

湛藍海水中的赤焰之舞－杜氏海膜

許自研、吳豐成

水產試驗所東港養殖研究中心

揭開赤焰的真實面紗：形態特徵

在波光粼粼的湛藍海水中，時常可見一抹鮮豔的赤紅色在礁岩間搖曳生姿，宛如一團跳動的火焰。這引人注目的海洋生物，正是本文要介紹的主角－杜氏海膜 (*Halymenia durvillei*)。其獨特的外觀和潛在的應用價值，正吸引著越來越多研究者的目光。

杜氏海膜在臺灣俗稱「紅寶菜」，藻體大型且叢生，高度可達 35 cm，色彩鮮豔，常見紅橙色或紫紅色，在水中舞動時，彷彿一簇簇熾熱的火焰在搖曳。新鮮的藻體觸感柔軟如軟骨，且有著滑膩 Q 彈的質地。它們透過盤狀的固著器牢牢附著在堅硬的礁石基質上。一條短小的柄部向上延伸，支撐著 2－4 條主要軸幹，這些軸幹的寬度約為 5－15 mm，並以羽狀互生的方式分枝 4－5 次。隨著分枝次數的增加，分枝逐漸變細，最終形成纖細而線性的末端小枝，頂端尖銳，有時呈現鉗狀。葉狀體的邊緣呈現鋸齒狀，而軸幹的表面則散布著少許針狀突起 (圖 1)。

其實在觀賞水族市場中，杜氏海膜早已小有名氣，在臺灣以「火焰藻」著稱，而在國外則以「龍之吐息 (dragon's breath)」作為商品名，水族貿易中常見的個體高度約為 6 cm，而在水族箱中，可長到 10－20 cm，呈現出叢生的形態，許多水族愛好者願意支付可觀的價格購買杜氏海膜以美化水族箱，一小叢火焰藻在美國網路水族店可售得約 20 歐元 (折合臺幣 740 元，1



圖 1 杜氏海膜的表面散布著針狀突起

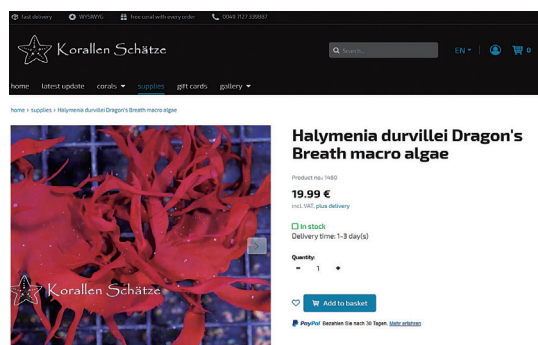


圖 2 國外水族網站一小叢的「龍之吐息 (dragon's breath)」售價約 20 歐元

歐元以 37 元計) 的價格 (圖 2)。此外，杜氏海膜的葉狀體具有半透明的特性，在水族箱的燈光照射下，會散發出迷人的光澤。相較於自然環境中可達 35 cm 的高度，水族箱中的個體通常較小，這可能反映了水體空間、環境水流、光照條件及營養供應等差異所致。

尋找赤焰的故鄉： 生態棲息與海洋角色

杜氏海膜其實在野外並非隨處可見，它對於棲息環境有著一定的偏好，並且在海洋生態系統中扮演著獨特的角色。杜氏海膜廣泛分布於印度 - 太平洋海域的熱帶至亞熱帶地區，屬於暖水性紅藻。在西太平洋地區發現記錄甚多，包括日本南部、菲律賓、印尼、馬來西亞、斐濟、關島、泰國及太平洋中的諸多島嶼海岸。在臺灣則主要生長於東北部海岸、小琉球及恆春半島沿岸的岩礁區。它通常附著在低潮線附近至水深約 10 m 的堅硬基質上，例如岩石或珊瑚礁上，以盤狀固著器固定自身，抵抗水流沖擊 (圖 3)。

作為海岸生態系統中的初級生產者，杜氏海膜透過光合作用製造有機質，為其他生物提供食物來源和棲息場所。海膽、螺類、草食性魚類等海洋生物常取食其葉片，而其繁茂的枝葉亦可成為小型甲殼類 (如橈足類) 隱藏、成長與繁殖的場所，因而在岩礁生態中扮演提供養分和庇護的雙重角色。

