槽 CGLT 以鉻(Cr)含量最多(124.6 mg/kg) ,第三槽 GLT+GC 以鉻(Cr)含量最多(263.9 mg/kg) , 第四槽 GLT+GC+Cg 以鉻(Cr)含量最多(88.7 mg/kg)。

2.堆肥槽操作

- (1) 翻堆方式及頻率：以翻堆用鏟子採人工方式操作，1 次/2 週(並以溫度為翻堆頻率為調整依據)。
- (2) 灑水頻率：1~2 次/每週(水分以 50%~60%為基準)，雨天不灑水。



表 3-2 各堆肥槽基質進料配比

項目	第一槽	第二槽	第三槽		第四槽		
	GLT	CGTL	GLT+GC		GLT+GC+Cg		
			GLT	GC	GLT	GC	Cg
進料重量(kg)	120.3	131.3	65.2	71.6	39.2	45.6	43.3
進料重量比例%	100.0	100.0	47.7	52.3	30.6	35.6	33.8
進料重量比	-	-	1 : 1.1		1 : 1.2 : 1.1		
進料體積(m ³)	0.9	1.0	0.4	0.8	0.3	0.3	0.3
進料體積比	-	-	1 : 2		1 : 1 : 1		
碳氮比(C/N)	11.1	34.1	24.3		21.9		

表 3-3 各槽之進料基質成份特性分析

材料名稱 分析項目	第一槽		第二槽		第三槽		第四槽	
	GLT		CGTL		GLT+GC		GLT+GC+Cg	
	content		content		content		content	
Ec(ms/cm)	2.4		2.1		4.9		2.3	
pH	6.6		6.7		7.1		7.0	
比重	0.1		0.1		03		0.2	
水分(%)	53.9		42.2		75.5		64.5	
灰分(%)	35.2		25.2		39.9		16.1	
有機質(%)	64.8		74.8		60.1		83.9	
有機碳(%)	15.4		40.9		41.6		52.6	
TN(%)	1.4		1.2		1.7		2.4	
碳氮比(C/N)	11.1		34.1		24.3		21.9	
P ₂ O ₅ (%)	0.3		0.3		0.4		0.3	
K ₂ O (%)	0.3		0.2		0.5		0.2	
分析項目	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a
磷 P (mg/kg)	1468.2	0.3	1154.2	0.3	1674.0	0.4	1248.7	0.2
鉀 K (mg/kg)	2539.2	1.5	1702.2	0.5	3864.0	1.1	1994.6	2.2
砷 As (mg/kg)	0.7	4.6	0.5	8.3	1.0	4.7	0.2	1.0
鎘 Cd (mg/kg)	0.2	0.4	0.1	1.2	0.3	0.5	0.1	0.9
鉻 Cr (mg/kg)	62.3	1.3	124.6	0.8	263.9	0.3	88.7	0.9
銅 Cu (mg/kg)	16.4	0.9	10.4	0.5	18.6	0.5	17.7	0.8
汞 Hg (mg/kg)	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-
鎳 Ni (mg/kg)	11.7	0.4	19.5	0.1	35.8	0.4	14.8	0.2
鉛 Pb (mg/kg)	6.5	0.1	5.3	0.4	9.2	0.5	5.6	0.3

ND：表示低於偵測極限值，a 為 R.S.D.相對標準偏差(%)。

表 3-3 各槽之進料基質成份特性分析(續)

材料名稱 分析項目	第一槽		第二槽		第三槽		第四槽	
	GLT		CGTL		GLT+GC		GLT+GC+Cg	
	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a	content	R.S.D. ^a
鋅 Zn (mg/kg)	77.0	0.3	52.1	0.1	102.0	0.3	76.5	0.3
鈣 Ca (mg/kg)	32361.8	1.0	31447	1.2	17708.3	0.9	16741.9	0.6
鐵 Fe (mg/kg)	3894.3	1.1	3458.5	0.5	12080.3	0.3	3360.9	1.0
錳 Mn (mg/kg)	87.2	0.4	73.5	0.4	160.8	0.3	76.9	0.8

ND：表示低於偵測極限值， a 為 R.S.D.相對標準偏差(%)。

3-3-2 盆栽植種配比設計

為瞭解堆肥成品實際用於植種效益，本研究針對四槽最終堆肥成品以不結球白菜(別稱小白菜 Pak-choi)(學名:Brassica chinensis Linn.)為指標作物進行實際盆栽試驗，並分別於 9、18、27 日量測其不結球白菜株生長之根長、地上部長及整株體重量作為對照，各供試堆肥與土壤配比如表 3-4 所示：

表 3-4 各槽堆肥成品與土壤進料配比及植珠數

試驗項目	第一槽		第二槽		第三槽		第四槽		對照組
(A)	GLT		CGTL		GLT+GC		GLT+GC+Cg		CK
進料重量(g)	1210.0		1109.0		1165.0		1119.4		
植株數	5		5		5		5		
試驗項目	第一槽		第二槽		第三槽		第四槽		對照組
(B)	GLT	土壤	CGTL	土壤	GLT+GC	土壤	GLT+GC+Cg	土壤	土壤
進料重量(g)	2504.2	2503.1	2503.6	2503.8	2502.9	2504.2	2503.7	2503.5	6583.2
進料重量比	1 : 1		1 : 1		1 : 1		1 : 1		-
植株數	12		12		12		12		12

CK：表示僅有土壤之對照組。

3-4 實驗方法與步驟

3-4-1 採樣方法

1.採樣方法：依據環保署環境檢驗所 NIEA R124.00C 「一般廢棄物(垃圾)採樣方法」，由每堆肥槽肥堆之四角落及中央處取得初步樣品各 1 kg，再以人工方式進行四分法再次拌混縮分後，取得最終樣品約 1 kg 放入採樣袋密封並立即攜回實驗室。因樣品為有機物，如未能立刻乾燥者，於 4±2℃ 冷藏下可保存 24 小時；經乾燥之樣品，得保存 60 天。

2.檢測分析項目、實驗設備及方法，如表 3-5 所示：

表 3-5 檢測分析項目、實驗設備及方法

分析項目	儀器設備	分析方法及編號
水分	循環式烘箱	環保署環境檢驗所 NIEA R213.20C
酸鹼值 pH	pH 計	環保署環境檢驗所 NIEA S410.62C
導電度 EC	導電度計	環保署環境檢驗所 NIEA W203.51B
有機質	高溫爐	標準檢驗局肥料檢驗法 CNS 13027 N4149
總有機碳	高溫爐	Walkley-Black 濕氧化法 (Nelson and Sommers,1982)
總氮 TN	凱氏氮分析儀	標準檢驗局肥料檢驗法 CNS 8449
磷	微波硝化器、感應	
鉀	耦合電漿放射光	Nookabkaew, S., N. Rangkadilok and J.
微量元素及 重金屬	譜分析儀 ICP- OES	Satayavivad, 2006

3.分析項目與頻率：

(1)監測項目及頻率：

①溫度：每週監測一次(以測定堆肥堆中心點為原則)。

② pH 值：每週監測一次。

(2)採樣分析頻率：由前進料開始 1 次/週(每次採堆肥堆中心及四周計 5 點，合計約 1 公斤重一包為基準)。

(3)樣品分析項目：

①植物必需營養元素分析：總有機碳(TOC)、總氮(TN)、有機質、全磷酐(P_2O_5)、全氧化鉀(K_2O)。

②化學性分析：碳氮比(C/N)、水份、比重、灰分。

③植物微量營養元素分析：鉀(K)、鈣(Ca)、磷(P)、鐵(Fe)、錳(Mn)、銅(Cu)、鋅(Zn)、鎳(Ni)。

④重金屬分析：砷(As)、鎘(Cd)、鉻(Cr)、銅(Cu)、汞(Hg)、鎳(Ni)、鉛(Pb)、鋅(Zn)。

(6)種子發芽率試驗：以各槽每月及最終堆肥成品分別作種子發芽率及發芽指數試驗，以比較不同腐熟時間對不結球白菜種子發芽情況。

(7)盆栽試驗：以各槽最終堆肥成品分別與土壤進行配比，以不結球白菜(別稱小白菜 Pak-choi)(學名:Brassica chinensis Linn.)實際種植比較各槽作物之生長狀況。

3-4-2 分析方法

1.分析項目：溫度測定

設備廠牌及型號：埋入型金屬溫度指針(MARK)。

使用埋入型金屬溫度指針測量堆肥溫度，溫度探棒材質為不銹鋼，長度為 1.2 公尺(有助於將探針插入堆肥中測量溫度)，溫度量測範圍為-50~200 °C，靈敏度為±0.1°C。在堆肥化過程中，每週監測肥堆的溫度變化，溫度量測時，將溫度探棒插入肥堆中心點，在插入堆肥時，應盡量放慢速度，使堆肥有足夠的時間將實際溫度透過探棒傳導至錶面，以測得真實之堆肥溫度，為該次測量之紀錄值。

2.分析項目：pH 值

設備廠牌及型號：pH 計(HACH Senlon MM34 pH Electode 5014)。

參考方法：NIEA S410.62C。

取 20.0±0.2g 堆肥樣品置於燒杯中，加入去離子水 100ml(樣品與水的比例為 1：5)，並以攪拌棒攪拌 1 分鐘，然後靜置至少 30 分鐘使其充分反應，以 pH 計測定樣本溶液之 pH 值。

3.分析項目：含水率

設備廠牌及型號：熱風循環式烘箱(KEC CDV-9)。

參考方法：NIEA S280.61C。

秤取 100.0±0.2 g (W1)樣品，置入熱風循環式烘箱中，在烘箱內以 105±5 °C 之溫度烘乾至恆重後，秤得其堆肥乾基重量(W2)，再計算出堆肥樣品之含水率。其計算式如下：

$$\text{含水率(\%)} = \frac{W1-W2}{W1} \times 100\%$$

4.分析項目：導電度(EC)

設備廠牌及型號：導電度計(HACH Senlon MM34 Conductivity 5070 Metter)。

參考方法：NIEA W203.51B。

秤取堆肥樣品 20.0±0.2 g 置於燒杯中，加入 100 mL 之去離子水(1:5)，攪拌均勻後放入超音波震盪槽震盪 30 分鐘，完成後取出過濾將所得之濾液，使用導電度計進行測定再將其數值紀錄之。

5.分析項目：灰分測定

設備廠牌及型號：可程控式高溫爐(Cheng Sang CMF-40)。

(1)新的磁坩堝在使用前至少要在 600°C 燒 1 小時。

(2)將磁坩堝洗淨放在 105°C 烘乾一小時，取出放入乾燥器，恢復至室溫後秤重。

(3)加入 2-5 g 之樣品，移入高溫爐。

(4)逐漸加溫至 600 ± 15°C，燃燒 4-6 小時。

(5)關閉電源，待溫度稍降至 150-200℃，將坩堝取出放入乾燥器，恢復至室溫。

(6)重覆加熱，並秤量至恆重，殘留部份即為風乾物之灰分含量。

$$\text{粗灰分(\%)} = \frac{\text{殘留物重(g)}}{\text{試樣重(g)}} \times 100\%$$

6.分析項目：有機質

設備廠牌及型號：可程控式高溫爐(Cheng Sang CMF-40)。

參考方法：CNS 13027 N4149。

秤取約 2g (S1)於陶磁坩堝(經 550~600℃灼熱過)，再置入可程控式高溫爐以 550~600℃加熱灰化 4 小時後，待溫度回復至室溫，取出秤重並將所得數值紀錄之(S2)。

使用可程控式高溫爐分析步驟：

(1)測試前將附有蓋子之坩鍋洗淨後，置於高溫爐中，以 1200℃空燒 30 分鐘。

(2)空燒後降低爐溫至 300℃時，將坩鍋移至乾燥器冷卻備用，使用前稱重。

(3)稱取適量之經粉碎後樣品(粒徑 1 mm 以下，精稱至 0.001g)約 5~10g (W1)

置於上述已秤重之坩鍋，先以 105±5℃之溫度預熱 30 分鐘，再將溫度調至 550±50 °C 燃燒 4 小時。

(4)降低爐溫至 300℃時，將坩鍋及樣品移入乾燥器中冷卻至室溫，以分析天秤秤得其重量(W2)。再計算出堆肥樣品之有機質。

計算式如下：

$$\text{有機質含量(\%)} = (1 - (100 \times S2) / (S1 \times (100 - \text{水分含量})) \times 100 \text{ (乾基)}$$

7.分析項目：總氮(TN)

設備廠牌及型號：凱式氮分析儀(Vapodest 45s)。

參考方法：標準檢驗局肥料檢驗法 CNS 8449。

(1)前處理：

- ①取 0.3 g 堆肥樣品至分解管加 2 粒沸石。
- ②添加 5 ml 硫酸，放至隔夜。
- ③先以低溫(100-200℃)燒 2-4 小時。
- ④取出放冷，觀察樣品是否燒至透明，若無，加入雙氧水(H₂O₂) 2~5 ml。
- ⑤再以 385℃ 燒至透明。
- ⑥透明後，將樣品定量至 50 ml。
- ⑦混勻後取 5 ml 樣品做 TN 的蒸餾。

(2)分析步驟：

- ①取適當樣品於分解管中+【80 ml 蒸餾水+ 20ml NaOH】放入蒸餾。
- ②另外以三角瓶加入 10 ml 2%硼酸吸收液，開始蒸餾三角瓶約 100 ml 即可。

③以 0.02N 硫酸滴定溶液滴定，並記錄 A。

④空白值以空的分解管+【80 ml 蒸餾水+ 20ml NaOH】放入蒸餾。

⑤另外以三角瓶加入 10 ml 2% 硼酸吸收液，開始蒸餾三角瓶約 100 ml 即可。

⑥以 0.02N 硫酸滴定溶液滴定，並記錄 B。

$$\text{計算公式：TN}=(A-B)\times 0.02\times 14.01\times 50/5\times 1/0.3\div 10\%$$

8.分析項目：總有機碳(TOC)

設備廠牌及型號：加熱板(NEWLAB HP-303D)。

參考文獻：Walkley-Black 濕氧化法 (Nelson and Sommers,1982)^[74]。

(1)分析步驟：

①精秤 0.02g 至 0.03g 樣品(Wsa)於 250ml 三角燒瓶中，加入 10.0ml 1N $K_2Cr_2O_7$ 溶液，靜置 20 至 30 分鐘後輕搖使有機肥分散。

②快速加入 20ml 濃硫酸後，置於已經預熱 90°C 之加熱板上或水浴中 30 分鐘，取出冷置室溫。

③加入 150ml 去離子水，冷卻後加入 2 至 3 滴顯色劑(0.025 M o-phenanthroline-Fe-complex)後，置於滴定架上，放入磁棒並穩定轉動同時以 0.5N $FeSO_4$ 溶液滴定至暗紫綠色。假設滴定體積為(Vsa)。

④做三個空白組，其步驟同上①至③，唯不加樣品，假設其滴定體積之平均值為(Vst)。

(2)計算：

標定 FeSO_4 濃度 $C_{\text{fe}} = 10 / V_{\text{st}}$

有機碳(%)= $(C_{\text{fe}} \times (V_{\text{st}} - V_{\text{sa}}) \times 0.003 \times 100) / W_{\text{sa}}$

9.分析項目：重金屬與微量營養元素

設備廠牌及型號：熱風循環式烘箱(KEC CDV-90)、加熱板(NEULAB HP-303D)、微波硝化器(MILESTONE MICROWAVE START D)、感應耦合電漿放射光譜分析儀 ICP-OES (Perkin Elmer Optima 2000)。

參考文獻：Nookabkaew, S., N. Rangkadilok, et al., 2006^[75]。

(1)前處理：

①樣品先置於 60°C 熱風循環式烘箱 48 小時烘乾後，再以研磨機研磨成粉狀後，並經 16 毫米篩網過篩取得樣品粉體。

②精秤樣品粉體 0.25g 於硝化瓶，分別加入 8ml 65% HNO_3 (Merck)及 2ml H_2O_2 (Merck)，等待數分鐘使消化管內氣泡作用不再明顯後，置入微波硝化器進行硝化，硝化功率設定為 1000 W、1000 W、1000 W 三個階段，硝化時間分別各為 10、10、30 分鐘於 100°C 、 190°C 、 190°C 微波硝化器進行去除有機質。

③經硝化後之樣品，置於加熱板蒸煮乾後，再以加入 12.25ml 0.3N HNO_3 稀釋，並經 $0.45\mu\text{m}$ 濾膜過濾取其過濾液，此樣品即為經稀釋 50 倍之供試水樣。

④再取前經稀釋 50 倍之供試水樣 0.5 ml，加入 10 ml 0.3N HNO₃ 稀釋，此樣品即為經稀釋 1000 倍之供試水樣。

(2)分析：

感應耦合電漿放射光譜分析儀 ICP-OES 係利用高頻電磁感應產生的高溫氬氣電漿，使導入電漿中的樣品受熱而起一系列的去溶劑、分解、原子化/離子化及激發等反應。其分析之依據，係利用被激發的待分析元素之原子/離子所發射出的光譜線，經由光譜儀的分光及偵測，即可進行元素之定性及定量。

取經前處理之供試水樣以感應耦合電漿放射光譜分析儀 ICP-OES 進行重金屬砷(As)、鎘(Cd)、鉻(Cr)、銅(Cu)、汞(Hg)、鎳(Ni)、鉛(Pb)、鋅(Zn)及微量營養元素鉀磷(P)、鉀(K)、鈣(Ca)、鐵(Fe)、錳(Mn)等成分分析。

10.分析項目：種子發芽率(G)及種子發芽指數試驗(GI)

設備廠牌及型號：植物低溫恆溫培養箱(Cheng Sang CRI-45)。

參考文獻：賀，2004^[61]。

①秤取堆肥樣品 5g 與 100g 60°C 溫水共混，放在 60°C 溫浴中保溫三小時後，並過濾取得濾液供試。

②再取濾紙兩張置於 10cm 培養皿，濾紙上約等距離放入 40 粒供試不結球白菜籽。

③將已播種之培養皿移入 25°C 植物低溫恆溫培養箱中培養三天，然後取出記錄正常發芽之種子數。再用尺概略量取每粒正常發芽之根長。

④發芽試驗設有對照組，以去離水($\geq 18\Omega\text{M}$)為對照溶液，重複上述步驟①至③操作。

⑤每月試驗一組，觀察發芽狀況並紀錄其發芽根長。

11.分析項目：供試盆栽試驗

供試作物：不結球白菜(別稱小白菜 Pak-choi)(學名: *Brassica chinensis* Linn.) (台農 2 號)。

為觀察堆肥成品實際用於植種效益及生長情形，以不結球白菜為指標作物進行盆栽試驗。

(1)盆栽及堆肥土壤配比試驗：

①圓柱型塑膠盆栽容器 4 只，每只尺寸大小半徑 0.162m、高 0.182m，每盆栽容器裝加入各堆肥槽堆肥成品量如表 3-3 所示之試驗項目(A)，各種植已先育苗三天之不結球白菜 5 株。

②長方型塑膠盆栽容器 5 只，每只尺寸大小 0.175m (W) × 0.46m (L) × 0.16m (H)，每盆栽容器裝加入各堆肥槽堆肥成品量及土壤量混合配比如表 3-3 所示之試驗項目(B)，各種植已先育苗三天之不結球白菜 12 株。

(2)供試作物生長紀錄：

分別於 9、18、27 日紀錄各試驗盆栽內之供試作物生長情況(包含根長、地上部長、整株體重量)。



第四章 結果與討論

本章藉觀察庭園廢棄物好氧堆肥過程之時間、溫度、pH 及 EC 的變化，評估混合不同基質四堆肥槽 GLT、CGTL、GLT+GC 及 GLT+GC+Cg 進行好氧堆肥化的差異。同時分析不同堆肥時間各槽產品有機質、總有機碳、總氮、碳氮比、植物營養元素及重金屬元素含量分布狀況，並探討經好氧堆肥化後產品是否適合作物生長利用。

4-1 堆肥化過程之肥堆特性監測

4-1-1 溫度變化

溫度是堆肥化過程中影響微生物活動最重要的參數之一，其會影響微生物生長速率、繁殖方式、形態、代謝反應、甚至營養需求。在堆肥化過程中，溫度變化是很容易觀察的性狀之一，一般都以此作為操作指標；堆肥過程溫度的上升可代表微生物具有旺盛的分解活動，維持堆肥高溫則有助於降低臭味產生，也有助於加速纖維素分解。反應溫度上升即代表微生物旺盛的分解作用，由於反應過程中同時進行翻堆作用，翻堆反應物料可增加孔隙度及氧氣傳遞，使好氧性微生物活性提升。以熱力學理論基礎而言，溫度越高其反應速率亦越高。本研究堆肥化過程各階段溫度變化如圖 4-1 及表 4-1 所示。

如圖 4-1 中所示，於堆肥化過程環境戶外溫度平均約在 25.9~36.9℃，而觀察各堆槽溫度變化結果：發現在第一槽 GLT 試驗中，堆肥初期升溫穩

定，堆肥溫度於第 14 天達到 40°C 以上(45.2°C，為該槽最高溫度)，已進入到高溫嗜熱期反應(45°C 以上)，但高溫階段僅持續約 1 週即緩步回溫至中溫階段(15~45°C)，來到第 91 天又有第二次接近高溫現象(二次發酵)發生 39.2~40.3°C，研判為翻堆過程堆體充分混合及空氣補注，再度提升微生物活性導致，最後降溫期堆肥溫度回復至接近環境戶外溫度約 32.3°C 左右。

在第二槽 CGTL 試驗中，因所進料之基質為具有革質之落葉，其葉片豐厚硬挺猶如皮革般具粗纖維，在未切碎細小化情況下，其分解速率有別於一般落葉，發現堆肥溫度都呈現在 30~37°C 平穩發展，堆肥溫度於第 70 天才達到 40°C 以上(41.6°C，為該槽最高溫度)，但並未達到高溫嗜熱期反應(45°C 以上)，最後降溫期堆肥溫度回復至接近環境戶外溫度約 34.1°C 左右。

在第三槽 GLT+GC 試驗中，因所進料之基質添加具有氮含量較高之草屑，微生物生長較快，其分解速率較快，導致進入嗜熱期的時間縮短。堆肥溫度於第 7 天就達到 40°C 以上(47.5°C)，發酵過程中高溫期共計約有 14 天(最高溫度 49.0°C)，最後降溫期堆肥溫度回復至接近環境戶外溫度約 32.2°C 左右。

在第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中，因所進料之基質同樣具有氮含量較高之草屑及咖啡渣，微生物生長較快，其分解速率較快，進入嗜熱期的時間縮短。堆肥溫度於第 7 天就達到 40°C 以上(45.1°C)，達到高溫嗜熱期反應(45

°C以上)，醱酵過程中高溫期共計約有 21 天(最高溫度 53.0°C)，最後降溫期堆肥溫度回復至接近環境戶外溫度約 34.1°C 左右。

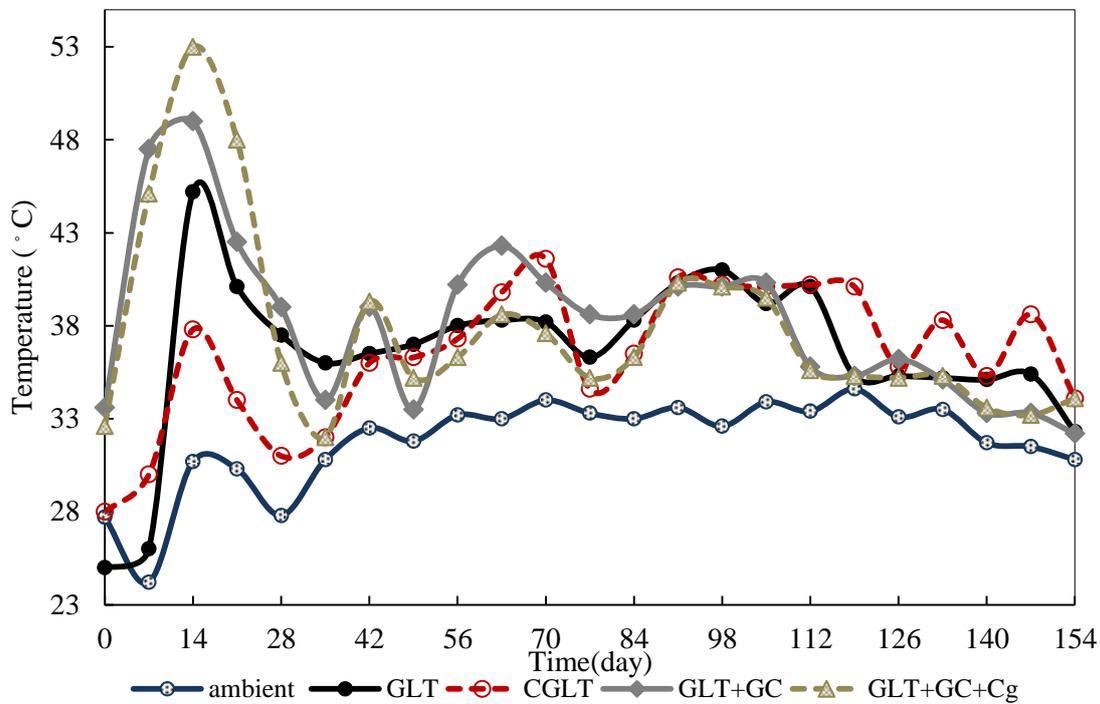


圖 4-1 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之溫度變化

影響到達嗜熱期天數長短的主要因素，為材料中的可利用碳源及氮源比例，其中碳源作為微生物生長的能量來源，氮源作為產生新的微生物細胞。原則上，高碳氮比的堆肥條件，微生物初始生長較慢，因為微生物雖有足夠的碳源作為生長能量，但是缺乏足夠的氮源合成新的細胞。反之，在低碳氮比的條件下，因微生物生長較快，導致進入嗜熱期的時間縮短。

