

飼糧中不同粗蛋白質含量對荷蘭泌乳牛碳排放量之影響⁽¹⁾

范耕榛⁽²⁾ 張俊達⁽²⁾ 賴京佑⁽²⁾ 李佳蓉⁽²⁾ 謝怡慧⁽³⁾ 洪兮雯⁽³⁾ 徐濟泰⁽⁴⁾ 程梅萍⁽⁵⁾⁽⁶⁾

收件日期：114 年 4 月 9 日；接受日期：114 年 9 月 19 日

摘 要

本研究旨在降低泌乳荷蘭牛飼糧中的粗蛋白質含量，並評估對其生產性能、氮排放與碳排放量的影響。使用 16 頭平均每日產乳量 30.63 kg 的泌乳牛，依乳量分成 4 組，分別餵飼粗蛋白質濃度 15、16、17 或 18% 之等能量值（泌乳淨能 1.69 Mcal/kg）及等精料、芻料與副產物比例（45：45：10）之飼糧，進行 4 × 4 拉丁方試驗，試驗為期 21 天，包括 14 天適應期與 7 天採樣期。牛隻以任飼任飲群飼，比較不同飼糧處理對乳量、乳成分、糞尿中氮排放量及溫室氣體估算排放量之差異。結果顯示，降低飼糧粗蛋白質濃度對泌乳牛之乾物質採食量與乳量並無負面影響，各組牛隻產乳量依飼糧蛋白質含量由低至高分別為 27.07、26.09、27.29 及 27.87 kg / 日，降低飼糧蛋白質會顯著減少乳中尿素氮濃度及糞便中氮之排放量 ($P < 0.05$)。以 IPCC 方法計算，在乳牛總碳排放量的數值上粗蛋白質 15% 組 (5,338 kg CO₂e / 頭 / 年) 較 17% (5,556 kg CO₂e / 頭 / 年) 或 18% 組 (5,515 kg CO₂e / 頭 / 年) 分別減少了 218 與 177 kg CO₂e / 頭 / 年，約減少 3.92 – 3.21%，但總碳排放量未達顯著差異，惟在糞尿處理過程中產生的甲烷 ($P = 0.0048$) 與氧化亞氮 ($P = 0.0272$) 排放量均顯著下降。荷蘭泌乳牛飼糧中粗蛋白質含量 15% 與較高粗蛋白質飼糧比較時，可維持產乳量並減少糞便及尿氮產生的浪費，同時溫室氣體排放量呈現降低趨勢，低蛋白質飼養技術是環境保護及產業永續的可行策略。

關鍵詞：泌乳牛、甲烷、碳排放量。

緒 言

全球人為溫室氣體排放農業生產方面約 10 – 12%，其中畜牧業約產生 50% 的甲烷 (CH₄) 和 60% 的氧化亞氮 (N₂O)。甲烷主要來自動物腸道發酵，而氧化亞氮則來自糞尿的氮循環 (Eckard *et al.*, 2010)。在人為碳排放量 12% 中，牛隻佔 62%，豬 14%、雞 9%、水牛 8%、山羊 4% 及綿羊 3%，畜牧業從肥料生產牧草到產品運輸之相關排放總計為 62 億噸二氧化碳當量，直接排放源為牛隻打嗝嘔氣反射將瘤胃中的甲烷氣排出及其排泄物發酵產生的氧化亞氮 (FAO, 2023)。我國國家溫室氣體排放清冊報告 (行政院環境保護署, 2022) 指出 2020 年農業部門溫室氣體排放約占臺灣溫室氣體排放 1.17%，其中畜禽腸胃發酵占 17.35%，畜禽腸胃發酵與畜禽糞尿處理約占農業部門排放量的 44.27%。依李等 (2000) 研究結果在臺灣以全株玉米、狼尾草、盤固草製成青貯料飼餵荷蘭泌乳牛，結果在泌乳牛胃腸道中甲烷產生量，以玉米青貯飼糧最低，是降低泌乳牛溫室氣體排放量較佳的選擇，在乾乳牛方面，以狼尾草青貯飼糧餵飼乾乳牛其甲烷日產量每頭 264 L，低於餵飼盤固草的 340 L 或玉米青貯飼糧之 350 L，平均降低幅度達 23%；在生長女牛則以狼尾草與全株玉米兩種飼糧優於盤固草，但狼尾草飼糧乾物質採食量偏低，以全株玉米青貯飼糧較佳。

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2841 號。

(2) 農業部畜產試驗所畜產經營組。

(3) 農業部畜產試驗所動物營養組。

(4) 國立臺灣大學動物科學技術學系。

(5) 農業部畜產試驗所副所長室。

(6) 通訊作者，E-mail: mpcheng@tlri.gov.tw。

飼糧組成影響乳牛的健康及泌乳量，未消化成分排泄後造成環境負荷。蛋白質是乳牛生長、維持生理功能及泌乳的所必需的基本營養素，其需求量與飼糧中蛋白質的含量、消化率與利用效率密切相關，處於懷孕、泌乳及生長階段的乳牛對蛋白質需求量較高，一般情形下為提高泌乳牛產乳量，許多酪農會餵飼高蛋白飼糧，然而，過量的蛋白質攝取不僅增加了飼養成本，還會導致多餘氮的排放，對環境造成壓力 (Kebreab *et al.*, 2001; Steinfeld *et al.*, 2006)。研究指出降低飼料中的總蛋白質含量，可選擇較高飼料效率的蛋白質原料來源，如油菜籽、豌豆或豆粕等，可以確保牛隻獲得必要的胺基酸，高效率蛋白質飼料原料不僅能提高飼料轉換率外，同時可有效減少氮排放 (Schmidt, 2017)。在降低飼糧蛋白質含量時，也需注意其他營養成分的平衡，特別是能量的供應，碳水化合物和脂肪等也需要一併考量，以確保牛隻有足夠的能量維持泌乳量及體態的需要量。

Eckard *et al.* (2010) 指出動物育種、飼料調整、瘤胃環境控制、糞尿管理、土壤管理等措施，可有效降低碳排放量，例如：以營養策略來提高牛乳產量和飼料利用效率，可以降低每單位生乳的甲烷排放量；提高飼料品質 (增加可發酵性碳水化合物，減少纖維) 可降低甲烷排放；添加脂肪 (如椰子油、亞麻籽油) 可降低甲烷產生 10% – 25%；使用縮合單寧 (condensed tannins, CT) 可抑制甲烷菌群，但過量可能影響消化；使用酵母培養物或特定酶制劑控制瘤胃發酵，刺激瘤胃中的產乙酸菌，消耗氫氣產生乙酸，間接可能減少甲烷生成。Agle *et al.* (2010) 及 Groof and Wu (2005) 研究指出，隨著氮採食的量增加時，糞便 (糞便和尿液) 中的氮含量亦會隨之增加，較多的排出導致氮利用率降低。降低商業乳牛場的飼糧蛋白質含量時，可使糞尿中氮及氨排放量減少，減少溫室氣體排放，而且不會影響乳牛的產奶量和成分，但低蛋白質飼料並未減少瘤胃甲烷的排放量 (Hristov *et al.*, 2015; Rendón-Huerta *et al.*, 2018)。為在 2030 年前減少 30% 的溫室氣體排放量 (與 2020 年相比)，從源頭減量改善氣候變遷的可能性，本研究以飼料配方技術調整泌乳牛之飼糧組成，固定精料、芻料與副產物比例 (乾基) 為 45:45:10，及固定瘤胃未降解蛋白質佔蛋白質比例 (35%) 之配方，比較餵飼粗蛋白質佔飼糧乾基 15、16、17 或 18，評估調降飼糧蛋白質對生產性能與效率之影響，同時測定氮之利用效率，比較不同蛋白質含量在臺灣環境飼養下，泌乳牛之活體胃腸道及糞尿溫室氣體排放量，並評估飼糧調整是否能降低氮的排放，進而減少碳排放量。

