

以 IPCC 方法推估不同廚餘處理方式之溫室氣體排放

陳鴻烈⁽¹⁾ 廖英洲⁽²⁾ 許振峯⁽³⁾ 周孟融⁽⁴⁾

摘要

現今生活中，溫室氣體的排放是眾人所關心的議題，而每戶人家在日常生活中所產生的剩菜、剩飯、蔬菜、果皮及茶葉渣等，這些食材料理前後所產生的有機廢棄物，統稱為「廚餘」，過去這些廚餘的處理方法大部分是利用來飼育豬隻或採用焚化法來燃燒，也有部分是應用堆肥或厭氧消化方式來處理，但在這些處理的過程中皆會產生溫室氣體(Green House Gas, GHGs)的排放。因此，本研究的目的是比較並評估各種處理廚餘的方法的過程中，所產生溫室氣體的排放量，並採用 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)國家溫室氣體清單指南中的方法來計算。這項研究的結果顯示若採焚化所產生溫室氣體為 100%，則利用廚餘來飼育豬隻的溫室氣體排放量則為 56%，堆肥處理則會排出 34%之溫室氣體，而進行厭氧消化處理則僅排放 10%。故由研究結果可知，厭氧消化是處理廚餘方法中，控制溫室氣體排放的最佳方法，在未來考量廚餘處理所排放之溫室氣體下，厭氧消化為重要的選項，以期降低溫室氣體的排放。

(**關鍵詞**：廚餘、溫室氣體排放、IPCC)

The evaluation study of green house gas emission by the IPCC method for the different treatments of kitchen waste

Paris Honglay Chen⁽¹⁾ *Ying-Chou Liao*⁽²⁾ *Cheng-Feng Hsu*⁽³⁾
Caroline Mengjung Chou⁽⁴⁾

Professor⁽¹⁾, Graduate Student⁽²⁾, PhD Student⁽³⁾, PhD Student⁽⁴⁾ Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

Today, GHGs brought a lot of attentions to treatment engineering. There were a lot of kitchen wastes in this world, including daily leftovers, vegetables, pericarp, tea leaves etc., cooked or

(1)國立中興大學水土保持系教授(通訊作者 e-mail: hlchen@dragon.nchu.edu.tw)

(2)國立中興大學水土保持學系碩士在職專班

(3)國立中興大學水土保持系博士班研究生

(4)國立中興大學水土保持系博士班研究生

uncooked. The waste utilization processes were popular in incineration in the past and in swine feeding currently, but there were other processes such as composting, anaerobic digestion in practice. Those methods might produce Green House Gas (GHGs) emissions. Therefore this study purpose was focused to evaluate and compare the GHGs emissions among the methods. The methodology was adopted from the method of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The results showed the emissions of GHGs: 100% in incineration, 56% in swine feeding, 34% in composting and 9% in anaerobic digestion. Accordingly, anaerobic digester could be the best GHGs control process and the GHGs analysis demonstrated the other alternatives for kitchen waste utilization selection. (**Keywords** : Kitchen waste, GHGs emission, IPCC)

前言

臺中市 2011 年廚餘量為 69.374 千噸，回收率自 2003 年 2.27%逐年提升至 2011 年 10.84% (行政院環境保護署統計資料庫，2012)。廚餘係指日常生活中所產生之剩菜、剩飯、蔬菜、果皮、茶葉渣等有機廢棄物，包括食材料理前後的所有廢棄物，甚至過期食品亦可統稱為廚餘。因廚餘易腐敗、產生臭味及吸引蚊蠅，故為垃圾場臭味、沼氣及滲出水的最大來源。在家庭中暫存的過程中，短時間內即易產生臭味，造成家庭的困擾。再者由於廚餘之含水率高、熱值低，因此不適用於焚化處理，而若採掩埋方式將也可能會產生臭味及滲出水等二次污染問題。

