

台灣雜糧發展基金會114年度補助計畫

結案報告

計畫名稱：豬隻腸胃發酵甲烷之碳排當量及碳足跡區域性差異評估
(Assessment of regional differences in carbon emission equivalent and carbon footprint of pig gastrointestinal fermentation methane)

計畫編號：114-02-004

執行期間：114年1 月1 日至112 年12 月31 日計

畫主持人：翁瑞奇博士

執行機關：中華民國飼料檢驗學會

中華民國 114 年12 月

目次

	頁次
一、前言	1
二、工作實施要點	11
(一) 以三階段體外消化量測法驗證五大養豬縣市豬隻腸胃 發酵甲烷排放係數	12
(二) 以三階段體外消化法驗證公司或自配料戶之豬隻腸胃 發酵甲烷排放係數	13
三、執行成果	14
四、成果效益	21
五、結論	22
六、檢討與改進	23
七、主要參考文獻	24

表目錄

	頁次
表1 畜禽腸胃發酵排放甲烷之係數	3
表2 標準飼糧(NRC2012)套用INRA-AFZ (2004) 回歸方程式 計算腸道甲烷產生量	4
表3 雲林地區商用飼糧套用INRA-AFZ (2004) 回歸方程式計 算腸道甲烷產生量	5
表4 屏東地區商用飼糧套用INRA-AFZ (2004) 回歸方程式計 算腸道甲烷產生量	5
表5 臺灣豬隻年底在養頭數	7
表6 不同地區估算法試算2020年臺灣豬隻腸道甲烷排放量及 二氧化碳當量	7
表7 臺灣2020年豬隻配合飼料供給量	8
表8 以配合飼料年供給量估算豬隻腸道甲烷年產生量及二氧 化碳年當量	9
表9 不同縣市母豬懷孕期飼糧乾物質消化率的差異	14
表10 不同縣市母豬哺乳期飼糧乾物質消化率的差異	15
表11 不同縣市保育期飼糧乾物質消化率的差異	15
表12 不同縣市生長期飼糧乾物質消化率的差異	15
表13 不同縣市肥育期飼糧乾物質消化率的差異	15

表14 不同縣市豬隻完全飼糧乾物質消化率的差異	16
表15 不同縣市豬隻懷孕期飼料總能值GE(Kcal/Kg)的差異	16
表16 不同縣市豬隻哺乳期飼料總能值GE(Kcal/Kg)的差異	16
表17 不同縣市豬隻保育期飼料總能值GE(Kcal/Kg)的差異	17
表18 不同縣市豬隻生長期飼料總能值GE(Kcal/Kg)的差異	17
表19 不同縣市豬隻肥育期飼料總能值GE(Kcal/Kg)的差異	17
表20 不同縣市豬隻完全飼料總能值GE(Kcal/Kg)的差異	17
表21 不同縣市豬隻懷孕期飼料糞能值FE(Kcal/Kg)的差異	18
表22 不同縣市豬隻哺乳期飼料糞能值FE(Kcal/Kg)的差異	18
表23 不同縣市豬隻保育期飼料糞能值FE(Kcal/Kg)的差異	18
表24 不同縣市豬隻生長期飼料糞能值FE(Kcal/Kg)的差異	19
表25 不同縣市豬隻肥育期飼料糞能值FE(Kcal/Kg)的差異	19
表26 不同縣市豬隻完全飼料糞能值FE(Kcal/Kg)的差異	19
表27 不同階段飼糧甲烷氣體產生量估算的差異	20

一、前言

國家溫室氣體清冊是聯合國氣候變化綱要公約（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）及京都議定書（Kyoto Protocol）用以評估其締約方管理人溫室氣體排放的重要依據。UNFCCC 及京都議定書並規範要求已開發國家，每年除了需要統計國家溫室氣體清冊外，尚須彙編年度國家清冊報告（Annual National Inventory Report），用以刊載及說明詳細的溫室氣體排放量與吸收量、計算方法、相關數據及趨勢等；同時並鼓勵開發中國家進行年度國家溫室氣體清冊統計及年度國家清冊報告彙編工作。

臺灣在相關部會共同努力下，於2014年11月完成「2014年中華民國國家溫室氣體清冊報告」彙編，提供相關數據，期能藉以增進各界對臺灣溫室氣體排放現況之瞭解。

臺灣農業部門溫室氣體排放清冊之統計工作，係依據聯合國政府氣候變化專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於 2006 年出版的國家溫室氣體排放清冊指南 1 (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories，以下簡稱 2006 IPCC 指南)，第四卷所述，將農業部門溫室氣體排放分為：3.A「畜禽腸胃發酵」、3.B「畜禽糞尿管理」、3.C「水稻種植」、3.D「農業土壤」、3.E「草原焚燒」、3.F「作物殘體燃燒」、3.G「石灰處理」、3.H「尿素施用」等項目，計算二氧化碳當量所使用之甲烷與氧化亞氮之全球暖化潛勢(Global Warming Potential, GWP) 分別為 25 與 298。

農業部門排放源分類與其所使用方法學中，畜牧產業之排放源有「畜禽腸胃發酵」(甲烷) 及「畜禽糞尿管理」(甲烷及氧化亞氮)，其計算範疇係指人類所飼養的家畜及家禽；並依據 2006 IPCC 指南，計算我國畜禽腸胃發酵甲烷排放量，其計算方式係為各畜種排放係數乘上年度活動數據之加總（公式 5.2.1）。產乳牛及其他牛之排放係數計算方法經專家諮詢會通過後，採用 2006 IPCC 指南方法 2；家禽之排放係數計算方法經專家諮詢會通過後，採用 2006 IPCC 指南方法 3；其他畜種的排放係數則採用 2006 IPCC 指南方法 1。