由於本研究所進料之落葉基質，因其有機碳含量較高，從 GLT 與 CGLT 試驗中在氮源不足之條件下其微生物生長較趨為緩慢，對應進入高溫期反應不若於 GLT+GC 與 GLT+GC+Cg 試驗中來得快與高溫時間持久，故以落

葉為基質堆肥化可適時添加高氮含量資材，以調整初始碳氮比促使堆肥反應有利啓動。

再依據圖 4-1 溫度變化曲線可觀察 GLT+GC 與 GLT+GC+Cg 試驗於 112 天已貼近環境溫度並呈現穩定變化，而 GLT 試驗則於 119 天貼近環境溫度呈現穩定變化，故可推論四堆肥槽基質所需腐熟時間以 GLT+GC 與 GLT+GC+Cg 試驗最短，其次為 GLT 試驗，最後為 CGLT 試驗。

本研究主要都以植物性廢棄物為基質，屬高碳低氮源之特性，而且堆肥槽體是採露天方式操作其蓄熱能力較低且易受環境、季節、溫濕度與雨季等影響，高溫表現整體而言相較不顯著，故整體堆肥腐熟化所需時間花費較長。

表 4-1 四個試驗組堆肥化溫度變化

槽體類別	到達高溫嗜熱期 (45°C 以上)時間	最高溫度°C	最高溫度維持 日數
GLT	第 14 天	45.2	7
CGLT	-	41.6	-
GLT+GC	第 7 天	49.0	14
GLT+GC+Cg	第 7 天	53.0	21

4-1-2 pH 變化

好氧堆肥過程的 pH 變化，代表有機物分解狀況及氨氮的形成，pH 值的高低對微生物的生長有重要影響，pH 過高或過低都會影響到微生物的生

長，適宜的 pH 可使微生物有效地發揮作用。圖 4-2 及圖 4-3 分別為各試驗組好氧堆肥過程中 pH 每週及每月變化，整個好氧堆肥過程達 150 天，pH 值介於 6.6~8.0 之間彙整如表 4-2，發現堆體 pH 值呈先降後升的變化，這是由於堆肥初期微生物利用糖類、澱粉等物質分解生成小分子的有機酸，致使堆肥早期有明顯的酸化過程^[76]，故反應初期有機酸產生導致 pH 值下降，隨著堆肥的進行微生物開始分解蛋白質產生氨等鹼性物質，堆肥 pH 開始上升，堆肥過程中蛋白質降解產生的氨提高 pH 值，由圖 4-2 及圖 4-3 顯示 pH 呈現 2 個波峰變化，整體觀察第 1 波峰在第 30 天時，由於微生物利用有機物轉化成有機酸，使 pH 值分別由 7.1 下降至 6.9，第 2 波峰在第 90 天時由 7.9 下降至 7.3。於第 120 天時，可能因有機酸繼續分解成爲二氧化碳，及堆肥中的含氮物質轉化爲氨氮，使 pH 逐步上升至平均 7.9 左右偏弱鹼性，唯獨第三槽 GLT+GC 試驗 pH 無太大起伏變化。就整體 pH 變化仍符合多數文獻研究，微生物適宜在中性和弱鹼環境中生長，堆肥原料或發酵初期，pH 爲弱酸到中性，腐熟時呈中性或偏弱鹼性。

表 4-2 四個試驗組堆肥化 pH 變化

槽體類別	pH			變化率%	雜項堆肥規範 pH 5.0~9.0
	初始	最終堆肥 成品	變化值		
GLT	6.6	7.6	+1.0	+13.2	符合規範
CGLT	6.7	7.8	+1.1	+14.0	符合規範
GLT+GC	7.1	7.9	+0.8	+10.0	符合規範
GLT+GC+Cg	7.0	7.6	+0.6	+8.0	符合規範

註：雜項堆肥規範：指對最終堆肥成品之成分規範，其中正值代表增加，負值代表減少。

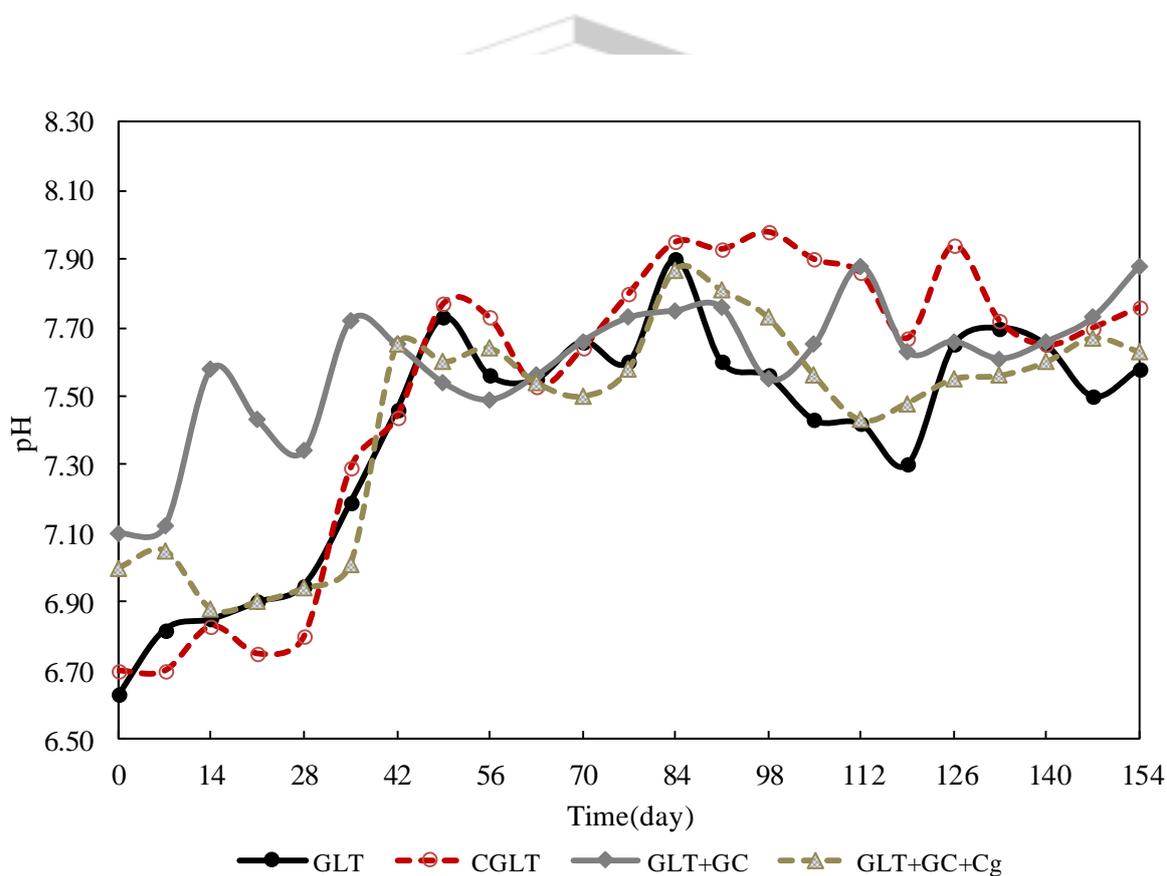


圖 4-2 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之 pH 每週變化

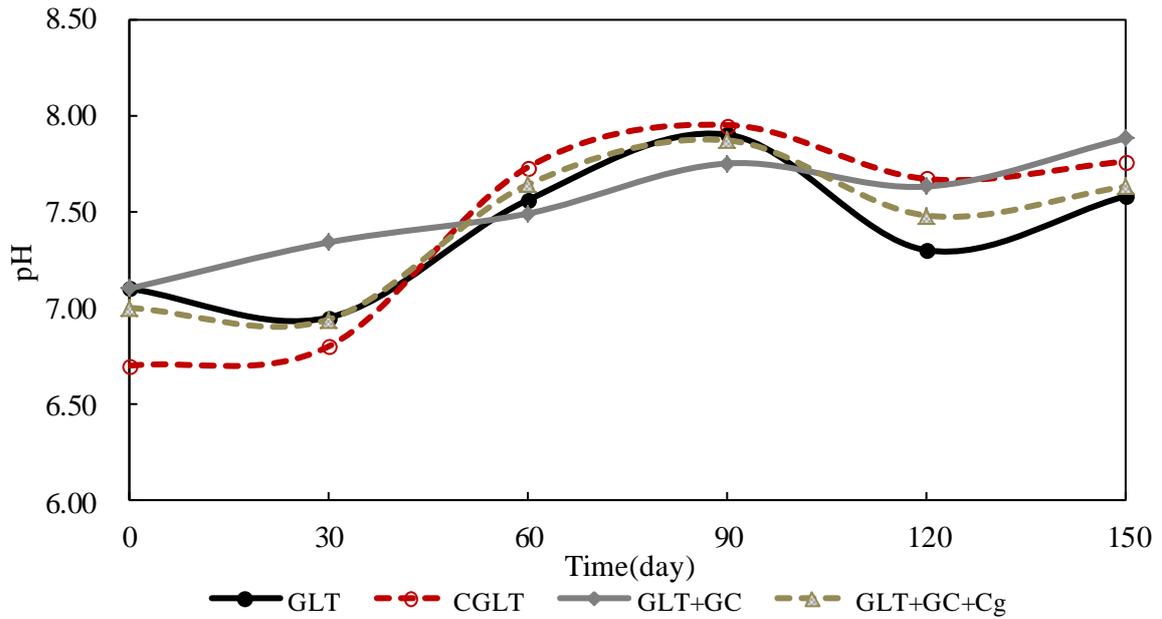


圖 4-3 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之 pH 每月變化

4-1-3 含水率(Moisture Content)變化

含水率於試驗初期為控制條件之一，因反應過程需靠微生物進行分解有機物，而水分是維持生物體生長與活動的重要因子，因此控制水分含量將可提高生物分解效率。反應過程水分除了由外在添加外，還包含微生物分解作用產生的水分，微生物活動時亦會產生熱，而水分的逸散會帶走熱量，故反應溫度的變動與水分有關。

反應初階段因微生物進行水解作用會產生大量水氣，除部分用於填補因溫度蒸發而散失之水分，此階段水分變化為上升的趨勢，並維持在 60% 左右波動，直至反應後期，因反應過程產生的熱蒸汽逐步帶走水分，隨著反應時間增加，四個試驗組含水率大約下降至 30~40% 左右。各試驗組堆肥

化之初始含水率介於 42.2~65.5%，之後，其間會受堆肥化升溫、翻堆與堆肥醱酵作用之關係而有所變化，各試驗組堆肥化過程之含水率變化詳如圖 4-4 所示，並整理如表 4-3。觀察試驗結果，第一槽 GLT 初始含水率約為 53.9%，最終堆肥成品含水率約為 39.2%，下降 14.7%(下降率 27.3%)；第二槽 CGLT 初始含水率約為 42.2%，最終堆肥成品含水率約為 40.0%，下降 2.2%(下降率 5.2%)；第三槽 GLT+GC 有添加草屑其水分較多：初始含水率約為 65.5%，最終堆肥成品含水率約為 38.6%，下降 26.9%(下降率 41.1%)；第四槽 GLT+GC+Cg 有添加草屑及咖啡渣其水分含量也偏多：初始含水率約為 64.5%，最終堆肥成品含水率約為 40.0%，下降 24.5%(下降率 38.0%)。

表 4-3 四個試驗組堆肥化含水率變化

槽體類別	含水率%			變化率%	雜項堆肥規範 含水率 <40.0%
	初始	最終堆肥 成品	變化值		
GLT	53.9	39.2	-14.7	-27.3	符合規範
CGLT	42.2	40.0	-2.2	-5.2	符合規範
GLT+GC	65.5	38.6	-26.9	-41.1	符合規範
GLT+GC+Cg	64.5	40.0	-24.5	-38.0	符合規範

註：雜項堆肥規範：指對最終堆肥成品之成分規範，其中正值代表增加，負值代表減少。

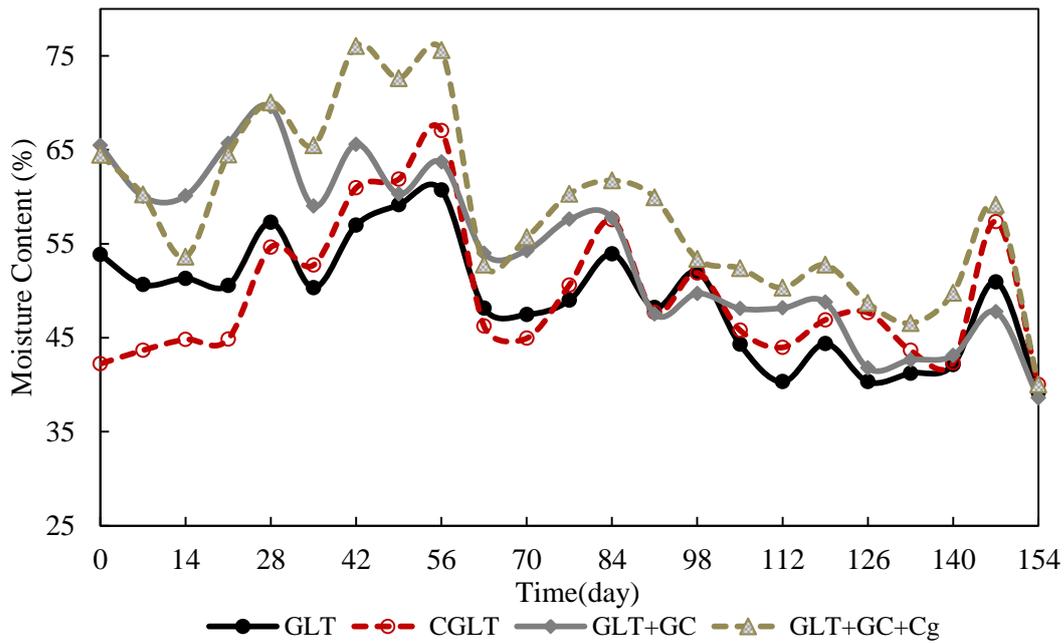


圖 4-4 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之含水率變化

4-1-4 導電度(EC)的變化

EC 應用於土壤表示為土壤中可溶性鹽類濃度的一種指標，可直接表示可溶性鹽類存在於土壤溶液中的濃度，測定單位通常以 ms/cm 表示，另一意義代表在一定體積內溶液內離子的導電能力，是土壤肥力的指標。土壤中的 EC 值高低，直接影響植物的生長，EC 值過高時，因滲透壓高會引起根部腐爛或葉片尖端枯萎現象，EC 值過低則會影響植物的生長肥大，每種作物都有其最適當的 EC 值，土壤導電度 $\text{EC} < 2 \text{ ms/cm}$ 表示土壤鹽份含量極低，一般作物可以正常生長。理想土壤的 EC 值應在 $0.15 \sim 0.4 \text{ ms/cm}$ 以內為佳。

依據表 3-1 可觀察到庭園落葉、草屑及咖啡渣原料基質的導電度 EC 分別為 2.4 ms/cm、5.7 ms/cm、1.2 ms/cm，在第三槽 GLT+GC 試驗因富含草屑故其初始 EC 為 4.9 ms/cm 皆高於其他試驗組，但經過堆肥化如圖 4-5 及表 4-4 所示，各實驗組 EC 皆低於 1 ms/cm，各試驗組 EC 值在第 77 天都已降至 2 ms/cm 以下，表示一般作物可以正常生長，EC 值下降是由於堆肥化過程中隨著 CO₂、NH₃ 的揮發，使得 EC 值下降，最終 EC 值為 0.3~0.6 ms/cm，產品可用以土壤肥力調整。

表 4-4 四個試驗組堆肥化 EC 變化

槽體類別	導電度 EC(ms/cm)			變化率%
	初始	最終堆肥 成品	變化值	
	GLT	2.4	0.4	
CGLT	2.1	0.5	-1.6	-76.2
GLT+GC	4.9	0.3	-4.6	-93.9
GLT+GC+Cg	2.3	0.6	-1.7	-73.9

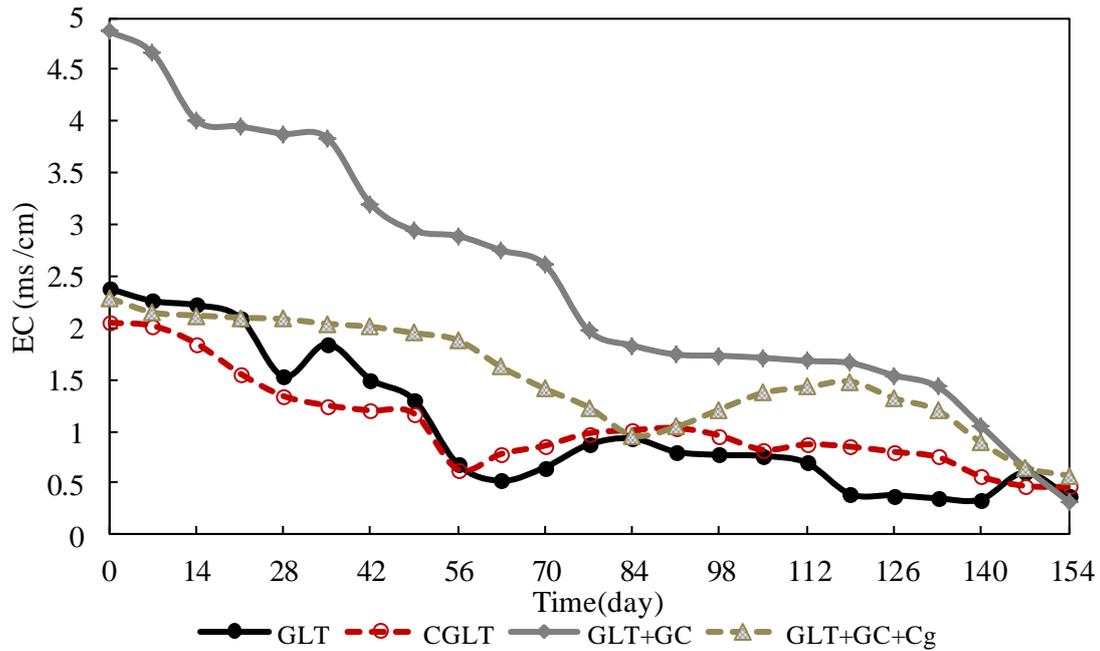


圖 4-5 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之 EC 變化

4-2 堆肥化過程之肥堆營養元素及重金屬含量變化

4-2-1 有機質(Organic matter)變化

在堆肥過程中，有機質是微生物賴以生存和繁殖的基本條件，因此有機質的變化能在一定程度上反映出堆肥的進行程度，許多學者通過研究堆肥過程中有機質的降解率來判斷堆肥的腐熟度。

如圖 4-6 及表 4-5 顯示，經過好氧堆肥化處理後，四實驗組有機質含量皆明顯降低，整個堆肥過程中，在微生物的分解作用下，第一槽 GLT 初始有機質含量 64.8%，最終堆肥成品有機質含量為 33.6%，下降 31.2%(下降率 48.1%)；第二槽 CGLT 初始有機質含量為 74.8%，最終堆肥成品有機質含量約為 40.6%，下降 34.2%(下降率 45.7%)；第三槽 GLT+GC 初始有機質含量

為 60.1%，最終堆肥成品有機質含量為 25.2%，下降 34.9%(下降率58.1%)；第四槽 GLT+GC+Cg 初始有機質含量為 83.9%，最終堆肥成品有機質含量為 43.0%，下降 40.9%(下降率 48.7%)，以第三槽 GLT+GC 下降率最多，其次為第四槽 GLT+GC+Cg。

綜觀四實驗組有機質含量降解率約為 45.7~58.1%，在高溫階段後期和降溫階段，大部分容易降解的有機質都已被降解，並且隨著溫度的降低，微生物活動減弱，其降解速率減慢並趨於穩定，有機質變化趨勢符合諸多文獻呈現結果，但最終堆肥成品有機質含量皆低於雜項堆肥規範，故僅適用作為土壤改良劑，非有機肥料。

表 4-5 四個試驗組有機質變化

槽體類別	有機質(Organic matter)(%)			變化率%	雜項堆肥規範>50.0%
	初始	最終堆肥成品	變化值		
GLT	64.8	33.6	-31.2	-48.1	低於規範
CGLT	74.8	40.6	-34.2	-45.7	低於規範
GLT+GC	60.1	25.2	-34.9	-58.1	低於規範
GLT+GC+Cg	83.9	43.0	-40.9	-48.7	低於規範

註：雜項堆肥規範：指對最終堆肥成品之成分規範，其中正值代表增加，負值代表減少。

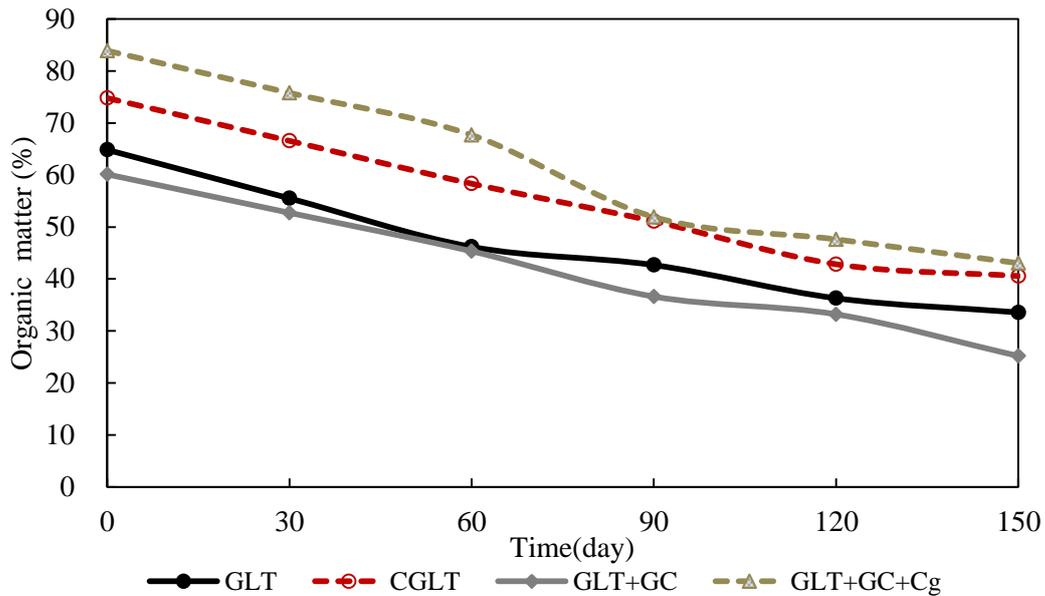


圖 4-6 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗組有機質變化

4-2-2 總有機碳(TOC)、總氮(TN)及碳氮比(C/N)三者間的變化

堆肥前後的總有機碳、總氮及碳氮比三者間的變化，可以顯示好氧堆肥對各試驗組的腐熟穩定化。圖 4-7、圖 4-8、圖 4-9 及圖 4-10 分別為各試驗組好氧堆肥前後總有機碳、總氮及碳氮比變化。微生物新陳代謝和細胞物質的合成，需要大量營養元素和微量元素。碳在其過程中有 2/3 變成二氧化碳，1/3 用於細胞物質的合成，因此被稱為微生物的能源，氮則主要用於細胞原生質的合成，C/N 則是影響分解速度的主因。如圖 4-7 至圖 4-10 所示，在堆肥過程各實驗組中總氮的含量變化是相對平穩，堆肥前後總氮含量變幅不大，可見以純植物性素材進行堆肥，其氮元素在過程中流失量甚少，由於堆肥全程 pH 大部分於 7 以上且屬高、中溫發酵，從文獻研究中證

