

臺灣養豬畜牧業溫室氣體減量潛力評估與 基線方法學排放係數之探討⁽¹⁾

連興隆⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 林岱霖⁽²⁾⁽³⁾

收件日期：111 年 9 月 16 日；接受日期：112 年 2 月 4 日

摘 要

以環保署溫室氣體抵換專案有關廢水處理回收甲烷之方法學，利用廢水經厭氧消化處理產生之甲烷排放的計算評估，開發養豬畜牧業沼氣回收再利用的溫室氣體減量額度，在臺灣不易推動，其原因之一是專案的開發耗時且多量的監測參數墊高開發成本。因此，本研究針對本土養豬畜牧業之減碳潛力進行評估，同時根據標準基線方法學之原則，設計可供本土養豬畜牧業者評估其減量額度開發潛力所需的簡易評估工具，並分析本土化養豬畜牧業之豬隻甲烷排放係數（以二氧化碳當量，CO₂e 表示）。本研究與三家養豬畜牧場合作，執行採樣分析並採用聯合國小規模 clean development mechanism (CDM) 方法學 AMS.III.H. 及理想氣體方程式等二種方法推估排放係數。彰化牧場的廢水是最具有二氧化碳減量潛勢，減量額度為 14,000 ± 4,280 t CO₂e/year。評估各牧場豬隻甲烷排放係數（以二氧化碳當量，CO₂e 表示），彰化、雲林、屏東分別為 305 ± 93.1、352 ± 169、122 ± 34.5 kg CO₂e/head/year。本研究提出以厭氧池出流水化學需氧量（Chemical oxygen demand, COD）移除率 ≥ 80% 和 LV 值（COD 值與處理廢水量的乘積再除上豬隻頭數）介於 100 – 300 g/day/head 二項條件，作為判斷養豬場的廢水相關數據是否具備可用性之原則。本研究結果對臺灣豬隻甲烷排放係數的本土值建議為 346 ± 32.2 kg CO₂e/head/year。

關鍵詞：養豬畜牧廢水、溫室氣體抵換專案、甲烷排放係數、沼氣、標準基線。

緒 言

畜牧產業為我國農業中重要的一環，生產總值每年均超過 1 千億元新臺幣，占臺灣農產品生產總值 33% 以上（行政院環境保護署水質保護網 a）。雖然產值高，然而，養豬畜牧業產生的廢水與糞尿問題卻對環境造成衝擊，為了將廢棄物轉成資源，達到循環經濟之目的，政府刻正推動「畜牧糞尿資源化利用」，包括：厭氧發酵沼氣發電，沼液沼渣作為農地肥分使用，依農業事業廢棄物再利用管理辦法進行再利用；以及經處理至符合放流水標準，放流水作為澆灌之水資源利用等三種途徑（行政院環境保護署水質保護網 b）。養豬畜牧業廢水透過厭氧發酵用於沼氣發電或再利用，不論是對再生能源電力的開發或減碳的措施都是極佳的實務應用。以環保署水質保護網中引用蘇忠禎的研究（蘇，2014）顯示，就飼養規模 9,000 頭之養豬場使用 90 kW 的發電機為例，並根據其沼氣發電量進行計算，每頭豬每年平均可減少 1 噸二氧化碳當量（t CO₂e）。計算臺灣全國 550 萬頭養豬沼氣發電可產生之減碳效益，評估每年可減少 5,500,000 t CO₂e 的碳排放量，占全國 CO₂ 排放量的 2%（行政院環境保護署水質保護網 b）。換言之，如果全臺養豬畜牧業都能進行沼氣回收，對我國永續發展目標「指標 12.8.2：畜牧廢棄物循環再利用」的 2030 年目標便可達成。

雖然臺灣大力推動沼氣發電，但全國設置沼氣發電之養豬場僅 53 場（行政院農業委員會，2019），全國養豬場共 6,609 場（行政院農業委員會，2020），設置沼氣發電的比例不到 0.8%。這當中除了大型養豬場之外，更多中小型養豬場對使用沼氣再利用缺乏動機。對中小型養豬業而言，設置沼氣回收再利用的投入成本與技術障礙，則令業主裹足不前。過去經驗顯示，由於（1）普遍機具設備設計不良，未將沼氣內所產生的硫化氫氣體去除，而造成處理設備及發電設施的腐蝕，或因（2）豬農專業能力欠缺，未落實應有操作及維護程序，或因（3）產生的電力超過自己所

(1) 行政院農業委員會畜產試驗所研究報告第 2734 號。

(2) 國立高雄大學土木與環境工程學系。

(3) 國立高雄大學新能源及電力發展研究中心。

(4) 通訊作者，E-mail: lien.sam@nuk.edu.tw。

需等因素，使得沼氣發電未能達到預期的效益（蘇，2008；郭及蕭，2009）；另一可能原因為無法購得 10 – 20 kW 之小型沼氣發電機。

行政院環境保護署為了鼓勵國內各項產業投入溫室氣體減量活動於 104 年 12 月公告「溫室氣體抵換專案管理辦法」（簡稱抵換專案），作為臺灣溫室氣體減量額度核發認證之窗口（行政院環境保護署，2022a）。根據事業溫室氣體排放量資訊平臺之公開資訊，目前臺灣的抵換專案方法學共計有 38 個。養豬畜牧業沼氣再利用導入溫室氣體減量額度，這些沼氣再利用的過程產生的減量額度，可成為養豬畜牧業者本業外的額外收入，增加畜牧業者對使用沼氣再利用或是沼氣發電的誘因。溫室氣體減量額度是執行溫室氣體抵換專案所產生，稱之為「減量額度」。依環保署公布之抵換專案方法學，養豬畜牧業廢水透過厭氧發酵用於沼氣發電或再利用可成為一項抵換專案。由於專案開發從開始到完成所花費之成本與時間相當大，且現行方法學的內容繁雜，對畜牧業者而言過於繁瑣，使得多數養豬畜牧業者即便有興趣，但因申請與執行方法過於複雜而放棄。因此，直到 109 年才有第一個養豬畜牧業沼氣發電再利用的抵換專案（漢寶農業可再生能源專案計畫書，2020；漢寶農畜產第三期廢水場沼氣發電計畫，2020），分別取得每年 12,912 以及 14,630 t CO₂e 之抵換專案的減量額度，是臺灣通過「溫室氣體減量及管理法」後，養豬畜牧業沼氣發電再利用減量額度開發的首例。

臺灣的抵換專案的減量計算是建立在聯合國京都議定書中清潔發展機制 (clean development mechanism, CDM) 所開發的方法學。為確保 CDM 專案的減量效益，並獲得具長期的、實際可測量的、額外性的減排量，在 UNFCCC 轄下之 CDM 執行理事會 (Executive board, EB) 建立的「基線與監測方法學 (baseline and monitoring methodologies)」，以供各國執行 CDM 專案活動 (CDM project activity) 時，作為登錄 (register) 專案與確證 (validation) 之指引。然而，將近 20 年的實務操作後，很多的研究已經指出，CDM 專案的開發被認為是相當耗時與成本高的，特別是在外加性 (additionality) 的論證上，也常有很大爭議 (Hayashi *et al.*, 2010)。如何簡化 CDM 專案的開發成本，降低過量的數據要求，但又能確保專案的環境完整性 (environmental integrity)，已成了 CDM 執行理事會 (EB) 近 10 年來重要的課題 (Hayashi *et al.*, 2010)。