材料與方法

I. 試驗動物與飼糧處理

動物試驗經過畜試所實驗動物照護及使用小組審核通過 (編號 113-17)，並於畜試所畜產經營組乳牛舍進行。泌乳牛飼糧營養分依據美國 NRC (2021) 乳牛營養需要量每日 28 kg 泌乳量進行飼料配方設計配製完全混合日糧 (total mixed ration, TMR)，固定精料、芻料與副產物比例 (乾基) 為 45:45:10，設計等能量 (飼糧每 kg 乾物質提供泌乳淨能 1.69 Mcal) 固定瘤胃未降解蛋白質佔蛋白質比例 (35%) 之配方，比較餵飼粗蛋白質佔飼糧乾基 15、16、17 或 18% 之碳排差異比較，並以 17% 作為對照組。本次試驗於 113 年 3 月至 6 月進行，主要使用的蛋白質飼料原料為大豆粕、魚粉、苜蓿乾草及啤酒粕，降低蛋白質含量時主要為調降大豆粕的使用量，並降低少量的魚粉添加量，苜蓿乾草及啤酒粕用量僅略為調整，配方及營養組成分如表 1。

將 16 頭荷蘭牛 (平均乳量 30.63 ± 4.64 kg、平均泌乳天數 116.75 ± 36.00 天及平均胎次 1.50 ± 0.63 胎) 依照乳量逢機均分為 4 組，飼養於隧道式通風牛舍，每組 4 頭群飼，每欄均有足夠空間的飼槽及水槽，牛隻每日餵飼 1 次並於上午 7:30 – 8:30 左右進行，剩料於 7:00 收集，其餘餵飼牛群飼養管理依標準作業流程進行。每日分別於上午 4:30 與下午 3:30 擠乳，以 4 × 4 拉丁方試驗，每次試驗 21 日進行。試驗開始前後測量體重、乾物質採食量 (群飼，計算每頭平均值)、乳量及乳成分 (乳脂率、乳蛋白率、乳糖率、無脂固形物率、總固形物率及乳中尿素氮)，並以直腸收集糞便分析乾物質 (dry matter, DM)、粗蛋白質 (crude protein, CP)、中洗纖維 (neutral detergent fiber, NDF) 及酸洗纖維 (acid detergent fiber, ADF) 含量。於試驗第 14 至第 15 日暫停牛舍內之刮糞機運作，於牛舍內分別全量收集 4 組之糞便排泄量 2 日，尿液會隨著畜舍走道斜度排出，以人力使用土鏟收集全量之糞便秤重紀錄，採樣烘乾後計算乾物率，保存於 -20°C 環境中供後續分析一般成分，計算排泄物總乾物質量與飼糧消化率。尿液則使用刺激法於試驗第 14 至第 15 日上午 9:00 左右，進行個別牛隻採樣 2 日各 150 mL 並加入 5 mL 50% 之硫酸防止氮揮發，於試驗第 16 至第 17 日測定當日於 8:00 各組進入已清理乾淨之試驗欄並於水泥地上鋪設足量且已記錄重量之墊料，收集各組之全部糞尿秤重，以堆肥墊料吸附後之總重量扣除糞便量，推估尿液量，將 2 日收集之樣品混合後取樣保存於 -20°C 環境中，供後續分析尿氮與糞氮量。並依生產表現計算扣除飼料費後之粗收益，作為比較經濟效益評估依據。

II. 測定項目

- (i) 體重：於每次試驗開始與結束日，各連續 2 日上午 9：30 餵飼後過磅。
- (ii) 飼糧組成：於每次試驗第 14 日起，於試驗第 17、19 及 21 天採集 3 次飼料原料，先以 -20°C 保存，試驗結束後以 55°C 烘乾 48 小時，熱秤得乾物質率，將每項原料的 3 個乾燥後樣品均勻再採樣以混合成 1 個樣品，經 1 mm Wiley mill 磨細後依 AOAC (2000) 分析營養組成分。
- (iii) 採食量：每日記錄各組牛群的餵飼量及剩餘量。於試驗第 17 至 21 天最後 5 日連續採集 TMR 飼糧及隔日剩料，先行冷凍保存後再烘乾如飼糧原料之處理，並依飼糧乾物質供應量及剩料乾物質率，計算各組平均每頭的乾物質採食量。
- (iv) 泌乳性能：試驗開始前 2 日連續記錄個別牛乳量並採集個別乳樣送驗，作為基期性能數據。於試驗第 18 日至 21 日連續 4 日記錄個別牛的泌乳量，於試驗第 19 日至 21 日連續 3 日依個別牛上下午採集之乳樣，混合成單日乳樣，每個試驗期每頭牛有 3 個乳樣品，送本所北區分所牛乳檢驗室，以全自動多功能乳成分分析儀 (MilkScan™ FT⁺, Foss, Denmark) 分析一般乳成分，包括乳脂率、乳蛋白質率、乳糖率、乳總固形物率及乳中尿素氮等。

表 1. 不同蛋白質含量飼糧餵飼泌乳牛試驗之飼糧配方及組成分 (%，乾基)

Table 1. Diet formulations and compositions for feeding experiments with different protein content fed to lactating cows or goats (% of DM basis)

Ingredients	CP 15 (-2%)	CP 16 (-1%)	CP 17 (control)	CP 18 (+1%)
Corn silage	15.54	15.42	15.49	15.49
Bermudagrass grass	16.43	16.31	16.38	16.37
Alfalfa hay	14.19	14.09	14.15	14.15
Brewer grain, Wet	5.46	5.42	5.44	5.44
Wheat bran	4.79	4.76	4.78	4.78
Corn, ground	28.63	26.55	24.32	21.97
Soybean meal, 43% CP	4.70	7.24	8.68	10.30
Soybean oil	2.69	2.46	2.47	2.41
Fish meal, 60% CP	3.19	3.41	3.91	4.39
Salt	0.27	0.26	0.27	0.27
Limestone	1.18	1.17	1.18	1.34
Dicalcium phosphate	1.18	1.17	1.18	1.34
Sodium phosphate	1.45	1.44	1.45	1.45
Premix ¹	0.30	0.30	0.30	0.30
Composition ² , % of DM				
CP, %	15.0	16.1	17.1	17.9
UIP, % of CP	35.0	35.0	35.0	35.0
NDF, %	33.1	33.1	33.2	33.3
ADF, %	17.6	17.7	17.9	18.0
Ca, %	1.2	1.2	1.3	1.4
P, %	0.6	0.6	0.7	0.7
Nel ³ , Mcal/kg	1.69	1.69	1.69	1.69

¹ Each kilogram of premix contains: Vit. A, 10,000,000 IU; Vit. E, 70,000 IU; Vit. D₃, 1,600,000 IU; Fe, 50 g; Cu, 10 g; Zn, 40 g; I, 0.5 g; Se, 0.1 g; Co, 0.1 g.

