

出國報告（出國類別：研究）

反芻動物之腸胃甲烷排放量 Tier 3 方法學計算與畜牧溫室氣體減量方法學國際交流

服務機關：農業部畜產試驗所

姓名職稱：洪兮雯助理研究員

派赴國家：法國

出國期間：114 年 9 月 30 日至 114 年 10 月 6 日

報告日期：114 年 11 月 13 日

摘要

依據臺灣的國家排放清冊，臺灣反芻動物的腸胃道甲烷排放係數所採用的方法學為 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Tier 1 或 Tier 2，而 IPCC 建議各國可依生產情況等，利用 Tier 2 或 Tier 3 方法更精準地計算其排放量，故需藉由研析他國 Tier 3 之方法，應用於我國反芻動物腸胃甲烷排放係數 Tier 3 方法學之建立。為此，本所動物營養組洪兮雯助理研究員向法國國家農業、食品與環境研究所 (National Research Institute for Agriculture, Food and Environment, INRAE) 的研究人員 Dr. Maguy Eugène 請益 Tier 3 方法學概念及計算方法，Dr. Maguy Eugène 表示由於 INRAE 藉由牛隻呼吸室累積了牛隻於不同生長階段、不同飼養環境之下的甲烷產量及消化率，經由這些試驗結果得出了甲烷排放主要由有機物消化率影響。因此，法國所使用的 Tier 3 方法學公式與概念，源自於 IPCC Tier 2，但將公式裡的「甲烷轉換因子 = 甲烷能量 ÷ 攝入的總能」替代為「甲烷轉換因子 = 甲烷排放量 ÷ 可消化有機物採食量」，這套公式的概念應可套用至其他國家。以目前畜試所的研究資料套入 IPCC Tier2 及 INRAE Tier 3 試算，得出 INRAE/IPCC 結果之比值為 78.5，而 Eugène et al. (2019) 所得出的比值介於 88 – 114，顯示本所的數值套入 INRAE Tier 3 的結果與 IPCC Tier2 仍有落差，尚須累積更多本土資料做比對，方能確認 INRAE Tier 3 方法學能否作為臺灣的泌乳牛腸胃發酵 Tier 3 方法學之借鏡。由於法國的甲烷轉換因子可利用飼糧等級跟飼糧中的可發酵碳水化合物比例進行預測，若臺灣能持續累積牛隻甲烷排放量與可消化有機物採食量之數據，將來亦可發展出相關的預測公式。另外，為了提升畜試所牛隻呼吸室量測溫室氣體之精準度，筆者前往法國國立生命與環境科學工業學院 (AgroParisTech) 與 INRAE 共同組成的研究單位 Modélisation systémique appliquée aux ruminants (MoSAR)，參訪其位於 Plaisir-Grignon 試驗牧場的呼吸室設備，並與 Dr. Rafael Munoz-Tamayo 討論如何提升呼吸室的回收率及討論呼吸室的最適換氣速率。Dr. Rafael Munoz-Tamayo 表示呼吸室的回收率與量測之精確度息息相關，越接近 100%越好，最低則不宜低於 80%，並建議測量回收率時，使用可以定量釋放標準氣體的流量控制器，會讓測量的效率更好；而呼吸室的最適換氣速率宜控制在每小時能夠完全換氣 8-10 次的速率。經由此次交流，未來可將參訪經驗及研習成果應用至目前正執行中的牛隻腸胃道甲烷排放量之研究，強化畜試所的畜禽呼吸室量測之精確度及減碳飼料添加物之相關研究，並參考國際經驗以發展本土之 Tier 3 方法學公式。

目次

壹、目的.....	3
貳、過程.....	4
參、研習內容	5
(一) 法國國家農業、食品與環境研究所 (INRAE) 簡介.....	5
(二) 將臺灣收集到的泌乳牛本土數值套入 INRAE 發展出的計算方式.....	6
(三) 系統建模在反芻動物的應用研究小組 Modélisation systémique appliquée aux ruminants (MoSAR) 簡介.....	8
肆、心得與建議	14
伍、參考文獻	14