為確保實質減碳建立環境完整性，CDM 的方法學建構在相對嚴謹的架構下執行，其中，外加性便是確保其嚴謹性 (stringency) 的重要一環。然而，外加性的論述由於過於主觀，或為確保專案的嚴謹性所需投入的大量成本分析，都成了推動 CDM 的障礙 (Hayashi *et al.*, 2010)。標準化基線法 (standardized baselines) 是 CDM 方法學中為降低交易成本，強化透明度、客觀性與可預測性，以加速 CDM 的推動，所創造的操作措施，其發展的背景是為降低傳統方法學對大量數據的需求，同時仍能維持足夠的嚴謹度以回應對環境完整性的要求。因此，標準化基線法要面對的挑戰是：避免低估了專案的價值與外加性造成減碳額度的信用低估 (under-crediting)，同時，又須避免高估信用 (over-crediting)，造成環境完整性的受損 (Schneider *et al.*, 2012)。

標準基線的設計原則包括：(1) 效能基準 (performance standard)、(2) 同質性 (homogeneous group) 專案類型擇優彙整、(3) 正面表列技術等 (UNDP, 2013)。第一種透過比較相似類型專案的效能基準，訂出基線排放係數，例如電力排放係數，是相對最多使用的方法。第二種是將同質性專案擇優彙整，利用「在過去五年相同社會、經濟、環境和技術條件下，類似項目活動的平均排放量在同一類別位中，位居前 20% 者」(Lee *et al.*, 2005) 定義標準基線排放係數。韓國的住宅減碳標準基線方法學便是採用這個原則 (Specific CO₂ emissions in residential buildings in Republic of Korea (version 01.0), 2020)。第三種正面表列技術則是利用效能穿透性方法 (performance penetration approach)，決定符合外加性的對應技術，並予以正向表列 (CDM Executive Board, 2011; Hermwille *et al.*, 2013; UNDP, 2013)。透過標準基線方法學將可獲得標準基線的排放係數，換言之，在減量額度的計算上，標準基線的排放係數將是預設值 (default value)，對專案開發者而言，僅需知道他的減碳標的物的專案開發量（例如：在養頭數、稻米量、水稻田面積、樓地板面積等），便可計算出減排量。

豬隻的甲烷排放係數之計算方法包括有：IPCC 國家溫室氣體排放盤查指引 (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) (IPCC, 2006; 2019)、CDM 方法學 (CDM methodology, 2019) 以及沼氣流量量測法 (Su and Chen, 2018) 等。依據 IPCC 指引，豬隻的甲烷排放包括豬隻的腸胃發酵以及糞尿管理活動產生之排放，計算方法皆分為方法 1 (Tier 1)、方法 2 (Tier 2) 和方法 3 (Tier 3) 三個層級的計算方法。Tier 1 是簡化的估計方法，由區域別、溫度別等分類確認排放係數預設值，與年均飼養頭數之乘積計算甲烷排放量。以臺灣為例，屬亞洲區、年均溫度介於 22 – 24 度，所得之排放係數為 5 kg CH₄/head/year (IPCC, 2006; 行政院環境保護署，2022b)。而 Tier 2 則是先使用該國家本土之特定參數（如豬隻糞便揮發性固體物含量等）計算排放係數，再以此計算溫室氣體排放量。Tier 3 則是若該國的飼養管理方法與 IPCC 指引提供之方程式設計背景差異太大，則可以為國家特定方法開發模型或使用量測的方法來量化排放因子，Tier 3 的使用需經過廣泛的國際同儕審查，以確保估計模式的準確性和 / 或精確度 (IPCC, 2006; 2019)。CDM 的方法學則是採用小規模減量方法學「AMS – III.H 廢水處理之甲烷氣回收專案」第 19.0 版 (CDM

methodology, 2019), 利用飼養豬隻排放之糞尿經廢水處理系統處理, 透過厭氧消化槽降解化學需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 同時產生甲烷的過程, 計算未進行甲烷回收的基線排放量 (baseline emission, BE), 以及進行甲烷回收破壞或再利用的專案活動排放量 (project emission, PE)。兩者的差值即為該養豬場產生之甲烷量, 經回收破壞或再利用所對應之溫室氣體減排量 (以二氧化碳當量表示之)。藉由溫室氣體減排量與在養頭數, 可計算以二氧化碳當量為單位之豬隻的甲烷排放係數。沼氣流量量測法是指飼養豬隻產生之廢水經厭氧發酵後, 有機物分解產生之甲烷, 經由甲烷收集系統量測甲烷流量, 利用理想氣體方程式及甲烷濃度計算產生之甲烷量的一種方法。藉由甲烷量與在養頭數可計算豬隻的甲烷排放係數 (Su and Chen, 2018)。

本研究以國內三家豬隻在養頭數規模在 1000 頭以上之養豬場的採樣數據, 以及文獻蒐集之數據為基礎, 探討臺灣本土養豬畜牧業廢水處理之減碳潛力, 並設計可供本土養豬畜牧業者評估其減量額度開發潛力所需的簡易評估工具。為提高臺灣養豬業者參與抵換專案的誘因, 本研究參照標準基線方法學之原則, 提出一個可用於本土養豬畜牧業沼氣破壞或再利用的標準基線方法學, 其中, 本研究採用聯合國小規模 CDM 方法學 AMS.III.H. 及理想氣體方程式等二種方法, 推估本土豬隻甲烷排放係數並與現有之數據比較。

材料與方法

I. 文獻蒐集與分析

本研究以文獻數據以及本研究自行採樣數據進行不同計算評估方法的分析, 文獻使用行政院農業委員會畜產試驗所於 2017 年發行養豬場沼氣發電實例手冊 (養豬沼氣發電實例手冊, 2017) 所提供的數據進行計算分析, 手冊中針對三場豬隻飼養規模分別為 28,000 頭 / 日 (20,000 頭以上)、3,200 頭 / 日 (3,000 頭以上) 及 2,200 頭 / 日 (2,000 頭以上) 之養豬畜牧場內之概況、廢水處理效率及沼氣利用現況進行介紹。另, 本研究亦收集過往政府的委託計畫研究成果, 進行豬隻甲烷排放係數分析 (蘇, 2010; 2011)。本研究也透過政府公開資訊, 蒐集飼養規模達 1,000 頭以上的國內養豬場之水污染防治措施計畫許可申請文件 (行政院環境保護署水污法相關公開資訊平臺, 2022), 針對許可文件中的每日最大飼養量、每日最大處理水量以及原污水 COD 設計值等共三項之基本資訊進行蒐集, 分析國內豬隻每天的 COD 單位產生量。

II. 田野調查與採樣分析

針對單獨養豬場進行田野調查與水質採樣分析, 主要對象為養豬場規模 1,000 頭以上之畜牧業者, 以其養豬場作為本土數據實測來源, 本研究調查三家養豬場, 分別位於彰化、雲林、屏東, COD 水樣採集頻率為每季一次, 採樣點分別為固液分離後原水、厭氧池出流水及放流水。水樣採樣方法參考 NIEA W109.53B 事業放流水採樣方法, 以附有伸縮式長柄之圓筒手動採水設備, 以採樣器分別採取足量之固液分離後原水、厭氧池出流水及放流水三個採樣點之水樣, 水樣採取後以 PP 材質之樣品瓶保存, 並將裝瓶後之樣品移入攜帶式保冷箱保存和運送 (環境檢驗所, 2021)。所有 COD 樣品皆於採樣後 24 小時內分析完畢。彰化牧場沼氣流量紀錄使用 VA550 工業型氣體流量計, 準確度 m.v. 1.5% & f.s. $\pm 0.3\%$ 。彰化牧場 2021 年整年度沼氣量為 974,831.5 m³。