早期臺灣農村就有廚餘養豬習慣，從經濟觀點來看，最有利之處為節省飼料成本。因廚餘價格低廉甚或不需成本，可大幅降低豬隻飼養成本並提高經濟效益。臺灣養豬飼料 90%仰賴進口，由於飼料成本約佔總養豬成本之 65~75% (中華民國養豬協會，2012)，而以廚餘養豬可以提高養豬戶收益，所以養豬戶基本上對於取用廚餘養豬極為樂意。然而 1997 年臺灣地區爆發口蹄後 (行政院農業委會，2012)，原以廚餘養豬為主之處理途

徑，因農委會矛頭指向豬隻食用帶有病毒的廚餘遂導致疫情爆發，環保署為此積極推動其他處理方式，以朝多元化方向發展。

臺中市自 2000 年起即推動廚餘回收再利用工作，2002 年 7 月起率先執行強制回收制度，全市廚餘回收量亦大幅提昇。目前廚餘再利用方式主要以養豬為主 (84.84%)，其他多元化處理有堆肥化處理 (處理量 9.4 公噸/日)、飼料化試驗 (處理量 4 公噸/月) 以及自主性單位進行廚餘堆肥之工作，使得廚餘資源化之整體價值更加提昇 (臺中市政府環境保護局，2011)。

此外，廚餘亦可藉由厭氧消化方式產生沼氣生質能源，如德國、丹麥、美國等 (行政院環境保護署，2009)。因應全球氣候暖化趨勢，加強再生能源開發，降低石化燃料及煤礦需求，為全世界關切課題。而厭氧消化在國際上是極成熟技術，因此國內推動廚餘進行厭氧消化處理將是未來多元化處理廚餘之可行方向。

廚餘再利用採取焚化、養豬 (Hubert Heitman et al., 1956)、堆肥 (MacGregor et al., 1981) 或厭氧消化方式 (Mata-Alvarez et al., 2000)，是目前國內、外可行之處理方法，各有其因地制宜性與優缺點，但其處理過程皆

陳鴻烈、廖英洲、許振峯、周孟融：
以 IPCC 方法推估不同廚餘處理方式之溫室氣體排放

會產生溫室氣體(Green House Gas, GHGs)排放之情形，而本研究為瞭解不同處理方式之 GHGs 排放量多寡，採用 2006 版 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)國家溫室氣體清單指南(Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)(IPCC, 2006)，以下簡稱「IPCC 排放指南」，經計算後比較各項處理方式之 GHGs 產生量，有利於政府機關未來選擇廚餘處理政策之參考依據。

IPCC 簡介

聯合國「政府間氣候變遷委員會」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)是評估氣候變遷且具重大影響力的國際科學組織，由聯合國環境規劃署(United Nations Environment Programme, UNEP)及世界氣候組織(World Meteorological Organization, WMO)於 1988 年共同設立。此一國際組織結合來自世界的科學家共同提供氣候變遷的科學視野，包括氣候變遷趨勢、目前研究程度及氣候對環境與社會經濟之潛在衝擊等。

IPCC 第一次科學評估報告於 1990 年公告，立即引起國際關注，排入該年度聯合國大會重要主題，並促成「聯合國氣候變化綱要公約」(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)之簽訂。IPCC 第二次評估報告於 1995 年公告，促成 1997 年「京都議定書」之簽訂；第三次(2001 年)與第四次(2007 年)評估報告公告亦促成「2007 氣候變遷報告書」之提出。由於 IPCC 科學組織致力於推動人類，瞭解人為氣

候變遷之事實，並喚起各國之共同努力，在 2007 年與製作「不願面對的真相」之美國前副總統高爾共同獲頒「諾貝爾和平獎」。

在組織架構上，IPCC 包括三個工作組及兩個特別任務組。這三個工作組(Working Group I, II, III)，分別負責三大研究範疇：氣候變遷的物理科學基礎、氣候變遷的衝擊、調適與脆弱度，以及氣候變遷的減緩；當前兩個「特別任務組」(Task Force)則負責推動各國「GHG 盤查工作」以及「數據與情境模擬」，作為提供氣候衝擊分析之基礎。