實，其過程可能對氮素固定有所貢獻，而使堆肥前後總氮變幅不大呈現平穩現象。反而堆肥物料中的總碳含量，則隨著堆肥時間及翻堆過程而產生增加及減少呈現起伏之變化。

在第一槽 GLT 試驗中，如圖 4-7 顯示，最終堆肥總有機碳上升 16.8%(上升率 52.2%)、總氮下降 0.1% (下降率 7.1%)、碳氮比上升 13.6(上升率 55.1%)，觀察總氮雖有下降趨勢但損失不多而有固氮現象，在最終堆肥總有機碳增加情況下其碳氮比也呈現上升情況，於雜項堆肥規範中雖總氮符合規範值，但碳氮比略高於規範值。

在第二槽 CGLT 試驗中，如圖 4-8 顯示，最終堆肥總有機碳下降 1.5% (下降率 3.7%)、總氮下降 0.1% (下降率 8.3%)、碳氮比上升 1.8(上升率 5.0%)，同樣總氮雖有下降趨勢但損失不多亦有固氮現象，在最終堆肥總有機碳下降比列不若總氮下降比例情況下，最終堆肥碳氮比仍略微上升，於雜項堆肥規範中總氮雖符合規範值，但碳氮比略高於規範值。

在第三槽 GLT+GC 試驗中，如圖 4-9 顯示，最終堆肥總有機碳下降 5.1% (下降率 12.3%)、總氮下降 0.8% (下降率 47.1%)、碳氮比上升 16.8(上升率 40.9%)，觀察總氮下降比例相較於有機碳下降比例來得多，且下降趨勢也顯示損失相較於 GLT 及 CGLT 試驗多，故在最終堆肥其碳氮比略微上升，於雜項堆肥規範中總氮雖符合規範值，但碳氮比仍略高於規範值。

在第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中，如圖 4-10 顯示，最終堆肥總有機碳下降 9.9% (下降率 18.8%)、總氮下降 0.7% (下降率 29.2%)、碳氮比上升 3.3(上升率 13.1%)，觀察總氮下降比例相較於總有機碳下降比例來得多，故在最終堆肥有機碳下降情況下其碳氮比仍略微上升，於雜項堆肥規範中總氮雖符合規範值，但碳氮比仍略高於規範值。

植物利用氮素之主要來源為土壤中之礦物性氮(無機態氮)，而不是土壤中存在最多之有機態氮。藉由微生物將有機態氮變為無機態氮此過程稱為氮之礦質化作用(Nitrogen mineralization)簡稱礦化^[77]，礦質化作用主要是持續供應土壤肥力及無機氮素之所需過程。在礦物性無機態氮之產生常伴隨一個相反的作用，此作用為硝酸態氮及其他狀態之礦物性氮再度變回為有機態氮之作用，此相反的作用乃由於多種微生物的代謝作用進行中，氮素被併入有機化合物合成中所引起稱為氮之生物固定作用 (nitrogen immobilization)^[77]。故氮素質量多，則氮素會易於被礦質化；如碳素質量多，則氮素是會被生物固定，礦化速率因添加有機資材之碳氮比不同而有差異，碳氮比愈小礦化速率愈大，碳氮比愈大，礦化速率變小，因為有生物固定作用發生的緣故。

於本研究第三槽 GLT+GC 及第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中堆肥材料初始的碳氮比經配比調整後分別為 26.6 及 27.5，接近理想堆肥的初始 C/N 比 25~30，導致微生物生長速度較快，使氮的同化作用大於硝化作用，及可能

部份的氮素形成氨氣流失，總氮亦同步下降，但隨著翻堆及溫度之變化呈現出 2 次波峰，分別在 60 及 120 天碳氮比可下降至 20 以下，故可推論第三槽 GLT+GC 及第四槽 GLT+GC+Cg 試驗在 120 天已接近腐熟階段(碳氮比小於 20)。反觀在第一槽 GLT 其及第二槽 CGLT 試驗中過高之碳氮比不利於堆肥的製作，也增加嗜熱期較長除了增加動力消耗外，亦可能增加氮素揮發為氨氣的損失，所以在碳氮比初始設定上，仍以介於 25~30 之間為較理想的條件。



表 4-6 四個試驗組堆肥化總有機碳(TOC)、總氮(TN)及碳氮比(C/N)變化

槽體類別	初始			最終堆肥成品			變化值			變化率%			雜項堆肥規範 TN 5.0~0.6 C/N 10~20
	TOC (%)	TN (%)	C/N	TOC (%)	TN (%)	C/N	TOC (%)	TN (%)	C/N	TOC	TN	C/N	
GLT	15.4	1.4	11.1	32.2	1.3	24.7	+16.8	-0.1	+13.6	+52.2	-7.1	+55.1	TN 符合規範 C/N 略高規範
CGLT	40.9	1.2	34.1	39.4	1.1	35.9	-1.5	-0.1	+1.8	-3.7	-8.3	+5.0	TN 符合規範 C/N 略高規範
GLT+GC	41.6	1.7	24.3	36.5	0.9	41.1	-5.1	-0.8	+16.8	-12.3	-47.1	+40.9	TN 符合規範 C/N 略高規範
GLT+GC+Cg	52.6	2.4	21.9	42.7	1.7	25.2	-9.9	-0.7	+3.3	-18.8	-29.2	+13.1	TN 符合規範 C/N 略高規範

註：雜項堆肥規範：指對最終堆肥成品之成分規範，其中正值代表增加，負值代表減少。

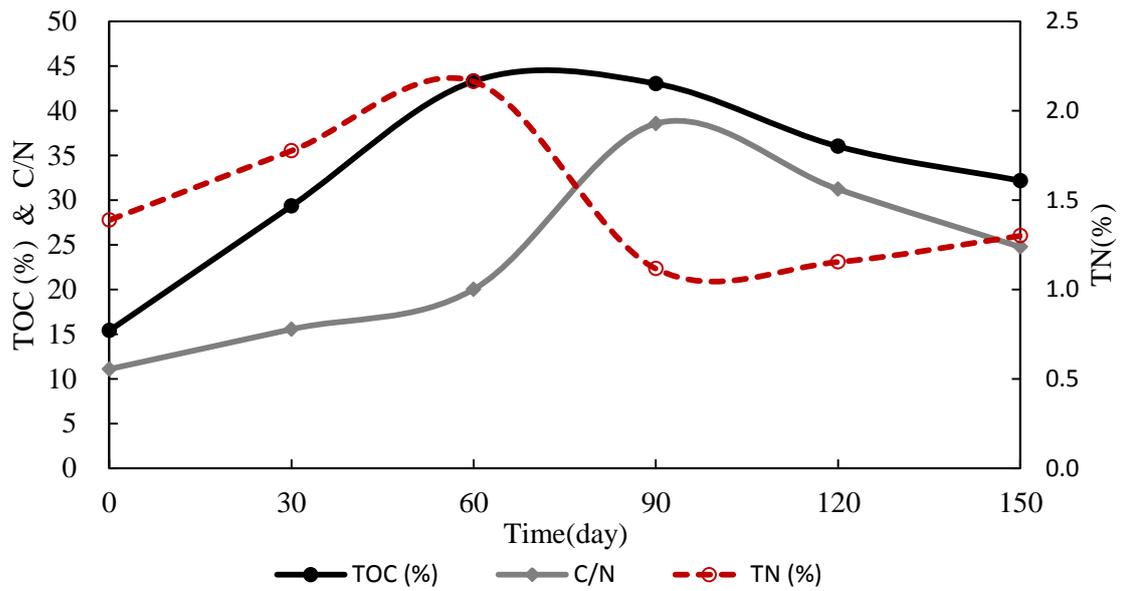


圖 4-7 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT 之 TOC、TN 及 C/N 變化

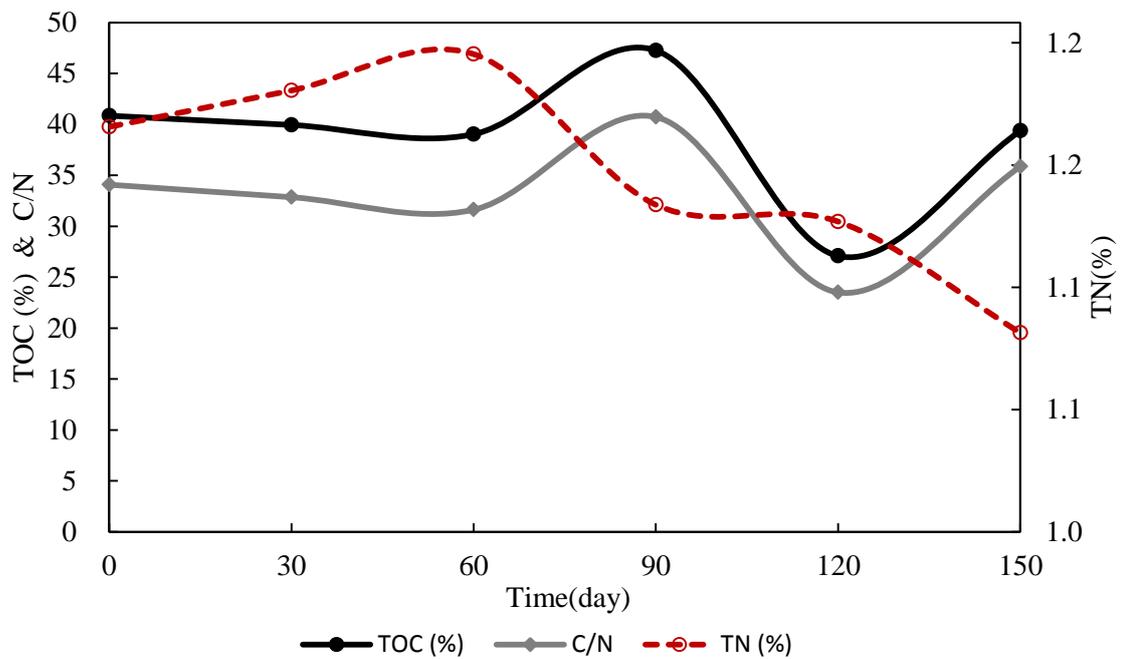


圖 4-8 庭園廢棄物堆肥化過程 CGLT 之 TOC、TN 及 C/N 變化

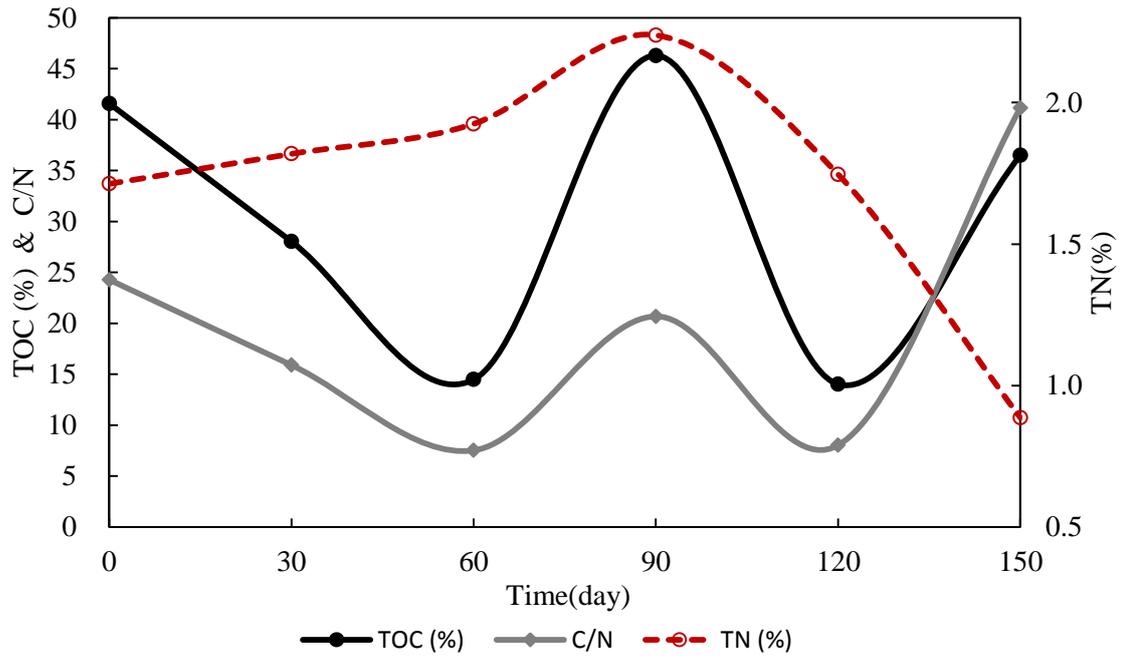


圖 4-9 庭園廢棄物堆肥化過程 GTL+GC 之 TOC、TN 及 C/N 變化

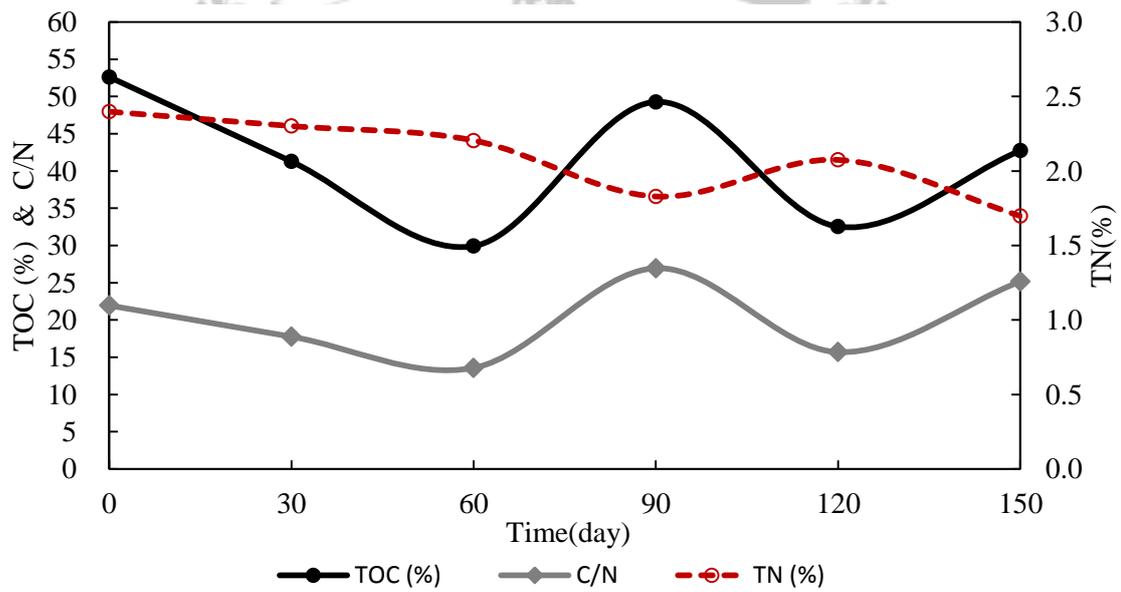


圖 4-10 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC+Cg 之 TOC、TN 及 C/N 變化

4-2-3 磷(P)、全磷酐 P_2O_5 、鉀(K)、全氧化鉀 K_2O 之變化

堆肥材料中之磷、鉀含量，不易因堆肥化處理而產生太大變化，故分析材料中之磷、鉀即可初略評估堆肥產品中之含量。磷在植物營養中扮演相當重要的角色，它與植物能量生化反應有關，許多的酵素代謝中需依賴磷酸作用，而且磷是生物遺傳物質—核酸之組成分，對細胞分裂及分生組織之發育有非常重要的關係，是植物生長及生殖不可缺少的大量元素之一。而鉀是植物生長及抗病的重要營養元素，鉀與植物光合作用、蛋白質合成、輔導作用及蒸散作用的調整等功能有關，其加強植物抗病能力，已被認定是相當重要的功效。

在所有植物生長所需礦物養分中，磷的含量僅次於氮和鉀，而在植體內的含量則僅次於氮^[78]。磷與氮的行爲差異甚大，氮在土壤中之移動或流失容易發生，而磷的移動或流失則較不容易發生^[79]。有機磷主要存在於腐植質及未腐植化的有機質中；而無機磷除了少量存在於土壤溶液外，大部分與其他金屬鍵結合成微溶性或難溶性的磷酸鹽化合物，於肥料中磷之成分習慣上以全磷酐(phosphorus pentoxide, P_2O_5)為計算標準，而鉀之成分則以全氧化鉀(potassium oxide, K_2O)為計算標準^[80]。

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-11 及表 4-7 顯示，最終總磷含量下降 113.1 mg/kg (下降率 7.7%)，總鉀含量上升 3180.6 mg/kg (上升率 55.6%)， P_2O_5 含量無差異， K_2O 含量上升 0.4% (上升率 57.1%)，第二槽 CGLT 試驗中圖

4-12 及表 4-7 顯示，最終總磷含量下降 91.0 mg/kg (下降率 7.9%)，總鉀含量上升 4060.0 mg/kg (上升率 7.0%)， P_2O_5 含量下降 0.1% (下降率 33.3%)， K_2O 含量上升 0.5% (上升率 71.4%)，第三槽 GLT+GC 試驗中圖 4-13 及表 4-7 顯示，最終總磷含量下降 277.8 mg/kg (下降率 16.6%)，總鉀含量上升 1819.6 mg/kg (上升率 32.0%)， P_2O_5 含量下降 0.1% (下降率 25.0%)， K_2O 含量上升 0.2% (上升率 28.6%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中圖 4-14 及表 4-7 顯示，最終總磷含量上升 333.8 mg/kg (上升率 21.4%)，總鉀含量上升 5195.0 mg/kg (上升率 72.3%)， P_2O_5 含量上升 0.1% (上升率 33.3%)， K_2O 含量上升 0.7% (上升率 77.8%)。

綜觀第一槽 GLT、第二槽 CGLT 及第三槽 GLT+GC 試驗中顯示微生物不斷利用有機物的過程中，整個堆肥材料重量及體積隨之減少，材料中的磷可能因氣化或隨滲出水流出損失而降低磷的含量。在鉀的變化上，鉀的含量可能與鉀的水溶性及與有機物鍵結力較佳，在堆肥過程中使用水分保持適當微生物生長條件的影響，使總鉀含量濃縮於堆肥中，唯獨第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中磷及鉀含量都隨堆肥化進行被濃縮於堆肥中呈現上升趨勢，於雜項堆肥規範中除 CGLT 之 P_2O_5 略低規範值外，四實驗組之 P_2O_5 及 K_2O 含量雖皆能符合規範，但普遍含量偏低，可見純植物基質堆肥化之 P_2O_5 及 K_2O 含量偏低，以若作為肥料而言屬肥分偏低資材。

表 4-7 四個試驗組堆肥化磷(P)、P₂O₅、鉀(K)及 K₂O 變化

槽體類別	初始				最終堆肥成品				變化值				變化率				雜項堆肥規範 P ₂ O ₅ 6.0~0.3 K ₂ O 4.0~0.3
	P	K	P ₂ O ₅	K ₂ O	P	K	P ₂ O ₅	K ₂ O	P	K	P ₂ O ₅	K ₂ O	P	K	P ₂ O ₅	K ₂ O	
	----mg/kg----		----%----		----mg/kg----		----%----		-----mg/kg-----				-----%-----				
GLT	1468.2	2539.2	0.3	0.3	1355.1	5719.8	0.3	0.7	-113.1	+3180.6	0	+0.4	-7.7	+55.6	0	+57.1	P ₂ O ₅ 符合規範 K ₂ O 符合規範
CGLT	1154.2	1702.2	0.3	0.2	1063.2	5762.2	0.2	0.7	-91.0	+406.0	-0.1	+0.5	-7.9	+7.0	-33.3	+71.4	P ₂ O ₅ 略低規範 K ₂ O 符合規範
GLT+GC	1674.0	3864.0	0.4	0.5	1396.2	5683.6	0.3	0.7	-277.8	+1819.6	-0.1	+0.2	-16.6	+32.0	-25.0	+28.6	P ₂ O ₅ 符合規範 K ₂ O 符合規範
GLT+GC+Cg	1248.7	1994.6	0.3	0.2	1582.5	7189.6	0.4	0.9	+333.8	+5195.0	+0.1	+0.7	+21.4	+72.3	+33.3	+77.8	P ₂ O ₅ 符合規範 K ₂ O 符合規範

註：雜項堆肥規範：指對最終堆肥成品之成分規範，其中正值代表增加，負值代表減少。

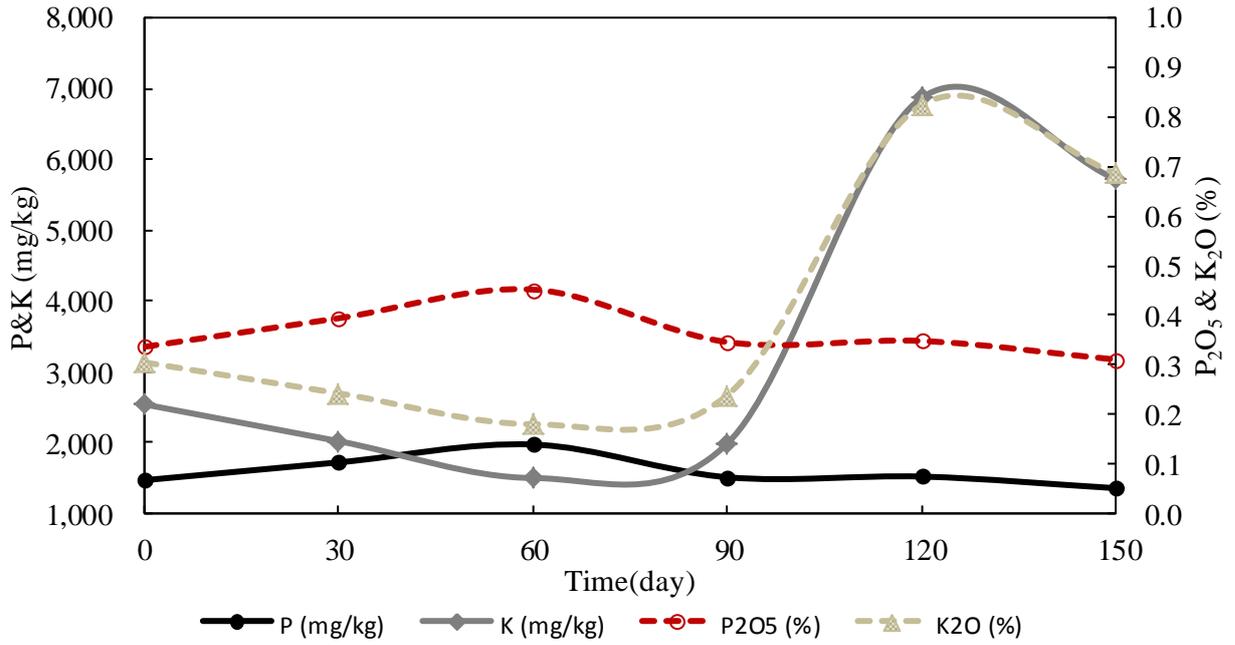


圖 4-11 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT 之磷(P)、鉀(K)、 P_2O_5 及 K_2O 變化