壹、目的

近年來，我國著力於淨零減碳的相關研究議題，如何估算反芻動物腸胃發酵排放的甲烷是其中一個研究重點，而使用何種評估方法得以提高精準度並能代表臺灣的現況，更是關鍵。依據 2025 年臺灣溫室氣體國家排放清冊（以下簡稱清冊），畜禽腸胃發酵排放出的溫室氣體占整個農業部門的 19.29%，而反芻動物排放的甲烷占其中的 62.5%。目前在清冊中，臺灣反芻動物的腸胃道甲烷排放係數所採用的方法學為 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Tier 1 或 Tier 2，而 IPCC 建議各國可依生產情況等，利用 Tier 2 或 Tier 3 方法更精準地計算其排放量，故需藉由研析他國 Tier 3 之方法，應用於我國反芻動物腸胃甲烷排放係數 Tier 3 方法學之建立。

法國國家農業、食品與環境研究所 (INRAE) 因應氣候變遷的影響，在降低氣候變遷的影響、適應氣候變遷等議題著墨甚多。INRAE 的研究人員於 2019 年發展出一套 Tier 3 方法學公式與概念，可評估法國牛隻的腸胃道甲烷排放係數。而 INRAE 旗下或合作的研究單位擁有反芻動物呼吸室，可偵測反芻動物的溫室氣體排放，亦有 GreenFeed 可量測反芻動物於開放式畜舍中的溫室氣體排放。計畫目的旨在與 INRAE 研究人員 Dr. Maguy Eugène 請益如何將臺灣收集到的泌乳牛本土數值套入 INRAE 發展出的計算方式，並前往法國與 AgroParisTech 的共同研究單位 MoSAR 參訪其反芻動物呼吸室，交換試驗心得以提升畜試所牛隻呼吸室量測溫室氣體之精準度，做為我國的反芻動物溫室氣體量測研究之參考，並希望藉由本次參訪建立雙方交流管道，墊下未來合作之基石。

貳、過程

一、計畫行程

日期	研習機構	研習內容	相關人員、聯絡方式或地址
9/30-10/1		啟程	畜試所→桃園機場→法國戴樂高機場→Palaiseau, France
10/2-10/3	法國 INRAE 與 AgroParisTech 的共同研究單位 MoSAR (Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 研習如何將臺灣收集到的泌乳牛本土數值套入 INRAE 發展出的計算方式 2. 研習新興減碳飼料添加物之技術及經驗交流 3. 參訪 MoSAR Team 如何呼吸室測量反芻動物腸道甲烷排放的技術 	Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants (MoSAR) : Rafael Munoz-Tamayo, PhD (rafael Munoz-Tamayo@inrae.fr) 地址 : 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau, France
10/4		路程	Palaiseau→巴黎
10/5-10/6		返程	法國戴樂高機場→桃園機場→畜試所

參、研習內容

（一）法國國家農業、食品與環境研究所（INRAE）簡介

INRAE 成立於 2020 年 1 月 1 日，致力於與生命、人類和地球相關的科學研究。由法國國家農業研究所（INRA）和法國國家環境與農業科學技術研究所（IRSTEA）合併而成，整合了雙方的主要基礎設施（例如觀測站、技術平台和資料儲存庫），能夠進行多面向的研究。由於全球面臨氣候變遷的影響，INRAE 的研究也涵蓋了降低氣候變遷的影響、適應氣候變遷、提高糧食安全和營養安全、保護自然資源、恢復生物多樣性、風險預測與管理以及數位農業等議題。INRAE 有 1 個位於巴黎的總部及 18 個研究中心，共可分成 14 個科學部門，遍佈法國各地（圖 1）。