臺灣雖非聯合國會員國，但科學界早於 1989 年起即推動全球氣候變遷研究，在行政院國家科學委員會下設立「全球變遷諮詢委員會」，密切關注 IPCC 報告，進而擬定我國政府因應氣候變遷之政策。例如，在 IPCC 第一次報告公告後，國科會即研提「因應全球變遷五年中程研究規劃」(1994 年)，積極推動相關研究與國際參與。在行政部門，行政院在 1992 年亦成立跨部會之「全球環境變遷工作小組」，1994 年將此小組擴編提升為行政院全球環境變遷政策指導小組，1997 年再進一步提升至「行政院國家永續發展委員會」。2007 年 IPCC 第四次評估報告(IPCC, 2007)後，行政院經濟建設委員會也因應其發展，研擬完成「我國氣候變遷調適政策綱領」(2010 年)，足見 IPCC 之影響力，以及我國對於氣候變遷現象及履行國際義務之重視。

研究理論與方法

本研究依照 IPCC 排放指南，計算以焚化、養豬、堆肥及厭氧消化方式處理或回收

廚餘過程中 GHGs 排放量，其主要假設條件將生物源排放(biogenic emissions)列入 GHGs 計算，與 IPCC 排放指南不同。因為後者以國與國之間 GHGs 比較為主，對於廢棄物中生質材料(biomass materials)(如紙張、食物和廢棄木材)燃燒、堆肥及厭氧產生的 CO₂ 為生物源排放，不列入 IPCC 與國家排放量估算。

茲將本研究架構如圖 1 所示。

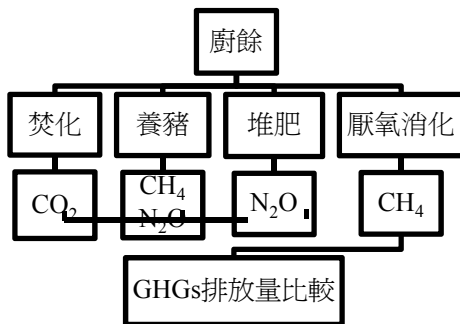


圖 1 研究架構

Figure 1 Flowchart of study

結果與討論

1. 焚化 GHGs 排放量

本研究假設廚餘直接焚化，進行 GHGs 排放量計算及比較，將廚餘量乘廚餘乾基及 C 到 CO₂ 轉換因子求得，如公式(1)所示：

$$\text{GHGs Emissions} = K \times (1 - KW) \times C \times (44/12) \quad (1)$$

式中，GHGs Emissions 為 GHGs 排放量(千噸，Gigagram, Gg)，K 為廚餘量(Gg)，KW 及 C 分別為廚餘含水量(%)及碳原子含量(%) (如表 1 所示)， $\frac{44}{12}$ 為 C 到 CO₂ 轉換因子，經計算 GHGs 排放量為 6.8913Gg，並以此焚化法所產生之 GHGs 排放量做為基本假設，將焚化法所產生之排放量視為 100% 並與其他方法做比較，以求得最佳之方法，詳表 2 所示。

2. 養豬 GHGs 排放量

IPCC 排放指南估算豬隻飼養過程當中，主要 GHGs 的來源有兩個：腸道發酵 CH₄ 排放量和糞便處理 CH₄、N₂O 排放量，但 CO₂ 排放量並不估算，因為 IPCC 排放指南假設

表 1 廚餘特性分析

Table 1 Characteristics of kitchen waste

分析項目	測值	分析項目	測值
含水量	75.94(%)	N	0.94(%)
灰份	5.48(%)	P	0.24(%)
可燃份	18.58(%)	K	0.18(%)
高位發熱熱值	1308(Kcal/Kg)	C	11.26(%)
低位發熱熱值	798(Kcal/Kg)	H	1.81(%)
pH	6.05	O	9.68(%)
EC	39,200(μmho/cm)	C/N	11.98

(臺北市政府環境保護局，2003)