III. 化學需氧量分析

水樣 COD 分析使用 HACH COD Digestion Vials 進行分析, 將 2 mL 水樣加入 COD 試管中, 以 150°C 加熱 2 小時, 再以分光光度計於 620 nm 下進行測定, 分光光度計使用 HACH DR900 Multiparameter Portable Colorimeter, 偵測範圍為 20 – 15,000 mg/L。

IV. CDM 小規模方法學 AMS.III.H. 廢水處理之甲烷氣回收專案

本研究採用養豬畜牧業可應用之 CDM 小規模減量方法學「AMS – III.H 廢水處理之甲烷氣回收專案」第 19.0 版 (CDM methodology, 2019) 進行溫室氣體減量額度之估算。本研究蒐集國內三間養豬畜牧場一整年度之固液分離後原水、厭氧池出流水及放流水 COD 數據, 計算其溫室氣體減量額度與豬隻甲烷排放係數。本研究將專案範疇邊界定為從固液分離有機物 (豬糞尿) 後, 液態廢棄物進入廢水處理設施, 故不考慮電力使用及污泥所造成之溫室氣體減排納入本研究專案邊界中。同時, 因本研究針對已使用沼氣發電之養豬畜牧場, 紅泥沼氣袋已為牧場既有設備, 因此本研究專案邊界不考慮相關洩漏排放或廢水處理系統未裝設沼氣回收裝置造成的排放量。依上述邊界設定結果, 可將原方法學之複雜計算方程式 (CDM methodology, 2019) 簡化為方程式 1 – 3, 其中, 專案活動所獲得之專案減排總量如方程式 1 所示, ER_y 代表第 Y 年的減排總量、BE_y 代表第 Y 年減排前之基線排放量、PE_y 代表第 Y 年減排後的專案活動排放量。

$$ER_y = BE_y - PE_y \dots\dots\dots (1)$$

$$BE_y = BE_{ww, treatment, y} + BE_{ww, discharge, y} \dots\dots\dots (2)$$

$$PE_y = PE_{ww, discharge, y} \dots\dots\dots (3)$$

其中 $BE_{ww, treatment, y}$ 為廢水處理系統之基線排放量、 $BE_{ww, discharge, y}$ 為處理後廢水 (放流水) 中含可降解之有機碳產生之基線排放量、 $PE_{ww, discharge, y}$ 為處理後之廢水 (放流水) 中含可降解之有機碳產生之專案活動排放量，相關排放量的計算方法分別如下：

$$BE_{ww, treatment, y} = Q_{ww, y} \times GWP_{CH_4} \times B_{0, ww} \times COD_{inflow, i, y} \times \eta_{COD, BL, i} \times UF_{BL} \times MCF_{ww, treatment, BL, i} \dots\dots\dots (4)$$

$$BE_{ww, discharge, y} = Q_{ww, y} \times GWP_{CH_4} \times B_{0, ww} \times COD_{discharge, BL, y} \times UF_{BL} \times MCF_{ww, discharge, BL, i} \dots\dots\dots (5)$$

其中，

$Q_{ww, y}$ = 於 Y 年，廢水處理量 (m^3)

GWP_{CH_4} = 甲烷全球暖化潛勢 (選用 25)

$B_{0, ww}$ = 於 Y 年，廢水產生甲烷的能力 (方法學預設值， $0.25 \text{ kg CH}_4/\text{kg COD}$)

$COD_{inflow, i, y}$ = 於 Y 年，基線情境下，厭氧廢水處理系統「i」之進流 COD 濃度 (ton/m^3)

$\eta_{COD, BL, i}$ = COD 去除效率

$MCF_{ww, treatment, BL, i}$ = 甲烷校正因子：因由厭氧消化槽甲烷回收，根據方法學指引，取 0.8

UF_{BL} = 模式不確定性校正因子 (根據方法學指引，取 0.89)

$COD_{discharge, i, y}$ = 於 Y 年，基線情境下，厭氧廢水處理系統「i」之放流 COD 濃度 (ton/m^3)

$MCF_{ww, discharge, BL, i}$ = 甲烷校正因子：因排放至海洋、河川或湖泊，根據方法學指引，取 0.1

$$PE_{ww, discharge, y} = Q_{ww, y} \times GWP_{CH_4} \times B_{0, ww} \times COD_{ww, discharge, PJ, y} \times UF_{BL} \times MCF_{ww, discharge, PJ, i} \dots\dots\dots (6)$$

其中，

$Q_{ww, y}$ = 於 Y 年，廢水處理量 (m^3)

GWP_{CH_4} = 甲烷全球暖化潛勢 (選用 25)

$B_{0, ww}$ = 於 Y 年，廢水產生甲烷的能力 (方法學預設值， $0.25 \text{ Kg CH}_4/\text{Kg COD}$)

UF_{BL} = 模式不確定性校正因子 (根據方法學指引，取 1.21)

$COD_{ww, discharge, PJ, y}$ = 於 Y 年，厭氧廢水處理系統之放流 COD 濃度 (ton/m^3)

$MCF_{ww, discharge, PJ, i}$ = 甲烷校正因子：因排放至海洋、河川或湖泊，根據方法學指引，取 0.1

V. 理想氣體方程式計算豬隻甲烷排放係數

本研究亦比較不同方法計算排放係數的差異。利用實際之沼氣流量，參考 Su 與 Chen 以理想氣體方程式 ($PV = nRT$) 進行每隻豬每年產生之甲烷排放量計算 (Su and Chen, 2018)，以甲烷之純度校正，計算方程式如下：

$$\text{甲烷排放係數 (kg CO}_2\text{e/year/head)} = \left(\frac{P \times B \times \frac{C}{100} \times 10^3 \text{ L} / m^3}{R \times T} \right) \times MW_{CH_4} \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \times GWP_{CH_4} \dots\dots\dots (7)$$

其中，

B：豬隻沼氣產量 ($m^3/\text{head}/\text{year}$)

C：甲烷純度 (%)

P：1 atm

R：0.0821 L · atm/mol · K

T：298 K

GWP_{CH_4} ：25

結果與討論

I. 評估養豬畜牧場廢水二氧化碳減量額度

本研究分別針對彰化、雲林、屏東三間不同規模之養豬畜牧場進行分析，彰化場飼養量為 46,000 頭 / 日，此牧場內總計有 2 座完整之廢水處理設施；雲林場飼養量為 20,000 頭 / 日；而屏東場飼養量則為 4,200 頭 / 日。三家牧場皆已完成建置沼氣發電設備並進行發電。表 1 為本研究於 110 年至三間牧場採樣分析之水質 COD 濃度，以此為基礎利用小規模方法學 AMS.III.H. 廢水處理之甲烷氣回收專案，進行牧場廢水二氧化碳減量額度的計算，牧場整年度個別之二氧化碳轉換潛勢如圖 1 所示。個別而言，彰化場的廢水是最具有二氧化碳轉換潛勢，其減量額度為 14,000 t CO₂e/year，雲林場之減量額度為 7,050 t CO₂e/year，屏東場之減量額度則為 512 t CO₂e/year。究其原因主要是因為彰化場的廢水量與飼養量是三場中最高的。