公式 5.2.1 畜禽腸胃發酵甲烷之排放量：

$$\text{畜禽腸胃發酵甲烷之排放量(Gg/年)} = \sum_i (EF_i \times \text{各類畜禽年度活動數據} \times 10^6)$$

EF_i = 某類畜禽腸胃發酵的排放係數 $Gg=10^9$ 公克，使用的畜禽種類分別為：產乳牛、其他牛、水牛、山羊、豬、白色肉雞、有色肉雞、蛋雞、鵝及肉鴨。

臺灣自1998 年起進行一系列畜禽溫室氣體排放的研究，並於 2001 年經由相關專家召開研究結果的審查，確立產乳牛、雞、鴨及鵝腸胃發酵的甲烷排放係數本土值，至於豬隻則因其為高度經濟動物，與其他國家豬隻品種與性能表現均大致相同，因此直接採用 2006 IPCC 指南的預設值；另山羊部分因無國內研究，亦採用 IPCC 的預設值；而駝鳥、鸕鶿、鹿及馬之排放量因未達總排放量之 5%，因此不予計入。排放係數的單位則與活動數據的估算方式一致，生命週期大於 1年或全年飼養量均一致者，其排放係數的單位為每年每頭(隻)腸胃發酵的甲烷排放量；至於白色肉雞、有色肉雞、鵝及鴨等生命週期僅數月或全年飼養量較不一致者，其排放係數單位則為每個生命週期每隻腸胃發酵的甲烷排放量；有關畜禽腸胃發酵排放甲烷之係數詳如表1。

表1 畜禽腸胃發酵排放甲烷之係數

			溫室氣體		排放係數 (EF)			
			類別	係數	單位	來源	說明	不確定性 (%)
腸胃 發酵	牛 (Cattle)	產乳牛 ^{a,d} (Dairy Cows)	甲烷	125.1	公斤/頭/年	本土值 ³	IPCC 為 68	±30.0
		其他牛 ^{b,d} (Other cattle)		64.3			IPCC 為 47	±30.0
	水牛 (Buffalo) ^c		甲烷	55.0	公斤/頭/年	IPCC ^f		±30.0
	山羊 (Goats) ^c		甲烷	5.0	公斤/頭/年	IPCC ^f		±30.0
	豬 (Swine) ^c		甲烷	1.5	公斤/頭/年	IPCC ^f		±30.0
		白色肉雞 ^e		1.587×10 ⁻⁵	公斤 / 隻 / 生命週期	本土值 ⁴		±12.1
	家禽(Poultry)	有色肉雞 ^e	甲烷	8.482×10 ⁻⁵	公斤 / 隻 / 生命週期	本土值 ⁴	IPCC	±12.0
		蛋雞 ^e		1.061×10 ⁻²	公 斤 / 隻 / 年	本土值 ⁵	無資料	±37.3
		鵝 ^e		1.500×10 ⁻³	公斤 / 隻 / 生命週期	本土值 ⁶		±27.7
		肉鴨 ^e		2.071×10 ⁻³	公斤 / 隻 / 生命週期	本土值 ⁷		±21.7

IPCC(2006)指南中豬隻腸胃發酵甲烷排放係數以每年每頭1.5公斤為計算標準，此一標準係數不考慮飼料型態、生理階段、環境條件等差異，計算基礎以飼糧總能及0.6%總能甲烷轉換率來估算豬隻腸胃發酵甲烷產生量，致使其計算結果無法代表各國實際的狀況；因此很多國家開始建立各自的溫室氣體排放係數，並且將飼料型態、生理階段、環境條件等差異列入評估方法中；例如，Le Goff等人（2002）指出腸道中甲烷的產生水準主要取決於日糧中纖維含量和豬隻後腸道的發酵能力；因此，膳食纖維含量的增加與甲烷產量的增加有關，而發酵能力取決於豬隻的生理階段，成年豬隻的甲烷產量通常較高。此外，母豬懷孕期及哺乳期飼糧中纖維含量、餵飼量及代謝速率等差異也會影響其腸道甲烷產生量。於是INRA-AFZ（2004）便根據Noblet 等人（1994）、Jorgensen等人(1996)、Olesen 及Jorgensen(2001)、Le Goff等人(2002a,b)、Ramonet等人(2000)、Galassi等人(2004, 2005)、Jorgensen, (2007)、Jorgensen等人(2007)及Serena等人(2008)等的研究結果，重新彙編這些數據，並開發了以下的公式作為預測肉豬(1)及母豬(2)腸道甲烷產量的依據。根據這些回歸方程式，便可以有效且快速計算出豬隻腸道中產生的甲烷量；例如，每頭肉豬每日攝取300公克的纖維(dRes)時，其腸道中會產生的甲烷量為3.6公克；每頭母豬每日攝取300公克的纖維(dRes)時，其腸道中會產生的甲烷

量為6.3公克。

$$E - \text{CH}_{4;\text{pig}} = 0.012 \times \text{digestible residues (dRes)} \quad (R^2 = 0.77) \quad (1)$$

$$E - \text{CH}_{4;\text{sow}} = 0.021 \times \text{digestible residues (dRes)} \quad (R^2 = 0.90) \quad (2)$$

(E-CH_{4,pig/sow}, in g CH₄ day⁻¹) from dRes intakes (g day⁻¹)

若根據前次計畫分析結果套用上述公式(1)及(2)，計算餵飼標準飼糧時豬隻每日腸道產生的甲烷量，結果顯示懷孕期母豬每日腸道產生的甲烷量為0.8316公克、哺乳期為2.6355、肥育期為0.5522，均低於IPCC建議值所計算出的每日4.1公克，詳如表2所示。