² DM: dry matter; CP: crude protein; UIP: undegradable intake protein; NDF: neutral detergent fiber; ADF: acid detergent fiber; Ca: calcium; P: phosphate; Nel: net energy for lactation.

³ Nel value is calculated according to NRC (2021).

III. 溫室氣體排放量之計算方法

透過不同方法評估飼糧總能量，並應用 IPCC (2006) 方法，搭配收集之採食量、消化率和成分分析資料，以總能量攝取 (MJ / 頭 / 日) 計算腸胃道甲烷排放量；依照前述之總能量攝取、飼糧消化情況、成分分析資料和糞

尿處理系統比例，計算揮發性固體物 (volatile solids, VS，為牛糞尿中可在 550°C 下揮發的有機物質，主要包含未消化的纖維與飼料殘渣、尿中有機氮化合物、微生物生物量及可溶性有機物) 和糞尿處理過程產生之甲烷和氧化亞氮排放量，計算各自 4 組飼糧之總碳排放量 (二氧化碳當量 / 頭)，比較減碳效果。

(i) 腸胃道甲烷年排放量 (kg / 頭 / 年) = (總能量攝取 (MJ / 頭 / 日) × Ym ÷ 100 × 365) ÷ 55.65。

MJ：百萬焦耳 (megajoule, MJ)，1 焦耳定義為使用 1 牛頓力使物體沿力的方向移動 1 米所消耗的能量；
Ym = 6.5 (%)，總能量攝取以熱卡計分析之數值並導入前揭公式，進行腸胃道甲烷年排放量估算。

(ii) 糞尿甲烷年排放量 (kg / 頭 / 年) = 排放係數 (kg / 頭 / 年) × 動物數量。

1. 排放係數 EF = VS × 365 × [糞尿最大甲烷產生量 B₀ × 0.67 kg/m³ × Σ (糞尿處理系統甲烷轉換因子 MCF ÷ 100 × 糞尿處理系統 MS)]。

2. 揮發性固體物 VS = [總能 × (1 - 消化率 ÷ 100) + (尿能 % × 總能)] × [(1 - 灰分 %) ÷ 18.45]。

3. 糞尿最大甲烷產生量 B₀ = 查詢 IPCC (2006) 第 4 卷第 10 章表 10A-4。

4. 糞尿處理系統甲烷轉換因子 MCF = 查詢 IPCC (2006) 第 4 卷第 10 章表 10.17 和表 10A-4。採用 25°C 下之集約式堆肥處理 (composting-intensive windrow)、液體儲存 (liquid)、加蓋式厭氧槽 (anaerobic digester) 係數及好氧處理 (aerobic treatment)。

5. 糞尿處理系統比例 MS (%) = 依農業部畜產試驗所牛舍糞尿處理系統處理槽容積比例計算，以廢棄物清理計畫書設定固液分離後固形物堆肥化處理比例為 5%，再計算加蓋式厭氧槽處理比例為 62.71%、耗氧處理比例為 24.93%，並將其餘槽體皆視為液體儲存共 7.36%。

(iii) 糞尿氧化亞氮年排放量 (kg N₂O / 頭 / 年) = 年直接排放 (kg N₂O / 頭 / 年) + 年揮發間接排放 (kg N₂O / 頭 / 年) + 年逕流間接排放 (kg N₂O / 頭 / 年)，各項目之排放量計算 = 氮年排放量 (kg N / 頭 / 年) × 排放係數 EF (kg N₂O-N/kg N)，得到氧化亞氮年排放量 (kg N₂O-N / 頭 / 年)，再乘以 44/28 來換算成氧化亞氮年排放量 (kg N₂O / 頭 / 年)。各項目之細部計算列於以下方程式。

1. 氧化亞氮年直接排放量 = 氮年排放率 Nex (kg N / 頭 / 年) × 糞尿處理系統比例 MS (%) × 排放係數 EF₃ × 44/28。

(1) 年氮排放率 Nex = 日氮攝取量 (kg N / 頭 / 日) × (1 - 日氮蓄積比例 (%)) × 365。

(2) 日氮攝取量 = 總能量攝取 (MJ / 頭 / 日) ÷ 18.45 × (CP% ÷ 100 ÷ 6.25)。

(3) 日氮蓄積比例 = [乳量 (kg / 頭 / 日) × (乳蛋白 % ÷ 100) ÷ 6.38] + {體增重 (kg / 日) × [268 - (7.03 × 生長淨能 (MJ / 日) ÷ 體增重 (kg / 日)) ÷ (1,000 × 6.25)]}。

(4) 生長淨能 = 22.02 × (體重 (kg) × 轉換係數 C × 成熟體重 0.75 (kg)) × 日增重 1.097 (kg / 日)，其中母牛之轉換係數 C 為 0.8。

2. 氧化亞氮年揮發間接排 = 氮年揮發間接排放量 (kg N / 頭 / 年) × 排放係數 EF₄ × 44/28。

(1) 氮年揮發間接排放量 = 氮年排放率 Nex (kg N / 頭 / 年) × 糞尿處理系統比例 MS (%) × (糞尿管理系統中以 NH₃ 和 NO_x 揮發的比例 FracGasMS (%) ÷ 100)。

3. 氧化亞氮年逕流間接排 = 氮年逕流間接排放量 (kg N / 頭 / 年) × 排放係數 EF₅ × 44/28。

(1) 氮年逕流間接排放量 = 氮年排放率 Nex (kg N / 頭 / 年) × 糞尿處理系統比例 MS (%) × (糞尿管理系統中以 NH₃ 和 NO_x 逕流的比例 FracLeachMS (%) ÷ 100)。

IV. 統計分析

試驗所得數值資料採用 SAS 套裝軟體 (SAS, 2014) 進行分析，以飼料為處理，使用一般線性模式 (general linear model procedure, GLM) 進行變方分析，再以最小顯著性差異法 (Fisher's least significant difference test, LSD) 進行試驗資料處理間差異比較，本試驗以 P < 0.05 為顯著差異水準。

結 果

I. 降低飼糧粗蛋白質含量對採食量及生產性能的影響

餵飼不同飼糧蛋白質含量對泌乳牛採食量及乳成分之影響如表 2 及表 3，結果顯示，隨著飼糧中粗蛋白質增加，在乾物質採食量雖無顯著差異 (約 20.19 - 20.65 kg / 頭 / 天)，但採食的總粗蛋白質量則有顯著提升 (由 3.16 kg / 頭 / 天顯著增加至 3.63 kg / 頭 / 天) (P < 0.05)。21 日的試驗期間餵飼不同飼糧粗蛋白質含量對泌乳牛體重影響極小，各處理組間並無顯著差異，產乳量亦無顯著變化，但對乳成分有觀察到變化的趨勢，生乳中的乳