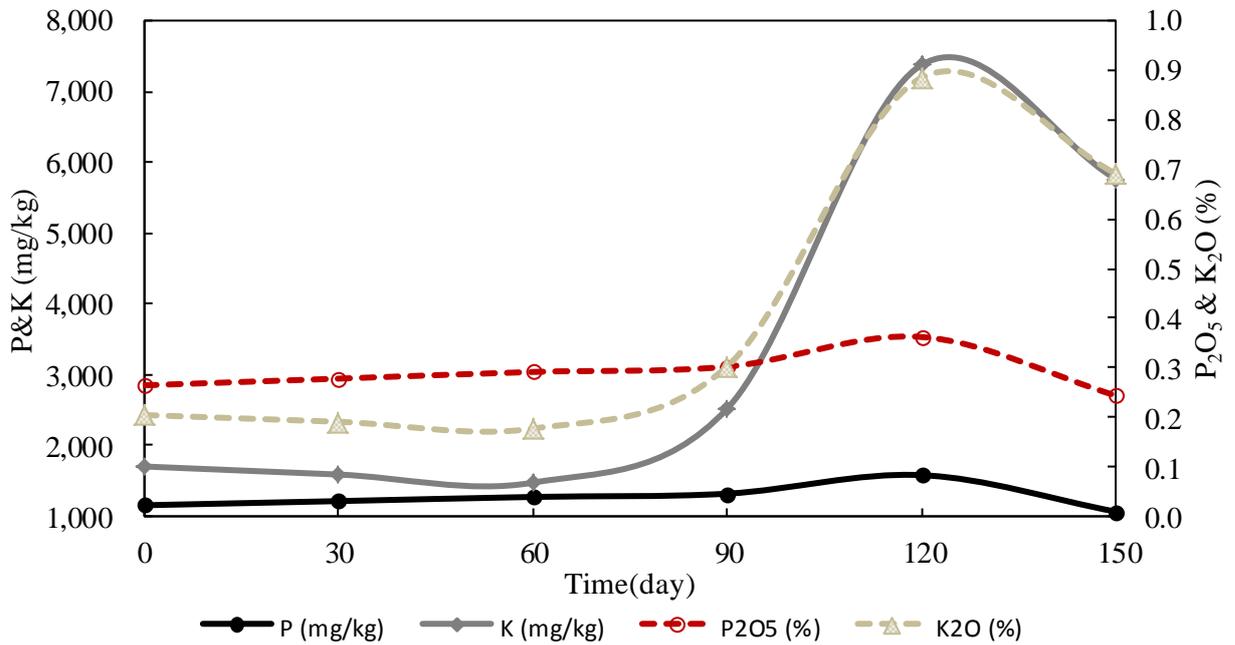


圖 4-12 庭園廢棄物堆肥化過程 CGLT 之磷(P)、鉀(K)、 P_2O_5 及 K_2O 變化

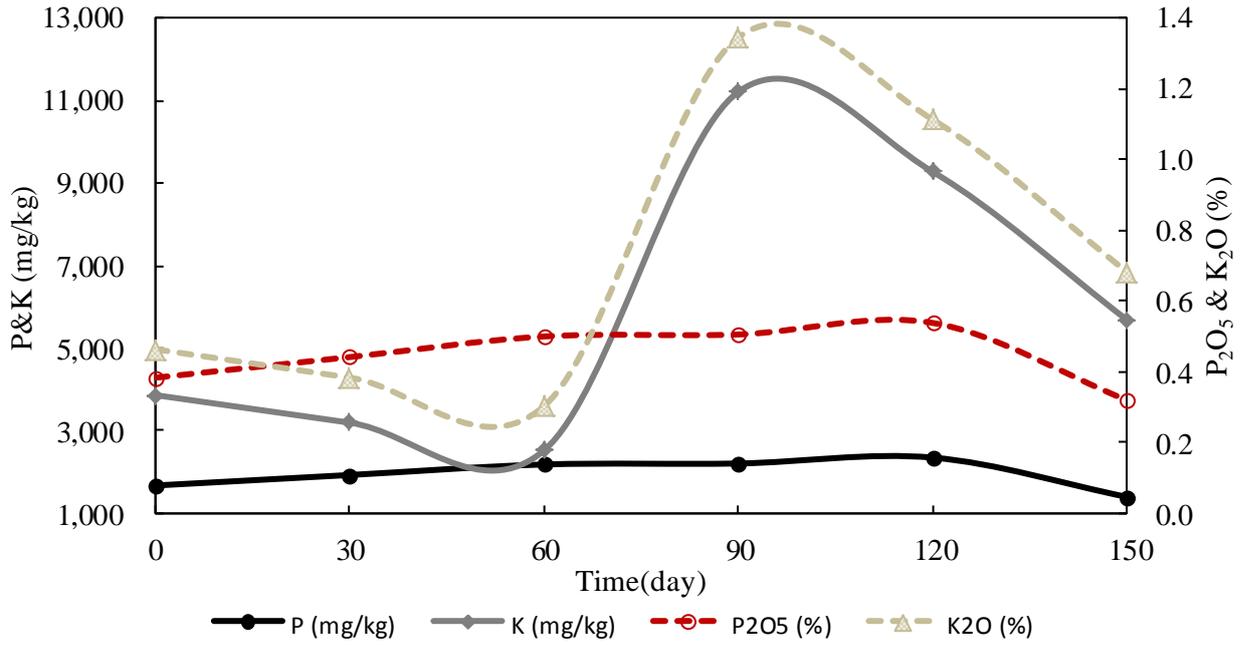


圖 4-13 庭園廢棄物堆肥化過程 GTL+GC 之磷(P)、鉀(K)、 P_2O_5 及 K_2O 變化

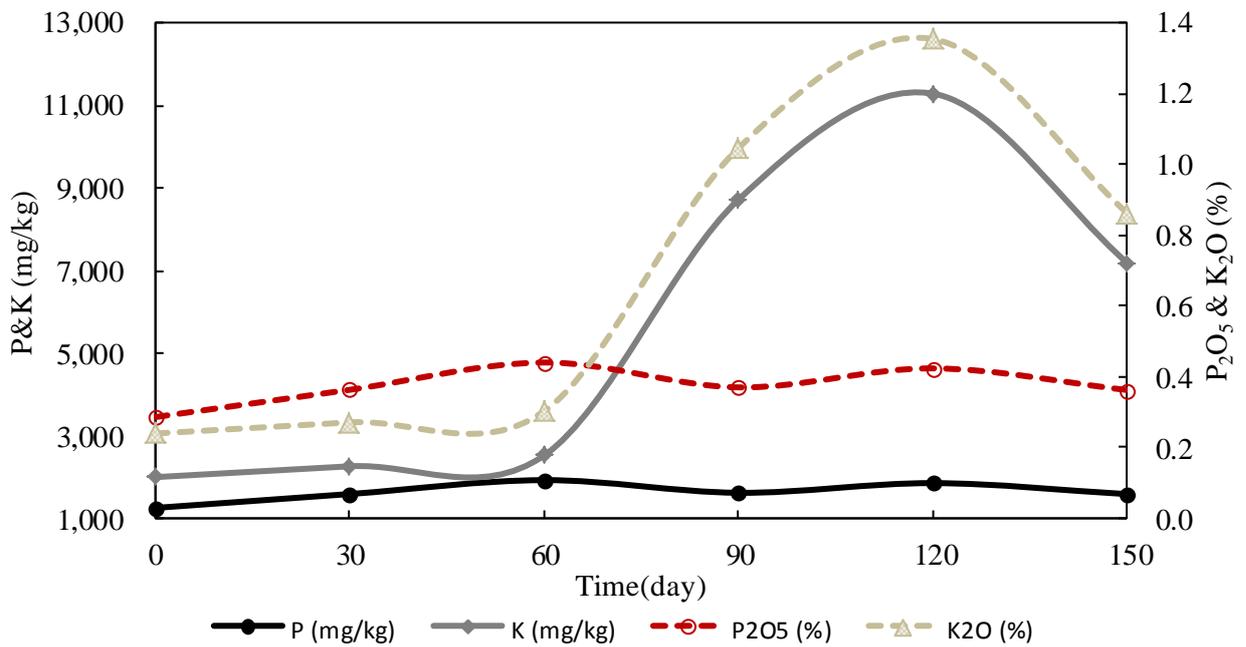


圖 4-14 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC+Cg 之磷(P)、鉀(K)、 P_2O_5 及 K_2O 變化

4-2-4 重金屬含量之變化

堆肥中的原料大部分是有機質，經過堆肥過程後，有機質經微生物作用不斷降解並進行著腐植化過程，形成腐植質。有機物在此過程中，能夠還原、吸附、固定重金屬離子，形成占很大比例的有機結合態重金屬，使重金屬活性降低。

1. 砷(As)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-15 及表 4-8 顯示，初始砷(As)含量 0.7 mg/kg，最終堆肥成品砷(As)含量增加 2.0mg/kg (增加率 74.1%)，第二槽 CGLT 試驗中初始砷(As)含量 0.5 mg/kg，最終堆肥成品砷(As)含量增加 2.1 mg/kg (增加率 80.8%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始砷(As)含量 1.0 mg/kg，最終堆肥成品砷(As)含量增加 2.3 mg/kg (增加率 69.7%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始砷(As)含量 0.2 mg/kg，最終砷(As)含量增 2.2mg/kg (增加率 91.7%)。四試驗組在堆肥後濃度均比初始時有所增加，這是由於水分、CO₂和揮發性物質揮發損失，及堆體在堆肥中體積減小其重金屬濃縮及於 pH 值在偏鹼性條件下，有機物質對重金屬的吸附力較佳所致，導致砷(As)含量呈現上升的結果，但尚低於雜項堆肥規範值(As<25mg/kg)，另也低於植物體之臨界毒害濃度(5~20mg/kg)，再依據附錄六所示四試驗砷(As)含量相對標準偏差最大值分別為 5.9%、9.0%、4.7%及 8.1%，顯示砷(As)含量試驗有良好的再現性。植物本身並不需要砷，過量則會因取代磷酸活動而抑制

能量的代謝工作，造成作物之生長不良、根黃化、新芽受抑制、葉向下垂等症狀。

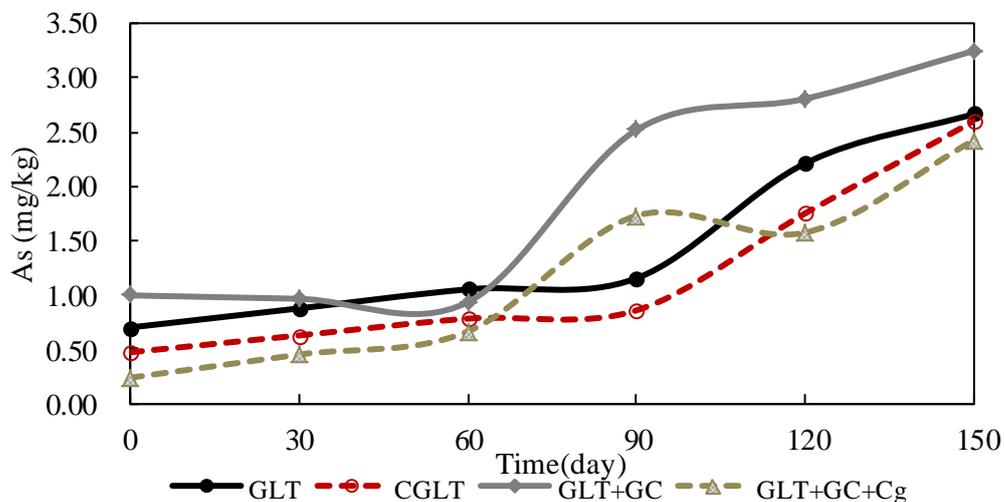


圖 4-15 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之砷(As)含量變化

2. 鎘(Cd)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-16 及表 4-8 顯示，初始鎘(Cd)含量 0.2 mg/kg，最終堆肥成品鎘(Cd)含量增加 0.1 mg/kg (增加率 33.3%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鎘(Cd)含量 0.1 mg/kg，最終堆肥成品鎘(Cd)含量增加 0.2mg/kg (增加率 66.7%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鎘(Cd)含量 0.3 mg/kg，最終堆肥成品鎘(Cd)含量增加 0.1 mg/kg (增加率 25.0%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鎘(Cd)含量 0.1mg/kg，最終堆肥成品鎘(Cd)含量增加 0.2 mg/kg (增加率 50.0%)。四試驗組在堆肥後鎘(Cd)含量均比初始時有所增加，同樣因水分、CO₂ 和揮發性物質揮發損失，及堆體在堆肥中體積減小重金屬濃縮及於 pH 值在偏鹼性條件下，有機物質對重金屬的吸附力較佳所

致，導致鎘(Cd)含量呈現上升的結果，但低於雜項堆肥規範值(Cd<2.0mg/kg)，另也低於植物體之臨界毒害濃度(5~30mg/kg)，再依據附錄六所示四試驗鎘(Cd)含量相對標準偏差最大值分別為 0.9%、1.2%、0.7%及 1.2%，顯示鎘(Cd)含量試驗亦有良好的再現性。鎘為植物生長所非必需之元素，其毒性大於其他金屬約 2~20 倍。亦為植物生長所不必需之元素，植物體若累積過量的鎘，則會使作物生長受到阻礙，本研究四實驗組鎘(Cd)含量皆未超高過雜項堆肥規範值。

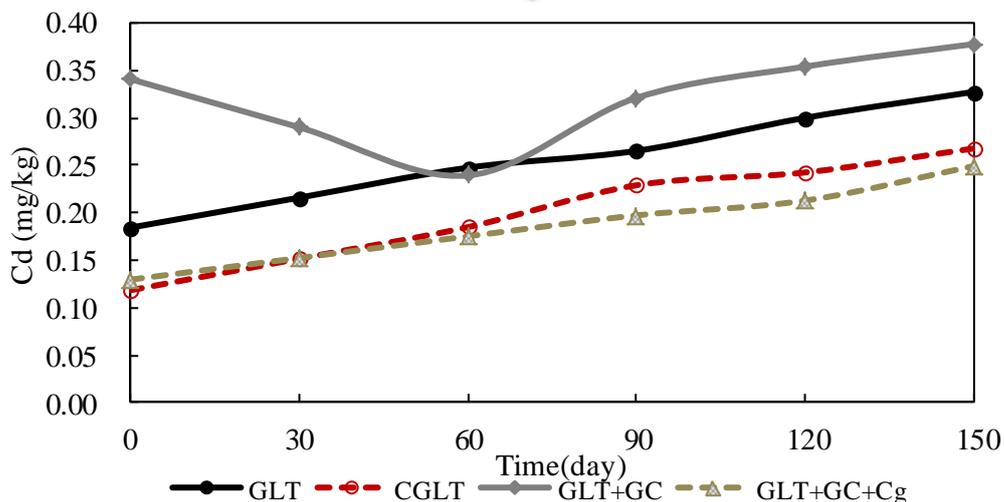


圖 4-16 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鎘(Cd)含量變化

3. 鉻(Cr)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-17 及表 4-8 顯示，初始鉻(Cr)含量 62.3mg/kg，最終堆肥成品鉻(Cr)含量增加 10 mg/kg (增加率 13.8%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鉻(Cr)含量 124.6 mg/kg，最終堆肥成品鉻(Cr)含量減少 67.1mg/kg (減少率 53.9%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鉻(Cr)含量 263.9

mg/kg，最終堆肥成品鉻(Cr)含量減少 178.0mg/kg (減少率 67.5%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鉻(Cr)含量 88.7mg/kg，最終堆肥成品鉻(Cr)含量減少 20.1mg/kg (減少率 22.7%)。四試驗組在堆肥後鉻(Cr)含量除第一槽 GLT 外，其餘均比初始時有所減少。鉻(Cr)含量變化呈現無規律性，可能是由於鉻(Cr)通常是以非可溶態和部分可溶態存在，可以通過堆肥轉化成更易溶的形態如水解氧化態和硝酸鹽結合態，或者非可溶態通過滲漏液呈懸浮態流失^[81]，且各堆體溫度、pH 和含水率等存在差異也可能是原因之一，產品鉻(Cr)含量低於雜項堆肥規範值(Cr<150mg/kg)，但略高於植物體之臨界毒害濃度(5~30mg/kg)之上限，再依據附錄六所示四試驗鉻(Cr)含量相對標準偏差最大值分別為 1.3%、0.8%、0.9% 及 0.9%，顯示鉻(Cr)含量試驗亦有良好的再現性。鉻(Cr)亦是植物生長所不必需之元素，植物體若累積過量的鉻(Cr)則會使作物根生長受到阻礙，幼葉黃化等影響，本研究原落葉基質之鉻(Cr)含量為 90.4 mg/kg，經堆肥化後四實驗組之鉻(Cr)含量分別為 72.3 mg/kg、57.5 mg/kg、85.9 mg/kg、68.6 mg/kg，顯示堆肥反應可降低鉻(Cr)含量。

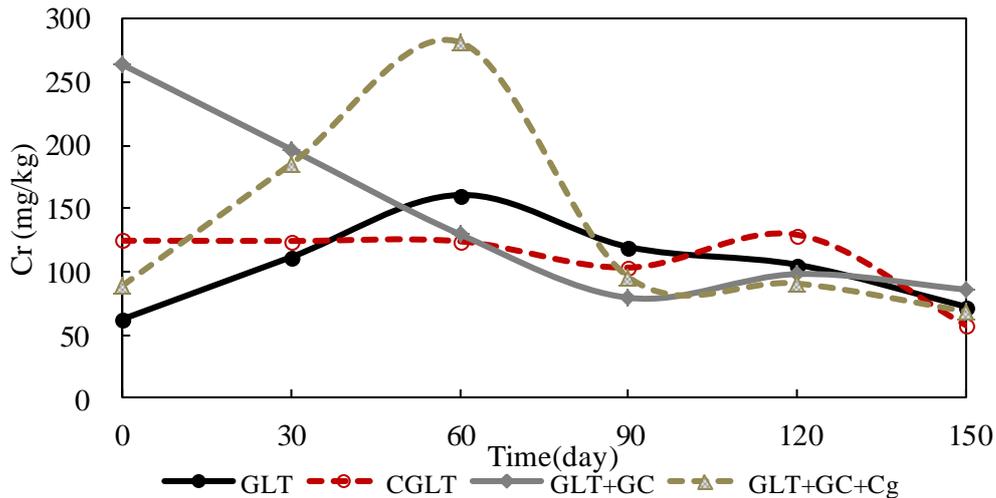


圖 4-17 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鉻(Cr)含量變化

4.銅(Cu)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-18 及表 4-8 顯示，初始銅(Cu)含量 16.4mg/kg，最終堆肥成品銅(Cu)含量增加 6.6 mg/kg (增加率 28.7%)，第二槽 CGLT 試驗中初始銅(Cu)含量 10.4 mg/kg，最終堆肥成品銅(Cu)含量增加 5.5mg/kg (增加率 34.6%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始銅(Cu)含量 18.6 mg/kg，最終堆肥成品銅(Cu)含量增加 3.6mg/kg (增加率 16.2%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始銅(Cu)含量 17.7mg/kg，最終堆肥成品銅(Cu)含量增加 4.4mg/kg (增加率 20.0%)。四試驗組在堆肥後銅(Cu)含量均比初始時有所增加，同樣因水分、CO₂ 和揮發性物質揮發損失，及堆體在堆肥中體積減小重金屬濃縮及於 pH 值在偏鹼性條件下，有機物質對重金屬的吸附力較佳所致，導致銅(Cu)含量呈現上升的結果，其產品銅(Cu)含量低於雜項堆肥規

範值($\text{Cu} < 100\text{mg/kg}$)，另除第二槽 CGLT 外，其餘各槽皆略高於植物體之臨界毒害濃度($20\sim 100\text{mg/kg}$)之下限，再依據附錄六所示四試驗銅(Cu)含量相對標準偏差最大值分別為 0.9%、0.8%、0.9% 及 0.8%，顯示銅(Cu)含量試驗亦有良好的再現性。但因銅(Cu)也是植物體必須營養元素，植物對銅有選擇性吸收且在植物體內傳導性低，是氨基酸合成酵素及氧化還原酵素之重要成分，與氨基酸及蛋白質代謝有密切關係，亦是葉綠素形成所必需的元素，並直接參與呼吸作用，被吸收之銅大部份可累積於根部而影響植物對其他必要元素(尤其是鐵)之吸收而呈現黃化、生長延遲等現象，銅過量亦會影響根部之水分吸收。

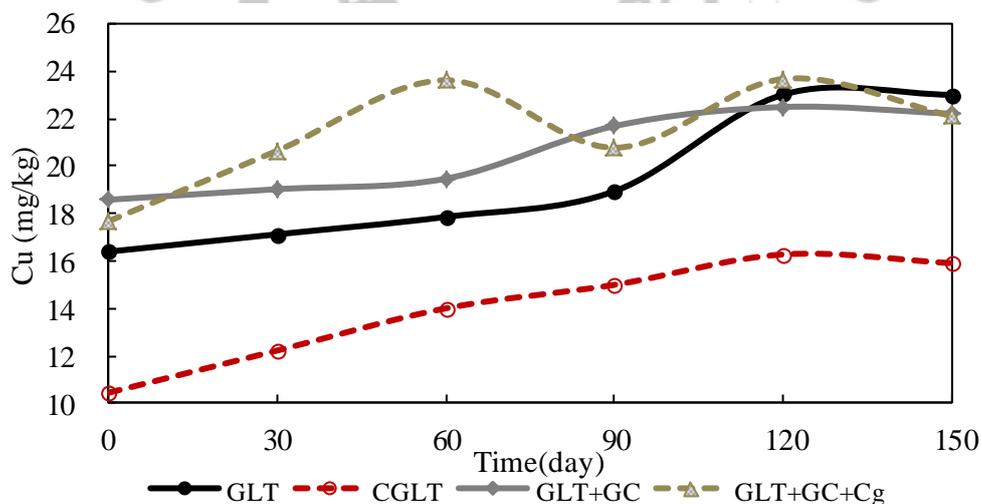


圖 4-18 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之銅(Cu)含量變化

5.汞(Hg)含量變化

四試驗組初始及最終堆肥成品之汞(Hg)含量皆低於偵測極限，產品(Hg)含量皆低於雜項堆肥規範值(Hg<1.0mg/kg)，另也低於植物體之臨界毒害濃度(1~3 mg/kg)。

植物對汞的吸收性極低，然而在酸性土壤中，作物對汞的吸收則較明顯，又以有機汞較無機汞之毒害大，且有機汞極易被植物吸收，因此很容易進入食物鏈中，本研究四試驗組皆無汞(Hg)含量檢出，故無汞(Hg)毒害性。

6.鎳(Ni)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-19 及表 4-8 顯示，初始鎳(Ni)含量 11.7mg/kg，最終堆肥成品鎳(Ni)含量增加 0.7mg/kg (增加率 5.6%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鎳(Ni)含量 19.5mg/kg，最終堆肥成品鎳(Ni)含量減少 9.0mg/kg (減少率 46.2%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鎳(Ni)含量 35.8mg/kg，最終堆肥成品鎳(Ni)含量減少 22.4mg/kg (減少率 62.6%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鎳(Ni)含量 14.8mg/kg，最終堆肥成品鎳(Ni)含量減少 4.5mg/kg (減少率 30.4%)。四試驗組在堆肥後鎳(Ni)含量除第一槽 GLT 外，其餘均比初始時有所減少。鎳(Ni)含量變化也呈現無規律性，可能是由於鎳(Ni)通常是以非可溶態和部分可溶態存在，可以通過堆肥轉化成更易溶

的形態如水解氧化態和硝酸鹽結合態，或者非可溶態通過滲漏液呈懸浮態流失^[81]，且各堆體基質、溫度、pH 和含水率存在差異也可能是原因之一，產品鎳(Ni)含量皆低於雜項堆肥規範值(Ni<25.0mg/kg)，但略高於植物體之臨界毒害濃度(10~100mg/kg)之下限，再依據附錄六所示四試驗鎳(Ni)含量相對標準偏差最大值分別為 0.5%、0.5%、0.4%及 0.3%，顯示鎳(Ni)含量試驗亦有良好的再現性。

微量之鎳對植物生長有一定之促進功能，但非植物生長所絕對必需，在大多數情形下，鎳對植物之生長具有相當之毒害，植物受鎳毒害之徵狀為生長遲緩，同時伴隨幼葉黃化，嚴重時根部生長受阻無法產生鬚根，各部位變形，莖葉呈現斑點而壞死。