陳鴻烈、廖英洲、許振峯、周孟融：
以 IPCC 方法推估不同廚餘處理方式之溫室氣體排放

CO₂ 經植物行光合作用，將會循環回大氣，故年淨排放為零，本研究以廚餘量可飼養豬的頭數，來計算 GHGs 排放量。

(1) 養豬數量

欲估算 GHGs 排放量，需先得知每頭豬每日廚餘攝食量為 $2.704 \times 10^{-3} \text{Gg/頭}$ ，其數值來源為採閩公豬出生至屠宰日均飼養量(沙拉, 2007)得知，如公式(2)所示，求得臺中市廚餘養豬年產量為 25,656 頭，如表 2 所示。

$$\text{養豬量(頭)} = \text{廚餘量(Gg)} / \text{廚餘攝食量(Gg/頭)} \quad (2)$$

(2) 腸道發酵 GHGs 排放量

牲畜養殖過程中之溫室氣體來源，主要為腸道發酵及糞便處理。在消化過程中，碳水化合物被微生物分解產生 CH₄。反芻類(牛、羊)與非反芻類動物(豬、雞)腸道發酵均會產生 CH₄，而 CH₄ 產生量以反芻動物最多。CH₄ 產生量亦與動物年齡、體重、環境、飼料的質與量有關，腸道內發酵同時也產生 N₂O，大多由氮轉變成 NH₃/NH₄⁺後再形成的，但由於腸內為缺氧狀態，所以其生成量也較少。

採 IPCC 排放指南，腸道發酵 CH₄ 排放公式，如公式(3)所示：

$$\text{GHGs Emissions} = \text{EF} \times (\text{N}/10^6) \times \text{GWP} \quad (3)$$

式中，EF 為排放因子 (emission factor)(kg/頭，依 IPCC 排放指南，EF 假設為 1)，N 為豬頭數，10⁶ 為 kg 轉換 Gg，GWP(Global Warming Potential，全球暖化潛勢)依 IPCC 第四次評估報告為 25(無單位)，經計算 GHGs 年排放量為 0.6414Gg(詳表 2)。

(3) 糞便處理 GHGs 排放量

1 糞便處理 CH₄ GHGs 排放量

圈養飼育環境(如乳牛場、肉牛場、豬圈及雞舍)，糞便於厭氧環境下進行儲存和處理過程易產生 CH₄。

影響 CH₄ 排放主要為糞便量和厭氧環境下分解速率。前者取決於豬的廢物產生率和數量，後者取決於糞便處理系統。當糞便在厭氧條件下液態儲存或處理時(如化糞池、池塘、糞池或糞坑)，CH₄ 排放量受儲存環境溫度和滯留時間有極大影響。當糞便為固態處理(如堆積、堆放)或在牧場和草地堆放，好氧環境下進行分解將產生較少的 CH₄ 排放。

採 IPCC 排放指南糞便處理 CH₄ 排放公式，如公式(4)所示：

$$\text{GHGs Emissions} = \text{EF} \times (\text{N}/10^6) \times \text{GWP} \quad (4)$$

式中，EF 為排放因子(kg/頭，依 IPCC 排放指南，EF 假設為 5)，GWP 依 IPCC 第四次評估報告為 25(無單位)，N 為豬頭數，計算 GHGs 排放量為 3.207Gg(詳表 2)。

2 糞便處理 N₂O GHGs 排放量

糞便中所含的氮在硝化和脫硝作用下產生 N₂O 排放，而排放多寡取決於所含的氮及碳含量，除此之外儲存時間及處理方式亦有影響。

糞便所含有機氮經微生物礦化(mineralization)生成 NH₄⁺-N，在有氧存在下由硝化作用將 NH₄⁺-N 轉成 NO₂⁻-N 及 NO₃⁻-N。而於缺氧狀態下，脫硝作用會釋出 N₂O。

採 IPCC 排放指南糞便處理 N₂O 排放公式，如公式(5)所示所表示：

$$\text{GHGs Emissions} = \{[(N \times N_{\text{ex}} \times \text{MS}) \times \text{EF}] \times (44/28) \times 10^{-6}\} \times \text{GWP} \quad (5)$$