脂率 ($P = 0.0597$)、乳糖率 ($P = 0.0972$) 及無脂固形物率 ($P = 0.0609$) 皆會隨著飼糧粗蛋白質含量增加而呈上升趨勢。餵飼高粗蛋白質飼糧時，伴隨乳中尿素氮 (Milk urea nitrogen, MUN) 的顯著提升，從 12.67 mg/dL 升至 14.44 mg/dL ($P = 0.0129$)。經濟效益評估如表 5，由每 kg 飼糧乾物質的單價 (依 113 年 3 月分之各飼料原料購買價格，計算各組不同配方組合下各組之飼糧單價)，計算每天每頭乾物質採食量下每日的飼糧花費，並使用生乳價格評價表 (民國 111 年 06 月 08 日公告之乳品加工廠收購酪農原料生乳驗收及計價要點第二點附表) 查生乳品質對應的每 kg 乳價 (以夏季計算) 與平均乳量計算每日乳款收入，並計算扣除飼料費之後的粗收益，結果顯示降低飼糧粗蛋白質含量對於乳牛之經濟效益並不會受到影響。

II. 降低飼糧粗蛋白質含量對糞尿排泄與消化率的影響

飼糧蛋白質含量對泌乳牛糞便及尿液排放之影響如表 2，試驗結果顯示乳牛飼糧蛋白質含量增加會提高糞便的排出量及糞的總粗蛋白質的排出量，CP 15% 組 0.84 kg / 頭 / 天增至 CP 18% 組的 1.20 kg / 頭 / 天 ($P < 0.01$)。尿液的總排出的氮量亦隨著飼糧的增加而提高排出量，但處理組間並無顯著差異。糞便中的中洗纖維或酸洗纖維排出量處理組間並無顯著差異。在飼糧表面消化率方面，乾物質和粗蛋白質表面消化率隨著粗蛋白質含量提高而顯著下降 ($P < 0.01$)。乾物質消化率從 CP 15% 組的 72.62% 下降到 CP 18% 組的 64.28%，而粗蛋白質消化率則由 73.36% 下降到 66.90%。

III. 降低飼糧粗蛋白質含量對溫室氣體排放的影響

飼糧蛋白質含量對泌乳牛碳排放量之影響如表 4，在腸胃道及糞尿處理溫室氣體排放方面，使用熱卡計檢測之總能代入公式，並配合相關生產表現及糞尿含量處理等參數計算，再以 IPCC AR6 的 GWP 值進行總排放量換算。結果顯示，在乳牛總碳排放量的數值上 CP 15% 組 (5,338 kg CO₂e / 頭 / 年) 較 CP 17% (5,556 kg CO₂e / 頭 / 年) 或 CP 18% 組 (5,515 kg CO₂e / 頭 / 年) 分別減少了 218 (5,556 kg CO₂e / 頭 / 年 - 5,338 kg CO₂e / 頭 / 年) 與 177 kg CO₂e / 頭 / 年 (5,515 kg CO₂e / 頭 / 年 - 5,338 kg CO₂e / 頭 / 年)，約減少 3.92 - 3.21% (218 kg CO₂e / 5,556 kg CO₂e × 100% - 177 kg CO₂e / 5,515 kg CO₂e × 100%)，總碳排放量處理間差異未達統計顯著，然而在分項中，糞尿處理階段產生的甲烷與氧化亞氮排放量均呈顯著下降 (CH₄, $P = 0.0048$; N₂O, $P = 0.0272$)。換算每公斤生牛乳的碳排放量 CP 17% 組及 CP 15% 組由 0.56 kg CO₂e (5,556 kg CO₂e / 365 日 / 27.29 kg 泌乳量) 至 0.54 kg CO₂e (5,338 kg CO₂e / 365 日 / 27.07 kg 泌乳量)。

討 論

Barros *et al.* (2017) 泌乳牛研究顯示飼糧 CP 濃度從高量 162 g/kg DM (16.2%) 減少至中等量 144 g/kg DM (14.4%) 時，牛隻的乾物質採食量 (24.2 與 23.8 kg) 和泌乳量 (31.8 與 31.4 kg) 持續能夠維持在較高的水準，但降至 131 g/kg DM (13.1%) 及 118 g/kg DM (11.8%) 時，採食量及產乳量呈現線性下降；Hynes *et al.* (2016) 研究將飼糧 CP 由 181 g/kg DM (18.1%) 降至 141 g/kg DM (14.1%) 時，乳牛的乾物質採食量 (20.7 kg) 和產乳量 (25.8 kg) 並未顯著降低，表示荷蘭泌乳牛在 25 - 30 kg 的泌乳量下，餵飼中等 CP 含量飼糧即可獲得足夠的氮源來因應生產所需，並可維持良好的生產性能。由於瘤胃微生物在乳牛的蛋白質代謝中極為重要，降低飼糧 CP 含量時產乳量能維持穩定可能是乳牛在較低 CP 飼糧下，瘤胃內部的氮源會更依賴微生物蛋白的再利用，避免過量氮進入血液轉化為尿素，造成過量氮的流失，因而提高氮的利用效率 (Hynes *et al.*, 2016; Barros *et al.*, 2017)。Sinclair *et al.* (2014) 報告亦指出，降低泌乳牛飼糧中粗蛋白質濃度至 14% (乾基) 可增加氮捕捉 (N capture) 效率以及減少氮的排出。Law *et al.* (2009) 報告中亦顯示低 CP 飼糧有較佳的氮利用效率，氮利用率隨飼糧 CP 增加而下降，需根據泌乳階段調整 CP 在飼糧中的含量，供應過量的 CP 不僅無法顯著提升產乳量，反而會導致氮的流失，降低氮的利用效率 (Castillo *et al.* 2000)；Bach *et al.* (2005) 研究顯示瘤胃尿素再循環可提供微生物所需的氮，使得瘤胃環境及代謝趨於穩定，將體內的尿素回流至瘤胃補充氮源，可維持瘤胃內菌群的平衡，在將氮重新分配給瘤胃微生物的過程中，可減少體內直接將氮排出的總量，尤其是在飼糧瘤胃降解蛋白質不足的情況下，其不僅有助於瘤胃微生物利用有限的氮源外，還能避免飼糧蛋白質在瘤胃中過度分解產生氨的累積或增加血液中氨的含量，低蛋白質日糧 (CP < 14%) 中適當增加瘤胃未降解蛋白質比例可確保氮的有效利用，透過增加瘤胃未降解蛋白質的利用，減緩因微生物蛋白生成下降而造成的生產性能降低，藉由優化瘤胃降解蛋白質與瘤胃未降解蛋白質的比例，調整瘤胃降解蛋白質供應量，搭配可發酵的碳水化合物，可以提高瘤胃內氮的捕獲率及氮利用效率。本試驗中降低泌乳牛飼糧中的 CP 含量時並未影響牛隻的乾物質採食量及產乳量，且低 CP 組也有顯著較高的蛋白質的表面消化率，綜合上述內容顯示，合理減少飼料中的 CP 含量不會對乳牛的生產品能造成負面影響。

表 2. 不同蛋白質含量飼糧對泌乳牛採食量、糞便排出量、表面消化率及體重之影響

Table 2. Effect of different dietary proteins on feed intake, feces excrete, apparent digestibility, and body weight in dairy cow