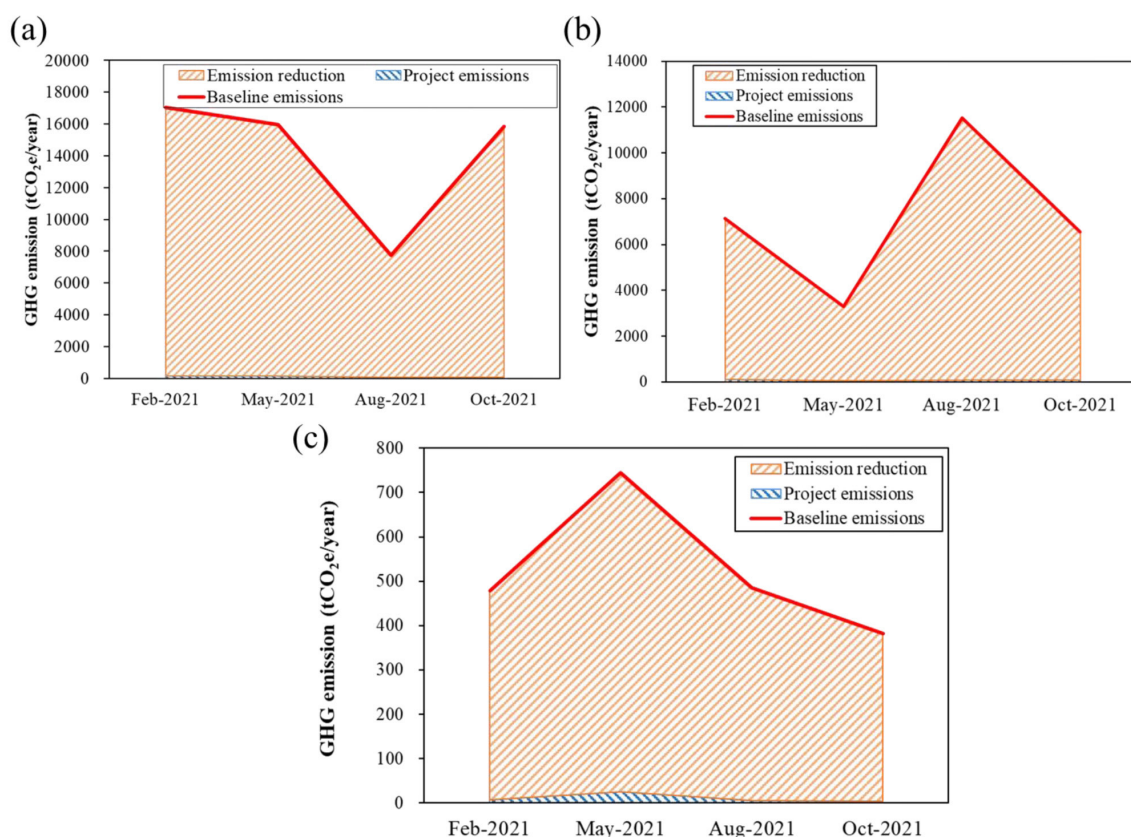


圖 1. 養豬畜牧場 110 年整年度廢水二氧化碳當量轉換潛勢 (a) 彰化場 46,000 頭 / 日、(b) 雲林場 20,000 頭 / 日、(c) 屏東場 4,200 頭 / 日。

Fig. 1. The GHG emission reduction potential estimated by the conversion of wastewater quality in the course of 2021. (a) Changhua farm 46,000 head/day, (b) Yunlin farm 20,000 head/day, and (c) Pingtung farm 4,200 head/day.

表 1. 牧場廢水處理單元水質 COD 濃度

Table1. The inflow and effluent COD concentrations of wastewater in anaerobic digesters for three pig farms

	Sampling time	COD (mg/L)		COD Removal efficiency ((A-B)/A) × 100
		Raw water after solid-liquid separation (A)	Anaerobic digester effluent (B)	
Changhua farm	1 st treatment plant	Wastewater flowrate = 503.4 CMD (m ³ /day)		
	2021/02	12,450	955	92.3%
	2021/05	13,940	1,091	92.2%
	2021/08	7,190	600	91.7%
	2021/10	11,900	606	94.9%
	2 nd treatment plant	Wastewater flowrate = 400 CMD (m ³ /day)		
	2021/02	10,100	857	91.5%
	2021/05	7,760	1,215	84.3%
	2021/08	3,220	412	87.2%
	2021/10	8,480	454	94.6%

表 1. 牧場廢水處理單元水質 COD 濃度 (續)

Table1. The inflow and effluent COD concentrations of wastewater in anaerobic digesters for three pig farms (continued)

		COD (mg/L)		COD Removal efficiency ((A-B)/A) × 100
	Sampling time	Raw water after solid-liquid separation (A)	Anaerobic digester effluent (B)	
Yunlin farm	Wastewater flowrate = 351.05 CMD (m ³ /day)			
	2021/04	14,350	1,990	86.1%
	2021/06	6,890	1,200	82.6%
	2021/09	21,320	1,194	94.4%
	2021/10	12,550	1,155	90.8%
Pingtung farm	Wastewater flowrate = 84 CMD (m ³ /day)			
	2021/03	4,270	798	81.3%
	2021/06	5,680	368	93.5%
	2021/09	4,030	495	87.7%
	2021/10	3,200	422	86.6%

評估牧場每隻豬所產生的甲烷排放量 (以二氧化碳當量表示), 以養豬畜牧場在養頭數計算各牧場每隻豬一年的甲烷減量額度, 可得其豬隻甲烷排放係數, 彰化、雲林、屏東分別為 305 ± 93.1 、 352 ± 169 及 122 ± 34.5 kg CO₂e/head/year。進一步分析各牧場的規模、甲烷減量額度與豬隻甲烷排放係數之關係, 如圖 2 所示當牧場規模越大, 其牧場的甲烷減排總量則越高, 換言之, 當牧場規模越大, 其沼氣發電效益應當也越大。另一方面, 固液分離後原水 COD 值則是影響單位廢水量減排效益的主因, 屏東場固液分離後原水的 COD 值明顯較另兩場偏低, 造成單位廢水量溫室氣體減量效益顯著低於其他兩場。以本研究採樣所得之結果而言, 彰化、雲林、屏東各場廢水中甲烷能轉換之二氧化碳當量平均分別為 15.5 ± 4.7 、 20.1 ± 9.6 及 6.1 ± 1.7 t CO₂e/year/CMD。