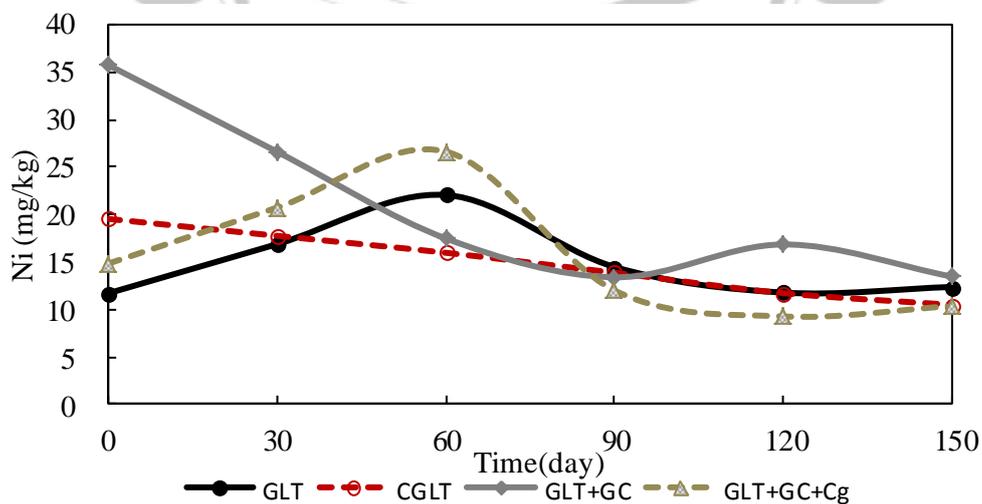


圖 4-19 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鎳(Ni)含量變化

7.鉛(Pb)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-20 及表 4-8 顯示，初始鉛(Pb)含量 6.5mg/kg，最終堆肥成品鉛(Pb)含量增加 8.5 mg/kg (增加率 56.7%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鉛(Pb)含量 5.3 mg/kg，最終堆肥成品鉛(Pb)含量增加 5.8mg/kg (增加率52.3%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鉛(Pb)含量9.2 mg/kg，最終堆肥成品鉛 (Pb) 含量增加 5.7mg/kg (增加率 38.3%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鉛(Pb)含量 5.6mg/kg，最終堆肥成品鉛(Pb)含量增加 5.2mg/kg (增加率 48.1%)。四試驗組在堆肥後鉛(Pb)含量均比初始時有所增加，同樣因水分、CO₂ 和揮發性物質揮發損失，及堆體在堆肥中體積減小重金屬濃縮及於 pH 值在偏鹼性條件下，致鉛(Pb)含量呈現上升的結果，產品鉛(Pb)含量皆低於雜項堆肥規範值(Pb<150mg/kg)，也低於植物體之臨界毒害濃度(30-300mg/kg)，再依據附錄六所示四試驗鉛(Pb)含量相對標準偏差最大值分別為 0.7%、0.7%、0.6%及 0.8%，顯示鉛(Pb)含量試驗亦有良好的再現性。

植物對鉛的吸收並不顯著，通常只是累聚在植物的根部，呈現根短現象。

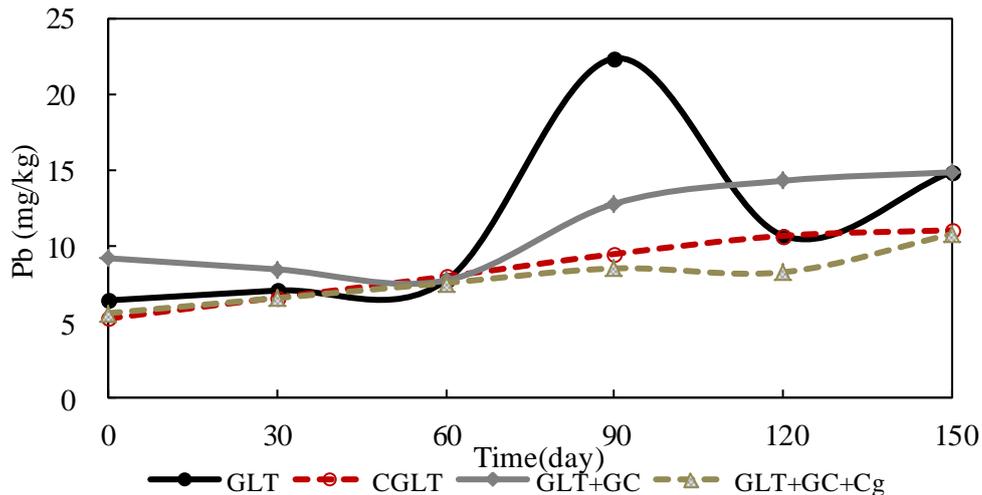


圖 4-20 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鉛(Pb)含量變化

8. 鋅(Zn)含量變化

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-21 及表 4-8 顯示，初始鋅(Zn)含量 77.0mg/kg，最終堆肥成品鋅(Zn)含量增加 102.2 mg/kg (增加率 57.0%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鋅(Zn)含量 52.1mg/kg，最終堆肥成品鋅(Zn)含量增加 33.9mg/kg (增加率 39.4%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鋅(Zn)含量 102.0 mg/kg，最終堆肥成品鋅(Zn)含量增加 0.7mg/kg (增加率 0.7%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鋅(Zn)含量 76.5mg/kg，最終堆肥成品鋅(Zn)含量增加 7.0mg/kg (增加率 8.4%)。四試驗組在堆肥後鋅(Zn)含量皆相較於初始時有所增加，同樣因水分、CO₂ 和揮發性物質揮發損失，及堆體在堆肥中體積減小其重金屬濃縮並於 pH 值在偏鹼性條件下，導致鋅(Zn)含量呈現上升的結果，產品鋅(Zn)含量皆低於雜項堆肥規範值(Zn<500mg/kg)，除第二槽

CGLT 及第四槽 GLT+GC+Cg 低於植物體之臨界毒害濃度(100~400mg/kg) 外，其餘第一槽 GLT 及第三槽 GLT+GC 略高於臨界毒害濃度下限，再依據附錄六所示四試驗鋅(Zn)含量相對標準偏差最大值分別為 0.3%、0.4%、0.3% 及 0.3%，顯示鋅(Zn)含量試驗有良好的再現性。植物對鋅(Zn)有吸收性，雖然鋅(Zn)對植物的毒性低，但在吸收累積下仍有一定危害，鋅(Zn)與蛋白質代謝酵素及生長荷爾蒙的合成有關，對植物毒害症狀為幼葉及葉尖黃化，生長受阻，考量到 Cu、Zn 是作物生長的重要微量元素，因此只要合理的施用並不會給環境帶來大的影響。

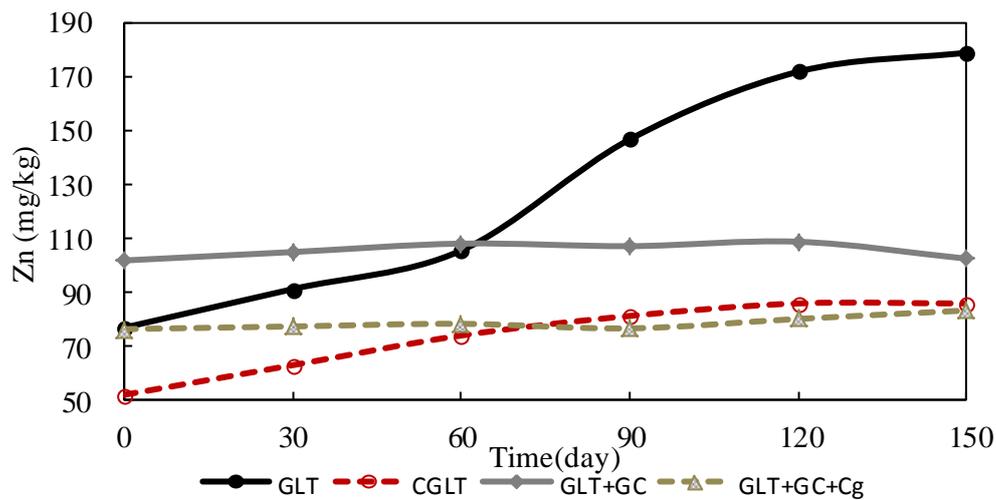


圖 4-21 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鋅(Zn)含量變化

4-2-5 植物營養元素含量之變化

1.鈣(Ca)含量變化

原堆肥基質落葉、草屑及咖啡渣之鈣(Ca)含量分別為 24483.0mg/kg、4077.4mg/kg 及 1386.1mg/kg，以落葉之鈣(Ca)含量最高，隨堆肥化進行溫度、pH、有機質變化，初期 Ca 以離子型態 Ca^{2+} 與腐植質產生結合，充分的將 Ca^{2+} 保留於堆肥中，因此提昇鈣的含量而後再緩慢減少趨勢。

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-22 及表 4-8 顯示，初始鈣(Ca)含量 32361.8mg/kg，最終堆肥成品鈣(Ca)含量減少 5810.2 mg/kg (減少率 18.0%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鈣(Ca)含量 31447.8mg/kg，最終堆肥成品鈣(Ca)含量減少 8939.9mg/kg (減少率 28.4%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鈣(Ca)含量 17708.3 mg/kg，最終堆肥成品鈣(Ca)含量增加 1981.3mg/kg (增加率 10.1%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鈣(Ca)含量 16741.9mg/kg，最終堆肥成品鈣(Ca)含量減少 1557.7mg/kg (減少率 9.3%)。四試驗組在堆肥後鈣(Ca)含量除第三槽 GLT+GC 增加，其餘均比初始時有所減少，再依據附錄六所示四試驗鈣(Ca)含量相對標準偏差最大值分別為 1.4%、1.2%、0.9% 及 0.6%，顯示鈣(Ca)含量試驗具有良好的再現性，植物生長必需適合的濃度約 5000 mg/kg，四試驗組最終堆肥成品鈣(Ca)含量皆可滿足植物微量元素需求。

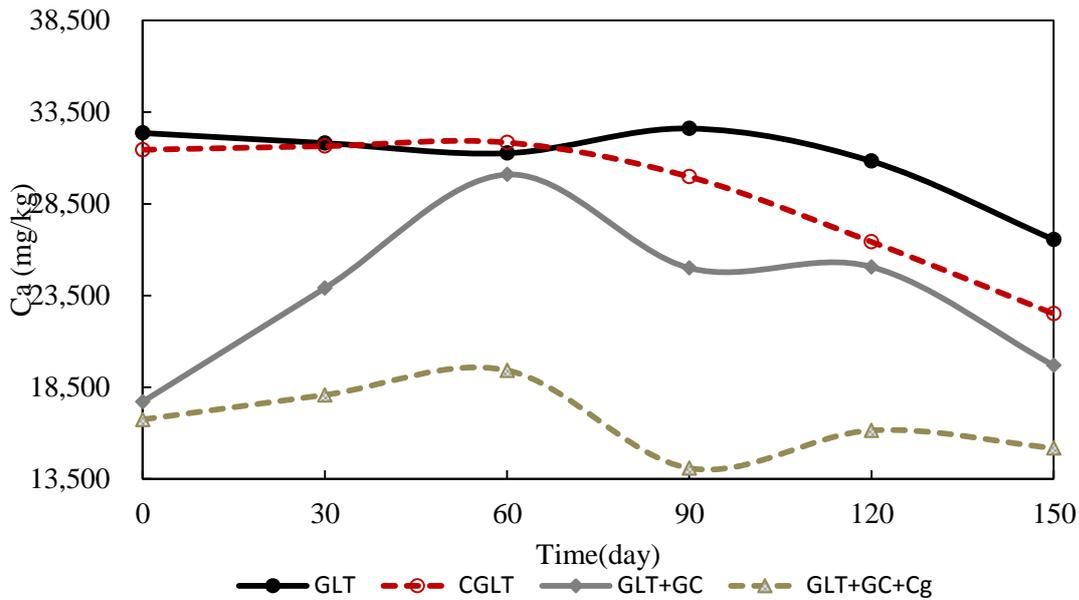


圖 4-22 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鈣(Ca)含量變化

2. 鐵(Fe)含量變化

原堆肥基質落葉、草屑及咖啡渣之鐵(Fe)含量分別為 5678.3mg/kg、314.3mg/kg 及 34.2 mg/kg，以落葉之鐵(Fe)含量最高，隨堆肥化進行溫度、pH、有機質變化，初期 Fe 以離子型態 Fe^{2+} 與腐植質產生結合，充分的將 Fe^{2+} 保留於堆肥中，因此提昇鐵(Fe)的含量。

本研究第一槽 GLT 試驗中如圖 4-23 及表 4-8 顯示，初始鐵(Fe)含量 3894.3mg/kg，最終堆肥成品鐵(Fe)含量增加 8457.6mg/kg (增加率 68.5%)，第二槽 CGLT 試驗中初始鐵(Fe)含量 3458.5mg/kg，最終堆肥成品鐵(Fe)含量增加 7269.0mg/kg (增加率 67.8%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始鐵(Fe)含量 12080.3 mg/kg，最終堆肥成品鐵(Fe)含量增加 1944.3mg/kg (增加率

13.9%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始鐵(Fe)含量 3360.9mg/kg，最終堆肥成品鐵(Fe)含量增加 7409.7mg/kg (增加率 68.8%)。四試驗組在堆肥後鐵(Fe)含量皆增加，再依據附錄六所示四試驗鐵(Fe)含量相對標準偏差最大值分別為 1.1%、0.5%、0.6% 及 1.0%，顯示鐵(Fe)含量試驗具有良好的再現性。植物生長必需適合的濃度約 100 mg/kg，四試驗組最終堆肥成品鐵(Fe)含量皆可滿足植物微量元素需求。

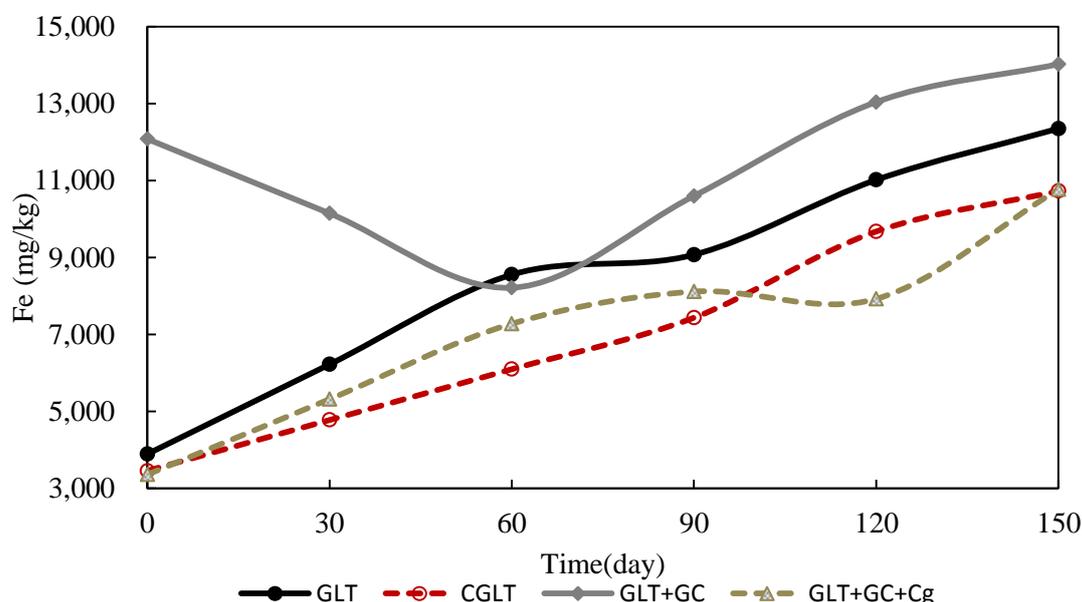


圖 4-23 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之鐵(Fe)含量變化

3. 錳(Mn)含量變化

原堆肥基質落葉、草屑及咖啡渣之錳(Mn)含量分別為 113.1mg/kg、41.9mg/kg 及 33.3mg/kg，以落葉之錳(Mn)含量最高，隨堆肥化進行溫度、pH、有機質變化，初期錳(Mn)以離子型態錳 Mn^{2+} 與腐植質產生結合，充分的將錳 Mn^{2+} 保留於堆肥中，因此提升錳(Mn)的含量而後再緩慢減少趨勢。

本研究第一槽 GLT 試驗中圖 4-24 及表 4-8 顯示，初始錳(Mn)含量 87.2mg/kg，最終堆肥成品錳(Mn)含量增加 96.8mg/kg (增加率 52.6%)，第二槽 CGLT 試驗中初始錳(Mn)含量 73.5mg/kg，最終堆肥成品錳(Mn)含量增加 86.1mg/kg (增加率 53.9%)，第三槽 GLT+GC 試驗中初始錳(Mn)含量 160.8mg/kg，最終堆肥成品錳(Mn)含量增加 48.7mg/kg (增加率 23.2%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始錳(Mn)含量 76.9mg/kg，最終堆肥成品錳(Mn)含量增加 94.0mg/kg (增加率 55.0%)。四試驗組在堆肥後錳(Mn)含量皆增加，再依據附錄六所示四試驗錳(Mn)含量相對標準偏差最大值分別為 1.2%、0.7%、1.0% 及 0.8%，顯示錳(Mn)含量試驗具有良好的再現性，植物生長必需適合的濃度 50 mg/kg，四試驗組最終堆肥成品錳(Mn)含量皆可滿足植物微量元素需求。

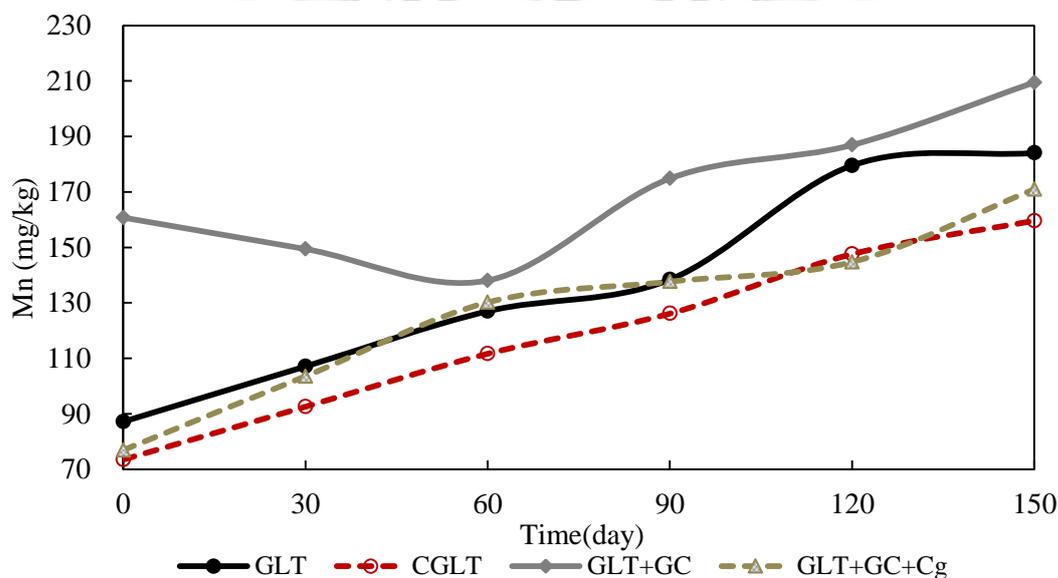


圖 4-24 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之錳(Mn)含量變化

表 4-8 四試驗組堆肥化元素含量變化

槽體別/ 元素 (mg/kg)	GLT				CGLT				GLT+GC				GLT+GC+Cg				雜項堆肥 規範
	初始	最終堆 肥成品	變化 值	變化 率%	初始	最終 堆肥 成品	變化值	變化 率%	初始	最終 堆肥 成品	變化 值	變化 率%	初始	最終 堆肥 成品	變化 值	變化 率%	
砷(As)	0.7	2.7	+2.0	+74.1	0.5	2.6	+2.1	+80.8	1.0	3.3	+2.3	+69.7	0.2	2.4	+2.2	+91.7	As<25 低於規範
鎘(Cd)	0.2	0.3	+0.1	+33.3	0.1	0.3	+0.2	+66.7	0.3	0.4	+0.1	+25.0	0.1	0.2	+0.1	+50.0	Cd<2.0 低於規範
鉻(Cr)	62.3	72.3	+10.0	+13.8	124.6	57.5	-67.1	-53.9	263.9	85.9	-178.0	-67.5	88.7	68.6	-20.1	-22.7	Cr<150 低於規範
銅(Cu)	16.4	23.0	+6.6	+28.7	10.4	15.9	+5.5	+34.6	18.6	22.2	+3.6	+16.2	17.7	22.1	+4.4	+20.0	Cu<100 低於規範
汞(Hg)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	Hg<1.0 低於規範
鎳(Ni)	11.7	12.4	+0.7	+5.6	19.5	10.5	-9.0	-46.2	35.8	13.4	-22.4	-62.6	14.8	10.3	-4.5	-30.4	Ni<25.0 低於規範
鉛(Pb)	6.5	15.0	+8.5	+56.7	5.3	11.1	+5.8	+52.3	9.2	14.9	+5.7	+38.3	5.6	10.8	+5.2	+48.1	Pb<150 低於規範
鋅(Zn)	77.0	179.2	+102.2	+57.0	52.1	86.0	+33.9	+39.4	102.0	102.7	+0.7	+0.7	76.5	83.5	+7.0	+8.4	Zn<500 低於規範

註：雜項堆肥規範：指對最終堆肥成品有害成分之規範。ND：表示低於偵測極限值。堆肥元素含量變化率，其中正值代表增加，負值代表減少。

表 4-8 四試驗組堆肥化元素含量變化(續)

槽體別 /元素 (mg/kg)	GLT				CGLT				GLT+GC				GLT+GC+Cg			
	初始	最終堆 肥成品	變化值	變化 率%	初始	最終堆 肥成品	變化值	變化 率%	初始	最終堆 肥成品	變化值	變化 率%	初始	最終堆 肥成品	變化值	變化 率%
鈣(Ca)	32361.8	26551.6	-5810.2	-18.0	31447.8	22507.9	-8939.9	-28.4	17708.3	19689.6	+1981.3	+10.1	16741.9	15184.2	-1557.7	-9.3
鐵(Fe)	3894.3	12351.9	+8457.6	+68.5	3458.5	10727.5	+7269.0	+67.8	12080.3	14024.6	+1944.3	+13.9	3360.9	10770.6	+7409.7	+68.8
錳(Mn)	87.2	184.0	+96.8	+52.6	73.5	159.6	+86.1	+53.9	160.8	209.5	+48.7	+23.2	76.9	170.9	+94.0	+55.0

註：堆肥元素含量變化率，其中正值代表增加，負值代表減少。



4-3 堆肥體積變化及質量平衡

4-3-1 堆肥體積變化

廢棄物經堆肥處理之後，所形成的成品叫做堆肥(compost)。體積減少顯示出材料腐熟之進度，其減少程度可依材料種類、堆積之密度及發熱溫度狀況而異。一般而言，經堆肥化後可縮小至原來體積之 30~50%。

本研究第一槽 GLT 試驗如表 4-9 顯示，初始進料重量及體積分別為 120.4kg、0.9 m³，最終堆肥成品減少之重量及體積分別為 64.8kg、0.8 m³ (重量及體積減少率分別為 53.8%、88.9%)，第二槽 CGLT 試驗初始進料重量及體積分別為 131.3kg、1.0 m³，最終堆肥成品減少之重量及體積分別為 70.3kg、0.1 m³ (重量及體積減少率分別為 46.5%、90.0%)，第三槽 GLT+GC 試驗初始進料重量及體積分別為 153.2kg、1.2m³，最終堆肥成品減少之重量及體積分別為 63.3kg、0.11 m³ (重量及體積減少率分別為 58.8%、91.7%)，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗初始進料重量及體積分別為 128.0kg、1.0m³，最終堆肥成品減少之重量及體積分別為 72.7kg、0.9m³ (重量及體積減少率分別為 56.8%、90.0%)。

以第三槽 GLT+GC 重量及體積減少率為最多，依序為第四槽 GLT+GC、GLT+GC+Cg、第二槽 CGLT、第一槽 GLT，整體四個試驗組經堆肥化後重量及體積均減少 50% 以上，符合文獻所述。

表 4-9 四個試驗組重量及體積變化

槽體類別	初始進料		最終肥料成品		變化值/變化率			
	重量	體積	重量	體積	重量		體積	
	(kg)	(m ³)	(kg)	(m ³)	(kg)	(%)	(m ³)	(%)
GLT	120.4	0.9	55.6	0.1	-64.8	-53.8	-0.8	-88.9
CGLT	131.3	1.0	70.3	0.1	-61.0	-46.5	-0.9	-90.0
GLT+GC	153.2	1.2	63.3	0.1	-89.9	-58.8	-1.1	-91.7
GLT+GC+Cg	128.0	1.0	55.3	0.1	-72.7	-56.8	-0.9	-90.0

註：正值代表增加，負值代表減少。

綜合四試驗組重量及體積變化，如運用於實場設計以庭園廢棄物為堆肥基質，槽體設計尺寸約 1.3 m³ 可處理約 128.0~153.2 kg 庭園廢棄物量，進一步推估進料 1.0 m³，可產出約 0.1 m³(61.0~89.9 kg)堆肥產品，依此可以處理量多寡來推算出所需槽體尺寸大小，以作為實場設計之參考基準。

4-3-2 堆肥質量平衡

隨堆肥化生物降解反應過程中，會導致基質之質量及水分含量等產生變化，因本研究採戶外露天設置堆肥槽易受環境因素而影響，對於滲出水、水分蒸散及氣體逸散之監測不易情況下，由堆肥前後基質之質量變化來分析四試驗組之質量平衡如圖 4-25 至圖 4-29 所示。