若以雲林地區商用餵飼飼糧計算豬隻每日腸道產生的甲烷量時，結果顯示懷孕期母豬每日腸道產生的甲烷量為1.4738公克、哺乳期為2.5095、肥育期為0.8611，亦均低於IPCC建議值所計算出的每日4.1公克，詳如表3所示。

若以屏東地區商用餵飼飼糧計算豬隻每日腸道產生的甲烷量時，結果顯示懷孕期母豬每日腸道產生的甲烷量為0.9425公克、哺乳期為2.8245、肥育期為0.6146，亦均低於IPCC建議值所計算出的每日4.1公克，詳如表4所示。

表2 標準飼糧(NRC2012)套用INRA-AFZ (2004) 回歸方程式計算腸道甲烷產生量

	懷孕期	哺乳期	肥育期
飼糧粗纖維含量(%)	1.8	2.51	1.77
平均每日預期攝食量(公斤/天) ^A	2.2	5	2.6
平均每日粗纖維攝取量(公克/天)	39.6	125.5	46.02
平均每日腸道甲烷產生量(公克/天)	0.8316	2.6355	0.5522

^A：臺灣地區養豬飼養標準(1990)

表3 雲林地區商用飼糧套用INRA-AFZ（2004）回歸方程式計算腸道甲烷產生量

	懷孕期	哺乳期	肥育期
飼糧粗纖維含量(%)	3.19	2.39	2.76
平均每日預期攝食量(公斤/天) ^A	2.2	5	2.6
平均每日粗纖維攝取量(公克/天)	70.18	119.5	71.76
平均每日腸道甲烷產生量(公克/天)	1.4738	2.5095	0.8611

^A：臺灣地區養豬飼養標準(1990)

表4 屏東地區商用飼糧套用INRA-AFZ（2004）回歸方程式計算腸道甲烷產生量

	懷孕期	哺乳期	肥育期
飼糧粗纖維含量(%)	2.04	2.69	1.97
平均每日預期攝食量(公斤/天) ^A	2.2	5	2.6
平均每日粗纖維攝取量(公克/天)	44.88	134.5	51.22
平均每日腸道甲烷產生量(公克/天)	0.9425	2.8245	0.6146

^A：臺灣地區養豬飼養標準(1990)

此外，Vermorel等人（2008）估計，法國生產的離乳仔豬（20公斤以下）、育肥豬（20公斤以上）和繁殖母豬的每日腸道甲烷排放量分別為每頭0.8、2.4和8.2克，低於IPCC（2006）指南方法1推薦的標準(每天每頭4.1公克)。

Dämmgen等人（2012）則提出了德國生產的相應值分別為0.9、2.5和6.1公克腸道甲烷排放量，低於IPCC（2006）指南方法1推薦的標準(每天每頭4.1公克)。

Jørgensen等人(2011)針對丹麥地區的研究結果指出，在豬腸道甲烷產生的來源是日糧中的纖維濃度，而日糧脂肪和蛋白質對甲烷產生均無顯著影響；膳食脂肪對甲烷產生無顯著影響可能是由於小腸中脂肪的消化率非常高。仔豬的甲烷產量很低，僅為0.13升/天或總能(GE)的0.1%。對於生長豬使用低纖維飼糧或標準飼糧，甲烷產生量估計為總能(GE)的0.2%至0.5%，相當於一頭肥育豬為3.4公升/天；二者均低於IPCC（2006）推薦的標準(總能的0.6%)。此外，Jørgensen等人(2011)的研究結果也指出，限飼時乾母豬和妊娠母豬腸道甲烷產生量為總能的

0.6%至2.7%，具體取決於餵飼量和纖維類型，而泌乳母豬的腸道甲烷產生量估計約為總能的0.6%；在所有試驗中，妊娠母豬的腸道甲烷產生量都超過了IPCC(2006)建議的標準(總能的0.6%)。

反觀臺灣有關豬隻腸胃發酵甲烷排放之相關研究，因自2015年以後便中斷，致使對於豬隻腸道甲烷產生量的計算一直引用 2006 IPCC 指南的預設係數。雖然農業部畜試所曾歷時四年針對國內豬隻活體溫室氣體排放量進行調查研究(李等人，2015)，並將摘要發表於 2015年12月份的中國畜牧學會會誌，但是該研究結果(摘要)因尚未完整並未被國家溫室氣體清冊採用。

根據畜試所2015年發表於中國畜牧學會會誌的摘要顯示，以簡易氣體室採集進出氣體，並以氣相層析儀測定進、出氣體中甲烷與二氧化碳濃度差異，同時以103年農業統計年報豬隻年底在養頭數為加權的情況下，計算臺灣豬隻腸胃發酵甲烷排放係數的結果為每日每頭3.04公克或每年每頭1.11公斤；但是國家溫室氣體清冊因該研究只有摘要並不完備而未予採用；因此臺灣2022年國家溫室氣體清冊中，豬隻腸胃發酵甲烷排放係數仍採用2006 IPCC 指南的預設值每年每頭1.5公斤為計算標準，不考慮飼料型態、生理階段、環境條件等的差異，致使國家溫室氣體清冊的計算結果可能高估臺灣豬隻腸胃發酵甲烷二氧化碳當量約53.74千公噸。

根據法國Vermorel等人(2008)、德國Dämmgen等人(2012)、丹麥Jørgensen等人(2011)、畜試所(2015)及IPCC(2006)等不同國家的豬隻腸道甲烷排放量及二氧化碳當量估算法，並以農業部111年農業統計年報(2023)之臺灣豬隻歷年在養頭數為依據(詳如表5)，計算2020年臺灣豬隻各階段腸道甲烷排放量及二氧化碳當量的結果，年甲烷產生量試算值介於4585~6116公噸，低於IPCC的估算值8249公噸/年；轉換為二氧化碳當量則為114.6~152.9千公噸/年，低於IPCC的估算值206.23千公噸/年(詳如表6所示)。這些試算結果均比IPCC估算值(206.23千公噸/年)低許多。