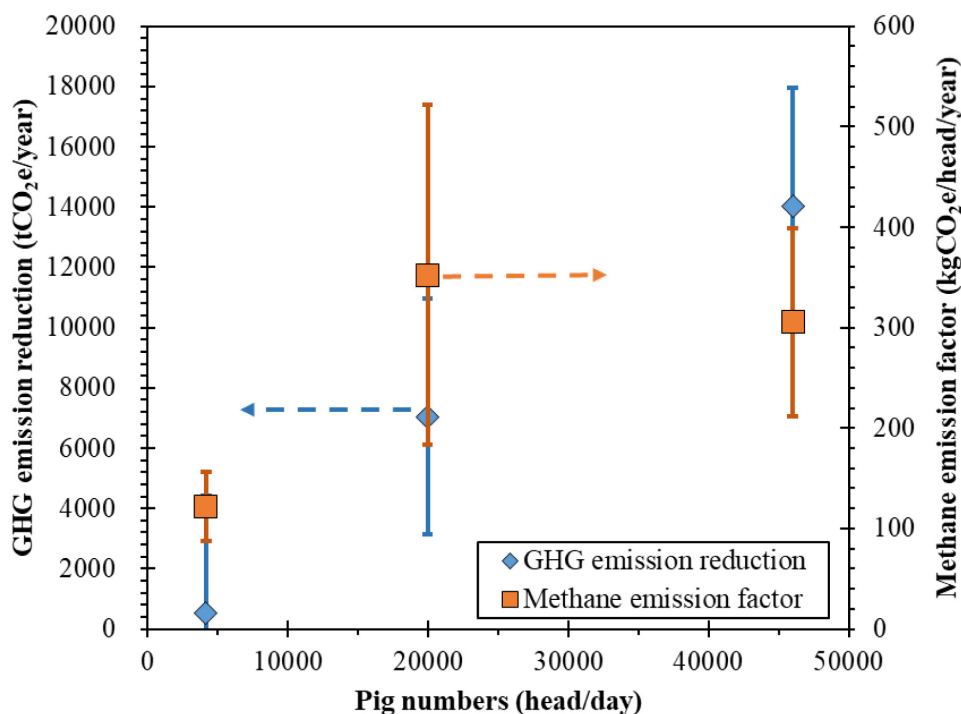


圖 2. 養豬畜牧場規模與溫室氣體減量額度及豬隻甲烷排放係數之關係。

Fig. 2. The GHG emission reduction and the methane emission factor in association with pig numbers.

以標準基線方法學的開發而言, 提供一個可以辨識甲烷排放係數有效性的配套工具, 有其必要性。本研究透過政府公開資訊, 收集國內養豬場的水污染防治措施計畫 (簡稱水措計畫), 透過其中的基本數據, 可以歸納出以養豬廢水 COD 值為基礎的 CDM 方法學, 可用以辨識甲烷排放係數有效性的判準方法。圖 3 為本研究利用收集國內 33 場養豬頭數 1,000 頭以上之一貫場的水措計畫資料, 計算每頭豬隻每天產生之 COD 值 (g/head/

day)，該限制值 LV (limit value) 的計算如下：

$$LV_{\text{(每頭豬隻每天產生之 COD 值 (g/head/day))}} = (Q \times \text{COD}_0) \div P \dots\dots\dots (8)$$

其中，

Q = 每日最大處理水量 (CMD)

COD₀ = 原廢水水質化學需氧量 (mg/L)

P = 豬隻在養頭數 (head)

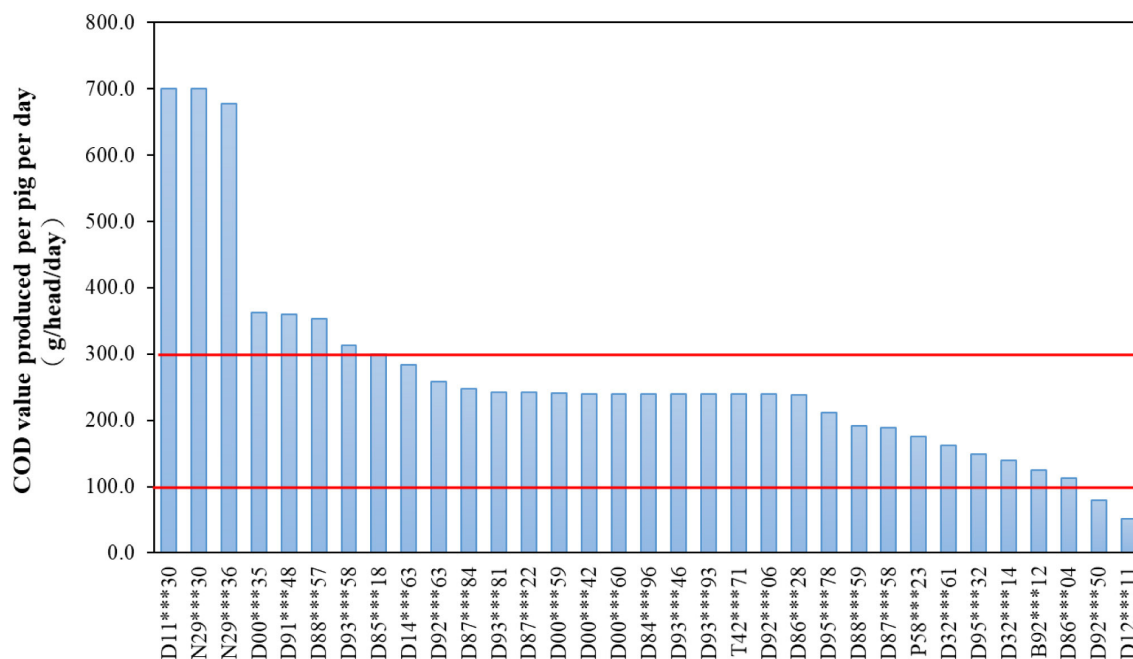


圖 3. 以水措計畫資料計算臺灣每頭豬隻每天產生之 COD 值 (LV 值, g/head/day)。

Fig. 3. The daily COD value per pig (LV value) in Taiwan estimated by the data of the water pollution control measure plans (Limit value (LV), g/head/day).

扣除其中最高值的三間養豬場與最低值的二間養豬場，整體而言，有 24 間養豬場的 LV 值介於 100 – 300 g/head/day，換言之，在減碳潛力的評估上，每頭豬每天能排放的 COD 值介於 100 – 300 g 應是合理的範圍。以臺灣本土數據而言，實際排放至廢水處理場之污染量為平均每頭豬每天產生約 30 公升廢水量，COD 為 250 g，SS 為 150 g (楊，2004)，與上述利用水措計畫資料彙整並計算的 LV 值之結果一致，故可作為判斷養豬場所提供的 COD 數據是否具備可用性之原則。

