

利用海藻來減少反芻動物腸道甲烷生成的可能性

臺北市立動物園 陳怡璇

全球環境正面臨挑戰，畜牧業佔全球溫室氣體 (global greenhouse gas) 排放量的 14.5% 至 19%，其中大約有一半為甲烷 (methane, CH₄)。據估計，牛、綿羊和山羊由於採食差異，攝入總能量會損失 2% 到 12% 以產生瘤胃甲烷。反芻動物透過補充海藻減少腸道甲烷排放的能力成為熱門話題。

根據 2021 年聯合國環境規劃署 (United Nations Environment Programme) 報告指出，自 2011 年以來，加勒比海海岸線一直受到大規模的漂浮馬尾藻 (Sargassum) 湧入的影響。馬尾藻是棕色大型藻類或海藻的一個屬或科，分佈在世界各地溫帶和熱帶海洋中。馬尾藻湧入是一個非常多領域的跨界問題，涉及公共衛生、沿海生活、旅遊、漁業與海運等影響。因馬尾藻具部分腐蝕性，且若其腐爛將導致環境退化及資源利用效率低下的情況。然而，這個問題不僅限於加勒比地區，而是橫跨熱帶大西洋，包括赤道巴西以及從塞拉利昂到幾內亞灣的西非沿海地區，需要在受影響區域內和跨區域進行協調與合作。但馬尾藻也被認為是一種可能被商品化的潛在資源，有多種用途的潛力，

包括農業、生物能源、生物塑料、生物修復和淨化、建築和化妝品等。有鑑於此，本文彙整相關研究，希望可以瞭解海藻作為減少反芻動物腸道甲烷生成的潛在可能，同時也要兼顧反芻動物的健康與產能，尋求新的機會潛力。

海藻簡介

海藻是原始不開花的光合大型植物。有三個不同的海藻群：綠藻門 (Chlorophyta)、褐藻門 (Phaeophyta) 和紅藻門 (Rhodophyta)。2016 年估計，全球透過水產養殖生產的新鮮海藻超過 3,000 萬噸。一些海藻物種具有生物活性的抗產甲烷特性。

海藻由於多醣含量高，故具有高量的中洗纖維 (NDF) 和酸洗纖維。紅海藻的 NDF 含量 (27.2% 至 43.1% 乾基) 通常高於綠海藻 (15.3% 至 18.6% 乾基) 和褐海藻 (16.6% 至 22.0% 乾基) (表 1)。海藻的細胞壁主要由藻酸鹽組成，還有一些纖維素、木聚醣和木葡聚醣。海藻的各種活性多醣成分在反芻動物消化系統中被碳水化合物活性酶水解和發酵，部分海藻中多醣的生物利用度具有降低甲烷的潛力。據研究指出，海藻中的

光泉廠農通訊(115)

<http://www.kuangchuan.com/09Life/Life05.aspx>

抗產甲烷鹵化化合物(例如：溴氯甲烷 Bromochloromethane, BCM、溴仿 Bromoform)餵給反芻動物時會改變瘤胃發酵途徑，抑制腸道甲烷排放，其中紅海藻的溴仿普遍高於綠海藻與褐海藻。

值得注意的是，一些紅色和棕色海藻乾物質中的碘含量高達 3.37 mg/kg(表 1)，特別是海帶屬 (*Laminaria* and *Saccharina japonica*)的碘含量最高，可能高達 5.6 mg/kg 乾基。因此，動物飼料中的海藻含量可能需要限制在日糧的 10%以內，避免攝食過量的碘，此外也有必要確認碘代謝的機制，特別是碘與硒、溴和鐵等其他營養素的相互作用。

海藻對反芻動物生產性能的影響

有限的研究評估了海藻補充劑如何影響瘤胃微生物群和產甲烷作用。據研究，添加紅海藻和 BCM 可減少牛隻甲烷的產生。在飼餵以草料和穀物的混合日糧為基礎的閩牛和乳牛的動物試驗中，添加 BCM(0.15-0.6 g/100 kg 體重)或 *Asparagopsis* spp. 的紅海藻(0.05-1.0% 有機物)，可降低甲烷產量 50.0%至 98.0%，同時也降低閩牛和乳牛乾物質採食量 0.4 至 38.0%，