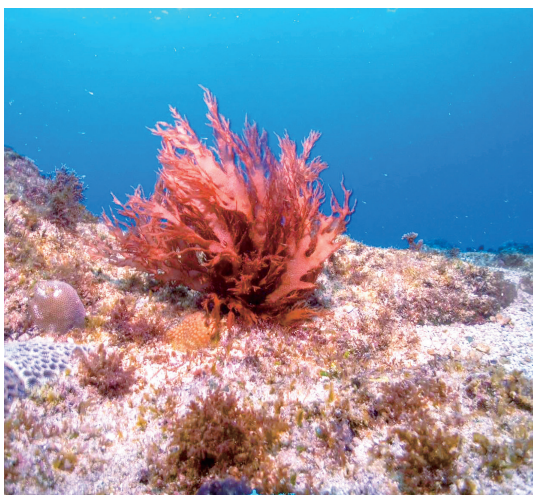


圖 3 臺灣屏東海域野外生長之杜氏海膜

杜氏海膜對水質中的養分具有良好的吸收能力，能吸收水體中過多的氮、磷等營養鹽，有助於減少富營養化 (eutrophication) 的發生。除了可以釋放氧氣外，杜氏海膜還能合成並分泌具有生物活性的次級代謝物，促進有益微生物群落 (如參與氮循環的相關菌群) 的發展，維持體表微生態平衡，並透過化學防污 (chemical antifouling) 機制減少附著生物覆蓋的風險。從更廣泛的海洋生態系統角度來看，包含杜氏海膜在內，海洋紅藻床為許多具有重要經濟價值的海洋生物提供天然的棲息地、覓食場、產卵場和育幼場，功不可沒。

探尋赤焰的足跡： 產業現況與市場展望

隨著杜氏海膜的各種營養成分被探明，它也正從一種區域性的野生資源，逐漸轉變為深具潛力的新興海藻原料。在全球市場上，傳統的紅藻產業主要利用對象為以富含卡拉膠 (carrageenan) (如角叉菜、麒麟菜等) 和瓊膠 (agar) 的各種藻類 (如石花菜、龍鬚菜等) 為主，而杜氏海膜則為卡拉膠的重要來源之一，目前開發利用尚處於起步階段，但近年需求有上升趨勢。

由於其富含高價值成分，如光合色素 (photosynthetic pigment) 和特殊多醣，一些國家和企業已對杜氏海膜展現濃厚興趣。以菲律賓為例，杜氏海膜在當地被廣泛食用和販售，甚至出現在公眾市場中作為海菜食品原料。然而，由於供給主要來自野生採集且分布受季節和海象影響，供應量有限，使得市場上杜氏海膜及其產品價格相對高昂。在臺灣方面，雖然少數沿海漁村 (如小琉球) 已有食用杜氏海膜的傳統，

但整體消費市場尚處於萌芽階段。為充分發揮其營養價值與經濟潛力，本所於 2025 年底彙整國內外文獻資料，向衛生福利部食品藥物管理署申請將其列入食品原料範疇（食品原料整合查詢平臺），並已順利獲得核准。未來本所將積極投入養殖技術開發，並推動多元化的加值應用，以健全產業鏈發展。

產業供應方面，過去幾年菲律賓的野生杜氏海膜因恣意採摘導致資源衰減，為了滿足持續增長的需求，市場迫切需要人工養殖來供給穩定的藻源。目前已有一些企業投入資金與技術開發，以期建立穩定的杜氏海膜供應鏈。在菲律賓的八打雁省 (Batangas)，人們正在利用浮筏法進行淺海杜氏海膜養殖試驗，現已開發出可用於持續大規模生產杜氏海膜的陸上培養技術。

另一方面，澳大利亞的 Plentex 公司則與菲律賓學術單位合作，取得杜氏海膜養殖及萃取技術授權，計畫在全球範圍內推廣商業化生產。在需求端，杜氏海膜的應用橫跨食品、保健、化工等多領域，如食品業者看中其營養價值，生技和醫藥產業則著眼於其藻紅蛋白、藻藍蛋白和活性多醣的開發潛能。儘管杜氏海膜的養殖仍面臨一些挑戰，但其產業現況正逐步發展，市場前景十分廣闊。

孕育赤焰搖籃：養殖技術與挑戰

由於杜氏海膜具重要經濟價值，科學家們一直在探索其養殖技術，以實現可持續利用。研究顯示，在陸基養殖系統中，透過調控光照和提供曝氣（產生水流），可有效提升其生長速度。較低的放養密度有助於提高生長速率，這可能是由於減少對