Item	Treatment ²				SEM	P-value	
	CP 15	CP 16	CP 17	CP 18			
Intake							
DM ¹	(kg/head/d)	20.65 ± 0.473	20.27 ± 0.79	20.61 ± 0.99	20.19 ± 1.08	0.46	NS
CP	(kg/head/d)	3.16 ± 0.06 ^c	3.27 ± 0.13 ^{bc}	3.47 ± 0.15 ^{ab}	3.63 ± 0.17 ^a	0.08	0.0185
GE	(MJ/head/d)	361.78 ± 7.44	358.97 ± 13.84	365.53 ± 17.41	358.41 ± 19.01	8.71	NS
NDF	(kg/head/d)	6.40 ± 0.68	6.57 ± 0.80	6.74 ± 1.02	6.48 ± 1.03	0.79	NS
ADF	(kg/head/d)	3.68 ± 0.73	3.65 ± 0.82	3.77 ± 0.99	3.67 ± 0.95	0.88	NS
Feces							
DM	(kg/head/d)	5.63 ± 0.30 ^c	6.28 ± 0.24 ^b	6.78 ± 0.14 ^{ab}	7.16 ± 0.23 ^a	0.16	0.0025
CP	(kg/head/d)	0.84 ± 0.06 ^c	0.96 ± 0.06 ^{bc}	1.08 ± 0.04 ^{ab}	1.20 ± 0.07 ^a	0.04	0.0027
NDF	(kg/head/d)	2.59 ± 0.23	2.86 ± 0.20	2.85 ± 0.27	2.90 ± 0.23	0.20	NS
ADF	(kg/head/d)	1.58 ± 0.23	1.64 ± 0.18	1.75 ± 0.24	1.72 ± 0.21	0.22	NS
Urine							
Voided vol-ume	(kg/head/d)	27.55 ± 1.22	26.43 ± 3.03	25.85 ± 2.59	24.83 ± 3.01	1.34	NS
CP	(kg/head/d)	1.18 ± 0.11	1.19 ± 0.10	1.20 ± 0.12	1.35 ± 0.14	0.10	NS
Apparent digestibility							
DM	%	72.62 ± 2.06 ^a	68.93 ± 1.28 ^{ab}	66.89 ± 1.45 ^{bc}	64.28 ± 1.97 ^c	1.08	0.0081
CP	%	73.36 ± 2.50 ^a	70.20 ± 2.26 ^{ab}	68.71 ± 1.41 ^{ab}	66.90 ± 2.07 ^b	1.50	0.0990
NDF	%	59.54 ± 2.53	56.50 ± 2.37	57.74 ± 2.18	55.26 ± 2.29	1.86	NS
ADF	%	57.11 ± 2.48	55.08 ± 2.28	53.62 ± 2.04	53.24 ± 2.31	1.90	NS
Body weight							
IBW	(kg)	593.69 ± 17.26 ³	587.13 ± 15.34	595.31 ± 15.87	588.75 ± 17.35	5.59	NS
FBW	(kg)	588.13 ± 17.23	587.63 ± 15.24	589.06 ± 13.82	592.25 ± 16.94	6.69	NS

¹ Abbreviations: DM = Dry matter; CP = Crude protein; GE = Gross energy; NDF = Neutral detergent fiber; ADF = Acid detergent fiber; IBW = Initial body weight; FBW = Final body weight.

² Treatment: CP 15 = diet with 15% of crude protein; CP 16 = diet with 16% of crude protein; CP 17 = diet with 17% of crude protein; CP 18 = diet with 18% of crude protein.

³ Mean ± SE (n = 16) for intake, feces and apparent digestibility; Mean ± SE (n = 64) for body weight.

^{a, b, c} Means within each row followed by the same letter(s) are not significantly different at 5% level by Fisher's protected LSD test.

表 3. 不同蛋白質含量飼糧對泌乳牛生產性能之影響

Table 3. Effect of different dietary proteins on lactating performance in dairy cow

Item	Treatment ²			SEM	P-value
	CP 15	CP 16	CP 17		
Yield (kg/day)	27.07 ± 1.24 ³	26.09 ± 1.34	27.29 ± 1.23	27.87 ± 1.58	NS
Fat (%)	3.62 ± 0.04 ^B	3.65 ± 0.05 ^B	3.69 ± 0.04 ^{AB}	3.77 ± 0.03 ^A	0.0597
Protein (%)	3.25 ± 0.04	3.26 ± 0.06	3.31 ± 0.04	3.33 ± 0.02	NS
Lactose (%)	4.85 ± 0.03 ^B	4.89 ± 0.04 ^{AB}	4.91 ± 0.02 ^{AB}	4.95 ± 0.02 ^A	0.0972
SNF ¹ (%)	8.82 ± 0.04 ^B	8.82 ± 0.07 ^B	8.96 ± 0.03 ^A	8.94 ± 0.04 ^{AB}	0.0609
MUN (mg/dL)	12.67 ± 0.46 ^b	12.77 ± 0.51 ^b	13.75 ± 0.52 ^{ab}	14.44 ± 0.45 ^a	0.0129
FFA (mmol/100g fat)	0.82 ± 0.08	0.75 ± 0.08	0.94 ± 0.07	0.90 ± 0.10	NS

¹ Abbreviations: SNF = Solid-non-fat; MUN = Milk urea nitrogen; FFA = Free fatty acids.

² Treatment: CP 15 = diet with 15% of crude protein; CP 16 = diet with 16% of crude protein; CP 17 = diet with 17% of crude protein; CP 18 = diet with 18% of crude protein.

³ Mean ± SE (n = 64).

^{a, b} or ^{A, B} Means within each row followed by the same letter(s) are not significantly different at 5% or 10% level by Fisher's protected LSD test.

表 4. 不同蛋白質含量飼糧對泌乳牛溫室氣體排放量之影響

Table 4. Effect of different dietary proteins on GHG emissions in dairy cow

Item	Treatment ²			SEM	P-value
	CP 15	CP 16	CP 17		
IPCC tier 2 ¹					
CH ₄ from livestock (kg/head/yr)	154.22 ± 3.16 ³	153.03 ± 5.91	155.83 ± 7.43	152.81 ± 8.10	NS
CH ₄ from manure management (kg/head/yr)	19.86 ± 1.00 ^c	22.00 ± 0.84 ^b	23.59 ± 0.55 ^{ab}	24.53 ± 0.72 ^a	0.0048
N ₂ O from manure management (kg/head/yr)	1.75 ± 0.08 ^c	1.86 ± 0.07 ^{bc}	2.01 ± 0.09 ^{ab}	2.07 ± 0.09 ^a	0.0272
Total emissions (kg CO ₂ e/head/yr)	5,338.14 ± 92.39	5,392.72 ± 190.13	5,556.27 ± 239.00	5,514.74 ± 260.76	NS

¹ Data derived from gross energy. Gross energy was measured by the Bomb calorimeter.

² Treatment: CP 15 = diet with 15% of crude protein; CP 16 = diet with 16% of crude protein; CP 17 = diet with 17% of crude protein; CP 18 = diet with 18% of crude protein.

³ Mean ± SE (n = 16) for values estimated from IPCC tier 2.

^{a, b, c} Means within each row followed by the same letter(s) are not significantly different at 5% level by Fisher's protected LSD test.

