



以海洋解方協助牧場淨零： 藻類降低反芻動物溫室氣體之應用

林幼君¹、許自研²、蔡慧君¹

¹ 水產試驗所水產加工組、² 東港養殖研究中心

前言

當前畜牧業所飼養如牛羊等反芻動物所產生的甲烷 (methane, CH₄) 排放量佔全球農業甲烷排放的 39%，以及佔全球總甲烷排放約 17% (Bačėninait et al., 2022; Patra et al., 2014)。預估到 2100 年，反芻動物飼養所導致的排放可能將佔全球甲烷排放的 40% 以上 (Harmsen et al., 2019)，這些甲烷雖然半衰期短，然而其全球暖化潛勢 (global warming potential, GWP) 是二氧化碳的 28 倍 (IPCC, 2014)。依據 2025 年我國國家溫室氣體排放清冊報告顯示，動物腸胃道產生的溫室氣體佔農業生產過程的 19.29%，其中牛羊等反芻動物合計為 402 千公噸二氧化碳當量，以全國畜禽腸胃發酵所產生之二氧化碳當量為 643 千公噸計算，反芻動物即佔畜禽腸胃發酵總量的 62.52%。

反芻動物的生長主要依賴瘤胃內的微生物生態系統進行發酵，將攝入的植物作為能量來源，將難消化的植物纖維透過厭氧發酵轉化為小分子養分。這些養分經吸收後，用於合成乳汁及肉類等動物性蛋白質供人類食用。這些存在於瘤胃中的微生物包括細菌、古細菌、原蟲、噬菌體與真菌，與宿主形成共生關係，使反芻動物能夠發酵複雜的結構性碳水化合物組成 (Carberry et al., 2012; Huws et al., 2018)。

而分解纖維過程中，CH₄ 是反芻動物產甲烷菌腸道發酵的代謝終產物，產甲烷菌會將二氧化碳 (CO₂) 與氫氣 (H₂) 轉化為 CH₄。這些甲烷排放不僅造成溫室效應，亦是反芻動物能量損失的途徑之一，過高的甲烷排放可能導致較低的生產效率。因此，降低畜禽甲烷排放不僅有助於減緩氣候變遷對環境的衝擊，同時可提升飼養效率與能源利用率，顯見發展具環保與經濟效益的減排策略，已成為永續畜牧生產的重要課題。

探索海藻作為甲烷抑制劑的潛力

近期許多甲烷抑制劑作為飼料添加物已被用於減少反芻動物腸胃道產生的甲烷排放，包括抗生素、微生物製劑或部分植物次級代謝物如單寧 (tannins)、皂素 (saponins)，以及化合物 3- 硝基丙醇 (3-Nitropropanol, 3-NOP) 等化合物 (Kumar et al., 2014)。這些成分雖已證實可透由 CH₄ 的生合成途徑所需的酶產生競爭性結合或透由調節反芻動物瘤胃微生物相組成，達到干預腸胃道甲烷排放目的，然而原料的安全性與適法性仍備受挑戰，因此近年來逐漸使用天然的原型材料進行研發。

海藻富含營養成分與生物活性物質，包括蛋白質、碳水化合物和部分的脂質以及肽、皂苷、生物鹼與色素等內源性的小分

子。部分藻類亦具植物性化合物，如酚類化合物及具抑制甲烷生成潛力的鹵素化合物，成為甲烷抑制劑中備受關注的天然飼料添加物 (Abbott et al., 2023)。迄今，已有幾種海藻被證實可降低反芻動物的甲烷排放，包括海門冬 (*Asparagopsis taxiformis*)、大西洋裙帶菜 (*Alaria esculenta*)、泡葉藻 (*Ascophyllum nodosum*) 及角叉菜膠苔蘚 (*Chondrus crispus*) 等 (Kinley et al., 2016; Machado et al., 2015; Ramin et al., 2018; Wang et al., 2009)。這幾種海藻物種中尤其是紅藻，因富含溴化物可抑制反芻動物體內甲烷菌製造 CH_4 的生合成途徑而備受矚目。其中以海門冬效果最顯著，飼糧中添加 2% 有機質 (organic matter, OM) 的劑量下可降低 99% 甲烷排放 (Chagas et al., 2019; Brooke et al., 2020)。主要原因為海門冬具有高量的溴仿 (bromoform) 成分，可作為 CH_4 生成速率限制酵素甲基輔酶 M 還原酶 (methyl-coenzyme M reductase, MCR) 的競爭性抑制劑或類似物進而干擾其發揮作用，阻斷 CH_4 生成的最後催化步驟 (Denman et al., 2007; Goel et al., 2009; Min et al., 2021; Wanapat et al., 2013)。