表 5 臺灣豬隻年底在養頭數

	場數	總頭數	種公豬	母種豬	哺乳小豬	未滿 30 公斤	30-60 公斤	60 公斤以上
2018	7241	5447283	20162	599918	764322	1391527	1337819	1333535
2019	6759	5514211	19798	600926	768129	1418864	1333070	1373424
2020	6497	5512274	19573	595503	764692	1380085	1351947	1400474
2021	6308	5471588	18865	596285	760140	1359537	1357974	1378787
2022	5991	5316431	18062	583226	745784	1335078	1296191	1338090

摘自農業部 111 年農業統計年報(2023)

表6不同地區估算法試算2020年臺灣豬隻腸道甲烷排放量及二氧化碳當量

	日甲烷產生量 (公克/天)	年甲烷產生量 (公噸/年)	CO ₂ 年當量 (千公噸/年)
Vermorel 等人（2008）估算法	13365.26	4878.32	121.96
Dämmgen 等人（2012）估算法	12563.32	4585.61	114.64
畜試所(2015) 估算法	16757.31	6116.42	152.91
IPCC(2006) 估算法	22600.32	8249.12	206.23

再者，若以農業部111年農業統計年報(2023)中 2020年豬飼料總供應量之商品飼料及自配飼料為基礎(詳如表7)，考慮配合飼料實際供給量配合不同之飼糧總能含量(GE)，飼糧可消化能含量(DE)及甲烷能量轉換率(MCR)等因子，並根據 Dämmgen等人（2012）、IPCC及前次計畫體外三階段消化法等不同估算方式的試算結果得知，以飼糧總能含量(GE)為估算基礎時會導致高估豬隻腸道甲烷產生量及二氧化碳轉換量的結果顯示，從各個方法試算出的甲烷年產生量及二氧化碳年當量還是以IPCC的值最高，因此以飼料量來估算豬隻腸道甲烷產生量還是以飼糧的可消化能(DE)及其甲烷轉換率(MCR)來估算各生理階段的飼糧在腸道所產生的甲烷較為精確(詳如表8)。

表 7 臺灣 2020 年豬隻配合飼料供給量

年分	2018	2019	2020	2021	2022
配合飼料總供應量(公噸)	7708828	8627092	8641672	8588267	8604263
豬飼料總供應量(公噸)	3204314	3735682	3828000	3752355	3622724
商品豬飼料(公噸)	1248473	1301546	1343281	1402588	1469002
自配豬飼料(公噸)	1955841	2434137	2484719	2349767	2153722

摘自農業部 111 年農業統計年報(2023)

表 8 以配合飼料年供給量估算豬隻腸道甲烷年產生量及二氧化碳年當量

Items	2020	2021	2022
總供應量(公噸/年)	8641672	8588267	8604263
豬飼料(公噸/年)	3828000	3752355	3622724
商品豬飼料(公噸/年)	1343281	1402588	1469002
自配豬飼料(公噸/年)	2484719	2349767	2153722
IPCC 試算結果			
豬飼料 GE(百萬焦耳) ^A	58912920	57748743.5	55753722.4
IPCC(MCR=0.006)(MJ)	353477.5	346492.5	334522.3
腸道甲烷產量(公噸/年)	6351.8	6226.3	6011.2
CO ₂ 年當量(千公噸/年)	254.1	249.1	240.4
Dämmgen 等人(2012)試算結果^B			
豬飼料 GE(百萬焦耳) ^A	58912920	57748743.5	55753722.4
(MCR=0.005)(MJ)	294564.6	288743.7	278768.6
腸道甲烷產量(公噸/年)	5293.2	5188.6	5009.3
CO ₂ 年當量(千公噸/年)	211.7	207.5	200.4
前次計畫體外三階段消化法(DE=0.76GE)試算結果			
豬飼料 DE(百萬焦耳) ^A	45068383.8	44177788.7	42651597.6
(MCR=0.006)(MJ)	270410.3	265066.7	255909.6
腸道甲烷產量(公噸/年)	4859.1	4763.1	4598.6
CO ₂ 年當量(千公噸/年)	194.4	190.5	183.9

^A：以飼料中總熱量檢驗方法指導書(文件編號: B-7.2-02-48a)，參考 1.衛生福利部食品藥理署臺灣地區食品營養成分資料庫之熱量計算方式，2. 衛生福利部 107 年 3 月 31 日衛授食字第 1071300530 號公告修訂包裝食品營養標示應遵行事項，熱量 (Kcal/100g): (4×粗蛋白質 (%)) + (9×粗脂肪 (%)) + (4×碳水化合物 (%))。

^B：德國 Dämmgen 等人(2012)所採用的 MCR 是經過該作者計算出飼糧淨能值再回算比對 IPCC 的數值(0.006)因此對應數值為 0.005。

綜合以上所述，顯見若以**2006 IPCC**建議值計算臺灣豬隻每日腸道產生的甲烷量及二氧化碳當量，無論以豬隻飼養頭數或飼料的使用量計算，都會有嚴重高估的狀況。然而豬隻生產是臺灣主要的畜牧經濟活動，在全球減碳生產的浪潮中將面臨嚴峻的挑戰自是無法避免。但臺灣目前仍採用**2006 IPCC** 指南的預設係數對臺灣豬隻腸胃發酵甲烷二氧化碳當量進行評估，並沒有建立符合國情的碳排當量計算模式，在**2006 IPCC** 指南預設係數可能**高估**臺灣豬隻腸胃發酵甲烷二氧化碳當量的情況下，國家溫室氣體清冊的估算結果對臺灣豬隻產業的影響恐難以想像。是以，當務之急應盡速建立符合臺灣本土生產環境及生產型態的豬隻碳排當量及碳足跡計算模組，讓豬隻生產的溫室氣體當量計算能確實反映臺灣豬隻生產活動的現況，避免錯誤計算扼殺臺灣豬隻產業的生存與發展空間。