式中，N 為豬頭數， N_{ex} 為氮排泄量(kg/頭/年)，MS 為氮排泄率(依 IPCC 排放指南，MS 假設為 40%)，EF 為排放因子(依 IPCC 排放指南，EF 假設為 0.002)， 10^{-6} 為公斤轉換千噸，GWP 依 IPCC 第四次評估報告為 298(無單位)，計算 GHGs 排放量為 0.0413Gg。

$$N_{\text{ex}} = N_{\text{rate}} \times (\text{TAM}/10^3) \times 365 \quad (6)$$

式中， N_{ex} 為氮排泄量(kg/頭/年)， N_{rate} 為氮排泄率(依 IPCC 排放指南， N_{rate} 假設為 0.42)，TAM 為每頭豬質量(kg)(依 IPCC 排放指南，TAM 假設為 28)。

總計廚餘養豬過程中，包含腸道發酵(CH_4)、糞便處理(CH_4 、 N_2O)(由式(3)至(5))，可得養豬 GHGs 排放量共產生 3.8897Gg，與

焚化法所產生之 GHGs 排放量比較，僅為其

表 2 GHGs 排放量總表
 Table 2 The summary of GHGs emissions

項目	類別	養豬					堆肥	厭氧
		焚化	養豬量	腸道 CH_4	糞便 CH_4	糞便 N_2O		
廚餘量(Gg)					69.374			
KW(%)		75.94						
C(%)		11.26						
攝食量(Gg/頭)			2.704×10^{-3}					
豬隻頭數(N)			25,656					
N_{rate}						0.42		
TAM						28		
EF			1	5	0.002		0.6 2	
GWP			25	25	298		298 25	
GHGs 排放量(Gg)		6.8913			3.8897		2.3419 0.6549	
GHGs 排放		100%			56%		34% 10%	

3 氮排泄量(N_{ex})

採 IPCC 排放指南氮排泄量排放公式，如公式(6)所示：

排放量之 56%，可見以廚餘飼育豬隻可比焚化法約減少一半的 GHGs 排放量，故較焚化法佳。計算結果詳表 2。

3. 堆肥 GHGs 排放量

陳鴻烈、廖英洲、許振峯、周孟融：
以 IPCC 方法推估不同廚餘處理方式之溫室氣體排放

好氧堆肥經由好氧性的微生物發酵作用，將含有有機質的廢棄物轉化成無臭、暗棕色、類似腐植質的固體。堆肥過程中，堆肥發酵所累積的發酵熱會使溫度上升至 70~80°C，如此可殺死大部份的病原菌及寄生蟲卵，避免施用於農田時污染環境。堆肥產生的 GHGs 以 N₂O 為主，其反應機制與豬糞便處理產生機制相同。

採 IPCC 排放指南生物處理 N₂O 排放公式，如公式(7)所示：

$$\text{GHGs Emissions}=(M \times \text{EF}) \times 10^{-3} \times \text{GWP} \quad (7)$$

式中，M 為有機廢棄物生物處理量 (Gg)(扣除廚餘含水量(%)及灰份(%))，EF 為排放因子(g CH₄/kg，依 IPCC 排放指南，EF 假設為 0.6)，GWP 依 IPCC 第四次評估報告為 298(無單位)，計算 GHGs 排放量為 2.3419Gg(詳表 2)，與焚化法所產生之 GHGs 排放量比較，採用此法之 GHGs 排放量僅為焚化法排放量之 34%，由此可知以堆肥做為處理之 GHGs 排放量可降低為焚化法的三分之一，也較前述的兩種方法都還要來的佳。

4. 厭氧消化 GHGs 排放量

厭氧消化狀態下會產生 CH₄，其生成主要分為水解(hydrolytic)、酸化(acidogenesis)及甲烷化階段(methanogenic)三個步驟。微生物在水解過程中將有機物分解成小分子，再經由嫌氣性及厭氧性 (facultative and anaerobic)微生物利用而產生有機酸、CO₂ 及代謝過程中產氫反應(metabolic hydrogen)，最後再由甲烷菌在厭氧狀態下產生 CH₄。