詳細資料如表 2。

乳牛完全混合日糧(TMR)中連續 21 天添加 0.5%和 1.0%紅海藻 *A. armata*(有機物為基礎)，乾物質採食量分別降低 10.8%和 38.0%，產乳量只有在添加 1.0%時顯著減少 11.6%，甲烷產量分別顯著降低 20.0%和 50.0%。可以發現添加高濃度紅海藻 *A. armata*，可能會影響乳牛採食量。然而，2020 年的報告指出，以閩牛 TMR 為基礎的日糧中添加低濃度的紅海藻 (*A. taxaformis*；0.05% - 0.2% 有機物)可減少高達 98% 的腸道甲烷排放，在閩牛的乾物質採食量沒有顯著減少，有提高平均日增重的情形(表 2)。1997 年的研究中，在低品質和中品質的首蓿乾草為基礎的閩牛日糧，飼餵 10 到 12 週的 BCM(1.2% 乾基)，閩牛乾物質採食量降低 7.4%。這些結果表明，添加濃度範圍為乾基的 0.5% 至 1.0%的 BCM 或含有 BCM 的海藻，閩牛與乳牛的乾物質採食量會逐漸降低。然而，此狀況在綿羊與泌乳山羊則沒有相同的結果。2018 年研究顯示，餵給食用高纖維日糧的綿羊，以有機物為基礎，添加 0%、0.5%、1%、2% 與 3% 五種濃度的 *A. taxiformis*，發現不影響綿羊的乾物質採食量且可減少高達 80.7%的甲烷排放。另有學者

表 1 海藻的化學成分(以乾基 DM 表示)

Type	Red seaweed 紅海藻			Green seaweed 綠海藻	Brown seaweed 褐海藻			
Species	<i>Porphyra</i> spp.	<i>A. taxiformis</i>	<i>A. armata</i>	<i>Ulva</i> sp.	<i>A. nodosum</i>	<i>Macrocystis</i> Sp.	<i>Laminaria</i> Sp.	<i>Costaria Costata</i>
Nutrients, %								
CP	24.6-38.1	17.8	18.3	15.3-18.6	6.0-8.3	10.1	9.8-16.6	7.8
NDF	43.1	36.9	27.2	22.8-26.2	20.9-22.0	19.9	16.6	-
ADF	6.6	11.6	10.9	7.6-8.7	13.1	12.6	-	-
Ether extract	0.3-0.5	0.4	0.32	1.2	3.9	0.6	0.8	-
Ash	6.5-8.7	-	10	7.7-23.2	22.0-22.5	32.9	29.9-31.5	-
Minerals, %								
Ca	4.4	3.8	4.47	2.9	1.0-3.0	14.1	0.08	0.12
P	3.8	0.2	0.27	0.27	0.1-0.2	2.9	-	-
Na	4.1	6.6	9.36	2.0-3.3	2.4-4.0	36.5	25.3	4.16
Mg	4.9	0.8	1.38	1.7	0.5-1.09	39.2	5.5	0.96
Minerals, mg/kg								
Fe	2.2	6.2	1.188	1.24	134	117	233.2	-
Mn	-	0.1	0.63	0.1	10-50	11	6.2	1.48
Zn	0.15	0.24	0.07	0.05	35-100	12	111.7	10.8
Cu	0.51	0.87	-	7.07	4.0-15	2	14.9	6.4
S	-	4.5	-	-	2.0-2.3	-	-	-
Iodine	1.5	1.71-3.37	0.6-1.8	0.9	0.01-0.1	-	0.9	0.03
Bromoform 溴仿	-	1,723 µg/g DM	1,320 µg/g DM	150 ng/g fresh weight	2.7 ng/g fresh weight	150 ng/g fresh weight	49.7 µg/g DM	-
Phlorotannins	-	5.0-6.0	5	1.0-2.0	20-14	21	2	2

(Min, Byeng R., et al., 2021)

