

牧場如何得知乳牛的甲烷排放量

撰文 | 畜產試驗所 賴京佑、范耕榛、陳文賢

前言

在全球氣候變遷的背景下，畜牧業的溫室氣體排放日益受到關注，其中與乳牛產業最為相關的，就是常見於牛隻嗶氣中所含的甲烷（ CH_4 ）。根據聯合國氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第六次評估報告（the Sixth Assessment Report, AR6），甲烷100年的全球暖化潛勢是二氧化碳的27.9倍，對全球暖化的影響更為劇烈。相較於對環境的危害，甲烷對乳牛來說更是代表了消化過程中的能量損失，這

些能量若能有效轉化為牛奶，將有助於提升牧場的生產效益。因此，準確評估乳牛的甲烷排放量，對於提升生產效益、推動永續乳業以及友善環境具有關鍵意義。

乳牛甲烷排放量直接測量方法 (direct measurements)

現今甲烷的測量已經從實驗室逐步走進牧場，雖然能夠快速準確的在牧場中實測甲烷排放量的方法仍在持續發展，但已有不少技術能依照使用場景來做選擇。

呼吸室法 (respiration chamber)

此方法被視為測量個別牛隻甲烷排放的黃金標準，透過留有進出氣孔的封閉室，計算牛隻口鼻部及肛門所排出的總甲烷量，依通氣種類又可分為連續式和批次式。然而，其建設成本及技術門檻較高，每次能測量的牛隻數量少，較難作為商用牧場的測量





左圖：呼吸室法的 AI 生成示意圖（Gemini, 2026）。右圖：六氟化硫技術的 AI 生成示意圖（Gemini, 2026）。

選項。此外，牛隻在密閉環境下的行為和採食量可能受到影響、使用的空氣流量和換氣率、每天因為擠奶或清潔所產生的時間空缺等等，皆需要被充分考慮才能盡量減小測量誤差（Garnsworthy et al., 2019; Hristov et al., 2018）。

六氟化硫技術（sulfur hexafluoride）

是一種被廣泛使用的腸胃道甲烷測量技術，透過將能夠穩定釋放 SF_6 的滲透管置於瘤胃內，並讓牛隻配戴具有採樣管和真空採樣瓶的項圈，利用毛細管或篩板穩定採樣瓶收集氣體的速率，牛隻口鼻部排出的氣體經由採樣管流入採樣瓶中，分析一段時間瓶內 SF_6 和的 CH_4 比例以得知牛隻的腸胃道甲烷排放量，可用於圈養或放牧的系統（Bekele et al., 2022）。然而， SF_6 本身也是一種溫室氣體，且 SF_6 釋放速率、背景氣體濃度或動物採樣位置等皆影響其準確性，同時需要頻繁更新採樣瓶，又無法測量來自後腸的甲烷排放都是選擇此方法需要

考量的（Tedeschi et al., 2022）。

面罩法（face mask method）

面罩設備包含氣體流量計、採樣單元及甲烷分析儀，測量的原理與呼吸室法類似，透過訓練牛隻保持胸骨臥姿，每2 - 3小時進行1次30分鐘的測量，每天最多測量7次。此方法比呼吸室或 SF_6 技術便宜且簡單，同時具有更高的可移動性。然而，除了測量次數對動物行為可能造成影響外，操作流程也被認為過於費力，因此被使用的頻率已逐漸減少（Bekele et al., 2022）。

GreenFeed系統

是一種自動化的頭罩式商業設備，透過提供飼料吸引牛隻進入頭罩（測量站），系統自動測量牛隻呼出的甲烷，利用1天內多次短時間的測量來估計日均甲烷排放量，每套設備可供15 - 25頭牛使用（Garnsworthy et al. 2019; Tedeschi et al. 2022）。然而，牛隻除了需要經過

訓練才能適應設備，進入設備的時間也應在1天中合理分配，減少因為採食時間、乾物質採食量等所造成的測量誤差，另外，此方法需要的測量時間較長，亦僅測量口鼻部的甲烷排放，環境中的風向和風速等也都會影響其準確性（Ghassemi Nejad et al., 2024; Tedeschi et al., 2022）。



GreenFeed 系統的 AI 生成示意圖（Gemini, 2026）。

嗅探器技術（Sniffer Technique）

在牛舍中以非侵入式的方式加裝氣體濃度檢測器，主要應用於擠乳機器人或精料餵飼站的飼槽中，短時間連續採集並分析牛隻口鼻部的 CH_4 與 CO_2 濃度，但不測量通氣量，主要依據以呼吸室建立的回歸方程式進行計算，在現場應用的便利性與資料量上具備優勢及潛力，未來有機會作為大規模



嗅探器技術的 AI 生成示意圖（Gemini, 2026）。

常態檢測的選擇（Ghassemi Nejad et al., 2024; Huhtanen et al., 2015）。然而，此技術的精確度低於呼吸室法與 SF_6 技術，主要原因包含甲烷濃度在個體間的高度變異性、飼槽容積和形狀影響氣體混合、採樣點與牛鼻的距離等問題，仍需進一步研究以改善其準確性與穩定性（Ghassemi Nejad et al., 2024）。