二、工作實施要點

IPCC(2006)指南中豬隻腸胃發酵甲烷排放係數為每年每頭1.5公斤為計算標準，其標準係數不考慮飼料型態、生理階段、環境條件等差異，計算基礎以飼糧總能及0.6%總能甲烷轉換率來估算豬隻腸胃發酵甲烷產生量，結果並無法代表臺灣豬隻生產的實際狀況。除此之外，以簡易氣體室採集進出氣體，並以氣相層析儀測定進、出氣體中甲烷與二氧化碳濃度差異的評估方法較為繁瑣，且採樣期間無法精確的及時分離糞便及尿液。而體外仿生消化法則可克服上述的缺點。

體外仿生消化（*in vitro* bionics digestion）藉由模擬動物的消化道環境與條件的體外試驗評估技術，可連續進行取樣和即時監測，優點試驗成本低效率高、重複性好，且對於試驗動物需求大幅降低。體外消化模型的發展可提供動物飼糧的先期消化評估，並結合體內試驗以建立相關性，提供後續預測飼糧餵飼營養價值，但是目前各種模擬豬隻體外消化的操作條件差異很大。消化模型以模擬的消化構造區分，分為模擬單一器官的單部位（mono-compartmental）模型與連續消化道的多部位（multi-compartmental）模型。若以消化過程的主要操作方式，則可分為靜態（static）消化與動態（dynamic）模擬。以模擬消化階段來分，除了模擬胃部與小腸消化外，也可利用豬隻腸道內容物或糞便接種腸道微生物進行體外發酵，模擬大腸部位消化操作。

建立快速而有效的豬隻飼糧消化評估方式，在國內養豬產業計算腸道碳排當量及碳足跡係數上具有迫切的需求。因應畜牧產業減碳生產之國際趨勢及碳排當量數值精確性，國內豬隻腸胃發酵甲烷排放係數本土值必須整合國內養豬區域不同的飼糧組成和餵養方式所產生多樣化的甲烷排放因素和甲烷轉化率的區域變化，來估算全國平均值。

有鑒於此，本次計畫依據前次計劃所建立的三階段體外仿生消化法，作為估算國內豬隻腸胃發酵甲烷排放係數本土值及豬隻糞尿管理排放甲烷係數本土值之研究法，建立符合臺灣飼養環境的豬隻碳排當量本土係數值模式，釐清各界對臺灣養豬產業排放溫室氣體量之誤解，並提供養豬業者精確計算碳排當量及未來相關產品碳足跡計算之參考依據。

根據前次計劃執行結果，商用飼糧IVTTD測試結果顯示乾物質消化率介於72%到81%，DE/GE介於0.72到0.8，可能原因為不同地區所使用飼糧中的粗蛋白質比例及粗纖維含量不同，因此在消化酵素濃度及反應時間相同的狀況下產生差異。標準飼糧IVTTD測試結果乾物質消化

率介於81%到89%，DE/GE介於0.78到0.85，可能因為新鮮豬糞作為微生物酶的替代品，因此消化率均高於IVID檢測法；標準飼糧只使用玉米及大豆粕作為主要原料，纖維含量較商用飼糧低。據此，本次計畫在商業樣品實測時，將調節IVID反應時間及IVTTD新鮮豬糞濃度(作為微生物酶的替代品)，但此階段培養時間仍將維持在18小時。

此外，前次計劃採用三階段體外消化法驗證出標準生長豬飼糧及商用生長豬飼糧之DE/GE分別為0.81及0.72近似丹麥調查結果，但為期提高國內養豬產業豬隻腸胃發酵甲烷排放碳排當量估算本土值的精確性，本次計劃擴大採樣範圍及樣品數。

(一) 以三階段體外消化量測法驗證五大養豬縣市豬隻腸胃發酵甲烷排放係數

本計畫採用三階段體外消化法對國內五大養豬縣市豬隻飼養之碳排當量進行評估，所謂三階段體外消化法是指體外乾物質消化率和產氣量預測法(Boisen and Fernández, 1997; Bindelle et al., 2007)，實施步驟分三階段，第一及第二階段模仿豬隻胃部及小腸消化環境，第三階段模仿豬隻大腸發酵環境並同時接種餵飼相同測試物質供糞豬隻新鮮稀釋糞液來提供腸道微生物進行共消化。

以農業部112年11月底養豬頭數調查報告選別雲林縣(155.6萬頭)、屏東縣(109.8萬頭)、彰化縣(74.7萬頭)、臺南市(58.3萬頭)及嘉義縣、市(36.8萬頭)為主要採樣縣市，每個縣市均收集(1)母豬懷孕期飼糧及新鮮糞便；(2)母豬哺乳期飼糧及新鮮糞便；(3)仔豬保育期飼糧及新鮮糞便；(4)豬隻生長期飼糧及新鮮糞便；(5)豬隻肥育期飼糧及新鮮糞便等五種飼糧及新鮮糞便樣品進行三階段體外消化實測，及採購胃蛋白酶、胰蛋白酶、生物膜及緩衝容液等試藥進行體外消化測試，合計樣品數150件。