本研究第一槽 GLT 試驗如圖 4-25 顯示，進料之乾物重量 55.1 kg、水分重量 64.9kg，進料總重為 120.4kg，經堆肥化反應後，肥料成品水分重量 21.8kg，經換算其滲出液及水分散失 36.9 kg(散失率 30.6%)，氣體轉化量 15.9

kg(轉化率 13.2%)，肥料成品乾物重 33.8 kg(轉化率 61.3%)，肥料成品總重為 55.6kg(轉化率 46.2%)，進料量等於肥料成品量、水分散失量、氣體轉化量及採樣損失量可達質量平衡。

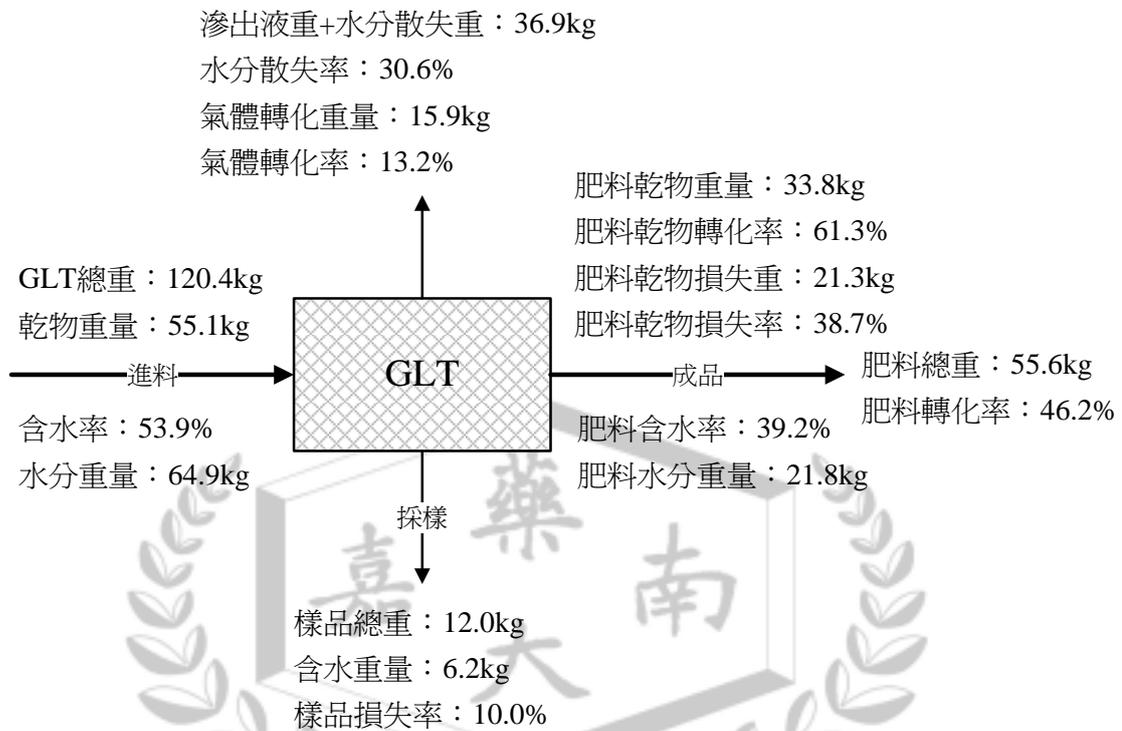


圖 4-25 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT 之質量平衡圖

本研究第二槽 CGLT 試驗如圖 4-26 顯示，進料之乾物重量 75.9 kg、水分重量 55.4kg，進料總重為 131.3kg，經堆肥化反應後，肥料成品水分重量 28.1kg，經換算其滲出液及水分散失 21.1 kg(散失率 16.1%)，氣體轉化量 27.9kg(轉化率 21.2%)，肥料成品乾物重 42.2 kg(轉化率 55.6%)，肥料成品總重為 70.3kg(轉化率 53.5%)，進料量等於肥料成品量、水分散失量、氣體轉化量及採樣損失量可達質量平衡。

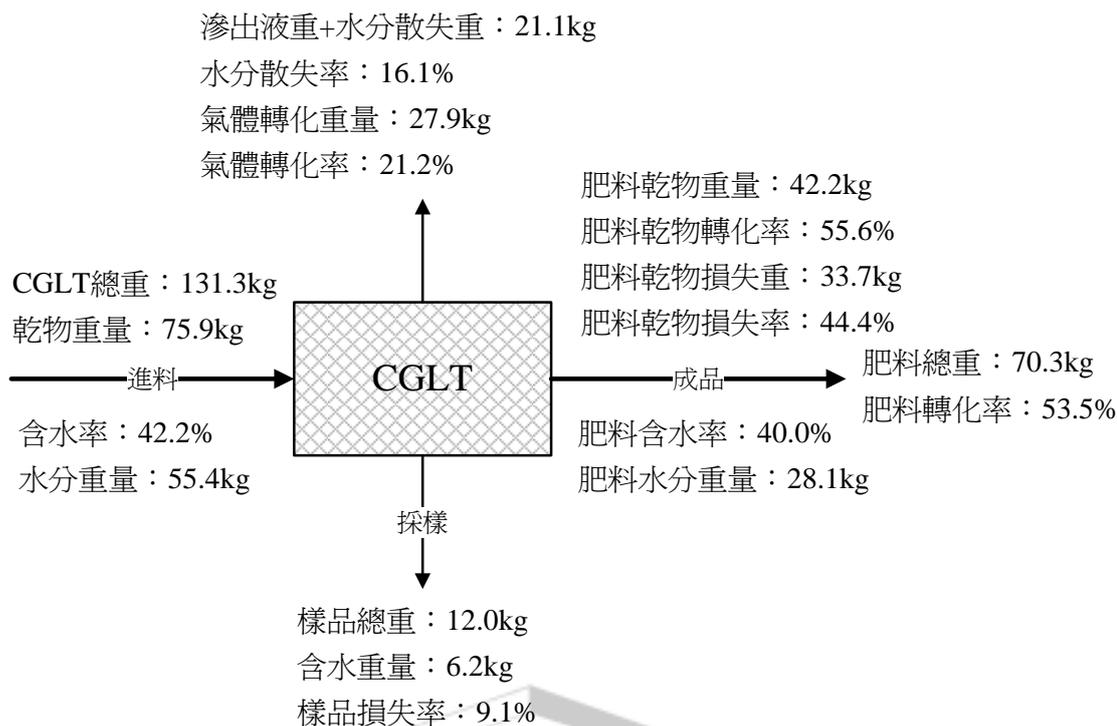


圖 4-26 庭園廢棄物堆肥化過程 CGLT 之質量平衡圖

本研究第三槽 GLT+GC 試驗如圖 4-27 顯示，進料之乾物重量 52.9 kg、水分重量 100.3kg，進料總重為 153.2kg，經堆肥化反應後，肥料成品水分重量 24.4kg，經換算其滲出液及水分散失 68.8g(散失率 44.9%)，氣體轉化量 9.1kg(轉化率 5.9%)，肥料成品乾物重 38.9kg(轉化率 73.5%)，肥料成品總重為 63.3kg(轉化率 41.3%)，進料量等於肥料成品量、水分散失量、氣體轉化量及採樣損失量可達質量平衡。

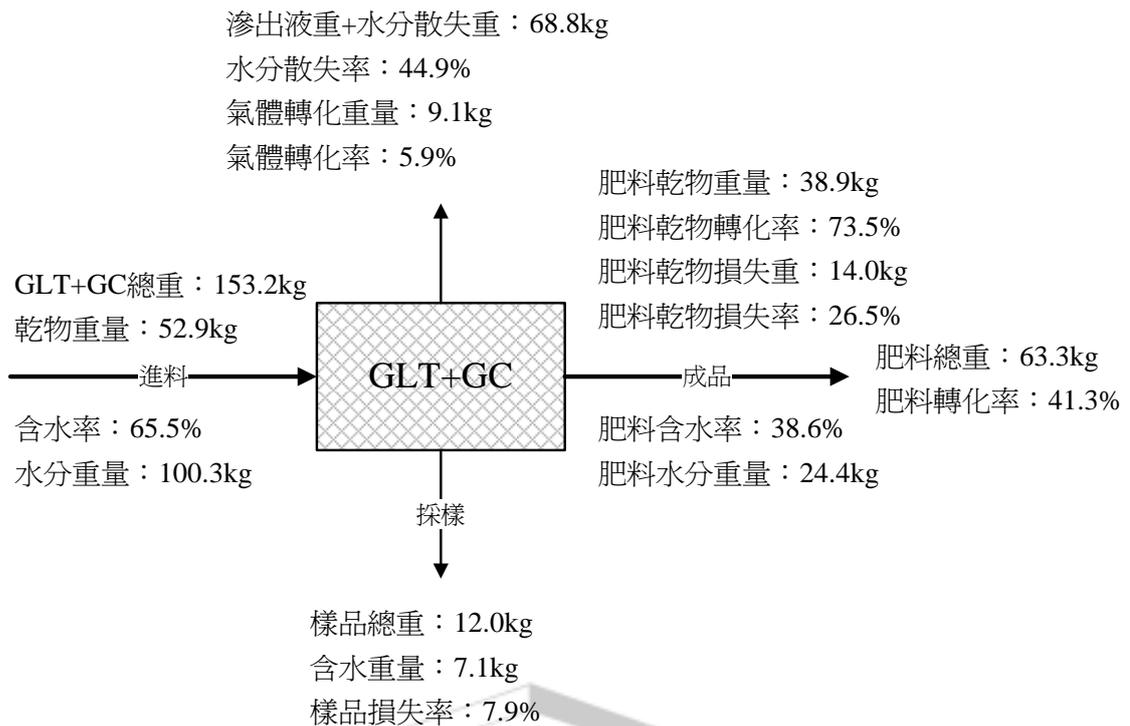


圖 4-27 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC 之質量平衡圖

本研究第四槽 GLT+GC+Cg 試驗如圖 4-27 顯示，進料之乾物重量 45.4 kg、水分重量 82.6kg，進料總重為 128.0kg，經堆肥化反應後，肥料成品水分重量 21.3kg，經換算其滲出液及水分散失 54.0g(散失率 42.2%)，氣體轉化量 8.7kg(轉化率 6.8%)，肥料成品乾物重 32.0kg(轉化率 70.5%)，肥料成品總重為 53.3kg(轉化率 41.6%)，進料量等於肥料成品量、水分散失量、氣體轉化量及採樣損失量可達質量平衡。

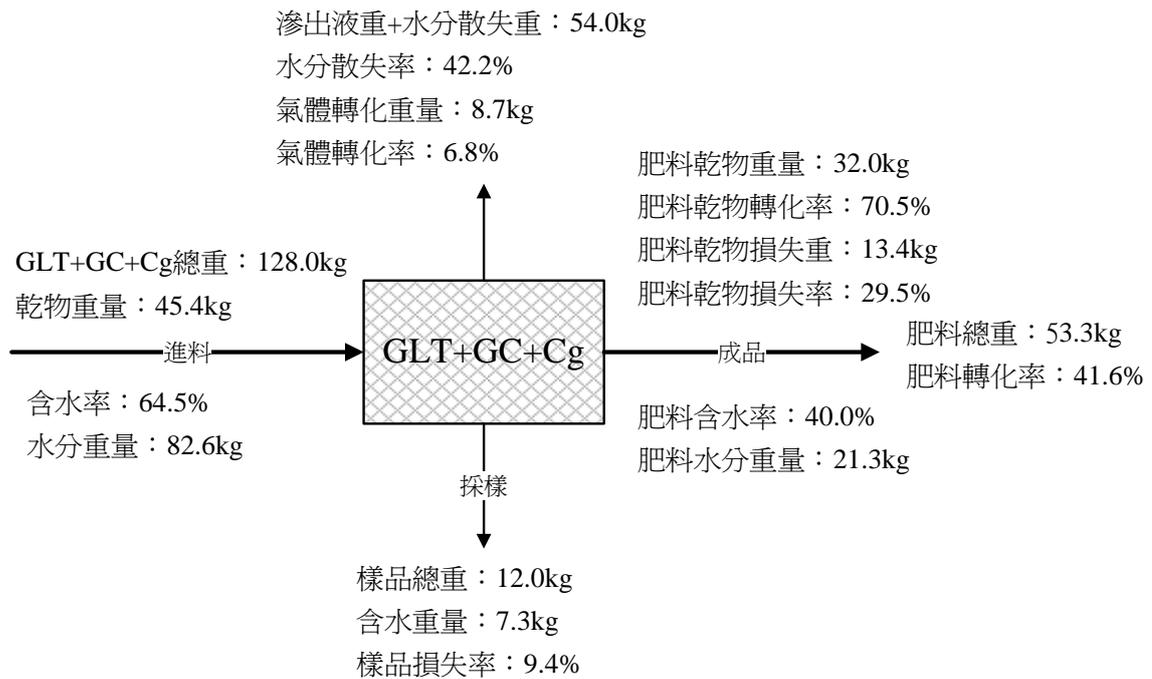


圖 4-28 庭園廢棄物堆肥化過程 GLT+GC+Cg 之質量平衡圖

觀察上述四試驗，水分散失以添加有草屑第三槽 GLT+GC 最多，其次為第四槽 GLT+GC+Cg。氣體轉化則以第二槽 CGLT 最多；其次為第一槽 GLT。肥料成品轉化率平均介於 41.3%~53.5%，以第二槽 CGLT 轉化率最佳，依序為第一槽 GLT、第四槽 GLT+GC+Cg 及第三槽 GLT+GC。肥料成品乾物轉化率平均介於 55.6%~73.5%，以第三槽 GLT+GC 轉化率最佳，依序為第四槽 GLT+GC+Cg、第一槽 GLT 及第二槽 CGLT。

4-4 堆肥化過程之種子發芽率(G)及種子發芽指數(GI)變化

為評估庭園廢棄物堆肥成品對植物生長之影響，本研究利用供試作物不結球白菜(別稱小白菜 Pak-choi)(學名:Brassica chinensis Linn.)之種子發芽率及發芽率指數來測試堆肥之腐熟度。不結球白菜為我國居家常食用之蔬

菜之一，其發芽的最適溫度為 20°C~25°C，具有對土壤的適應性較強、對土壤的要求不嚴格、全年皆可種植，而且發芽及生長期短等特性(發芽期 3 天，生長期 30 天)，故常被列為種子發芽率試驗之供試樣品。在經過三天恆溫 25°C 四試驗組各階段堆肥進行試驗後之種子發芽率(G)及種子發芽率指數(GI)詳如表 4-10 及圖 4-29、圖 4-30 所示。

本研究第一槽 GLT 試驗中初始發芽率(G)為 70.0%；發芽率指數(GI) 為 33.9%，最終堆肥成品發芽率(G)為 92.5%；發芽率指數(GI) 為 191.4%，第二槽 CGLT 試驗中初始發芽率(G)為 82.5%；發芽率指數(GI) 為 103.3%，最終堆肥成品發芽率(G)為 92.5%；發芽率指數(GI) 為 133.2%，第三槽 GLT+GC 試驗中初始發芽率(G)為 80.0%；發芽率指數(GI) 為 85.6%，最終堆肥成品發芽率(G)為 90.0%；發芽率指數(GI) 為 102.8%，第四槽 GLT+GC+Cg 試驗中初始發芽率(G)為 85.0%；發芽率指數(GI) 為 89.1%，最終堆肥成品發芽率(G)為 100.0%；發芽率指數(GI) 為 162.0%。各試驗組最終堆肥成品發芽率(G)介於 90.0~100.0%之間(空白試驗為 95.0%)，依據文獻指出利用種子發芽率(G)以進行腐熟度測定，發芽率(G)達 50%以上可視為堆肥腐熟之表徵，試驗各組最終堆肥成品皆能符合文獻。

而在種子發芽率指數(GI)試驗中其各試驗組最終堆肥成品之種子發芽率指數(GI)介於 102.8~191.4%之間，依據文獻指出以種子發芽率與根長度來計算發芽率指數(GI)，當 GI 大於 50%時，表示堆肥對植物已基本沒有毒性，

堆肥已基本腐熟；而當 GI 大於 80%時，可認為堆肥已完全腐熟，施用既不抑制種子萌芽，也不會影響根系生長，甚至還能促進根系生長^[46]。由上述各實驗組最終堆肥成品皆能符合文獻。

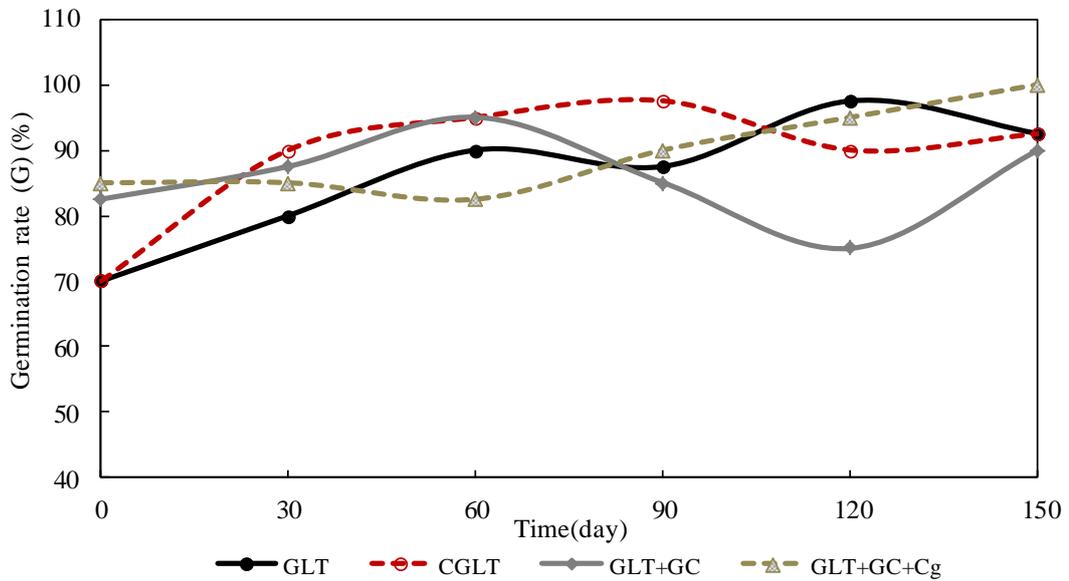


圖 4-29 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之種子發芽率(G)變化

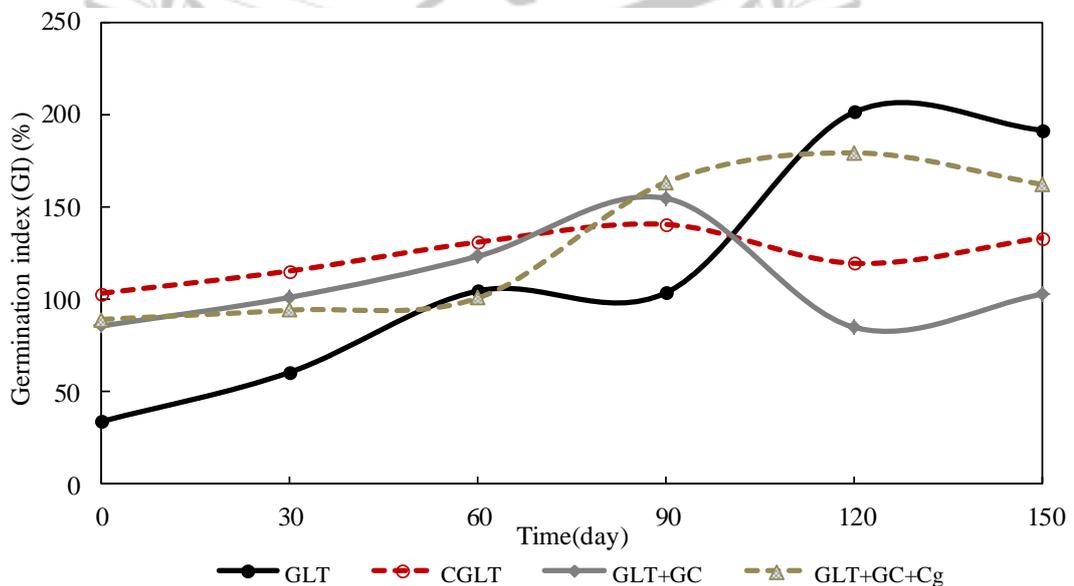


圖 4-30 庭園廢棄物堆肥化過程各試驗之種子發芽率指數(GI)變化

再由本研究四試驗組中可觀察到種子發芽率(G)與pH及EC存在相關性，在 pH 為 7 左右時顯示其有較高發芽率；低於 pH 7 及高於 pH 8 則發芽率略低，而 EC 越高其發芽率越低，可見庭園廢棄物經堆肥化處理其 pH 能接近中性或弱鹼性，且導電度 EC 也能低於 2ms/cm，不影響植物發芽及根系之生長。



表 4-10 四試驗組不結球白菜種子發芽率及發芽率指數生長變化

槽體別 /Time (day)	GLT							CGLT						
	播種 數	發芽 數	平均根 長(cm)	pH	EC (ms/cm)	G (%)	GI (%)	播種 數	發芽 數	平均根長 (cm)	pH	EC (ms/cm)	G (%)	GI (%)
0	40	28	0.8	6.6	2.4	70.0	33.9	40	33	2.2	6.7	2.1	82.5	103.3
30	40	32	1.3	7.0	1.5	80.0	60.6	40	36	2.2	6.8	1.3	90.0	115.3
60	40	36	2.0	7.6	0.7	90.0	104.5	40	38	2.4	7.7	0.6	95.0	130.9
90	40	35	2.0	7.9	0.9	87.5	103.7	40	39	2.5	8.0	1.0	97.5	140.4
120	40	39	3.6	7.3	0.4	97.5	201.3	40	36	2.3	7.7	0.9	90.0	119.4
150	40	37	3.6	7.6	0.4	92.5	191.4	40	37	2.5	7.8	0.5	92.5	133.2
CK	40	38	1.8			95.0								

註：CK：指對空白對照組。G(%)：種子發芽率，GI(%)：指種子發芽率指數。

表 4-10 四試驗組不結球白菜種子發芽率及發芽率指數生長變化(續)

槽體別 /Time (day)	GLT+GC							GLT+GC+Cg						
	播種 數	發芽 數	平均根 長(cm)	pH	EC (ms/cm)	G (%)	GI (%)	播種 數	發芽 數	平均根 長(cm)	pH	EC (ms/cm)	G (%)	GI (%)
0	40	32	1.8	7.1	4.9	80.0	85.6	40	34	1.8	7.0	2.3	85.0	89.1
30	40	35	2.0	7.3	3.9	87.5	101.1	40	34	1.9	6.9	2.1	85.0	94.1
60	40	38	2.2	7.5	2.9	95.0	123.3	40	33	2.1	7.6	1.9	82.5	100.7
90	40	34	3.1	7.8	1.8	85.0	154.5	40	36	3.1	7.9	1.0	90.0	163.3
120	40	30	1.9	7.6	1.7	75.0	84.7	40	38	3.2	7.5	1.5	95.0	179.2
150	40	36	2.0	7.9	0.3	90.0	102.8	40	40	2.8	7.6	0.6	100.0	162.0
CK	40	38	1.8			95.0								

註：CK：指對空白對照組。G(%)：種子發芽率，GI(%)：指種子發芽率指數。

4-5 供試盆栽試驗植物生長變化

為瞭解堆肥成品實際用於植種之效益，本研究以不結球白菜(別稱小白菜 Pak-choi)(學名:Brassica chinensis Linn.) (台農 2 號)為指標作物進行盆栽試驗。分為 A 試驗組(無土壤配比)及 B 試驗組(有土壤配比)以瞭解不結球白菜生長狀況。

由表 4-11 及圖 4-31 觀察在 A 試驗組(無土壤配比)中隨時間進程不結球白菜生長根部平均長以 GLT+GC+Cg 試驗 9.6cm >GLT 試驗 7.7cm >GLT+GC 試驗 7.6cm > CGLT 試驗 6.5cm，以 GLT+GC+Cg 試驗根部生長較為茂密。地上部平均長以 GLT+GC+Cg 試驗 13.6cm >GLT+GC 試驗 11.6cm > CGLT 試驗 10.5cm > GLT 試驗 8.3cm。整株長以 GLT+GC+Cg 試驗 23.2cm >GLT+GC 試驗 19.2cm > CGLT 試驗 17.0cm > GLT 試驗 16.0cm。整株重量以 GLT+GC+Cg 試驗 7.5g >GLT+GC 試驗 6.1g > CGLT 試驗 1.6g > GLT 試驗 1.1g。整體而言以第四槽 GLT+GC+Cg 試驗在無土壤配比狀況下其根部及地上部生長都相較其他試驗組，可以提供較充足之營養元素供不結球白菜生長。