此外，其他海藻如褐藻也含有可抑制瘤胃古細菌的多酚、單寧與皂苷等成分，顯示海藻在減少反芻動物甲烷排放方面具高度可行性。部分藻類在體外試驗已被證明具有顯著緩解甲烷排放潛力，包括部分褐藻如囊鍊藻 (*Cystoseira trinodis*)、網地藻 (*Dictyota bartayresii*)、南方團扇藻 (*Padina australis*)，以及石蓴 (*Ulva* spp.) 與墊狀剛毛藻 (*Cladophora patentiramea*) 等綠藻

(Brooke et al., 2020; Dubois et al., 2013; Machado et al., 2014; Maia et al., 2016)。雖然尚未完全釐清藻類抑制甲烷的主要活性成分，但添加在瘤胃體外發酵試驗中，可觀察到總產氣量與甲烷生成量的減少，惟仍需進一步的活體動物試驗確認其對動物生產性能的影響，至於海藻為何能抑制甲烷，我們必須深入探究其內含的關鍵活性化合物及其作用機制。

藻類抑制甲烷生成的活性化合物

瘤胃微生物群分解飼料中的碳水化合物與纖維，產生 CO_2 、 H_2 與揮發性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs)。其中 CO_2 與 H_4 是產甲烷菌生成 CH_4 的重要原料，同時菌種間的 H_2 傳遞，能影響產甲烷菌與產酸菌之間的代謝，是影響 CH_4 與 VFAs 生成調節的重要因素 (Denman et al., 2007; Min et al., 2021; Machado et al., 2018; Patra et al., 2014; Roque et al., 2021; Wanapat et al., 2013; Wood et al., 1968)。海藻作為飼料的添加可改變瘤胃發酵路徑，藉由影響 CH_4 生成的三大路徑 (甲基營養型、氫營養型與乙酸裂解型) 來降低甲烷排放 (McGurrin et al., 2023)。如氯仿 (chloroform)、溴仿、褐藻多酚 (phlorotannin) 與皂苷等植物次級代謝物可干擾 CH_4 生成所需酵素 (如含鈷酶) 與 MCR 的活性，進而減少甲烷合成 (Min et al., 2021; Wanapat et al., 2013)。

最具甲烷減量效果的海門冬因含有高濃度溴仿，可與 MCR 競爭結合，阻斷 CH_4 生成的最後步驟，並因與維生素 B_{12} 交互作用而進一步抑制 CH_4 生成。部分紅藻如 *Gracilaria*



sp. 中的溴仿可減少產甲烷菌數量 (Goel et al., 2009; Denman et al., 2007; Prayitno et al., 2018)。因此，富含鹵素的海藻可能成為減少甲烷排放的有效天然手段。其他海藻生物活性物質也可能影響產甲烷菌，如皂苷化合物可抑制原蟲生長，因此可減少瘤胃中原蟲的數量，進而改變與原蟲共生的甲烷菌喜好之環境而降低 CH₄ 產量 (Newbold et al., 2010)。此外，部分藻類中所含的單寧，易與瘤胃中的蛋白質產生相互作用形成複合物，使瘤胃蛋白的消化率降低而影響 CH₄ 之生成。另一項存在於褐藻中的活性成分為褐藻多酚，其是構成褐藻酚類成分的主要物質，已知具有抗菌、抗氧化及抗發炎等特性 (Cabrita et al., 2016; Gulzari et al., 2019)。過去文獻以不同劑量之褐藻多酚添加於瘤胃液中進行體外發酵，處理組在 24 小時內 CH₄ 排放量均低於對照組，具抑制潛力 (Wang et al., 2008)。然而褐藻多酚在劑量上的使用需特別注意，高劑量添加情形下可能使動物消化率下降而影響其產乳性能，亦可能減少瘤胃菌中善於分解纖維的微生物數量，因此商品化過程對於劑量反應、瘤胃菌群動態與營養須加以評估以提升可行性 (Abbott et al., 2023)。