表 5. 飼養不同蛋白質含量飼糧對泌乳牛影響之經濟效益評估

Table 5. Effect of different dietary protein levels on the economic benefits of lactating cows

	CP 15 (-2%)	CP 16 (-1%)	CP 17 (control)	CP 18 (+1%)
Dry matter price of feed, NT\$/kg	16.18	16.67	17.24	17.87
Daily feed cost per cow, NT\$	334	338	355	361
Milk price per kg, NT\$/kg	32.37	32.37	32.37	32.56
Daily milk revenue, NT\$	876	845	883	907
Gross income after feed cost, NT\$	542	507	528	547
Gross income increases or decrease compared to the control group, %	2.57	-3.89	—	3.41

氮排放是畜禽飼養業的一個重要環境問題，過量的氮不僅會影響水質，還可能導致大氣中的溫室氣體增加 (Aneja *et al.*, 2008)。高蛋白質飼糧會導致瘤胃中產生過量氨，當無法同步提供微生物可用的碳源或超過微生物的利用能力時，氨會被瘤胃吸收進入血液並送往肝臟，轉化為尿素後再經由腎臟隨尿液排出體外。根據 Yan *et al.* (2007) 的研究顯示，隨著日糧中 CP 含量的增加，尿液中的氮排放量顯著上升，降低飼糧中的 CP 濃度可以減少氨的產生，進而降低尿液中的氮含量。Schils *et al.* (2013) 指出，降低飼糧中的 CP 濃度可以減少尿液中氮排放，能降低土壤中硝酸鹽的積累，有助於控制水污染風險，糞便中的氮以有機形式存在，不會像尿液氮進入土壤後很快轉化為氨，容易揮發或進一步轉化為硝酸鹽，糞便中的氮相對於尿液中的氮更穩定，因為糞便中的有機氮需要經過微生物的分解才能釋放。在蛋白質品質對氮排出的影響方面，優化反芻動物對氮的利用效率，可能有效減少尿液中氮的流失，進而降低糞便中氨氣與氧化亞氮的排放 (Montes *et al.*, 2013)，透過降低飼糧中瘤胃可降解蛋白質的含量，並提高瘤胃未降解蛋白質的比例，可提升整體氮利用效率，並確保足夠的代謝蛋白質輸送至小腸供動物使用 (Calsamiglia *et al.*, 2010)。然而在 de Melo Coelho *et al.* (2022) 的研究中，添加瘤胃未降解蛋白質並未減少尿液中氮的流失，且導致氧化亞氮排放增加，對甲烷和氨的排放則無顯著影響，推測可能有 3 個原因，(一) 瘤胃未降解蛋白質飼糧中的可降解蛋白質含量仍足以滿足瘤胃微生物對氮的需求，導致未能形成顯著的尿素再循環以減少尿氮排出；(二) 當胺基酸進入小腸超出動物需求時，過量部分會被氧化產生尿素，增加尿氮的生成；(三) 高瘤胃未降解蛋白質飼糧可能導致尿液中含有較多的尿素，增加氧化亞氮排放。因此降低飼糧蛋白質含量可能比改善品質更有減碳效果。Castillo *et al.* (2000) 的文獻回顧中亦指出，乳牛對氮的利用效率低，約 72% 的採食的氮會透過糞便與尿液排出，當氮攝取量超過 400 g/d，氮排放主要以尿液形式增加，糞便和牛奶中氮排放量的增長幅度則呈線性下降，建議將日糧 CP 含量從 200 g/kg DM 降至 150 g/kg DM，可減少 21% 的糞氮排放與 66% 的尿氮排放。在本試驗中乳牛的糞便的氮排出量亦隨著飼料 CP 的減少而減少，尿液也有相同的現象，由 180 g/kg DM 降至 150 g/kg DM 時分別減少 30% 的糞氮及 12.6% 的尿氮排放 (表 2)，本試驗尿氮降低效果低於文獻可能是糞尿量的收集方式所造成的差異，但整體的結果與文獻是一致的。

Hristov *et al.* (2022) 研究指出飼料添加物可透過改變瘤胃發酵環境與微生物組成，影響氫 (H₂) 的利用途徑。當氫由甲烷生成途徑轉向被替代電子受體 (如硝酸鹽) 所利用時，可有效降低甲烷排放。此外，部分甲烷抑制劑添加物會改變瘤胃短鏈脂肪酸組成，增加丁酸比例，進而促進瘤胃氨的吸收與轉化，使乳中尿素氮濃度上升，改變氮的利用與分配。Niu *et al.* (2016) 研究則發現改變飼糧中 CP 含量對甲烷排放無顯著影響，但採食過量的 CP 除增加未被利用的氮隨糞尿排出，進一步形成氧化亞氮，增加溫室氣體排放量外，糞尿處理時有機物的分解也會增加碳排放量，故適當降低飼料中的 CP 能有效降低乳牛的碳排放量 (Gerber *et al.*, 2013)。在本試驗中雖然「總碳排放量」在處理組間差異未達顯著 (P > 0.05) (表 4)，但由各項溫室氣體來源顯示糞尿處理過程中甲烷與氧化亞氮排放量隨日糧蛋白質降低而顯著下降 (分別為 P = 0.0048 與 P = 0.0272)。然而，胃腸道甲烷排放仍是主要的排放來源，飼糧處理並未顯著降低其排放量，因而換算成 CO₂ 當量加總後，處理間之差異未達顯著。泌乳牛糞便及尿液中的氮與有機物 (未消化的物質) 排出，間接降低後續糞尿管理 (廢棄物處理時的堆肥化與廢水厭氣發酵) 產生的溫室氣體排放，即使胃腸道甲烷排放未顯著下降，整體仍具有減碳潛力，此結果與文獻 (Yan *et al.*, 2007; Gerber *et al.*, 2013; Schils *et al.*, 2013) 相符。碳排放量是畜牧業永續經營的關鍵因素，雖然至目前尚無充分證據支持降低飼糧 CP 即能直接顯著減少反芻動物胃腸道發酵產生的甲烷量，改變甲烷生成量關鍵仍是與瘤胃中碳水化合物的發酵有關，在供應乳牛能量的主要方式為飼糧碳水化合物 (澱粉和 NDF) 於瘤胃中發酵 (Abbas *et al.*, 2020) 及少量的脂肪 (Aschenbach *et al.*, 2010)，其中，纖維可以增加纖維分解菌的數量，從而提高 NDF 的利用率，並提高利用氫氣的產甲烷菌 (Flint, 2004; Abbas, *et al.*, 2020)，因此與氮代謝密切相關的碳水化合物和脂肪被認為是影響甲烷排放的主要因素 (Hristov

et al., 2013; Zhang *et al.*, 2024)。相較之下，澱粉可以促進瘤胃中的丙酸發酵，增加澱粉分解菌和乳酸利用菌的數量，它們會與產甲烷菌競爭氫氣以抑制甲烷排放 (Mohammed *et al.*, 2010)。富含纖維的飼糧則會促進乙酸發酵，產生更多的氫氣供產甲烷菌利用 (Moss *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2018)，因此，增加非纖維碳水化合物飼料調整方向可能是更有效的甲烷減排策略，然而，高量的非纖維碳水化合物可能會增加飼料成本和瘤胃酸中毒的風險 (Benchaar *et al.*, 2001)。反芻動物胃腸道產生的甲烷總量與糞便排放的甲烷量相比時，糞便產生的甲烷量很小 (Benchaar and Hassanat, 2019)，而降低 CP 日糧的碳排放策略主要作用反應在減少氮的排放及其後續廢棄物處理發酵過程所產生的碳排放量 (Gerber *et al.*, 2013)，同時在降低 CP 的同時，若不增量牧草纖維時，非纖維碳水化合物的含量即會增加，因此降低飼糧蛋白質對於降低碳排放量仍是有效的作法。由於試驗期間為乳牛泌乳後約 90 天內之中早期階段，此階段為乳牛營養需求與產乳量均相對穩定之期間，亦為整體泌乳期產量相對較高的階段，具有一定之代表性作為年碳排放量估算基礎，雖試驗仍存在時間範圍之侷限，不同泌乳階段的蛋白質需求與氮排放會有所差異，可能影響碳排放推算低估或高估實際總排放，但本試驗主要目的在開發飼糧調整減碳技術供產業參考應用，在國家溫室氣體排放清單報告中使用的活體溫室氣體排放量則同時間有其他研究使用呼吸室進行實際量測，後續可再進行數值上的比對分析。