表 4-11 A 試驗組(無土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長變化

植株/槽體別	day	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
根部平均長 (cm)	9	1.2	3.0	5.5	3.1
	18	3.0	4.2	6.5	6.7
	27	7.7	6.5	7.6	9.6
地上部平均長 (cm)	9	3.9	4.3	4.2	3.4
	18	5.7	6.8	6.0	7.3
	27	8.3	10.5	11.6	13.6
整株長(cm)	9	5.1	7.3	9.6	6.5
	18	8.8	11.0	12.5	14.1
	27	16.0	17.0	19.2	23.2
整株重量 (g)	9	0.1	0.1	1.2	1.1
	18	0.5	0.6	2.1	4.8
	27	1.1	1.6	6.1	7.5



圖 4-31 A 試驗組(無土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長狀況

由表 4-12 及圖 4-32 觀察在 B 試驗組(有土壤配比)中隨時間進程不結球白菜生長根部平均長以 CGLT 試驗 9.5cm > GLT+GC+Cg 試驗 6.5cm >GLT+GC 試驗 5.9cm > CK 試驗 5.5cm>GLT 試驗 4.9cm。地上部平均長以 GLT+GC+Cg 試驗 17.4cm >GLT+GC 試驗 16.5cm > GLT 試驗 15.4cm > CGLT 試驗 12.1cm > CK 試驗 4.5cm。整株長以 GLT+GC+Cg 試驗 23.7cm >GLT+GC 試驗 22.4cm > CGLT 試驗 21.7cm > GLT 試驗 20.2cm> CK 試驗 10.0cm。整株重量以 GLT+GC+Cg 試驗 16.4g > GLT 試驗 8.5g >GLT+GC 試驗 7.6g > CGLT 試驗 6.4g> CK 試驗 0.3g。整體而言仍以第四槽 GLT+GC+Cg 試驗在有土壤配比狀況下相較其他試驗組，可以提供較充足之營養元素供不結球白菜生長。

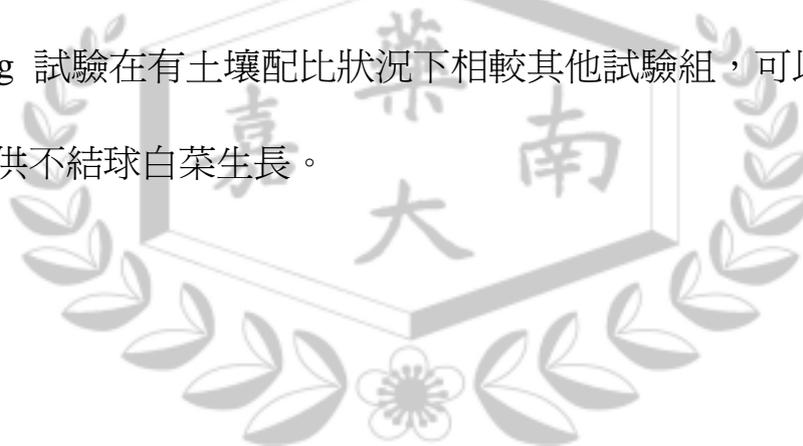


表 4-12 B 試驗組(有土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長變化

植株/槽體別	day	CK	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
根部平均長 (cm)	9	2.1	3.2	3.4	3.6	2.5
	18	2.6	3.5	6.4	4.7	5.3
	27	5.5	4.9	9.5	5.9	6.3
地上部平均長 (cm)	9	2.5	4.3	4.7	5.5	4.5
	18	2.7	7.0	7.0	7.1	8.0
	27	4.5	15.4	12.1	16.5	17.4
整株長(cm)	9	4.6	7.6	8.1	9.1	7.0
	18	5.2	10.5	13.4	11.9	13.3
	27	10.0	20.2	21.7	22.4	23.7
整株重量 (g)	9	0.1	0.5	0.2	0.6	0.9
	18	0.2	1.5	2.3	1.4	3.8
	27	0.3	8.5	6.4	7.6	16.4

CK：為對照組僅有土壤。



圖 4-32 B 試驗組(有土壤配比)中四試驗組不結球白菜生長狀況

本研究在有施用庭園廢棄物經堆肥化之有機肥料相較於僅有土壤(對照組)植種，有機肥料確實能提供改善土壤的物理結構、增進礦物質溶解、增進團粒、及保水力作用來提高土壤肥力之效益，而促使植物根系及地上部之生長。

再觀察 B 試驗組(有土壤配比)相較於 A 試驗組(無土壤配比)研究中，庭園廢棄物經堆肥化後之有機肥料於 A 試驗組(無土壤配比)雖可提供肥分及營養元素以供試不結球白菜之生長，但在 B 試驗組(有土壤配比)，因混合土壤基質其所蘊含之營養元素及提高水分保持能力等有利條件，能輔以庭園廢棄物堆肥化之有機肥料之不足，更能促進植物生長，整體株長、重量、地上部生長及葉片都有最佳表現。

4-6 綜合討論

4-6-1 試驗結果綜合分析

綜合本研究各試驗之結果彙整如表 4-13 所示，大致上皆能符合行政院農業委員會農糧署公告「肥料種類品目及規格」中的雜項堆肥(編號 5-11)規範標準，惟四試驗組堆肥成品之 C/N 略高及有機質略低於堆肥品質規範之要求。整體庭園廢棄物堆肥各項參數表現以第四槽 GLT+GC+Cg 最佳，依次為第三槽 GLT+GC，第二槽 CGLT 及第一槽 GLT。

表 4-13 各試驗結果統計及比較

項目/槽體別	GLT		CGLT		GLT+GC		GLT+GC+Cg		
	堆肥	優劣	堆肥	優劣	堆肥	優劣	堆肥	優劣	
	規範	表現	規範	表現	規範	表現	規範	表現	
溫度	●	2	▽	1	●	3	●	4	
pH	●	4	●	4	●	4	●	4	
含水率%	●	3	●	1	●	4	●	2	
EC	-	3	-	2	-	4	-	1	
有機質	▽	2	▽	3	▽	1	▽	4	
TN	●	3	●	2	●	1	●	4	
C/N	▽	2	▽	1	▽	4	▽	3	
P ₂ O ₅	●	3	●	1	●	3	●	4	
K ₂ O	●	3	●	3	●	3	●	4	
重金屬含量	砷(As)	●	2	●	3	●	1	●	4
	鎘(Cd)	●	3	●	2	●	1	●	4
	鉻(Cr)	●	2	●	4	●	1	●	3
	銅(Cu)	●	1	●	4	●	2	●	3
	汞(Hg)	●	4	●	4	●	4	●	4
	鎳(Ni)	●	2	●	3	●	4	●	4
	鉛(Pb)	●	1	●	3	●	2	●	4
	鋅(Zn)	●	1	●	3	●	2	●	4
堆肥化時間	-	2	-	1	-	4	-	4	
成品肥料轉化率	-	3	-	4	-	1	-	2	
成品肥料乾物轉化率	-	2	-	1	-	4	-	3	

表 4-13 各試驗結果統計及比較(續)

項目/槽體別	GLT		CGLT		GLT+GC		GLT+GC+Cg		
	堆肥	優劣	堆肥	優劣	堆肥	優劣	堆肥	優劣	
	規範	表現	規範	表現	規範	表現	規範	表現	
種子發芽率 G (%)	-	2	-	3	-	1	-	4	
種子發芽指數 GI(%)	-	2	-	3	-	1	-	4	
盆栽試驗(A)	株長	-	1	-	2	-	3	-	4
	珠重	-	1	-	2	-	3	-	4
盆栽試驗(B)	株長	-	1	-	2	-	3	-	4
	珠重	-	3	-	1	-	2	-	4
計分	58		63		66		93		

註：1.「●」為符合我國相關堆肥法令規範值；「▽」為未符合我國相關堆肥法令及規範值。

2.優劣表現：最優以 4 分、優以 3 分、普通以 2 分、差以 1 分計。

4-6-2 庭園廢棄物堆肥化操作流程

歷經 150 天實務操作，彙編建立簡易庭園廢棄物堆肥化操作流程以供操作之參考，分述詳如圖 4-33 及圖 4-34 所示。

1.多槽輪翻堆式堆肥槽

參考我國南部某科技大學校園落葉堆肥操作流程增修建立。

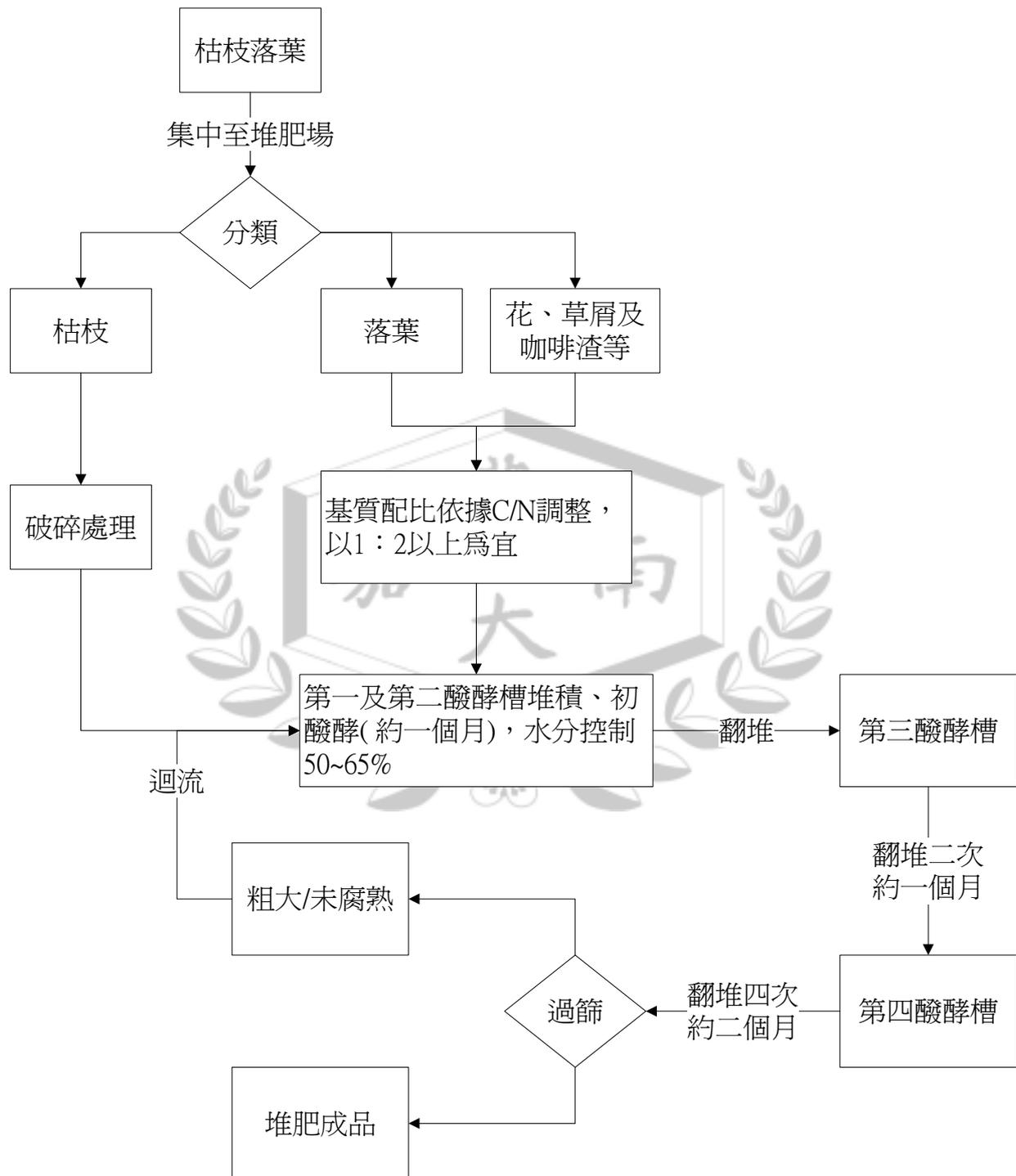


圖 4-33 多槽輪翻堆式堆肥槽操作流程

2.單槽翻堆式堆肥槽

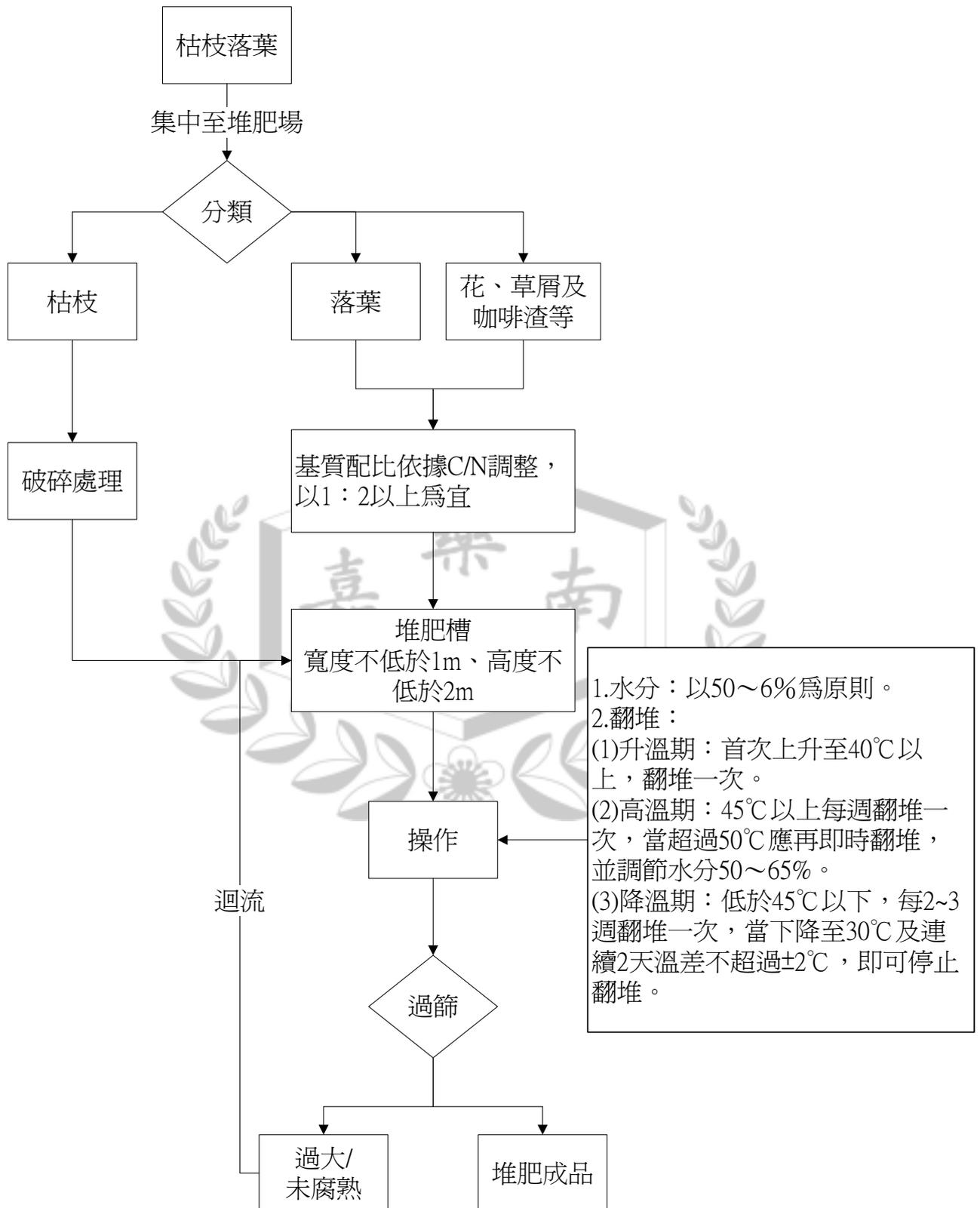


圖 4-34 單槽翻堆式堆肥槽操作流程

第五章 結論與建議

5-1 結論

本研究以庭園廢棄物進行好氧堆肥化實驗，並藉由操作因子(水分、配比、翻堆等)之控制，探討各因子對基質分解效率之影響，找出最適化操作條件，並建立適當操作模式，由實驗結果歸納出下列結論：

1. 根據本研究的堆肥基質中以 GLT+GC 與 GLT+GC+Cg，於好氧堆肥過程中，第 7 天即可進入高溫嗜熱期，並且於高溫維持天數分別約有 14 天及 21 天，能達到高溫殺死害蟲及雜草種子衍生之效益，相較於 GLT 與 CGLT 試驗中因其在氮源不足條件下，其微生物生長較趨為緩慢，故此類以純植物性落葉為基質堆肥化可適時添加高氮含量資材，以調整初始碳氮比有利於堆肥化反應啟動。而且從反應過程中較明顯的溫度尖峰值有兩波，此現象應與有機物之成份有關。可推論有機物之分解應具階段性，即易分解物質(如醣類、澱粉、蛋白質、脂肪等)於生物降解初期快速達到分解，而纖維素、半纖維素等難分解之有機物於生物降解中、後期分解。
2. GLT+GC 與 GLT+GC+Cg 試驗於 112 天已貼近環境溫度並呈現穩定變化，而 GLT 試驗則於 119 天貼近環境溫度呈現穩定變化，故可推論四堆肥槽基質所需腐熟時間以 GLT+GC 與 GLT+GC+Cg 試驗最短，其次為 GLT 試驗，最後為 CGLT 試驗。

- 3.就 pH 變化而言四槽實驗組仍符合多數文獻研究，微生物適宜在中性或弱鹼環境中生長，庭園廢棄物堆肥原料或醱酵初期 pH 為弱酸到中性，腐熟時呈中性或偏弱鹼性。
- 4.含水率會受堆肥化升溫、翻堆與堆肥醱酵作用之關係而有所變化，GLT+GC 與 GLT+GC+C 二實驗組因富含草屑初期水分偏多，但經操作控制最終含水率仍可符合農委會雜項堆肥規範 40%以下，若實務操作水分仍過高則可透過曝曬程序以降低含水率。
- 5.雖部分基質初始 EC 值偏高，但經堆肥化後平均各試驗組 EC 值在第 90 天都已降至 2 ms/cm 以下，表示為一般作物可以正常生長，最終 EC 值分別在 0.3~0.6 ms/cm，其產品可用以土壤肥力調整。
- 6.四實驗組最終堆肥成品之 TN 皆能符合雜項堆肥品目規範，但 C/N 變化呈現後期明顯上升之趨勢，最終堆肥成品 C/N 皆略高於規範值，與一般研究不同，推論因落葉完全分解後含有大量微生物難分解之有機碳所致。
- 7.四實驗組之 P_2O_5 及 K_2O 含量雖皆能符合雜項堆肥規範值，但普遍含量偏低，可見以純植物為基質，若作為肥料而言屬肥分偏低資材。
- 8.四實驗組經堆肥化後最終堆肥成品其重金屬含量，皆低於雜項堆肥品目規範值，重金屬含量分佈皆以鋅(Zn)>鉻(Cr)>銅(Cu)>鉛(Pb)>鎳(Ni)>砷(As)>鎘(Cd)，顯示庭園廢棄物經堆肥化後鋅(Zn)含量累積較為顯著，鋅(Zn)亦

為作物所需微量營養元素之一，故在落葉等植物性有機廢棄物，皆有相較於其他元素含量較多趨勢。

9.以廢棄物減量觀點而言，庭園廢棄物經堆肥化處理後能達成廢棄物體積減少可達 88.9~91.2%，堆肥成品之肥料轉化率 41.3%~53.5%，堆肥成品之乾物肥料轉化率 55.6%~73.5%，顯示堆肥化處理確實是此類廢棄物處置良好選項之一。

10.種子發芽率(G)、種子發芽率指數(GI)與 pH 及 EC 存在相關性，在 pH 為 7 左右時顯示其有較高發芽率；低於 pH 7 及高於 pH 8 則發芽率略低，而且 EC 越高其發芽率越低。

11.由實務操作經驗，槽體設計尺寸約 1.3 m³可處理約 128.0~153.2 kg 庭園廢棄物量，進一步推估進料 1.0 m³，可產出約 0.1 m³(61.0~89.9 kg)堆肥產品，依此可以處理量多寡來推算出所需槽體尺寸大小，以作為實場設計之參考基準。

12.盆栽試驗中以第四槽 GLT+GC+Cg 試驗在有土壤配比狀況下相較其他試驗組，更具有充足之營養元素可供不結球白菜生長。

13 整體庭園廢棄物堆肥各項參數試驗結果以第四槽 GLT+GC+Cg 表現最佳，依次為第三槽 GLT+GC，第二槽 CGLT 及第一槽 GLT。

14 以純植物庭園廢棄物堆肥，在不額外添加動物性基質、添加劑或菌種條件下操作，雖顯示有氮、磷、鉀等營養肥力略低及堆肥期程略長(約 3.5~5

個月)劣勢外，但在具有操作成本最低及取材方便等優勢下，同樣可提供作為土壤改良劑以活化土壤品質，營造優質生態效益。

5-2 建議

1. 由研究結果顯示，庭園廢棄物經好氧堆肥法穩定後之堆肥產品與市售肥料之肥分尚無法比擬。因此，若以廢棄物減量為出發點思維實為此類廢棄物最適當處理措施。如欲提升其堆肥價值，可藉由添加高氮素資材方式，使反應物料在達到穩定化時仍可保留較多的氮、磷及鉀等營養元素。
2. 由研究結果顯示，庭園廢棄物經好氧堆肥後能充分降解廢棄物體積，但在施用上仍建議與土壤混合可提高其效益。
3. 目前庭園廢棄物堆肥化再利用在我國仍停留在僅少部分學校及實驗研究領域階段，觀察此類廢棄物產生量在國內仍是不容小覷，但目前大部分仍都是進入焚化體系處理，無形中造成嚴重資源浪費及違背我國廢棄物多元化資源再利用政策與「零廢棄」願景，期望能透過實務堆肥化操作及相關成分分析，以作為政府對此類廢棄物處理有效推廣，達到廢棄物減廢、減碳、減費、再利用等總體營造。

第六章 參考文獻

1. 呂依純，“行道樹的美麗與哀愁—談行道樹維護與環境教育”，北市師環教季刊，64 期，臺北市立教育大學環境教育所，P24，(2006)。
2. 行政院環境保護署，“中華民國環境保護統計年報”，102 年，P 2-100-P 2-111，(2013)。
3. Thomas, M. Terry, (1998), “Animation of the Nitrogen Cycle” , University of Connecticut.
<http://www.sp.uconn.edu/~terry/229sp02/lectures/Ncycleanim.html>。
4. Kawamura, K. (2002), “Technologies for Organic Wastes Regeneration Commercial Products and Application.” 有機廢棄物資源化處理技術演講暨座談會，高雄市政府環保局南區資源回收廠回饋設施視聽室，(2002)。
5. 劉康克，“自然界的氮循環”，科學月刊，183 期，P172-175，(1985)。
6. 劉兆玄，“糧食危機與氮的固定”，科學月刊，104 期，P50-52，(1978)。
7. 羅明典，“我國古代對土壤肥力的認識”，中國古代農業科技，農業出版社，北京，(1980)。
8. 廖雪芳，“自然農耕，有機報告貳”，92 期，漢聲出版社，(1997)。
9. “History of Composting” University of Illinois extension,
<http://web.extension.illinois.edu/homecompost/history.cfm>.

- 10.林殿琪，“論台灣家庭廚餘堆肥現況與未來發展之探討”，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文，(2000)。
- 11.行政院農業委員會農糧署，“肥料管理法”，(1999)，
http://www.afa.gov.tw/laws_index.asp?CatID=58。
- 12.高明堂、簡芙蓉，“土壤肥料”，財團法人豐年社，初版，台北，(1980)。
- 13.Jokela, W. E., (1992), “Nitrogen fertilizer and dairy manure effect on crop yield and soil nitrate.” *Soil Science Society of America Journal*, 56(1): 148-154.
- 14.Zocconi, F., A. Monaco, et al., (1985), “Phytotoxins during the stabilization of organic matter.” *Composting of Agricultural and Other Waste*, 73-86.
- 15.經濟部工業局，“堆肥技術與設備手冊及案例彙編”初版，(2005)。
- 16.柴曉利，張華，趙由才等，“固體廢物堆肥原理與技術”，化學工業出版社，北京，(2005)。
- 17.Narayan, R.,(2003), “Biodegradation of polymeric materials (anthropogenic 121 macromolecules) during composting” *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*.Renaissance Pub., Worthington, Ohio, 339-362.