除了海藻內的二次代謝物外，從海藻中分離或生成的肽或細菌素，亦可抑制甲烷菌與原蟲的生長。肽和細菌素有可能調節瘤胃發酵，導致丙酸鹽增加，從而降低甲烷生產 (McCauley et al., 2020)。此外，海藻中的脂質與碳水化合物亦可作為甲烷減排的成分之一。在一項菜籽油試驗中顯示，將多元不飽和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFAs) 提升至日糧乾物 6% 內可顯著減少甲烷 (Poulsen et al., 2013)，如北歐褐藻

(*Ascophyllum nodosum*) 富含 α-亞麻酸，即可做為潛在減甲烷成分源取代可發酵碳源，降低氫產生 (Bikker et al., 2020)。海藻中的 PUFA 在瘤胃生物氫化中可進行氫匯，或競爭氫氣及影響原蟲生長以抑制產甲烷菌利用 (Beauchemin et al., 2008)。在碳水化合物方面，海藻中的多醣含量最高可達 76% 乾重，種類涵蓋藻酸鹽、角叉菜膠、岩藻糖膠等，鏈結結構複雜。這些多醣需瘤胃微生物的碳水化合物活性酶 (carbohydrate-active enzymes, CAZymes) 逐步水解，分解速率慢，限制發酵氫產生並減少 CH₄ (Kidgell et al., 2019; Morais et al., 2020)。此外，海藻中高硫酸化的多醣與多酚可協同抑制纖維素分解菌與原生动物的生長，進一步影響 CH₄ 生成 (Morais et al., 2020)。透過上述的作用機制，不同藻類組合配方與應用可建立其不同活性成分的互補作用，使抑制甲烷更具穩定性與廣效性。不僅可避免高劑量單一成分造成消化效率下降或瘤胃微生物群失衡，亦可降低藻類作為飼料添加之成本並提升產業化可行性。

■ 國產藻類對反芻動物甲烷生成的抑制效果

迄今為止，大多數對於甲烷抑制的研究主要透過批次式體外 (*In Vitro*) 發酵系統 (圖 1) 或半連續式瘤胃模擬技術 (rumen simulation technique, RUSITEC) (圖 2) 進行。主要過程為將海藻乾燥後，添加至含有飼料等營養物質之瘤胃液進行觀察，以模擬這些藻類進入動物體內的情況。而本所加工組亦曾透過反芻動物體外模擬系統，評估 20 項國產養殖藻類對溫室

氣體排放 (CH₄ 與 CO₂) 及揮發性脂肪酸 (VFAs) 產生的影響，藉以篩選具抑制甲烷潛力之飼料添加藻種。試驗過程主要將荷蘭牛瘤胃內容物、人工唾液及完全混合飼糧 (total mixed ration, TMR) 混合後，於 39°C 水浴中發酵 24 小時，並透過氣相層析儀 (gas chromatography, GC) 進行 CH₄、CO₂ 與 VFAs 分析。