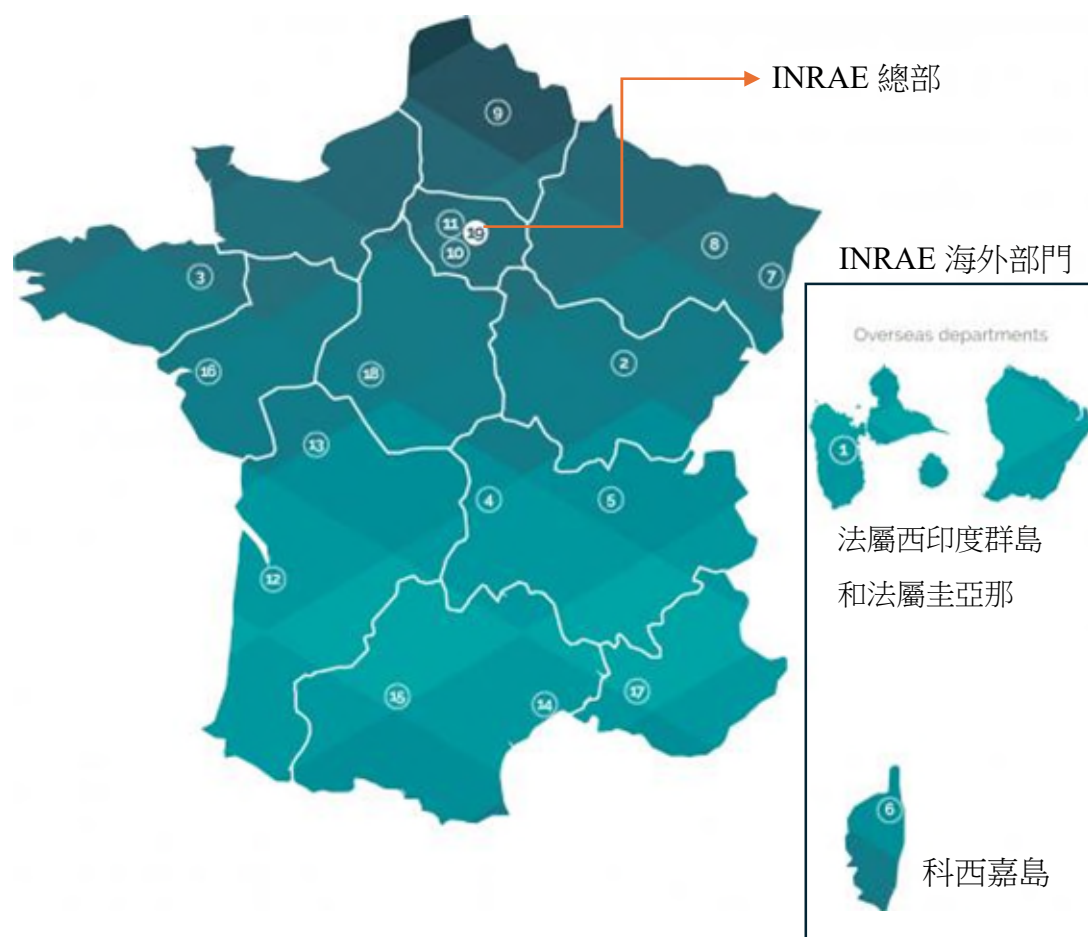


圖 1. INRAE 的總部及各研究中心位置

（圖片來源：<https://www.inrae.fr/en/about-us/organisation>）

(二) 將臺灣收集到的泌乳牛本土數值套入 INRAE 發展出的計算方式

本計畫原訂目的在於攜帶下述資料前往法國 INRAE 的草食動物研究單位 (Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores)，與 Dr. Maguy Eugène 學習如何將臺灣收集到的泌乳牛本土數值套入 INRAE 發展出的計算方式，以發展臺灣的泌乳牛腸胃發酵 Tier 3 方法學。

Dr. Eugène 表示由於 INRAE 藉由牛隻呼吸室累積了牛隻於不同生長階段、不同飼養環境之下的甲烷產量及消化率，經由這些試驗結果得出了甲烷排放主要由有機物消化率影響。因此，法國所使用的 Tier 3 方法學公式與概念，源自於 IPCC Tier 2，但將公式裡的「甲烷轉換因子 = 甲烷能量 ÷ 攝入的總能」替代為「甲烷轉換因子 = 甲烷排放量 ÷ 可消化有機物採食量」，這套公式的概念應可套用至其他國家。然而於今年 6 月份聯繫時，得知 Dr. Eugène 將於 9 月 1 日離開草食動物研究單位，轉至 INRAE 位於法屬西印度群島的海外研究中心工作，故將參訪時間訂於 7 月下旬，亦取得參訪同意，最後卻因 Dr. Eugène 有其他緊急狀況，不得不取消拜訪行程。經由 Dr. Eugène 的介紹，後續改為拜訪在 Modélisation systémique appliquée aux ruminants (MoSAR) 的 Dr. Rafael Munoz-Tamayo。而將臺灣收集到的泌乳牛本土數值套入 INRAE 發展出的計算方式的部分，則改由本人試算之後，經由 e-mail 與 Dr. Eugène 討論。

1. IPCC 2006 的牛隻動物腸胃發酵 Tier 2 方法學公式 vs. INRAE 所發展的牛隻腸胃發酵 Tier 3 方法學公式

(1) IPCC 2006 的反芻動物腸胃發酵 Tier 2 方法學公式

- a. 腸胃道甲烷排放係數 (kg /頭/年) = $GEI \text{ (MJ/頭/日)} \times Y_m \div 100 \times 365 \div 55.65$
- b. 總能量攝取 $GEI = \text{總能} \times \text{採食量}$ ，在此總能量攝取以熱卡計分析之數值計算
- c. 甲烷轉換因子 $Y_m \text{ (\%)} = ECH_4 \div GEI$ ，通常默認為 6.5
- d. 甲烷能量 $ECH_4 = \text{甲烷排放量 (g/日)} \times \text{甲烷熱能 } 55.65 \text{ (MJ/g)}$