(二) 以三階段體外消化法驗證公司或自配料戶之豬隻腸胃發酵甲烷排放係數

本次試驗分析比較5個豬隻生理階段，試驗將選擇使用國內商用飼料公司產品或自配料戶為主，收集肉豬保育料、生長期料、肥育期料、母豬懷孕期料、母豬哺乳期料等5種飼料並以標準試驗單位化驗檢測樣品之糞能及總能含量各150件合計樣品數300件。從該該縣市中選擇可供新鮮糞便採集之養豬戶，並將分別收集肉豬保育期、生長期、肥育期、母豬懷孕期、母豬哺乳期等5個生理階段之新鮮糞便。

三、執行成果

(一) 完成有關112年建立之相關評估方法與Minekus等人(2014)及Lo等人(2022)試驗法比較並驗證其正確性及可行性。

(二) 完成PARR彈卡計之測試與實測。

(三) 完成NRC標準玉米豆粕型飼料樣品調製與重測比較。

(四) 完成體外三階段模仿豬隻胃部、小腸及大腸消化環境緩衝溶液、培養時間之修正並作為下階段商用飼料體外消化試驗參數修正。

(五) 驗證商用飼料戶之豬隻腸胃發酵甲烷排放係數

1. 不同縣市各期飼糧乾物質消化率的差異

表9、表10、表11、表12及表13分別列出不同縣市收集母豬懷孕期、哺乳期、保育期、生長期及肥育期飼糧樣品並以體外三階段分析法測得樣品乾物質消化率差異；試驗結果顯示，個階段均有明顯差異其中母豬懷孕期($p=0.001$)、哺乳期($p=0.029$)、保育期($p=0.043$)、生長期($p=0.001$)及肥育期($p=0.041$)；綜合各縣市樣品分析結果，彰化地區飼料樣品乾物質消化率最最差，雲林區最佳，其餘3縣市居中(表14， $p=0.001$)。

表 9 不同縣市母豬懷孕期飼糧乾物質消化率的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	78.82 ^a	77.55 ^a	78.72 ^a	81.04 ^a	71.79 ^b	4.537	0.001
標準差	2.242	4.600	3.580	2.840	3.316		
最小值	76.44	72.93	74.61	76.29	66.85		
最大值	81.56	85.4	81.1	85.69	75.41		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 10 不同縣市母豬哺乳期飼糧乾物質消化率的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	78.67 ^a	78.62 ^a	78.00 ^{ab}	80.51 ^a	75.64 ^b	2.957	0.029
標準差	1.715	4.038	1.221	2.865	0.708		
最小值	76.62	72.4	76.66	76.86	74.68		
最大值	80.72	84.06	79.06	84.19	76.59		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 11 不同縣市保育期飼糧乾物質消化率的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6		
平均值	77.46 ^b	81.10 ^a	79.39 ^{ab}	81.10 ^a	77.14 ^b	3.246	0.043
標準差	1.644	3.999	2.207	3.542	1.036		
最小值	76.01	76.37	77.22	76.7	76.08		
最大值	80.56	85.11	81.63	86.72	78.47		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 12 不同縣市生長期飼糧乾物質消化率的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6		
平均值	77.84 ^{bc}	79.13 ^{bc}	80.17 ^{ab}	83.08 ^a	76.31 ^c	3.557	0.001
標準差	1.698	3.331	1.638	3.430	0.702		
最小值	76.46	75.32	78.28	76.43	75.13		
最大值	80.98	83.11	81.17	87.4	76.96		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 13 不同縣市肥育期飼糧乾物質消化率的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	77.43 ^b	80.26 ^{ab}	79.76 ^{ab}	81.94 ^a	77.47 ^b	3.416	0.041
標準差	1.112	4.191	2.754	2.911	3.280		
最小值	76.15	73.02	76.63	77.27	73.02		
最大值	79.17	84.33	81.82	85.98	82.15		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 14 不同縣市豬隻完全飼糧乾物質消化率的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	30	30	15	45	30	150	
平均值	78.04 ^b	79.33 ^b	79.21 ^b	81.53 ^a	75.67 ^c	3.605	0.001
標準差	1.707	3.969	2.200	3.122	2.904		
最小值	76.01	72.4	74.61	76.29	66.85		
最大值	81.56	85.4	81.82	87.4	82.15		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

2. 不同縣市各期飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

表 15、表 16、表 17、表 18 及表 19 分別列出不同縣市收集母豬懷孕期、哺乳期、保育期、生長期及肥育期飼糧樣品並以彈卡計燃燒法測得樣品飼料總能值差異；試驗結果顯示，個階段均無明顯差異其中母豬懷孕期($p=0.910$)、哺乳期($p=0.210$)、保育期($p=0.588$)、生長期($p=0.664$)及肥育期($p=0.753$)；綜合各縣市樣品分析結果亦無明顯差異(表 20， $p=0.556$)。

表 15 不同縣市豬隻懷孕期飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	3239	3231	3251	3240	3294	78.7	0.910
標準差	84.2	38.7	44.4	160.7	56.1		
最小值	3188	3197	3207	3105	3246		
最大值	3336	3273	3296	3418	3356		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 16 不同縣市豬隻哺乳期飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	3388	3468	3405	3504	3376	79.1	0.210
標準差	45.3	52.3	27.3	123.6	69.1		
最小值	3336	3411	3378	3376	3297		
最大值	3415	3513	3433	3623	3420		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 17 不同縣市豬隻保育期飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	3453	3478	3443	3406	3386	71.9	0.588
標準差	30.9	31.2	57.4	117.5	94.6		
最小值	3432	3444	3378	3308	3281		
最大值	3489	3504	3486	3536	3463		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 18 不同縣市豬隻生長期飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	3383	3443	3383	3455	3391	72.8	0.664
標準差	38.1	54.6	18.8	148.5	54.8		
最小值	3353	3382	3365	3305	3330		
最大值	3426	3487	3403	3602	3438		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 19 不同縣市豬隻肥育期飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	3335	3380	3396	3417	3315	98.4	0.753
標準差	81.7	80.5	84.7	143.7	126.3		
最小值	3247	3292	3319	3285	3175		
最大值	3408	3449	3487	3570	3421		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 20 不同縣市豬隻完全飼料總能值 GE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	30	30	15	45	30	150	
平均值	3360	3400	3376	3404	3353	104.0	0.556
標準差	89.7	104.8	80.8	149.8	82.6		
最小值	3188	3197	3207	3105	3175		
最大值	3489	3513	3487	3623	3463		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