18. Hoitink, H. A. J. and H. M. Keener, (1993), “Science and Engineering of Composting: Design, Environmental Microbiological and Utilization Aspects, The Ohio State University.
19. Brown, S., J. Scoot Angle, et al., (1998), “Beneficial Co-Utilization of Agricultural Municipal and Industrial By-Products.” Kluwer Academic Publishers.
20. Bernal, M. P., M. A. Sanchez-Monedero, et al., (1998) , “Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil” *Agriculture Ecosystems and Environment*, 69: 175-189.
21. 李國學，張福鎖，“固體廢棄物堆肥化與有機復混肥生產”，(再版)，化學工業出版社，北京，(2005)。
22. Epstein E., (1997), “The Science of Composting” E&A Environmental Consultants, Inc. Canton, MA.
23. 茹菁宇，尹雯，王家強，張無敵，“農田秸稈高溫好氧堆肥試驗研究”
可再生能源，25 卷，2 期，P37-40，(2007)。
24. 盧漫，黃東光，陳元科，周賢軍，彭堅，“園林植物廢棄物堆肥發酵關鍵技術參數變化分析”，深圳職業技術學院學報，10 卷，5 期，(2011)。

- 25.簡宣裕，“製造堆肥時材料的碳氮比及水分含量之調整”堆肥製造技術，特刊 88 號，P59-60，行政院農業委員會農業試驗所，(1999)。
- 26.林財旺，“禽畜糞堆肥化處理”，堆肥技術及其利用研討會論文集，中華生質能源學會，(1998)。
- 27.李健，張崢嶸，黃紹斌等，“固體廢棄物堆肥化研究進展”，廣東化工，1 期，P93-95，(2008)。
- 28.Madejon E., M. Jesus Diaz, et al., (2001), “Co-composting of sugarbeet vinasse: Influence of the organic matter nature of the bulking agents used.” *Bioresource Technology*, 76: 275-278.
- 29.Cornell Composting, “Crop and Soil Sciences” Cornell Waste Management Institute.,
<http://compost.css.cornell.edu/OnFarmHandbook/apa.tabal.html>.
- 30.林健三，林健榮，“固體廢棄物處理”，高立圖書有限公司，台北，四版，P 175，(2008)。
- 31.李應煌、盧金鎮，“家禽畜排泄物及其堆肥各種理化性狀成分調查分析”，八十三年度畜牧污染防治試驗研究計畫成果報告彙編，台灣省畜產試驗所編印，P189-194，(1994)。
- 32.楊盛行，“堆肥過程中微生物相變化及高溫放線菌之分離及應用”，土壤肥料試驗報告，台灣省政府農林編印，P338-357，(1994)。

- 33.Kumar, M., Y. L. Ou, et al., (2010), “Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio.” *Waste Manage*, 30(4): 602-609.
- 34.林鴻淇， “堆肥材料、堆肥化過程與堆肥品質” ，堆肥技術及其利用研討會論文集， P35-48 ， (1994) 。
- 35.Moral, R., C. Paredes, et al., (2009), “Utilization of manure composts by high-value crops: safety and environmental challenges” *Bioresource Technology*, 100(22): 5454-5460.
- 36.Jimenez, E. I. and Y. P. Garcia, (1989), “Evaluation of city refuse compost maturity : a review.” *Biological wastes*, 27(2):115-142.
- 37.Sellami F., S. Hachicha, et al., (2008), “Maturity assessment of composted olive mill wastes using UV spectra and humification parameters.” *Bioresource Technology*, 99(15): 6900-6907.
- 38.吳正宗，陳仁炫， “廚餘堆肥腐熟度指標之評估” ，*土壤與環境*，10 卷， 1-2 期， P53-68 ， (2007) 。
- 39.Yang, S. S., (1997), “Preparation of compost and evaluating its maturity.” *Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region, Extension Bulletin* 408.

40. Jimenez, E. I. and V. Perez Garcia, (1992), "Determination of maturity indices for city refuse compost." *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 38(4): 331-343.
41. Benito, M., A. Masaguer, et al., (2005), "Evaluation of maturity and stability of pruning waste compost and their effect on carbon and nitrogen mineralization in soil." *Soil Science*, 170(5): 360-370.
42. U.S. Regional Salinity Laboratory, (1954), "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils" Washington, D.C.: U.S. Dept. of Agriculture, *Agriculture handbook*, 60.
43. 陳鴻堂, "設施栽培之土壤管理", 土壤肥料, 台灣農家要覽-農作篇(一), 財團法人豐年社, P573, (2005)。
44. Aparna, C., P. Saritha, et al., (2007), "Techniques for the evaluation of maturity for composts of industrially contaminated lake sediments" *Waste Management*, 28(10):1773-1784.
45. Tiquia, S. M. and N.Y. F. Tam, (1998), "Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge." *Bioresource Technology*, 65(1-2): 43-49.
46. Zucconi, F., A. Pera, et al., (1981), "Evaluating toxicity of immaturity compost." *Biocycle*, 22:54-57.

47. Zubillaga, M. S. and R. S. Lavado, (2006), “Phytotoxicity of biosolids compost at different degrees of maturity compared to biosolids and animal manures” *Compost Science & Utilization*, 14(4): 267-270.
48. Karnchanawong, S. and N. Suriyanon, (2011), “Household organic waste composting using bins with different types of passive aeration” *Resources, Conservation and Recycling*, 55: 548-553.
49. 行政院農業委員會農糧署網站，
http://www.afa.gov.tw/peasant_index.asp?CatID=587
50. 林浩潭，“重金屬及微量元素對植物之影響”，台灣農家要覽-農作篇（三），財團法人豐年社，行政院農委會農業藥物毒物試驗所，(1995)。
51. 陳炳良，“有機堆肥施用對土壤性質之影響”，國立屏東科技大學環境工程與科學研究所論文，(2003)。
52. Alloway, B. J., (1990), “Heavy metals in soils.” Blackie and Son Ltd, London.
53. Kabata-Pendias, A. and H. Pendias, (1986), “Trace elements in soil and plants.” CRC press, Boca Raton, Florida.
54. 廖紅，嚴小龍，“高級植物營養學”，科學出版社，一版，北京，P11-14，(2003)。

55. Epstein, E., et al., (1972), "Mineral nutrition of plants: principles and perspectives." New York: Wiley.
56. Marschner, H., et al., (1995), "Mineral nutrition of higher plants." 2nd ed, Harcourt Brace and Company : Academic Press.
57. Mengel, K. and E. A. Kirkby, (2001), "Principles of plant nutrition." 5th ed, Londen: Kluwer Academic Publishers.
58. 張則周, "植物營養學" 五南圖書出版股份有限公司, 初版, 台北, P269-270, (2008)。
59. Stanford, G., M. H. Frere, et al., (1973), "Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization." *Soil Science*, 115(4): 321-323.
60. 毛炎, "利用園林綠化廢棄物優化城市綠地生態系統", 園林, 2 期, 園林雜誌社, 上海, (2012)。
61. 賀偉雄, "國軍營區廢棄物堆肥資源化執行模式之研究", 國立高雄第一科技大學環境工程研究所碩士論文, (2004)。
62. 王佩蓮, 劉美玲, "大地的維他命—落葉變堆肥之探討", 台北市立師範院自然科學教育研究所, (2000)。
63. "Designs for Composting Systems" Cornell Waste Management Institute, <http://cwmi.css.cornell.edu/composting.htm>.
64. U. S. EPA., (1999), "Organic Materials Management Strategies."

65. U. S. EPA., (2001), "Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2010" EPA-530-F-11-005.
66. 邱政文譯, "堆肥之現況", 生物可分解塑膠技術資訊, 美國穀物協會, (1999)。
67. Josef, B., K. Barbel, (1998), "Composting Process in Europe" BioCycle, 39(4): 65.
68. 陳月青, "校園落葉堆肥製作之研究-以桃園縣國民小學為例", 國立屏東科技大學環境工程系碩士論文, (2007)。
69. 王宏智, "園林綠化廢棄物再利用的思考", 北京市房山區園林綠化局, (2011)。
70. 鄭惠文, "庭園廢棄物有機堆肥簡易腐熟指標建立之研究", 國立高雄第一科技大學環境工程研究所碩士論文, (2012)。
71. 施學集, "國小校園有機廢棄物堆肥化", 私立大葉大學環境工程學系碩士論文, (2011)。
72. 蔡宜峯, 陳俊立, 陳榮五, "落葉廢棄物製作堆肥技術之研究", 臺中區農業改良場研究彙報, 103 期, P 53-62, (2009)。
73. 張定生, "高雄市公園廢棄物(樹枝葉)堆肥化可行性之研究", 國立屏東科技大學環境工程研究所碩士論文, (2003)。

74. Nelson, A. J. and L. E. Sommers., (1982), "Total carbon, Organic carbon and Organic matter. In: Methods of Soil Analysis (Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney eds), Part 2, 2nd. ed." , SSSA and ASS, Madison, WI, USA, 539-579.
75. Nookabkaew, S., N. Rangkadilok, et al., (2006), "Determination of Trace Elements in Herbal Tea Products and Their Infusions Consumed in Thailand" *Agricultural and Food Chemistry*, 54: 6939-6944.
76. 劉學玲，黃懿梅，薑繼韶，"微生物生理群在豬糞秸稈高溫堆肥碳氮轉化中的作用"，*中國環境工程學報*，6卷，5期，P1713-1720，(2012)。
77. 郭魁士，"土壤學"，中國書局，台北，P321-380，(1997)。
78. Chen, J. H., (1995), "Soil analysis manual" *The Chinese society of soil and fertilizer sciences*, Taichung, 253-273.
79. Young, C. C., (1997), "Soil and fertilizer" *Nong Shi*, Taichung, 62-102.
80. Twu, H. G., (1989), "Industries analysis and experiment" *Zheng Wen*, Taipei, 251-275.
81. Whittle, A. J. and A. J. Dyson, (2002), "The fate of heavy metals in green waste composting." *The Environmentalist*, 22(1): 13-21.

附錄一 四個試驗組堆肥化溫度(Temperature)監測紀錄

Time(days)	ambient	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
/槽體別	-----°C-----				
0	27.2	25.0	28.0	33.6	32.6
7	24.2	26.0	30.0	47.5	45.1
14	30.7	45.2	37.8	49.0	53.0
21	30.3	40.1	34.0	42.5	48.0
28	27.8	37.5	31.0	39.0	36.0
35	30.8	36.0	32.0	34.0	32.0
42	32.5	36.5	36.0	39.0	39.3
49	31.8	37.0	36.3	33.5	35.2
56	33.2	38.0	37.3	40.2	36.3
63	33.0	38.3	39.8	42.3	38.6
70	34.0	38.2	41.6	40.3	37.6
77	33.3	36.3	34.6	38.6	35.2
84	33.0	38.3	36.5	38.6	36.3
91	33.6	40.3	40.6	40.1	40.3
98	32.6	41.0	40.2	40.1	40.1
105	33.9	39.2	40.1	40.3	39.5
112	33.4	40.1	40.2	35.8	35.6
119	34.6	35.3	40.1	35.3	35.3
126	33.1	35.3	35.8	36.2	35.2
133	33.5	35.2	38.3	35.1	35.3
140	31.7	35.1	35.3	33.3	33.6
147	31.5	35.4	38.6	33.3	33.2
154	30.8	32.3	34.1	32.2	34.1

附錄二 四個試驗組堆肥化 pH 監測紀錄

Time(days) /槽體別	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
0	6.6	6.7	7.1	7.0
7	6.8	6.7	7.1	7.1
14	6.9	6.8	7.6	6.9
21	6.9	6.8	7.4	6.9
28	7.0	6.8	7.3	6.9
35	7.2	7.3	7.7	7.0
42	7.5	7.4	7.7	7.7
49	7.7	7.8	7.5	7.6
56	7.6	7.7	7.5	7.6
63	7.6	7.5	7.6	7.5
70	7.7	7.6	7.7	7.5
77	7.6	7.8	7.7	7.6
84	7.9	8.0	7.8	7.9
91	7.6	7.9	7.8	7.8
98	7.6	8.0	7.6	7.7
105	7.4	7.9	7.7	7.6
112	7.4	7.9	7.9	7.4
119	7.3	7.7	7.6	7.5
126	7.7	7.9	7.7	7.6
133	7.7	7.7	7.6	7.6
140	7.7	7.7	7.7	7.6
147	7.5	7.7	7.7	7.7
154	7.6	7.8	7.9	7.6

附錄三 四個試驗組堆肥化含水率(Moisture Content)監測紀錄

Time(days)	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
/槽體別	-----%-----			
0	53.9	42.2	65.5	64.5
7	50.7	43.7	60.0	60.2
14	51.3	44.8	60.1	53.6
21	50.6	44.9	65.7	64.5
28	57.3	54.6	69.6	70.0
35	50.3	52.7	59.0	65.5
42	57.0	60.9	65.6	76.0
49	59.1	61.9	60.3	72.6
56	60.7	67.0	63.7	75.6
63	48.1	46.2	54.0	52.8
70	47.5	44.9	54.3	55.7
77	49.0	50.6	57.6	60.3
84	53.9	57.6	57.8	61.7
91	48.2	47.7	47.5	59.9
98	52.0	51.9	49.7	53.4
105	44.3	45.8	48.1	52.4
112	40.3	44.0	48.2	50.3
119	44.4	46.9	48.8	52.8
126	40.3	47.7	41.8	48.7
133	41.2	43.6	42.6	46.6
140	42.1	42.3	43.1	49.8
147	50.9	57.4	47.8	59.2
154	39.2	40.0	38.6	40.0

附錄四 四個試驗組堆肥化導電度(EC)監測紀錄

Time(days)	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
/槽體別	----- ms/cm -----			
0	2.4	2.1	4.9	2.3
7	2.3	2.0	4.7	2.2
14	2.2	1.9	4.0	2.1
21	2.1	1.6	4.0	2.1
28	1.5	1.3	3.9	2.1
35	1.8	1.3	3.8	2.0
42	1.5	1.2	3.2	2.0
49	1.3	1.2	2.9	2.0
56	0.7	0.6	2.9	1.9
63	0.5	0.8	2.8	1.6
70	0.7	0.9	2.6	1.4
77	0.9	1.0	2.0	1.2
84	0.9	1.0	1.8	1.0
91	0.8	1.0	1.7	1.0
98	0.8	1.0	1.7	1.2
105	0.8	0.8	1.7	1.4
112	0.7	0.9	1.7	1.4
119	0.4	0.9	1.7	1.5
126	0.4	0.8	1.5	1.3
133	0.4	0.8	1.4	1.2
140	0.3	0.6	1.1	0.9
147	0.6	0.5	0.7	0.7
154	0.4	0.5	0.3	0.6

附錄五 四個試驗組堆肥化特性分析紀錄

Time(days) /槽體別	有機質 Organic matter (%)				比重 (%)				灰分 Ash (%)			
	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
0	64.8	74.8	60.1	83.9	0.1	0.1	0.3	0.2	35.2	25.2	39.9	16.1
30	55.5	66.6	52.7	75.8	0.1	0.2	0.3	0.2	44.5	33.4	47.3	24.2
60	46.2	58.3	45.3	67.7	0.2	0.3	0.3	0.3	53.8	41.7	54.7	32.3
90	42.7	51.1	36.6	51.9	0.3	0.3	0.4	0.3	57.3	48.9	63.4	48.1
120	36.3	42.8	33.2	47.6	0.4	0.3	0.5	0.5	63.7	57.2	66.8	52.4
150	33.6	40.6	25.2	43.0	0.4	0.4	0.5	0.4	66.4	59.4	74.8	57.0

Time(days) /槽體別	有機碳 Organic carbon (%)				總氮 TN (%)				C/N (%)			
	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
0	15.4	40.9	41.6	52.6	1.4	1.2	1.7	2.4	11.1	34.1	24.3	21.9
30	29.3	39.9	28.0	41.3	1.8	1.2	1.8	2.3	15.5	32.8	15.9	17.8
60	43.3	39.0	14.5	29.9	2.2	1.2	1.9	2.2	20.0	31.6	7.5	13.6
90	43.0	47.3	46.3	49.3	1.1	1.2	2.2	1.8	38.6	40.7	20.7	26.9
120	36.0	27.1	14.0	32.5	1.2	1.2	1.7	2.1	31.2	23.5	8.0	15.7
150	32.2	39.4	36.5	42.7	1.3	1.1	0.9	1.7	24.7	35.9	41.1	25.2

附錄六 四個試驗組堆肥化重金屬及營養元素含量分析紀錄

Time(days) /槽體別	P (mg/kg)								P ₂ O ₅ (%)			
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	CGLT	GLT+GC	GLT+GC+Cg
0	1468.2	0.3	1154.2	0.3	1674.0	0.4	1248.7	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3
30	1720.3	0.3	1213.1	0.3	1928.7	0.2	1585.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
60	1972.4	0.2	1272.0	0.3	2183.4	0.1	1921.8	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4
90	1509.5	0.1	1318.4	0.2	2207.7	0.3	1615.1	0.2	0.3	0.3	0.5	0.4
120	1519.4	0.3	1579.9	0.1	2349.7	0.3	1849.5	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4
150	1355.1	0.3	1063.2	0.3	1396.2	0.1	1582.5	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)。

Time(days) /槽體別	K (mg/kg)								K ₂ O (%)			
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	CGLT	GLT+G C	GLT+GC+Cg
0	2539.2	1.5	1702.2	0.5	3864.0	1.1	1994.6	2.2	0.3	0.2	0.5	0.2
30	2019.1	1.2	1588.3	1.0	3195.5	1.0	2257.3	1.6	0.2	0.2	0.4	0.3
60	1499.1	0.8	1474.3	1.4	2527.1	0.8	2520.1	1.0	0.2	0.2	0.3	0.3
90	1989.3	1.6	2525.1	0.3	11214.0	0.4	8720.2	1.5	0.2	0.3	1.3	1.0
120	6872.4	0.7	7381.1	1.8	9272.9	1.2	11289.9	1.0	0.8	0.9	1.1	1.4
150	5719.8	2.9	5762.2	2.5	5683.6	0.3	7189.6	1.4	0.7	0.7	0.7	0.9

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)。

附錄六 四個試驗組堆肥化重金屬及營養元素含量分析紀錄(續)

Time(days) /槽體別	As (mg/kg)								Cd (mg/kg)							
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)
0	0.7	4.6	0.5	8.3	1.0	4.7	0.2	1.0	0.2	0.4	0.1	1.2	0.3	0.5	0.1	0.9
30	0.9	3.5	0.6	8.6	1.0	4.0	0.4	4.0	0.2	0.7	0.2	1.1	0.3	0.5	0.2	1.1
60	1.0	2.3	0.8	9.0	0.9	3.5	0.7	7.0	0.2	0.9	0.2	1.0	0.2	0.4	0.2	1.2
90	1.2	4.5	0.9	8.0	2.5	2.8	1.7	7.5	0.3	0.4	0.2	0.7	0.3	0.3	0.2	0.6
120	2.2	5.8	1.8	4.4	2.8	4.3	1.6	8.1	0.3	0.7	0.2	0.2	0.4	0.7	0.2	0.5
150	2.7	5.9	2.6	1.4	3.3	5.7	2.4	4.8	0.3	0.4	0.3	0.7	0.4	0.1	0.2	0.5

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)。

Time(days) /槽體別	Cr (mg/kg)								Cu (mg/kg)							
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)
0	62.3	1.3	124.6	0.8	263.9	0.3	88.7	0.9	16.4	0.9	10.4	0.5	18.6	0.5	17.7	0.8
30	111.5	1.0	124.3	0.5	196.8	0.6	185.1	0.6	17.1	0.7	12.2	0.5	19.0	0.7	20.6	0.6
60	160.8	0.7	124.1	0.1	129.7	0.9	281.5	0.2	17.9	0.5	14.0	0.4	19.5	0.9	23.6	0.3
90	119.6	0.6	103.3	0.7	79.4	0.4	95.6	0.2	18.9	0.7	15.0	0.8	21.7	0.1	20.8	0.4
120	105.5	0.8	129.2	0.5	98.2	0.2	90.7	0.5	23.0	0.7	16.3	0.4	22.5	0.3	23.7	0.3
150	72.3	0.3	57.5	0.5	85.9	0.6	68.6	0.3	23.0	0.5	15.9	0.5	22.2	0.7	22.1	0.4

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)。

附錄六 四個試驗組堆肥化重金屬及營養元素含量分析紀錄(續)

Time(days) /槽體別	Hg (mg/kg)								Ni (mg/kg)							
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)
0	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	11.7	0.4	19.5	0.1	35.8	0.4	14.8	0.2
30	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	16.9	0.3	17.8	0.1	26.6	0.3	20.7	0.2
60	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	22.1	0.1	16.0	0.1	17.5	0.1	26.6	0.2
90	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	14.5	0.2	13.9	0.3	13.4	0.1	12.0	0.1
120	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	11.8	0.5	11.7	0.5	16.8	0.2	9.3	0.3
150	ND	-	ND	-	ND	-	ND	-	12.4	0.3	10.5	0.5	13.4	0.1	10.3	0.2

註：ND 表示低於偵測極限，R.S.D.：相對標準偏差(%)。

Time(days) /槽體別	Pb (mg/kg)								Zn (mg/kg)							
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)
0	6.5	0.1	5.3	0.4	9.2	0.5	5.6	0.3	77.0	0.3	52.1	0.1	102.0	0.3	76.5	0.3
30	7.1	0.1	6.7	0.3	8.5	0.5	6.6	0.4	91.4	0.2	63.1	0.2	105.1	0.2	77.5	0.2
60	7.8	0.1	8.0	0.7	7.8	0.6	7.6	0.4	105.7	0.1	74.1	0.2	108.3	0.1	78.5	0.1
90	22.4	0.7	9.5	0.7	12.8	0.5	8.6	0.8	146.9	0.1	81.4	0.1	107.3	0.1	76.8	0.2
120	10.7	0.3	10.7	0.3	14.3	0.3	8.3	0.6	172.1	0.2	86.1	0.2	109.0	0.2	80.3	0.2
150	15.0	0.5	11.1	0.5	14.9	0.1	10.8	0.1	179.2	0.2	86.0	0.4	102.7	0.1	83.5	0.1

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)。

附錄六 四個試驗組堆肥化重金屬及營養元素含量分析紀錄(續)

Time(days) /槽體別	Ca (mg/kg)								Fe (mg/kg)							
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)
0	32361.8	1.0	31447.8	1.2	17708.3	0.9	16741.9	0.6	3894.3	1.1	3458.5	0.5	12080.3	0.3	3360.9	1.0
30	31810.7	1.4	31643.7	1.1	23901.7	0.6	18081.7	0.5	6224.9	0.5	4778.8	0.4	10148.3	0.3	5320.4	0.7
60	31259.5	1.8	31839.5	1.1	30095.1	0.4	19421.4	0.4	8555.5	0.1	6099.1	0.4	8216.2	0.3	7280.0	0.4
90	32606.6	0.8	29975.0	0.1	25002.8	0.8	14088.3	0.1	9073.7	0.2	7437.8	0.5	10601.1	0.6	8115.7	0.1
120	30824.3	0.6	26426.8	0.4	25059.6	0.5	16148.0	0.3	11017.8	0.2	9677.7	0.2	13041.0	0.4	7926.6	0.3
150	26551.6	1.0	22507.9	0.7	19689.6	0.8	15184.2	0.1	12351.9	0.2	10727.5	0.5	14024.6	0.4	10770.6	0.2

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)。

Time(days) /槽體別	Mn (mg/kg)							
	GLT	R.S.D. (%)	CGLT	R.S.D. (%)	GLT+GC	R.S.D. (%)	GLT+GC+Cg	R.S.D. (%)
0	87.2	0.4	73.5	0.4	160.8	0.3	76.9	0.8
30	107.1	0.5	92.6	0.4	149.4	0.6	103.5	0.6
60	127.0	0.6	111.7	0.4	138.1	1.0	130.2	0.5
90	138.4	1.2	126.1	0.7	174.8	0.3	137.6	0.6
120	179.5	0.4	147.6	0.5	186.9	1.0	144.7	0.6
150	184.0	0.4	159.6	0.4	209.5	0.3	170.9	0.4

註：R.S.D.：相對標準偏差(%)