圖 1 批次式反芻動物體外發酵裝置

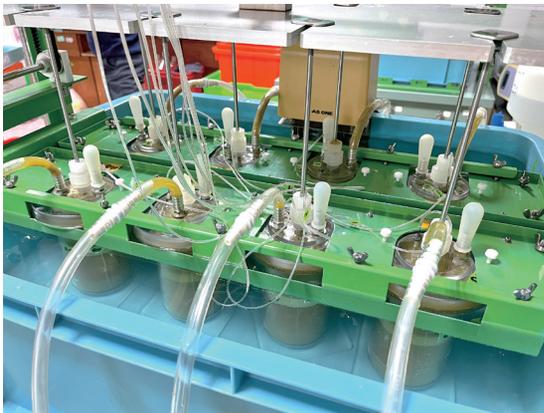


圖 2 半連續式瘤胃模擬技術

該試驗觀察到臺灣澎湖周邊海域採集到的野生海門冬，亦具明顯的甲烷抑制效果。以 1.25、2.5 及 5% 等不同劑量的乾燥海門冬進行添加，瘤胃液發酵後之總氣體產量、甲烷濃度及生成量皆顯著低於未添加海藻之對照組。此外，當添加海門冬粉末 5% 比例時，CH₄ 濃度

顯著降至 0.1%，產量僅剩 0.03 mg/g，抑制率達 99.78%。由於野生海門冬分布相當零散且生長期具明顯季節性，除採集困難外，若大量採集則可能導致族群減少、棲地破壞，影響海洋生態系，亦無法確保批次採集活性成分之穩定性。該研究進一步比較本所東港養殖研究中心人工培養的海門冬四分孢子體，發現其對於甲烷生成的抑制效果與野生配子體一致，皆具明顯的抑制效果。

除海門冬外，該研究另測試數種國產藻類，包括紅藻 (如紅寶菜、麒麟菜、穗狀魚棲苔)、綠藻 (如石蓴、海葡萄、小葉蕨藻) 及褐藻 (如馬尾藻) 等，部分藻類亦表現出可降低溫室氣體總產量與 CH₄ 濃度。相較於 TMR 對照組之數據，東港地區之紅寶菜與海葡萄、澎湖地區之小葉蕨藻及臺東地區之麒麟菜與穗狀魚棲苔皆顯示具潛在甲烷抑制功能。綜合結果顯示，海門冬無論在野生配子體或人工養殖四分孢子體 (圖 3、4)，皆具極顯著的甲烷抑制效果，而人工養殖之紅寶菜、海葡萄、小葉蕨藻、麒麟菜與穗狀魚棲苔等藻類亦展現良好抑制甲烷能力。透過多種國產藻類的搭配使用，結合不同藻種形成「複方型」添加物，可緩解野生海門冬在來源穩定性與成本的問題；而甲烷減量主活性成分搭配輔成分進行開發，未來在反芻動物營養調控、風味與接受度亦有突破之潛力。

結語

海藻可提供豐富的營養，其作為畜禽動物飼料已有數千年歷史。近年來，海藻逐漸被視為一種具有潛力的減甲烷飼料添加物，可減少反芻動物產生甲烷排放，進而提升畜牧業對溫



圖 3 臺灣周邊海域野生海門冬配子體型態



圖 4 本所東港養殖研究中心進行人工養殖海門冬四分孢子體型態

室氣體減排的貢獻。若海藻生物質能透過近海養殖生產，還能額外促進海洋碳封存，對環境具正面效益。因此，海藻作為飼料添加物，在提供反芻動物營養並抑制甲烷排放方面確實展現出可觀潛力，然而同時也需正視其可能帶來的風險，如食品安全、環境與相關可持續性議題。例如部分藻類富含碘與溴化物，高濃度之累積可能對動物與消費者健康造成風險，在使用海藻作為飼料添加物時，需同時監控這些成分在畜產品中的殘留濃度。因此未來的研究可聚焦於藻類添加安全劑量之確認、低風險藻種的開發及對瘤胃微生物菌相的長期影響，以評估其實際應用的可行性與安全性，並提供監管機關建立完善的監測與管理機制。善用國產藻類此一『海洋解方 (ocean-based solutions)』，不僅為臺灣的畜牧業邁向淨零碳排提供一條清晰可行的道路，也展現了海洋資源在永續發展中的無限潛力。