3. 不同縣市各期飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

表 21、表 22、表 23、表 24 及表 25 分別列出不同縣市收集母豬懷孕期、哺乳期、保育期、生長期及肥育期飼糧樣品並以彈卡計燃燒法測得樣品飼料糞能值差異；試驗結果顯示，個階段其中母豬懷孕期($p=0.594$)、保育期($p=0.087$)、及肥育期($p=0.065$) 無明顯差異，但是哺乳期($p=0.01$) 及生長期($p=0.044$) 有明顯差異；綜合各縣市樣品分析結果彰化及屏東地區飼料樣品糞能值較低(表 26， $p=0.001$)。

表 21 不同縣市豬隻懷孕期飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	p
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	2495	2536	2575	2546	2493	68.5	0.594
標準差	27.5	39.8	57.2	136.7	33.8		
最小值	2464	2506	2525	2417	2455		
最大值	2516	2581	2637	2690	2519		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 22 不同縣市豬隻哺乳期飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	p
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	2610 ^{bc}	2721 ^a	2697 ^{ab}	2753 ^a	2556 ^c	90.1	0.01
標準差	31.7	51.6	64.2	72.8	60.6		
最小值	2576	2667	2624	2675	2502		
最大值	2638	2769	2744	2820	2621		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 23 不同縣市豬隻保育期飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	p
N	6	6	3	9	6	30	
平均值 ^A	2661 ^{ab}	2729 ^a	2728 ^a	2677 ^a	2564 ^b	86.2	0.087
標準差	57.4	15.6	90.5	74.8	85.9		
最小值	2595	2715	2624	2603	2498		
最大值	2696	2746	2790	2753	2661		

^A：差異顯著性 $p < 0.1$

表 24 不同縣市豬隻生長期飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值	2607 ^{ab}	2701 ^a	2680 ^a	2714 ^a	2567 ^b	76.9	0.044
標準差	23.3	53.0	49.0	92.4	49.9		
最小值	2584	2644	2626	2619	2515		
最大值	2631	2749	2723	2803	2614		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

表 25 不同縣市豬隻肥育期飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	6	6	3	9	6	30	
平均值 ^A	2569 ^{ab}	2653 ^a	2676 ^a	2685 ^a	2509 ^b	94.8	0.065
標準差	59.7	73.0	86.9	88.4	60.6		
最小值	2509	2574	2578	2604	2452		
最大值	2628	2719	2744	2779	2572		

^A：差異顯著性 $p < 0.1$

表 26 不同縣市豬隻完全飼料糞能值 FE(Kcal/Kg)的差異

	屏東區	台南區	嘉義區	雲林區	彰化區	標準誤	<i>p</i>
N	30	30	15	45	30	150	
平均值	2588 ^b	2668 ^a	2671 ^a	2675 ^a	2538 ^b	97.4	0.001
標準差	67.7	85.0	80.5	108.4	60.2		
最小值	2464	2506	2525	2417	2452		
最大值	2696	2769	2790	2820	2661		

註：差異顯著性 $p < 0.05$

4. 不同階段飼糧腸道甲烷氣體產生量估算

以體外三階段消化法估算不同地區商用飼糧平均乾物質消化率、平均糞能值及平均每日攝取消化能，再參考各研究結果選用 MCR 估算值或動物代謝試驗就可估算出豬隻腸道甲烷產生量(結果如表 27)；IPCC 建議方法 1(MCR=0.6%GE 換算甲烷量 g/day)計算結果通常會發現哺乳期腸道甲烷產量被低估，其他懷孕期、保育期、生長期及肥育期都被高估。

表 27 不同階段飼糧甲烷氣體產生量估算的差異

	懷孕期	哺乳期	保育期	生長期	肥育期
平均乾物質消化率(%)	77.82	78.54	79.41	79.60	79.59
平均飼料總能值 GE(Kcal/Kg)	3251	3428	3433	3411	3369
平均糞能值(Kcal/Kg)	2529	2668	2672	2654	2618
平均每日攝食量(Kg/day) ^A	2.2	4.8	0.9	1.8	2.6
平均每日攝取消化能 DE(Kcal)	4331	10176	1959	3912	5582
修正 IPCC 法(MCR=0.6%DE 換算甲烷量 g/day)	2.60	6.11	1.18	2.35	3.35
德國(MCR=0.5%DE 換算甲烷量 g/day)	2.17	5.09	0.98	1.96	2.79
IPCC 法(MCR=0.6%GE 換算甲烷量 g/day)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1

^A：臺灣地區養豬飼養標準(1990)

四、成果效益

體外仿生消化（*in vitro* bionics digestion）藉由模擬動物的消化道環境與條件的體外試驗評估技術，可連續進行取樣和即時監測，優點試驗成本低效率高、重複性好，且對於試驗動物需求大幅降低。體外消化模型的發展可提供動物飼糧的先期消化評估，並結合體內試驗以建立相關性，提供後續預測飼糧餵飼營養價值。