(2) INRAE 所發展的牛隻腸胃發酵 Tier 3 方法學公式

- a. 腸胃道甲烷排放係數 (kg /頭/年) = $DOMI \times MCF_e \div 100 \times 365$

- b. 可消化有機物採食量 DOMI (kg/頭/日) = 有機物率 × 表面消化率 × 採食量
- c. 甲烷轉換因子 MCF_e (%) = 甲烷排放量 CH₄ (kg/頭/日) ÷ DOMI (kg/頭/日)

以下參數分別由 113 年度「泌乳牛羊低甲烷排放配方技術研發」以及 114 年度「臺灣泌乳牛及豬隻腸胃排放係數之更新」之試驗資料試算：

表 1. IPCC 2006 的牛隻動物腸胃發酵 Tier 2 方法學公式及 INRAE 所發展的牛隻腸胃發酵 Tier 3 方法學公式所需之參數

名稱	數值
泌乳牛甲烷轉換因子 (Y _m)	6.5% (IPCC 默認值)
泌乳牛甲烷轉換因子 MCF _e	2.7%
泌乳牛甲烷排放量	383.59 g/頭/日 (本土值，114 年上半年量測數據)
泌乳牛乾物質採食量	23.67 kg/日
泌乳牛有機物採食量	21.27 kg/日
泌乳牛可消化有機物質採食量	14.21 kg/日
泌乳牛飼糧總能	17.14 MJ/kg DM
泌乳牛飼糧乾物率	50.14%
泌乳牛飼糧有機物率	89.86%
泌乳牛飼糧表面消化率	66.89%

表 2. 分別以 IPCC Tier 2 方法學及 INRAE Tier 3 方法學估算之結果

方法學	數值
IPCC Tier2 (2006) 腸胃道甲烷排放係數 = $GEI \text{ (MJ/頭/日)} \times Y_m \div 100 \times 365 \div 55.65$	172.96 kg/頭/年 (Y _m = 6.5)
INRAE Tier 3 (2019) 腸胃道甲烷排放係數 = $DOMI \times MCF_e \div 100 \times 365$	140.04 kg/頭/年
INRAE / IPCC (%)	81

由表 2 可知，以目前畜試所的研究資料套入 IPCC Tier2 及 INRAE Tier 3 試

算，所得出 INRAE / IPCC 結果之比值為 81，而 Eugène et al. (2019) 所得出的比值介於 88–114，顯示本所的數值套入 INRAE Tier 3 的結果與 IPCC Tier2 仍有落差，尚須累積更多本土資料做比對，方能確認 INRAE Tier 3 方法學能否作為臺灣的泌乳牛腸胃發酵 Tier 3 方法學之借鏡。同時，我們應亦思考 IPCC 默認的 Y_m 值是否適合臺灣乳牛之情境，如要使用 IPCC Tier2 之公式，臺灣需要自己本土的 Y_m 值，更能代表臺灣現況。另外，法國的甲烷轉換因子 MCF_e 可利用飼糧等級跟飼糧中的可發酵碳水化合物比例進行預測，若臺灣能持續累積牛隻甲烷排放量與可消化有機物採食量之數據，將來亦可發展出相關的預測公式，更利於應用。

（三）系統建模在反芻動物的應用研究小組 Modélisation systémique appliquée aux ruminants (MoSAR) 簡介

直接翻譯的話，Modélisation systémique appliquée aux ruminants 係指將系統建模在反芻動物的應用團隊，簡稱 MoSAR。由法國國立生命與環境科學工業學院 (AgroParisTech) 與 INRAE 共同組成的研究單位。位於法國帕萊索 (Palaiseau) 的巴黎薩克雷農業大學 (Agro Paris Saclay) 新校區，並且在格里尼翁 (Grignon) 設有試驗牧場及實驗設施。MoSAR 成立於 2010 年 1 月 1 日，先前名為「營養與飼料生理學」(Physiologie de la Nutrition et Alimentation)。該單位在反芻動物營養生理學和飼料評估方面擁有豐富的經驗，尤其擅長乳羊的研究，並在動物生理和生物學的系統建模方面也頗有建樹。自從更名為 MoSAR 以來，該研究單位的科學研究目標不斷發展，更加重視系統建模的核心作用，並更加明確地關注營養物質獲取、轉化和分配到不同生命功能過程中的表型變異特徵。