在飼養成本方面，日糧中的蛋白質成分通常是飼料成本的主要組成部分，適度減少蛋白質含量可以明顯的降低每公斤飼料成本，同時在前述討論已了解降低飼糧 CP 可以減少氮的損失及浪費，因此可能降低乳牛的飼養成本，這對生產者來說具有直接的經濟效益可行措施。本試驗經濟效益評估中也顯示飼糧粗蛋白質含量降低時每日的飼料花費亦隨之減少，但由於乳量有數值上的不同，因此整體換算完後之扣除飼料費後的粗收益與對照組的差異相近，因此經濟效益上也是可行的做法。隨著全球對畜牧業的溫室氣體排放、氮氣排放及氮循環污染問題的關注，相關環境保護法規和政策將越來越嚴格，在減少飼糧中的蛋白質含量而不影響產能下，促進降低氮和碳的排放，為符合環保政策可行的方法之一，有助於促進畜牧業的永續經營與競爭力。

結 論

降低泌乳牛飼糧中的粗蛋白質含量，具有減少糞尿中氮排放和碳排放的潛力，同時維持生產性能及乳款收入，在乳牛碳排放量的數值上 CP 15% 組 (5,338 kg CO₂e / 頭 / 年) 較 CP 17% 或 CP 18% 組分別減少了 218 與 177 kg CO₂e / 頭 / 年，約減少 3.92 – 3.21%，雖然總碳排放量未達統計顯著差異，但在糞尿管理產生的甲烷與氧化亞氮排放量均呈顯著下降 (P < 0.05)，顯示低蛋白質飼糧的減碳作用主要來自於降低泌乳牛糞尿中的氮排放及其後續糞尿處理間接系統生成的溫室氣體。

參考文獻

- 行政院環境保護署。2022。中華民國國家溫室氣體排放清單報告。111 年 8 月，行政院環境保護署。
- 李春芳、蕭宗法、陳吉斌、劉秀洲。2000。溫室氣體產量測定及減量對策 - 反芻動物甲烷排放及減量對策 (II)：省產牧草對荷蘭牛泌乳性能與溫室氣體產量的影響。八十八年度國科會 / 環保署科技合作研究計畫報。
- Abbas, W., J. T. Howard, H. A. Paz, K. E. Hales, J. E. Wells, L. A. Kuehn, G. E. Erickson, M. L. Spangler. 2020. Influence of host genetics in shaping the rumen bacterial community in beef cattle. *Sci. Rep.* 10: 15101.
- Agle, M., A. N. Hristov, S. Zaman, C. Schneider, P. Ndegwa, and V. K. Vaddella. 2010. The effects of ruminally degraded protein on rumen fermentation and ammonia losses from manure in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93: 1625-1637.
- Aneja, V. P., J. Blunden, K. James, W. H. Schlesinger, R. Knighton, W. Gilliam, G. Jennings, D. Niyogi, and S. Cole. 2008. Ammonia assessment from agriculture: US status and needs. *J. Environ. Qual.* 37: 515-520.
- Aschenbach, J. R., N. B. Kristensen, S. S. Donkin, H. M. Hammon, and G. B. Penner. 2010. Gluconeogenesis in dairy cows: the secret of making sweet milk from sour dough. *IUBMB Life* 62: 869e77.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 2000. Official Methods of Analysis. 17th ed. AOAC, Arlington, VA.
- Bach, A., S. Calsamiglia, and M. D. Stern. 2005. Nitrogen metabolism in the rumen. *J. Dairy sci.* 88: E9-E21.
- Barros, T., M. A. Quaassdorff, M. J. Aguerre, J. O. Colmenero, S. J. Bertics, P. M. Crump, and M. A. Wattiaux. 2017. Effects of dietary crude protein concentration on late-lactation dairy cow performance and indicators of nitrogen utilization. *J. Dairy Sci.* 100: 5434-5448.

- Benchaar, C., C. Pomar, and J. Chiquette. 2001. Evaluation of dietary strategies to reduce methane production in ruminants: a modelling approach. *Can. J. Anim. Sci.* 81(4): 563-574.
- Benchaar, C. and F. Hassanat. 2019. Methane emissions of stored manure from dairy cows fed conventional or brown midrib corn silage. *J. Dairy Sci.* 102: 10632-10638.
- Calsamiglia, S., A. Ferret, C. K. Reynolds, N. B. Kristensen, and A. M. Van Vuuren. 2010. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. *Animal* 4: 1184-1196.
- Castillo, A. R., E. Kebreab, D. E. Beever, and J. France. 2000. A review of efficiency of nitrogen utilisation in lactating dairy cows and its relationship with environmental pollution. *J. Anim. Feed Sci.* 9: 1-32.
- de Melo Coelho, L., L. de Figueiredo Brito, J. D. Messana, A. da Silva Cardoso, G. M. Carvalho, R. de Nazaré Santos Torres, and T. T. Berchielli. 2022. Effects of rumen undegradable protein sources on nitrous oxide, methane and ammonia emission from the manure of feedlot-finished cattle. *Scientific Reports* 12: 9166.
- Eckard, R. J., C. Grainger, and C. A. M. de Klein. 2010. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livest. Sci.* 130: 47-56.
- Flint, H. J. 2004. Polysaccharide breakdown by anaerobic microorganisms inhabiting the mammalian gut. *Adv. Appl. Microbiol.* 56: 89-120.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2023. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems.
- Gerber, P. J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Falcucci, and G. Tempio. 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization (FAO). Rome, Italy.
- Groff, E. B. and Z. Wu. 2005. Milk production and nitrogen excretion of dairy cows fed different amounts of protein and varying proportions of alfalfa and corn silage. *J. Dairy Sci.* 88: 3619-3632.
- Hristov, A. N., A. Melgar, D. Wasson, and C. Arndt. 2022. Symposium review: Effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 105: 8543-8557.
- Hristov, A. N., J. Oh, C. Lee, R. Meinen, F. Montes, and T. Ott. 2013. Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production - A review of technical options for nonCO₂ emissions. FAO Animal Production and Health Paper No. 177. Rome, Italy.
- Hristov, A. N., K. Heyler, E. Schurman, K. Griswold, P. Topper, M. Hile, V. Ishler, E. Wheeler, and S. Dinh. 2015. Case study: Reducing dietary protein decreased the ammonia-emitting potential of manure from commercial dairy farms. *The Professional Animal Scientist* 31: 68-79.
- Hynes, D. N., S. Stergiadis, A. Gordon, and T. Yan. 2016. Effects of crude protein level in concentrate supplements on animal performance and nitrogen utilization of lactating dairy cows fed fresh-cut perennial grass. *J. Dairy Sci.* 99: 8111-8120.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories.
- Kebreab, E., J. France, D. E. Beever, and A. R. Castillo. 2001. Nitrogen pollution by dairy cows and its mitigation by dietary manipulation. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 60: 275-285.
- Law, R. A., F. J. Young, D. C. Patterson, D. J. Kilpatrick, A. R. G. Wylie, and C. S. Mayne. 2009. Effect of dietary protein content on animal production and blood metabolites of dairy cows during lactation. *J. Dairy Sci.* 92: 1001-1012.
- Li, Z., N. Liu, Y. Cao, C. Jin, F. Li, C. Cai, and J. Yao. 2018. Effects of fumaric acid supplementation on methane production and rumen fermentation in goats fed diets varying in forage and concentrate particle size. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 9: 21.
- Mohammed, R., J. J. Kennelly, J. K. G. Kramer, K. A. Beauchemin, C. S. Stanton, and J. J. Murphy. 2010. Effect of grain type and processing method on rumen fermentation and milk rumenic acid production. *Animal* 4: 1425-1444.
- Montes, F., R. Meinen, C. Dell, A. Rotz, A. N. Hristov, J. Oh, G. Waghorn, P. J. Gerber, B. Henderson, H. P. S. Makkar, and J. Dijkstra. 2013. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options. *J. Anim. Sci.* 91: 5070-5094.
- Moss, A., J. P. Jouany, and J. Newbold. 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Ann Zootech (Paris)* 49: 231-253.
- National Research Council (NRC). 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th ed. The National Academies Press. Washington, USA.