表 2 彙整本研究現場採樣之數據、各場之水措資料及本研究分析所得之數值，同時也將文獻養豬沼氣發電實例手冊 (2017) 所提供之數據進行了分析，包括以 CDM 方法學進行減碳量、計算其 LV 值、COD 去除率等，以比較造成不同養豬場甲烷排放係數差異的原因。結果顯示所有牧場的厭氧池出流水 COD 移除率皆大於 80% 以上，彰化場、雲林場、28,000 頭牧場及 3,200 頭牧場各項數值雖然皆不相同，但其 LV 值皆介於 100 – 300 g/head/day。分析結果顯示出，當 LV 值在 100 – 300 g/head/day，不同牧場間之甲烷排放係數相近 (346 ± 32.2 kg CO₂e/head/year)，與 Su 及 Chen (2018) 之建議值接近。就標準差而言，表 2 所示的甲烷排放係數的標準差達 827 kg CO₂e/head/year，但僅考慮 LV 值在 100 – 300 g/head/day 間的排放係數，則其標準差為 32.2 kg CO₂e/head/year，顯示，LV 值可作為甲烷排放係數的有效判定指標。而屏東的每頭豬隻產生的 COD 量相對偏低 (LV = 85.9 g/head/day)，與固液分離後原水 COD 值偏低有關，實務上而言，正常的飼養過程中，豬隻不應該產生過低量的豬糞尿，故當 LV 值過低時，進一步分析豬隻飼養狀況、廢水廠水質管理等可能造成的原因有其必要性。另一方面，2,200 頭牧場 LV 值異常高 (LV = 1,470 g/head/day)，則與廢水產出量偏高以及其 COD 值異常的高有關。以臺灣本土數據而言，每頭豬隻平均每天產生約 250 g COD (楊，2004)，該牧場高出將近 6 倍的 COD 排放量，與近 2 倍的廢水排放量，因此，以 2,200 頭牧場的數據所得之甲烷排放係數應屬不合理。本研究建議當養豬場的 LV 值未介於 100 – 300 g/head/day 時，所得之甲烷排放係數需被排除。故本研究排除屏東場與 2,200 頭牧場所得之甲烷排放係數 (養豬沼氣發電實例手冊，2017)。

表 2. 彰化牧場、雲林牧場、屏東牧場及其他牧場的 LV 值

Table 2. LV values of Changhua farm, Yunlin farm, Pingtung farm and others

Farm	Maximum daily Pig numbers	Maximum daily wastewater flowrate	Wastewater produced per pig per day	COD of raw water after solid-liquid separation	COD removal efficiency	Methane emission factor	LV
	P (head/day)	Q (CMD)	(Q/P) (L/head/day)	COD _o (mg/L)	(%)	(kg CO ₂ e/head /year)	(g/head/day)
Changhua (first)	26,000	503.4	19.4	11,370	94.9	331	220
Changhua (second)	20,000	400	20	7,390	89.4	272	148
Yunlin	20,000	351.05	17.6	13,778	88.5	352	242
Pingtung	4,200	84	20	4,295	87.3	122**	85.9
28,000 head*	28,000	737	26.3	8,438	95.0	342	222
3,200 head*	3,200	162.3	50.7	5,388	86.6	383	273
2,200 head*	2,200	149.3	67.9	21,679	96.9	2,310**	1,470

* The source of raw data (A practical handbook of swine biogas power generation, 2017)

** Abnormal value based on the LV test.

II. 比較不同計算方法之豬隻甲烷排放係數與牧場規模之關係

本研究利用二種不同方法計算不同牧場之豬隻甲烷排放係數：方法一為 CDM 的方法學，方法二則是依方程式 7 理想氣體方程式進行計算 (Su and Chen, 2018)。表 3 彙整本研究自行採樣之三間養豬畜牧場與文獻之數據。依小規模 CDM 方法學 AMS.III.H.，以養豬畜牧場廢水 COD 值削減量計算所得之豬隻平均甲烷排放係數為 346 ± 32.2 kg CO₂e/head/year (已利用 LV 值排除有效度不足之數據)；實際沼氣產量以理想氣體方程式計算所得之豬隻甲烷排放係數則介於 178 到 293 kg CO₂e/head/year 之間。Su 及 Chen (2018) 研究臺灣北中南三處的養豬畜牧場，豬隻規模介於 9,800 – 18,000 頭之間，三場的 COD 平均去除率為 77%。平均甲烷排放係數為 14.4 kg CH₄/head/year (以 GWP_{CH4} 值取 25 換算為二氧化碳當量之排放係數為 360 kg CO₂e/head/year)。我國 2021 國家溫室氣體排放清冊報告 (行政院環境保護署, 2022b) 有關豬隻糞尿處理甲烷之排放係數，採用 IPCC 指引 (2006) 甲烷排放係數建議值 5 kg CH₄/head/year (IPCC, 2006)，換算為二氧化碳當量之排放係數為 125 kg CO₂e/head/year。由於 IPCC 指引針對亞洲地區的估計是以將近 40% 的豬隻糞尿管理屬濕式處理做推估 (IPCC, 2006)，若以

表 3. 不同計算方法分析之豬隻甲烷排放係數

Table 3. Analysis of the methane emission factor with different calculation methods

Calculation methods Pig numbers	Methane emission factor (kg CO ₂ e/head/year)		Methane purity (%)	Sources of raw data
	CDM Methodology AMS-III.H.	Ideal gas equation		
46,000 head/day (Changhua)	305	284	81.2	This work
28,000 head/day	342	—	—	A practical handbook of swine biogas power generation, 2017
20,000 head/day (Yunlin)	352	—	—	This work
4,200 head/day (Pingtung)	122*	—	—	This work
3,200 head/day	383	178	55.7	A practical handbook of swine biogas power generation, 2017
2,200 head/day	2,310*	293	59.2	A practical handbook of swine biogas power generation, 2017

* Abnormal value based on the LV test.

臺灣幾乎 100% 採用濕式的廢水處理估計，甲烷排放係數可達 313 kg CO₂e/head/year，與本研究所得結果及 Su 和 Chen (2018) 的研究結果相近。

圖 4 為本研究分析彙整之豬隻甲烷排放係數。結果顯示，CDM 方法學所得之結果，以 LV 值排除異常值後，各牧場之豬隻甲烷排放係數 (346 ± 32.2 kg CO₂e/head/year) 與 Su 及 Chen (2018) 之建議值相似。而以實際沼氣量和理想氣體方程式分析所得之結果，因為沼氣產量與沼氣純度都是重要的影響參數，不同牧場間之沼氣純度落差不小，整體呈現較為分散。然而，值得注意的是，對每日飼養頭數 2,200 頭的牧場而言，該場的 LV 值異常，致使 CDM 方法學計算產生異常高的豬隻甲烷排放係數 (2,310 kg CO₂e/head/year)，但透過實際沼氣量的推估，可得相對合理的係數值 (293 kg CO₂e/head/year)，顯示以實際沼氣量和理想氣體方程式仍是有效的評估方法；另一方面，該場亦提供了以 LV 值作為判定 CDM 方法學計算結果有效性的依據。因此，本研究提出以厭氧池出流水 COD 移除率 $\geq 80\%$ 和 LV 值介於 100 – 300 g/head/day 二項條件，作為評估養豬廢水溫室氣體排放潛勢有效性的判定依據。