圖 2. AgroParisTech 在 Paris Saclay 的校區（圖片來源：AgroParisTech 官網）

1. 參訪格里尼翁試驗牧場的反芻動物呼吸室



圖 2. The Grignon Experimental Farm（圖片來源：AgroParisTech 官網）

此行由 MoSAR 的副主任 Dr. Rafael Munoz-Tamayo 帶領筆者參訪與討論，由於有簽署保密協議，因此有些地方像是動物飼養現場的照片及正在進行中（未公開發表）的試驗，未經同意不能揭露於公開場合，故部分照片以 AgroParisTech 官網的圖片取代。本報告中會揭露的部分，已於參訪時徵得研究人員同意。

格里尼翁試驗牧場飼養的動物以乳羊為主，品種有阿爾拜因與撒能，共約 120 頭。在試驗牧場的反芻動物呼吸室有 4 個，是給羊隻使用的。每個呼吸室長

2.06 m × 寬 1.57 m × 高 1.85 m，為開放式循環，並且有自動偵測採食量之智慧化磅秤系統。呼吸室的設計考量了動物福利，呼吸室的牆面皆為透明，羊隻能夠看到彼此，不易緊迫。甚至每間呼吸室內都有一個刷毛機，提供羊隻磨蹭與刷毛。呼吸室內部亦無代謝架，羊隻得以自由活動。



圖 3. 本所參訪人員與 Dr. Rafael Munoz-Tamayo（左）合影

Dr. Munoz-Tamayo 分享了許多呼吸室設計與使用上的心得與建議，例如：從呼吸室排出的空氣須確實往外排出，不能排進放置呼吸室的空間，避免甲烷持續累積，造成試驗誤差；試驗過程中一天餵食羊隻兩次，因為餵食而中斷的甲烷量測，所產生的量測空窗期因為較整體量測時間而言太過短暫，因此在統計時選擇忽略不計。而他們在進行呼吸室試驗之前，是用循序漸進的方式讓羊隻習慣呼吸室，適應的流程大致如下：

- (1) 第一天：讓羊隻走進來看環境（門打開）。
- (2) 第二天：也是門開著適應環境，但時間較第一天長。
- (3) 第三天：門關起來一陣子，看羊的反應。
- (4) 第四天：比第三天長。
- (5) 第五天：關起來過夜，看羊的反應。
- (6) 隔週週一：正式試驗，關門測一天。
- (7) 隔週週二：正式試驗，關門測兩天。

由於呼吸室的氣體回收率是影響量測精準度的重點之一，因此筆者請教了相關試驗細節。Dr. Rafael Munoz-Tamayo 表示回收率應該要超過 80%，低於 80%

的話，需要確定有沒有問題。MoSAR 的氣體回收率試驗測量了 6 個位置，分別是呼吸室的 4 個角落、正中央以及氣體排氣口，以下為 MoSAR 的氣體回收率試驗的操作步驟：

- (1) 將氣體排放源放置在所需的甲烷排放位置，關閉呼吸室並等待幾分鐘以使呼吸室中的氣體達到平衡。
- (2) 打開甲烷的流量控制器 30 分鐘。
- (3) 關閉甲烷的流量控制器，等待 15-20 分鐘，直到呼吸室內的甲烷濃度幾乎與環境濃度相等。
- (4) 數據採集完成後，將呼吸室內的甲烷濃度從每個時間點環境空氣中測得的甲烷濃度中減去。
- (5) 甲烷總量透過以下方法進一步計算：利用 R 統計軟體計算曲線下的面積。
- (6) 回收率 (%) = 在呼吸室量測到的甲烷總量 ÷ 釋出的甲烷總量 × 100

該團隊的氣體回收率資料及測試步驟已於 2022 年公開發表於 animal - open space 期刊，該期刊是動物聯盟（animal Consortium）新的出版計劃，該聯盟由英國動物科學學會、法國國家農業、食品與環境研究院（INRAE）和歐洲動物科學聯合會（EAAP）合作組成。Dr. Rafael Munoz-Tamayo 表示他們發表 animal - open space 期刊於研究報告中，提供了連結，可下載呼吸室 6 個不同量測位置的甲烷原始資料，供有興趣的研究同仁下載，可交叉比對各自的試驗結果。