- National Research Council (NRC). 2021. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*, 8th ed. National Academy Press. Washington, D. C.
- Niu, M., J. A. D. R. N. Appuhamy, A. B. Leytem, R. S. Dungan, and E. Kebreab. 2016. Effect of dietary crude protein and forage contents on enteric methane emissions and nitrogen excretion from dairy cows simultaneously. *Anim. Prod. Sci.* 56: 312-321.
- Rendón-Huerta, J. A., J. M. Pinos-Rodríguez, and E. Kebreab. 2018. Animal nutrition strategies to reduce greenhouse gas emissions in dairy cattle. *Acta Universitaria* 28(5): 34-41.
- Schils, R. L. M., J. Eriksen, S. F. Ledgard, T. V. Vellinga, P. J. Kuikman, J. Luo, S. O. Petersen, and G. L. Velthof. 2013. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from herbivore production systems. *Animal* 7: 29-40.
- Schmidt, A. 2017. Modelling economic incentives to reduce nitrogen surpluses of Swiss agriculture in the agent-based model SWISSland. PhD Diss. ETH, Zurich.
- Sinclair, K. D., P. C. Garnsworthy, G. E. Mann, and L. A. Sinclair. 2014. Reducing dietary protein in dairy cow diets: Implications for nitrogen utilization, milk production, welfare and fertility. *Animal* 8: 262-274.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute. 2014. *SAS/STAT User's Guide*. SAS Institute, Cary, NC.
- Steinfeld H., P. Gerber, T. D. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales, and C. de Haan. 2006. *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Yan, T., J. P. Frost, T. W. J. Keady, R. E. Agnew, and C. S. Mayne. 2007. Prediction of nitrogen excretion in feces and urine of beef cattle offered diets containing grass silage. *J. Anim. Sci.* 85: 1982-1989.
- Zhang, C., X. Jiang, S. Wu, J. Zhang, Y. Wang, Z. Li, and J. Yao. 2024. Dietary fat and carbohydrate-balancing the lactation performance and methane emissions in the dairy cow industry: A meta-analysis. *Anim. Nutr.* 17: 347-357.

The effect of different crude protein levels in feed on greenhouse gas emissions in Holstein Lactating Cows ⁽¹⁾

Geng-Jen Fan ⁽²⁾ Chun-Ta Chang ⁽²⁾ Jing-You Lai ⁽²⁾ Jia-Rong Lee ⁽²⁾ Hu-Wen Hung ⁽³⁾ Yi-Hui Hsieh ⁽³⁾ Jih-Tay Hsu ⁽⁴⁾ and Mei-Ping Cheng ⁽⁵⁾⁽⁶⁾

Received: Apr. 9, 2025; Accepted: Sep. 19, 2025

Abstract

This study evaluated the effects of reducing dietary crude protein (CP) concentration in lactating Holstein cows on production performance, nitrogen (N) excretion, and greenhouse gas (GHG) emissions. Sixteen cows with an average daily milk yield of 30.63 kg were assigned to four groups based on milk yield and fed diets containing 15%, 16%, 17%, or 18% CP. All diets were formulated to be isoenergetic (NEI = 1.69 Mcal/kg) with fixed proportions of concentrate, forage, and by-products (45:45:10). A 4 × 4 Latin square design was used, with each period lasting 21 days (14 days of adaptation and 7 days of data collection). Cows were group-housed and had ad libitum access to feed and water to compare the effects of different diets on milk yield, milk composition, nitrogen excretion, and GHG emissions. The results showed that reducing dietary CP concentration had no negative effects on dry matter intake or milk yield ($P > 0.05$). Milk yield for the 15%, 16%, 17%, and 18% CP groups was 27.07, 26.09, 27.29, and 27.87 kg/day, respectively. Lower CP diets significantly reduced milk urea nitrogen concentration and fecal N excretion ($P < 0.05$). Based on the methodology of the Intergovernmental Panel on Climate Change, total carbon emissions in the 15% CP group (5,338 kg CO₂e/head/year) were lower than those in the 17% (5,556 kg CO₂e/head/year) and 18% (5,515 kg CO₂e/head/year) groups, representing reductions of 218 and 177 kg CO₂e/head/year (approximately 3.92%–3.21%), although the differences were not statistically significant. However, methane ($P = 0.0048$) and nitrous oxide ($P = 0.0272$) emissions from manure management were significantly reduced. In conclusion, feeding lactating Holstein cows a diet containing 15% CP maintained milk yield while minimizing nitrogen losses in feces and urine and reducing GHG emissions. Therefore, low-protein feeding strategies represent a practical approach for environmental protection and sustainable dairy production.

Key words: Dairy cows, Methane, Carbon emissions.

(1) Contribution No. 2841 from Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Ministry of Agriculture (MOA).

(2) Livestock Management Division, MOA-TLRI, HsinHua, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(3) Animal Nutrition Division, MOA-TLRI, HsinHua, Tainan, 71246, Taiwan, R. O. C.

(4) Department of Animal Science and Technology, National Taiwan University, No. 50, Lane 155, Sec. 3, Keelung Road, Taipei 106, Taiwan, R. O. C.

(5) Deputy Director General Office, MOA-TLRI, HsinHua, Tainan 71246, Taiwan, R. O. C.

(6) Corresponding author, E-mail: mpcheng@tlri.gov.tw.