採 IPCC 排放指南生物處理 CH₄ 排放公式，如公式(8)所示：

$$\text{GHGs Emissions}=(M \times \text{EF}) \times 10^{-3} \times \text{GWP} \quad (8)$$

式中，M 為有機廢棄物生物處理量 (Gg)(扣除廚餘含水量(%)及灰份(%))，EF 為排放因子(g CH₄/kg，依 IPCC 排放指南，EF 假設為 2)，GWP 依 IPCC 第四次評估報告為 25(無單位)，計算 GHGs 排放量為 0.6549Gg(詳表 2)，與前述焚化法所產生之 GHGs 排放量比較，此法之 GHGs 排放量僅為焚化法排放量之 9%，較焚化法約可減少 90%的 GHGs 排放量，亦是全部四種方法中最佳的處理方法。

5. GHGs 計算結果

透過採用 IPCC 排放指南計算焚化、養豬、堆肥及厭氧消化方式處理或回收 GHGs 排放量，求得排放量由高至低分別為焚化 6.9772Gg、養豬 3.8897Gg、堆肥 2.3419Gg、厭氧消化 0.6549Gg。

如欲減少處理廚餘造成之 GHGs 排放量，最簡單方式為進行源頭減量，依各人所需取食適量食物，不但可減少不必要浪費又可省下採購食物的費用。

結論

國內目前處理廚餘之方式，大都採用焚化法燃燒或收集後用來飼育豬隻，而因飼育豬隻可獲得較高之經濟效益，故現今主要的處理方式仍是以飼育豬隻為主，但因無法有效掌控廚餘的來源，故相關的農業單位雖不鼓勵廚餘拿來飼育豬隻，但也難以禁止。而本研究從 GHGs 之觀點來看，發現上述兩種方法的處理過程，皆會排放出大量的 GHGs，並由分析結果中可發現 GHGs 排放量的大小

分別是：焚化法>養豬法>堆肥法>厭氧法，其 GHGs 排放的比例約為 100%、56%、34%及 10%，由此可知，較佳的處理廚餘方法應該是採用堆肥法或是厭氧法來處理，而厭氧法是最佳的方法，但國內目前仍不普遍採用此法來處理廚餘，全國僅於新北市八里設有唯一 1 座示範廠，故未來國內廚餘之處理方式應朝向以厭氧法之方式來做努力。

參考文獻

1. 中華民國養豬協會(2012)，<http://www.swineroc.com.tw/Industrial/Industrial.aspx>
2. 行政院農業委會(2012)，<http://www.coa.gov.tw/view.php?catid=4276>
3. 行政院環境保護署(2009)，「98 年全國廚餘回收再利用實務操作觀摩會」。
4. 行政院環境保護署統計資料庫(2012)，<http://210.69.101.110/epa/stmain.jsp?sys=10>
5. 沙拉(2007)，「飼糧之蛋白質及限制飼養管理會影響豬隻的代償性成長」，飼料營養雜誌，第四期，第 73-77 頁。
6. 臺中市政府環境保護局(2011)，「臺中市推動廚餘回收再利用專區營運管理及操作維護計畫」。
7. 臺北市政府環境保護局(2003)，「台北市廚餘產源調查及廚餘特性分析」。
8. Hubert Heitman, Jr., C. A. Perry and L. K. Gamboa(1956),“Swine Feeding Experiments with Cooked Residential Garbage,”*Journal of Animal Science*, 15(4): 1072-1077.
9. IPCC (2006),2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Japan.
10. IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, N. Y.
11. MacGregor, S.T., F.C. Miller, K.M. Psarianos and M.S. Finstein(1981),“Composting Process Control Based on Interaction Between Microbial Heat Output and Temperature,”*Applied and environmental microbiology*, 41(6): 1321-1330.
12. Mata-Alvarez, J., S. Macé, and P. Llabrés (2000), “Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives,” *Bioresource Technology*, 74(1): 3-16.

101 年 09 月 03 日收稿

101 年 09 月 17 日修改

101 年 10 月 04 日接受