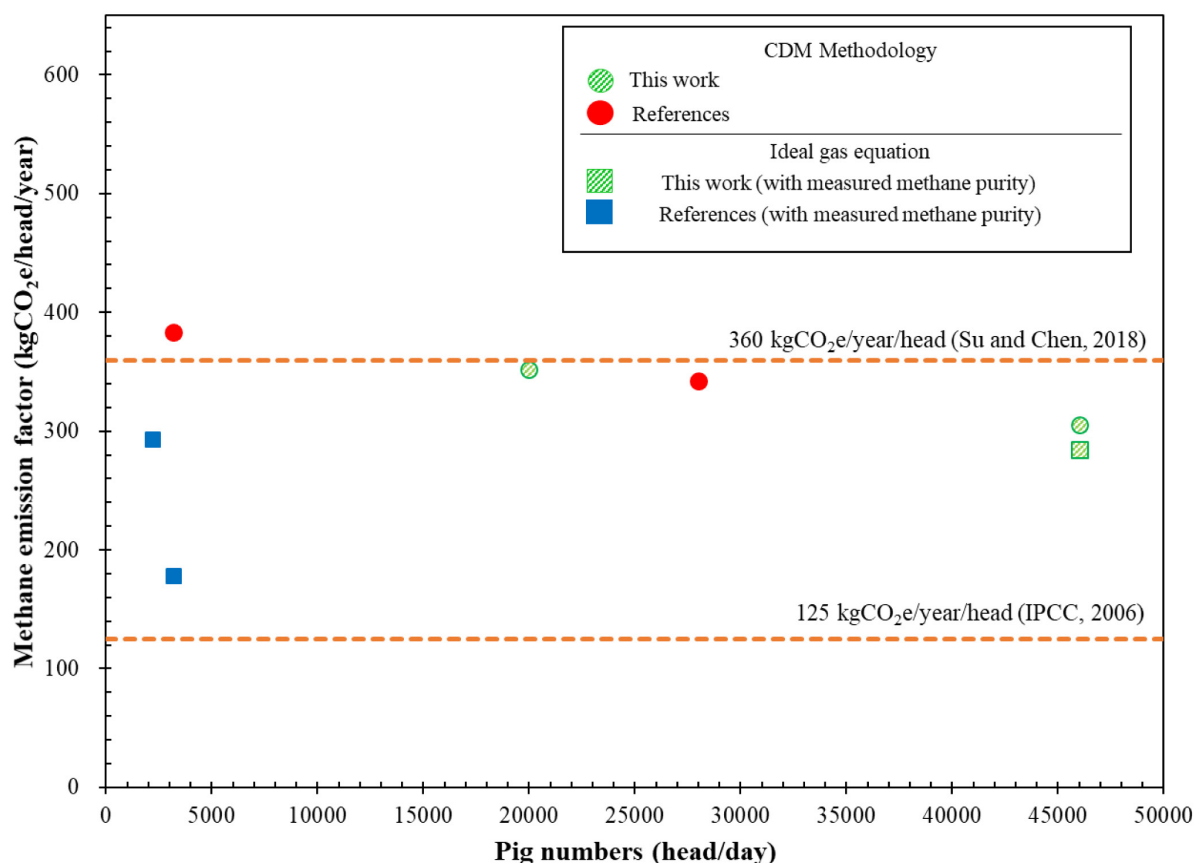


圖 4. 以不同方法計算不同規模畜牧場之豬隻甲烷排放係數之比較。

Fig. 4. Comparison of methane emission factors determined by different methods in association with pig numbers.

III. 本土養豬業沼氣破壞或再利用溫室氣體減量標準基線方法學之建議

本研究根據前項各項分析，設計標準基線方法學，此標準基線方法學之使用情境為：養豬畜牧場將牧場產生之豬糞尿，經由完整且功能正常的三段式廢水處理設施處理，蒐集並以任一方式進行破壞或再利用產生的沼氣，其減量的基準設定為將養豬畜牧廢水產生之沼氣，由「不捕集破壞」改為「捕集並破壞」，其計算方法如下所示：

$$\text{溫室氣體減量額度 (tCO}_2\text{e)/year} = \text{豬隻在養頭數 (head)} \times \text{豬隻甲烷排放係數 (tCO}_2\text{e/head/year)} \dots\dots\dots (9)$$

其中，本土之豬隻甲烷排放係數則依據前項的各項分析結果，採預設值 (default value) 直接設定為 0.346 t CO₂e/head/year。養豬畜牧場只要將產生之沼氣蒐集後，以任一形式進破壞或再利用 (例如：直接燃燒、保溫燈燃料、家用瓦斯燃料、發電等)，皆可以使用本方法學進行減量額度的計算。本研究根據前面各項分析討論之結果，設定此標準基線方法學之使用檢核條件，建議使用此標準基線方法學進行溫室氣體減量額度開發之養豬畜牧場，須符合下列所有檢核條件方可適用，檢核條件表 4 所示。

表 4. 養豬畜牧業沼氣破壞或再利用標準基線方法學檢核表

Table 4. A checklist of the proposed domestic standardized baseline methodology for biogas destruction or reuse in the pig husbandry in Taiwan

Check item	Criteria	Inspection method
Quality of discharge water	Comply with the effluent standards for pig husbandry	Check the official water pollution control fee documents and related water quality testing reports for the past year.
LV value	$100 \leq LV \leq 300$	$LV (g/head/day) = (Q \times COD_0) \div P$ Q = Maximum daily wastewater flowrate (CMD) COD_0 = Chemical oxygen demand of raw wastewater (mg/L) P = Daily maximum pig numbers (head)
COD removal efficiency (E) of anaerobic digesters	$E \geq 80\%$	Check the certificated water quality testing reports in the past year.
Biogas destruction or reuse equipment	Installation of required equipment	Proof of purchase, installation and use of biogas destruction or reuse equipment (such as combustion towers, insulation lamps, household fuel gas use, and electric generators, etc.) shall be provided.
Wastewater flowrate	Installation of the water flow meter at the discharge point	A water flow meter shall be installed at the discharge point, and the flow rate shall be monitored and recorded once a month. Check the certificated wastewater discharge documents in the past year.
Biogas flowrate	Installation of gas flow meter in the front-end pipeline of biogas destruction or reuse equipment	The front-end pipeline of the biogas destruction or reuse equipment shall be equipped with a gas flow meter. The flow rate shall be monitored and recorded once a month. Proof of purchase and installation of the gas flow meter and the flow meter calibration document of the past year shall be provided.

本研究由於僅有三家養豬場的實測數據與部分文獻資料的參酌，而豬隻甲烷排放係數會受到多種因素的影響，例如：豬舍的設計（如：傳統、高床、混合）、豬舍沖洗頻率、牧場位址之氣候條件、飼料配方、牧場型態（如：一貫場、肉豬場、種豬場等）等。因此，未來可針對不同地區、牧場型態、飼養方式等因素，進一步建立不同條件下牧場所適用之豬隻甲烷排放係數。然就本計畫所提出之方法學而言，其架構已具備合理性與便利性。未來可以根據此架構，採用前述不同條件下適用的本土排放係數，進行我國養豬畜牧業標準基線方法學之設計。

結 論

本研究透過與三家養豬畜牧場合作執行採樣分析，以計算臺灣本土的豬隻甲烷排放係數。執行期間共分 4 季取樣，完成 4 次水樣收集與分析。彰化場的廢水是最具有二氧化碳轉換潛勢的，減量額度為 $14,000 \pm 4,280 \text{ t CO}_2\text{e/year}$ ，雲林場之減量額度為 $7,050 \pm 3,380 \text{ t CO}_2\text{e/year}$ ，屏東場之減量額度則為 $512 \pm 145 \text{ t CO}_2\text{e/year}$ ，顯示牧場飼養規模越大其甲烷減排總量則越高。牧場豬隻甲烷排放係數（以二氧化碳當量表示），彰化、雲林、屏東各場分別為 305 ± 93.1 、 352 ± 169 及 $122 \pm 34.5 \text{ kg CO}_2\text{e/head/year}$ 。在減量額度的開發上，本研究以厭氧池出流水 COD 移除率 $\geq 80\%$ 和 LV 值介於 $100 - 300 \text{ g/head/day}$ 二項條件，作為判斷養豬場的廢水相關數據是否具備可用性之原則。本研究使用自行採樣之數據與文獻數據資料，比較二種不同之計算評估方法所得之豬隻甲烷排放係數，建議可用於標準基線方法學的臺灣本土豬隻甲烷排放係數為 $346 \pm 32.2 \text{ kg CO}_2\text{e/head/year}$ ，此結果與 Su 及 Chen (2018) 提出之甲烷排放係數建議值相近。然而，由於本研究之數據有限，需有更多的研究與相關文獻做比較，故建議未來可進一步針對不同地區、牧場型態、飼養方式等因素，評估建立不同條件下牧場所適用之豬隻甲烷排放係數之可行性。