光照和營養物質的競爭。幼苗培養時，添加 8 ml/L 的營養液即可滿足生長需求。在測試條件下，幼苗的最佳培養週期為 4 天。相較於成熟藻體，幼苗群表現出更穩定的生長速率和產量。

陸基養殖相較於海洋養殖，能夠更嚴格地控制生物和非生物因素。利用深層海水作為營養和碳源的陸基養殖系統也顯示出巨大的潛力。為了避免密度過高造成自我遮蔽現象 (self-shading effect)，進而限制藻體生長，建議每週或每 2 週進行收穫。如果具有控溫設備，溫度應維持在 24 – 26°C，pH 值則控制在 8.0 – 8.4，並視其成長情形適當添加鐵質和微量元素，以確保藻體健康無虞。

然而，白腐病 (white rot disease) 是杜氏海膜養殖主要病害之一。這種疾病曾在實驗室培養和海上移植的個體中被發現，甚至也發現在野生的杜氏海膜中 (Santiañez et al., 2024)。白腐病的典型症狀是在藻體的表面出現半圓形的褪色斑點，並逐漸擴大，藻體色素因被分解，顏色從鮮橙色變為淺黃色，最終呈現半透明狀，受感染的藻體組織變得越來越軟，表觀上白色到半透明的區域最為脆弱，而大塊且柔軟的感染部位因特別容易斷裂，導致藻體遠端部分發生脫落，並造成生物質持續性的損失（圖 4）。

在大多數情況下，感染部位靠近藻體的基部。因此，在惡劣海況或強烈波浪和水流中，大部分養殖藻繩上的藻體會因斷裂而被沖走，因而減少生物質的產量。杜氏海膜白腐病的症狀與在紫菜 (*Porphyra yezoensis*) 中常被報導的白腐病相似，後者被認為可能與弧菌有關，而組織的褪色、腐爛及隨之而來的生物質損失也讓人聯想

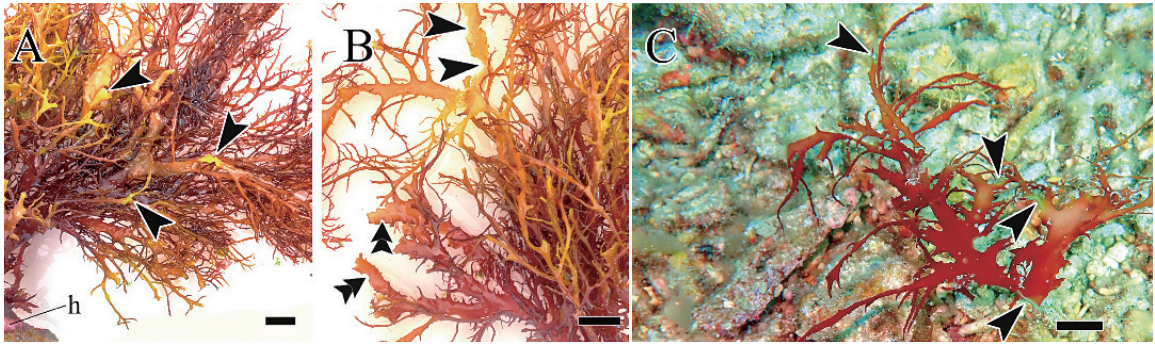


圖 4 菲律賓野外海域發現感染白腐病的杜氏海膜 (A) 顯示出固著器、(h) 和帶有變色及分解部分的枝條 (箭頭)；(B) 顯示出感染部分 (箭頭) 和癒合部分 (雙箭頭)；(C) 顯示出特有的變色和感染部分 (箭頭)。比例尺為 1 cm (Santiañez et al., 2024)

到在卡拉膠生產藻類 (如麒麟菜和龍鬚菜) 中常見的「冰冰病」(ice-ice disease)。除了不利的環境條件外，「冰冰病」也可能與致病細菌有關。雖然杜氏海膜白腐病的確切原因尚不清楚，但可能與其他養殖海藻疾病類似，涉及水質環境條件或病原感染；另一種威脅則是附生現象，例如由一種新多管藻屬 (*Neosiphonia apiculata*, 未有中譯) 的紅藻引起的附生，會導致杜氏海膜生長受阻。嚴重的附生現象與高營養鹽環境有關，維持適當的水流或許可以幫助預防疾病或附生現象發生。