消化模型以模擬的消化構造區分，分為模擬單一器官的單部位（**mono-compartmental**）模型與連續消化道的多部位（**multi-compartmental**）模型。若以消化過程的主要操作方式，則可分為靜態（**static**）消化與動態（**dynamic**）模擬。以模擬消化階段來分，除了模擬胃部與小腸消化外，也可利用豬隻腸道內容物或糞便接種腸道微生物進行體外發酵，模擬大腸部位消化。

建立快速而有效的豬隻飼糧消化評估方式，在國內養豬產業計算腸道碳排當量及碳足跡係數上具有迫切的需求。因應畜牧產業減碳生產之國際趨勢及碳排當量數值精確性，國內豬隻腸胃發酵甲烷排放係數本土值必須整合國內養豬區域不同的飼糧組成和餵養方式所產生多樣化的甲烷排放因素和甲烷轉化率的區域變化，來估算全國平均值。

五、結論

以體外三階段消化法估算不同地區商用飼糧平均乾物質消化率、平均糞能值及平均每日攝取消化能，再參考各研究結果選用MCR估算值或動物代謝試驗就可估算出豬隻腸道甲烷產生量(結果如表27)；IPCC建議方法1($MCR=0.6\%GE$ 換算甲烷量g/day)計算結果低估哺乳期腸道甲烷產量，其他懷孕期、保育期、生長期及肥育期都被高估。

六、檢討與改進

飼料營養濃度會隨著氣候變化而調節，以體外三階段消化法估算不同地區商用飼糧是建立快速而有效的豬隻飼糧消化評估方式之一，未來氣候條件改變情況下應增加採樣頻度及數量。

七、 主要參考文獻

李春芳、王嘉惠、吳啟瑞、范耕榛、洪鈴柱、程梅萍、蕭宗法，國內豬活體溫室氣體排放量調查，中國畜牧學會會誌，44(suppl.):259，2015。

我國國家溫室氣體排放清冊報告（2022年版），中華民國111年8月，行政院環境保護署
https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/tw_nir_2022.php

Bindelle, J., A. Buldgen, D. Lambotte, J. Wavreille, and P. Leterme. 2007. Effect of pig faecal donor and of pig diet composition on in vitro fermentation of sugar beet pulp. *Anim. Feed Sci. Technol.* 132:212–226. doi:10.1016/j.anifeedsci.2006.03.010

Boisen, S.; Fernández, J.A. Prediction of the total tract digestibility of energy in feedstuffs and pig diets by in vitro analyses. *Anim. Feed Sci. Technol.* 1997, 68, 277–286.

Dämmgen, U.; Schulz, J.; Kleine Klausing, H.; Hutchings, N. J.; Haenel, H.-D.; Rösemann C., 2012 Enteric methane emissions from German pigs. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research* 3 2012 (62)83-96

Galassi, G., Crovetto, G.M., Rapetti, L., Tamburini, A., 2004. Energy and nitrogen balance in heavy pigs fed different fibre sources. *Livest. Prod. Sci.* 85, 253–262.

Galassi, G., Crovetto, G.M., Rapetti, L., 2005. Trend of energy and nitrogen utilization of high fibre diets in pigs from 100 to 160 kg bodyweight. *Ital. J. Anim. Sci.* 4, 149–157.

INRA-AFZ, 2004. Tables De Composition Et De Valeur Nutritive Des Matières Premières Destinées Aux Animaux D'élevage. INRA Editions, Paris France.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

Jørgensen, H., 2007. Methane emission by growing pigs and adult sows as influenced by fermentation. *Livestock Sci.* 109, 216–219.

Jørgensen, H., Serena, A., Hedemann, M.S., Knudsen, K.E.B., 2007. The fermentative capacity of growing pigs and adult sows fed diets with contrasting type and level of dietary fibre. *Livestock Sci.* 109, 111–114.

Jørgensen, H., Zhao, X.Q., Eggum, B.O., 1996. The influence of dietary fibre and environmental temperature on the development of the gastrointestinal tract digestibility, degree of fermentation in the hind-gut and energy metabolism in pigs. *Br. J. Nutr.* 75, 365–378.

Le Goff, G., Dubois, S., Van Milgen, J., Noblet, J., 2002a. Influence of dietary fibre level on digestive and metabolic utilisation of energy in growing and finishing pigs. *Anim. Res.* 51, 245–260.

- Le Goff, G., Le Groumellec, L., van Milgen, J., Dubois, S., Noblet, J., 2002b. Digestibility and metabolic utilisation of dietary energy in adult sows: influence of addition and origin of dietary fibre. *Br. J. Nutr.* 87, 325–335.
- Noblet, J., Fortune, H., Shi, X., Dubois, S., 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 72, 344–354.
- Olesen, C.S., Jorgensen, H., 2001. Effect of dietary fibre on digestibility and energy metabolism in pregnant sows. *Acta Agric. Scand. Sect. A: Anim. Sci.* 51, 200–207.
- Ramonet, Y., van Milgen, J., Dourmad, J.Y., Dubois, S., Meunier-Salaun, M.C., Noblet, J., 2000. The effect of dietary fibre on energy utilisation and partitioning of heat production over pregnancy in sows. *Brit. J. Nutr.* 84, 85–94.
- Serena, A., Jorgensen, H., Bach Knudsen, K.E., 2008. Digestion of carbohydrates and utilization of energy in sows fed diets with contrasting levels and physico- chemical properties of dietary fiber. *J. Anim. Sci.* 86, 2208–2216.
- Vermorel, M., Jouany, J.P., Eugène, M., Sauvant, D., Noblet, J., Dourmad, J.Y., 2008. Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Prod. Anim.* 21, 403–418.