誌 謝

本研究獲得行政院環境保護署「109 年度補助溫室氣體減量管理及氣候變遷調適研究發展計畫」所補助之計

畫。在本報告中提及之觀點，不代表行政院環境保護署的意見。報告中所提及之商品、供應商名稱或商業產品皆非行政院環境保護署所指定。

參考文獻

- 連興隆。2022。臺灣畜牧業微型碳權標準化基線方法學之開發與可行性探討。行政院環境保護署 109 年度補助溫室氣體減量管理及氣候變遷調適研究發展計畫期末報告。
- 郭猛德、蕭庭訓。2009。沼氣利用技術及實例。現代養豬 31(1)：47-54。
- 漢寶農業可再生能源專案計畫書 (版本 10)。2020。
- 漢寶農畜產第三期廢水場沼氣發電計畫 (版本 9)。2020。
- 環境檢驗所。2021。事業放流水採樣方法 (NIEA W109.53B)。
- 行政院農業委員會。2019。沼氣再利用 (發電) 推廣與沼氣發電機操作手冊。
- 行政院農業委員會。2020。中華民國 109 年 5 月底養豬頭數調查報告。
- 行政院環境保護署。2022a。事業溫室氣體排放量資訊平臺。
- 行政院環境保護署。2022b。2021 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。
- 行政院環境保護署水質保護網 a。畜牧廢水。
- 行政院環境保護署水質保護網 b。畜牧糞尿資源化。
- 行政院環境保護署水污法相關公開資訊平臺。2022。許可 / 申報 / 復工計畫資料複合查詢。
- 行政院環境保護署事業溫室氣體排放量資訊平臺。2022。AMS.III.H. 廢水處理之甲烷氣回收專案。
- 蘇忠楨。2008。丹麥畜牧業廢棄物處理之沼氣工廠技術介紹。國際農業科技新知 37：3-8。
- 蘇忠楨。2010。畜牧場沼氣能源產生量之現場評估。行政院農業委員會 99 年度科技計畫研究報告。
- 蘇忠楨。2011。養豬場溫室氣體減量策略效益評估。行政院農業委員會 100 年度科技計畫研究報告。
- 蘇忠楨。2014。綠能養豬發展新契機。行政院農業委員會農業知識入口網。
- 養豬場沼氣發電實例手冊。2017。行政院農業委員會畜產試驗所。
- 楊萬發。2004。臺灣地區水污染防治現況。<http://mail.tku.edu.tw/shgau/> 研究成果 / 歷屆發表的文章 / 兩岸交流 / 臺灣地區水污染防治現況 .htm
- CDM methodology. 2019. AMS-III.H.: Methane recovery in wastewater treatment, Version 19.0.
- CDM Executive Board. 2011. Guidelines for the Establishment of sector specific Standardized Baselines-Version 2. UNFCCC. EB65, Annex, 23.
- Hayashi, D., N. Mueller, S. Feige, and A. Michaelowa. 2010. Towards a more standardized approach to baselines and additionality under the CDM. Zurich: Perspectives GmbH.
- Hayashi, D. and A. Michaelowa. 2013. Standardization of baseline and additionality determination under the CDM. Climate Policy. 13(2): 191-209.
- Hermwille, L., C. Arens, and M. Burian. 2013. Recommendations on the advancement of the CDM standardized baselines framework.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Lee, M. K., R. M. Shrestha, S. Sharma, G. R. Timilsina, and S. Kumar. 2005. Baseline methodologies for clean development mechanism projects. UNEP Risø Center, Denmark.
- Schneider, L., D. Broekhoff, J. Fuessler, M. Lazarus, A. Michaelowa, and R. Spalding-Fecher. 2012. Standardized baselines for the CDM-Are we on the right track? Carbon Market Watch Policy Paper.
- Specific CO2 emissions in Residential Buildings in Republic of Korea (version 01.0). 2020. Clean Development Mechanism (CDM) Standardized baselines.
- Su, J. J. and Y. J. Chen. 2018. Monitoring of greenhouse gas emissions from farm-scale anaerobic piggery waste-water digesters, J Agric Sci, 156(6): 739-747.
- UNDP. 2013. Guidance Note Standardized Baselines.

Evaluation of GHG emission reduction potential and investigation of the methane emission factor of standardized baseline methods for pig husbandry in Taiwan ⁽¹⁾

Hsing-Lung Lien ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ and Tai-Lin Lin ⁽²⁾⁽³⁾

Received: Sep. 16, 2022; Accepted: Feb. 4, 2023

Abstract

The Taiwan EPA has launched the greenhouse gas (GHG) offset projects to facilitate the reduction of GHG emissions. However, it is difficult to promote the GHG offset project for biogas recovery destruction and/or reuse in the pig husbandry. One of the reasons is cost-intensive and time-consuming during the project development. Thus, the study was aimed at investigating the GHG reduction potential of the domestic pig husbandry and developing a simple evaluation guideline of the GHG reduction potential based on the principles of the standardized baseline methodology. The domestic methane emission factor based on the manure management was evaluated using the UN small-scale clean development mechanism (CDM) methodology AMS.III.H. and the ideal gas equation, respectively. Experiments were conducted in three pig farms located in Changhua, Yunlin, and Pingtung. It was found that the Changhua pig farm had the highest potential of the GHG emission reduction, which was estimated to be $14,000 \pm 4280$ t CO₂e/year. The methane emission factor of Changhua, Yunlin, and Pingtung was determined to be 305 ± 93.1 , 352 ± 169 , and 122 ± 34.5 kg CO₂e/head/year, respectively. The overall COD removal efficiency of anaerobic digesters must be greater than 80% and a LV value (the product of COD values and wastewater flow rates) must be in the range of 100-300 g/head/day were proposed as the essential criteria to justify the availability of the data of the piggery wastewater. As a result, the domestic methane emission factor was recommended to be 346 ± 32.2 kg CO₂e/head/year, which is consistent with that determined by Su and Chen (2018) where the factor was 14.4 kgCH₄/head/year, corresponding to 360 kg CO₂e/head/year.

Key words: Piggery wastewater, Greenhouse gas (GHG) offset project, Methane emission factor, Biogas, Standardized baselines.

(1) Contribution No. 2734 from Livestock Research Institute, Council of Agriculture, Executive Yuan.

(2) Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Kaohsiung, Taiwan.

(3) New Energy and Electricity Development Center, National University of Kaohsiung, Taiwan.

(4) Corresponding author, E-mail: lien.sam@nuk.edu.tw.