在臺灣方面，本所東港養殖研究中心自 2023 年起即投入杜氏海膜的人工養殖研究，自屏東琉球海域採集野生杜氏海膜作為種原，透過室內水槽馴化培育，已培養出在人工環境下可穩定生長的藻株，為日後大規模養殖與推動產業發展奠定重要基礎 (圖 5)。

開拓赤焰的未來：應用潛力無限延伸

隨著科學研究的深入，杜氏海膜的應用潛力正在不斷被挖掘，其未來發展前景



圖 5 本所東港養殖研究中心之杜氏海膜陸上桶槽養殖

令人期待。在醫學方面，杜氏海膜的色素具有抗肺癌活性，並且富含抗氧化物質，是一種潛在的治療劑，同時也具有開發為抗糖尿病藥物的潛力。此外，杜氏海膜不僅具有抗炎、抗病毒、抗腫瘤和抗菌性，還表現出降膽固醇和抗凝血活性以及免疫調節、神經保護、細胞毒性和鎮痛等特性。這些研究結果均顯示出，杜氏海膜具有開發新型藥物的巨大潛力 (Arguelles et al., 2022; Manohong et al., 2021; Filaire et al., 2019; Rula et al., 2021; Kraokaew et al., 2022; Rodrigues et al., 2017)。

在保健與美容領域，杜氏海膜的天然色素被廣泛應用於化妝品中。富含多醣的提取物能夠改善皮膚發紅的狀況，並調節與皮膚老化相關的皮膚微生物群。乙酸乙酯提取物則能有效抵抗紫外線照射引起的皮膚光老化。杜氏海膜還具有作為抗皺劑 (抑制彈性蛋白酶) 和美白劑 (抑制酪胺酸酶) 的潛力。由於其抗痤瘡、抗氧化、抗衰老和抗炎特性，杜氏海膜在皮膚護理方面具有可觀的應用潛力，其多醣可能透過調節皮膚微生物群來緩解敏感性皮膚的不適和發紅。

在氣候變遷與環境永續方面，海藻養殖被視為緩解氣候變遷的一項自然解方。杜氏海膜具快速生長的特性，能大量吸收二氧化碳並固定在自身生物體中 (碳捕捉, carbon capture)，因此推動規模化杜氏海膜養殖可達到碳匯的效果，協助降低溫室氣體。同時，大量養殖的藻體可作為生質能源的原料，例如經發酵生產生物乙醇或經熱化學轉化後，可製造生質燃料。紅藻類海藻已被廣泛研究用於生物燃料生產，例如，安曼司石花菜 (*Gelidium amansii*) 被證實可經由低濃度酸液 (如稀

鹽酸、稀硫酸) 水解和酶解轉化為發酵性醣類，進而生產生物乙醇 (Park et al., 2012)。

另一研究指出，紅藻的卡拉膠和瓊脂等多醣適合透過厭氧消化或發酵生產生物甲烷和生物乙醇 (Zhao et al., 2022)。鑑於杜氏海膜的多醣含量高且易被微生物發酵之特性，可能為潛在的生物燃料資源，未來可投入研究其在碳中和能源循環中所能扮演的角色。

此外，杜氏海膜在水質淨化的能力使其可用於生態補償 (ecological mitigation)：在水產養殖系統中與魚蝦混養，吸收牠們排泄的養分，達到多營養層級養殖 (integrated multi-trophic aquaculture system) 的效果，減少養殖廢水對環境的衝擊。這些特性使杜氏海膜契合當前強調減碳、循環及生態養殖的永續發展目標。

結語

在湛藍海水中搖曳生姿的杜氏海膜，不僅以其美麗的外觀吸引著人們的目光，更以其豐富的營養成分、多樣的生物活性和廣泛的應用潛力展現出無限的可能。從傳統的食用價值到現代醫藥、保健、美容甚至環境保護領域，杜氏海膜都展現出巨大的潛力。隨著養殖技術的成熟和各項應用研發的突破，杜氏海膜有望在食品、醫藥、環保等領域展現更大的影響力，成為海洋給予人類的一項新穎禮物。透過持續開發養殖技術與更為科學的生產管理方式，我們將能享受杜氏海膜帶來的經濟利益，同時兼顧守護海洋生態的平衡。相信在不久的將來，這種來自海洋的饋贈將在更多領域綻放出耀眼的光芒，為人類帶來福祉。