圖 4. 呼吸室外觀



圖 5. 呼吸室系統櫃，內含抽風系統、流量控制系統與甲烷分析儀器



圖 6. 採食區，下面有可測採食量之磅秤



圖 7. 呼吸室內的刷毛機，增進動物福利

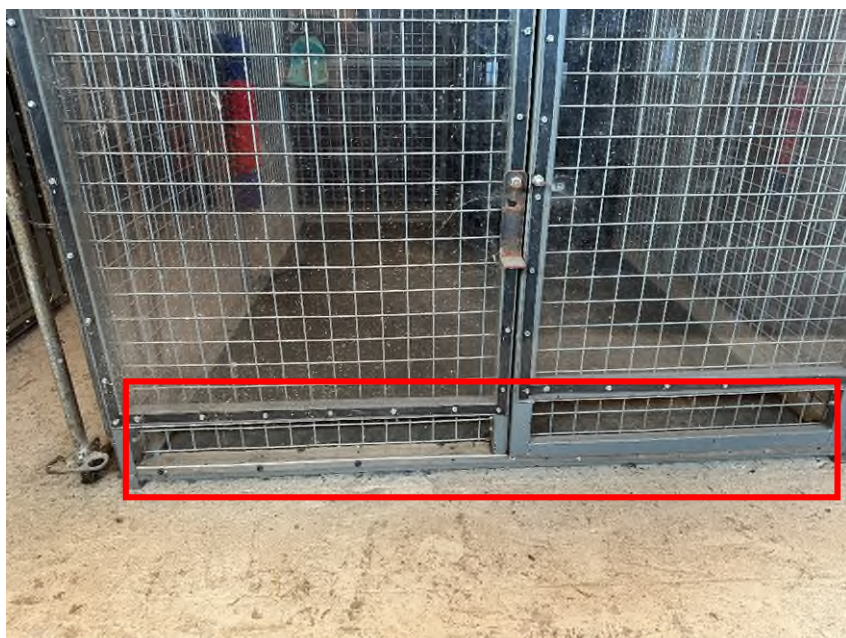


圖 8. 紅色框處為呼吸室的進氣區，為開放式循環

肆、心得與建議

- (一) 以目前畜試所的研究資料套入 IPCC Tier2 及 INRAE Tier 3 試算，所得出 INRAE / IPCC 結果之比值為 78.5，而 Eugène et al. (2019) 所得出的比值介於 88 – 114，顯示本所的數值套入 INRAE Tier 3 的結果與 IPCC Tier2 仍有落差，尚須累積更多本土資料做比對，方能確認 INRAE Tier 3 方法學能否作為臺灣的泌乳牛腸胃發酵 Tier 3 方法學之借鏡。
- (二) IPCC 默認的 Y_m 值可能並不適合臺灣乳牛之情境，如要使用 IPCC Tier2 之公式，臺灣需要自己本土的 Y_m 值，更能代表臺灣現況。
- (三) 法國的甲烷轉換因子 MCF_e 可利用飼糧等級跟飼糧中的可發酵碳水化合物比例進行預測，若臺灣能持續累積牛隻甲烷排放量與可消化有機物採食量之數據，將來亦可發展出相關的預測公式，更利於應用。
- (四) 未來將嘗試 MoSAR 的氣體回收率試驗方法，透過量測點位的增加，確認畜試所呼吸室的氣體回收率之精準度，進而提升整體呼吸室量測甲烷之準確性。

伍、參考文獻

環境部。2025。2025 年中華民國國家溫室氣體清冊報告。

<https://service.cca.gov.tw/File/Get/cca/zh-tw/ye2sM2I8dW4HKkw>

Dhumez, O., J. Tessier, M. Eugène, A.I. Martín-García, A. Eymard, S. Giger-Reverdin, C. Duvaux-Ponter, R. Muñoz-Tamayo. 2022. Dynamic data for determining the accuracy of four open-circuit respiration chambers designed to quantify methane emissions from goats. Animal - open space.

<https://doi.org/10.1016/j.anopes.2022.100006>

Eugène, M., Sauvant, D., Nozière, P., Viallard, D., Oueslati, K., Lherm, M., and Doreau, M. (2019). A new Tier 3 method to calculate methane emission inventory for ruminants. Journal of Environmental Management, 231, 982-988.

IPCC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4:
Agriculture, Forestry and other land use. Chapter 10: Emissions from livestock and
manure management.