乳牛甲烷排放量的間接預測方法（indirect estimation）

由於大規模直接測量甲烷排放量既困難又昂貴，間接預測方法應運而生，利用與甲烷排放相關的生理數值來估算排放量，目標是開發準確、低成本且適合大規模執行的方法（Negussie et al., 2017）。

經驗模型（empirical models）

透過統計方法，量化甲烷排放與各種生產性狀之間的關係，例如乾物質採食量、總能攝取量、中洗纖維採食量、泌乳量、體重和日糧組成等，具有較高的通用性，常見如IPCC的模型。但是在應用於不同飼養地區、不同管理模式等場域，會因為甲烷轉換因子的差異使準確率降低（Hristov et al., 2018; Ross et al., 2024）。

機械模型（mechanistic models）

透過數學方式模擬瘤胃消化和代謝過程，通常包含多個子模型，常見如

飼料特性、瘤胃降解、微生物生產和揮發性脂肪酸等，具有比經驗模型更高的準確性。然而，此類模型相對複雜，所需的資料通常較難以取得，因此可能因為數據不精確而導致誤差（Ross et al., 2024）。

代理特徵 (proxies)

間接指標做為科學測量上可行的替代方案，透過從一般乳牛飼養能夠量測的生理指標來預測其甲烷排放量，成為極具潛力的方法之一，包含採食量、採食行為、反芻時間、瘤胃微生物群、瘤胃容積與停留時間、瘤胃性狀、產乳量與品質、體重和消化率等，未來的應用仰賴各項指標之間的整合，以及與實測甲烷排放數值的比較，以提高預測準

確性（Negussie et al., 2017）。

結語

總體而言，在準確性、成本效益和大規模應用之間尋求平衡，是目前乳牛甲烷排放測量面臨的核心挑戰。未來，將需要開發更多因應不同飼養條件的模型，並可透過如人工智慧和機器學習等新興技術，提高數據預測的準確性和牧場端測量的可行性。目前所知的每種方法都有其限制，選擇哪種技術應根據研究目標、成本預算和適用性來決定，透過多種方法的整合與改進，將能更有效地管理和減少酪農業的甲烷排放，為實現永續乳業做出貢獻。🌱

參考資料

1. Bekele, W., A. Guinguina, A. Zegeye, A. Simachew, and M. Ramin. 2022. Contemporary methods of measuring and estimating methane emission from ruminants. *Methane*. 1:82-95.
2. Garnsworthy, P. C., G. F. Difford, M. J. Bell, A. R. Bayat, P. Huhtanen, B. Kuhla, J. Lassen, N. Peiren, M. Pszczola, D. Sorg, M. H. P. W. Visker, and T. Yan. 2019. Comparison of methods to measure methane for use in genetic evaluation of dairy cattle. *Animals* 9:837.
3. Ghassemi Nejad, J., M. S. Ju, J. H. Jo, K. H. Oh, Y. S. Lee, S. D. Lee, E. J. Kim, S. Roh, and H. G. Lee. 2024. Advances in methane emission estimation in livestock: A review of data collection methods, model development and the role of AI technologies. *Animals* 14:435.
4. Hristov, A. N., E. Kebreab, M. Niu, J. Oh, A. Bannink, A. R. Bayat, T. M. Boland, A. F. Brito, D. P. Casper, L. A. Crompton, J. Dijkstra, M. Eugène, P. C. Garnsworthy, N. Haque, A. L. F. Hellwing, P. Huhtanen, M. Kreuzer, B. Kuhla, P. Lund, J. Madsen, C. Martin, P. J. Moate, S. Muetzel, C. Muñoz, N. Peiren, J. M. Powell, C. K. Reynolds, A. Schwarm, K. J. Shingfield, T. M. Storlien, M. R. Weisbjerg, D. R. Yáñez-Ruiz, and Z. Yu. 2018. Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. *J. Dairy Sci.* 101:6655-6674.
5. Huhtanen, P., E. H. Cabezas-Garcia, S. Utsumi, and S. Zimmerman. 2015. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions. *J. Dairy Sci.* 98:3394-3409.
6. Negussie, E., Y. de Haas, F. Dehareng, R. J. Dewhurst, J. Dijkstra, N. Gengler, D. P. Morgavi, H. Soyeurt, S. van Gastelen, T. Yan, and F. Biscarini. 2017. Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions. *J. Dairy Sci.* 100:2433-2453.
7. Ross, S., H. Wang, H. Zheng, T. Yan, and M. Shirali. 2024. Approaches for predicting dairy cattle methane emissions: from traditional methods to machine learning. *J. Anim. Sci.* 102:skae219.
8. Tedeschi, L. O., A. L. Abdalla, C. Alvarez, S. W. Anuga, J. Arango, K. A. Beauchemin, P. Becquet, A. Berndt, R. Burns, C. De Camillis, J. Chará, J. M. Echazarreta, M. Hassouna, D. Kenny, M. Mathot, R. M. Mauricio, S. C. McClelland, M. Niu, A. A. Onyango, R. Parajuli, L. G. R. Pereira, A. del Prado, M. P. Tieri, A. Uwizeye, and E. Kebreab. 2022. Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods. *J. Anim. Sci.* 100:skac197.