表 2 添加海藻或 BCM 對於甲烷排放的動物試驗

試驗動物	基礎日糧	處理方式	乾物質採食量 (kg/d)	生產表現	甲烷生產量 (g/kg 乾物質採食量)	文獻
閹牛	完全混合日糧 (TMR) 圈養餵飼 28 日	BCM, g/100 kg BW				Tomkins and Hunter (2004)
		0 (對照組)	6.2 ^b	-	8.7 ^a	
		0.15	7.4 ^a	-	3.8 ^{ab}	
		0.3	5.6 ^b	-	1.4 ^b	
		0.6	5.5 ^b	-	0.8 ^b	
變化率 (%)	-11.3		-95.2			
閹牛	完全混合日糧 (TMR) 圈養餵飼 90 日	<i>A. taxiformis</i> , % OM		平均日增重 (kg)		Kinley et al. (2020)
		0 (對照組)	8.4	1.2 ^b	10.4	
		0.05%	8	1.22 ^{ab}	10	
		0.10%	10.3	1.5 ^a	6.2	
		0.20%	8.8	1.45 ^a	0.2	
變化率 (%)	-0.4		-98			
乳牛	完全混合日糧 (TMR) 圈養餵飼 21 日	<i>A. armata</i> , % OM		每日乳產量 (kg)		Roque et al. (2019)
		0 (對照組)	27.9 ^a	36.2 ^a	15.0 ^a	
		0.5	24.9 ^b	37.2 ^a	12.0 ^b	
		1	17.3 ^c	32.0 ^b	7.5 ^b	
變化率 (%)	-38		-50			

註：生產表現之數字含英文上標表示試驗結果有達統計差異。BW: body weight 體重。OM: organic matter 有機物。

表示，當日糧中添加紅海藻 (Asparagopsis) 含量高達 1.0% 乾基或超過 0.3 g 溴仿/100 kg 體重時，乳牛或肉牛似乎存在適口性的問題。

在一些土地貧瘠的區域，國外學者提出乳牛補充褐海藻，人類可藉此飲用牛乳來緩解碘缺乏症，但也要擔心攝入過多碘的問題，尤其是兒童。目前，牛乳中的碘含量尚無標準，根據 2012 年歐洲食品安全局 (European Food Safety Authority) 建議最高為 500 mg/L。若在冬季飼餵經產乳牛 0、57、113 和 170 g/d 褐海藻 (A. nodosum)，產出之牛乳中碘含量呈線性增加，平均為 177、602、1,015 和 1,370 mg/L，這也是需要留意的問題。

海藻的好處和挑戰

1. 海藻可作為營養素的替代的來源，海藻富含各種營養素，包含蛋白質、脂質、維生素、脂肪酸、氨基酸、碳水化合物、礦物質等。另外還含有生物活性化合物，例如：抗產甲烷劑、抗氧化劑、抗炎劑、抗菌劑或抗病毒劑等。

2. 與使用萃取物或其他添加劑相比，日糧中添加海藻可以作為減少反芻動物腸道甲烷排放，成為減少溫室氣體排放的工具。

3. 近期體外和體內研究表明，

富含溴仿的紅海藻 *Asparagopsis taxiformis* 和 *Asparagopsis armata* 在添加到草類和穀物日糧中時有可能減少甲烷的產生，研究表示紅海藻在短期內有效，但長期飼養功效尚不清楚。

4. 海藻添加到反芻動物日糧中時，對其適口性、動物健康和繁殖以及牛乳和肉質的影響並不一致。還需要進行額外的研究來確定海藻添加的類型、添加量和飼養時間，評估對反芻動物生產性能、採食量、飼料效率、屠體性狀、牛乳和肉類中的成分以及瘤胃健康等影響。

5. 海藻可能會有累積重金屬、碘和其他礦物質，飼料含有污染物的海藻可能會對動物和人類健康產生負面影響。

總結

目前的研究結果支持某些海藻 (特別是紅藻) 可減少甲烷排放的假設，然而，在體外和動物實驗結果仍然存在許多差距 (例如：乳牛和肉牛的實際生產表現)。海藻可能是反芻動物生產的替代原料之一，但添加濃度和飼養時間等都需要可持續、實用且經濟上可行的方式，從而確保瘤胃微生物功能以提高動物生產力。為了因應氣候變遷，考慮可使甲烷顯著減少的飼養方針及其對反芻動物可能的長期影響仍須持續研究。