

OAC-108-012 (研究報告)

防曬產品在海洋中的潛在危機：
探討 3 種紫外線過濾劑對造礁珊瑚的影響
Coral Conservation Frontline Operational Plan:
Exploring the effects of three UV filters on
hermatypic coral
(成果報告)

學校：國立臺灣海洋大學

指導教授：識名信也

學生：曲昱玲

研究期程：中華民國 112 年 3 月 1 日至 10 月 20 日

研究經費：新臺幣拾萬伍仟元

海洋委員會補助研究

中華民國 112 年 08 月

「本研究報告僅供海洋委員會施政參考，並不代表該會政策，該會保留採用與否之權利。」

「本研究報告絕無侵害他人智慧財產權之情事，如有違背願自負民、刑事責任。」

目 次

圖 次.....	3
表 次.....	4
摘 要.....	5
前 言.....	6
第一章 研究方法及過程	11
第一節 實驗物種	11
第二節 紫外線過濾劑	12
第三節 以培養皿中培養珊瑚系統(coral-on-a-laboratory dish, CLD).....	13
3-1 CLD 與樣本製備	13
3-2 實驗流程	14
第四節 珊瑚健康狀態評估方式	16
4-1 珊瑚片段的存活率	16
4-2 珊瑚片段的異常率	17
4-3 觸手張開程度分析	18
4-4 珊瑚顏色變化分析 (RGB 色彩模型分析)	19
4-5 珊瑚組織內共生藻光系統II光化學效率變化分析.....	20
4-6 珊瑚片段的表面積成長倍率	21
4-7 珊瑚片段的重量成長倍率	22
4-8 珊瑚蟲食量分析	23
第五節 統計方法	23
第二章 研究結果	24
第一節 三種紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚的影響	24
1-1 BMDM 對隆起軸孔珊瑚的影響.....	24
1-2 BP-3 對隆起軸孔珊瑚的影響	27
1-3 BEMT 對隆起軸孔珊瑚的影響	30
第二節 三種紫外線過濾劑對細枝鹿角珊瑚的影響	33
2-1 BMDM 對細枝鹿角珊瑚的影響.....	33
2-2 BP-3 對細枝鹿角珊瑚的影響	37
2-3 BEMT 對細枝鹿角珊瑚的影響	41
第三章 討論	45
第一節 紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚的影響	45
第二節 紫外線過濾劑對細枝鹿角珊瑚的影響	46
第三節 紫外線過濾劑對石珊瑚長期的影響	47
第四章 結論	48
參考資料.....	49

圖 次

圖 1：隆起軸孔珊瑚與細枝鹿角珊瑚外觀示意圖.....	11
圖 2：培養皿中培養珊瑚系統（CLD）.....	13
圖 3：控制組與實驗組樣本製備示意圖.....	14
圖 4：實驗流程.....	15
圖 5：珊瑚片段的存活與死亡示意圖.....	16
圖 6：珊瑚片段的正常組織與出現異常的組織示意圖.....	17
圖 7：細枝鹿角珊瑚觸手打開程度分析示意圖.....	18
圖 8：RGB 光色彩模型與分析珊瑚顏色變化.....	19
圖 9：量測共生藻光化學效率示意圖.....	20
圖 10：面積成長倍率分析示意圖.....	21
圖 11：浮力秤重裝置示意圖.....	22
圖 12：BMDM 對隆起軸孔珊瑚的影響.....	25
圖 13：BMDM 造成隆起軸孔珊瑚片段組織異常的外觀及比率.....	26
圖 14：BP-3 對隆起軸孔珊瑚的影響.....	28
圖 15：BP-3 造成隆起軸孔珊瑚片段組織異常的外觀及比率.....	29
圖 16：BEMT 對隆起軸孔珊瑚的影響.....	31
圖 17：BEMT 造成隆起軸孔珊瑚片段組織異常的外觀及比率.....	32
圖 18：BMDM 對細枝鹿角珊瑚的影響.....	34
圖 19：BMDM 造成細枝鹿角珊瑚之珊瑚蟲觸手活力影響.....	35
圖 20：BMDM 造成細枝鹿角珊瑚片段組織異常的外觀及比率.....	36
圖 21：BP-3 對細枝鹿角珊瑚的影響.....	38
圖 22：BP-3 造成細枝鹿角珊瑚之珊瑚蟲觸手活力影響.....	39
圖 23：BP-3 造成細枝鹿角珊瑚片段組織異常的外觀及比率.....	40
圖 24：BEMT 對細枝鹿角珊瑚的影響.....	42
圖 25：BEMT 造成細枝鹿角珊瑚之珊瑚蟲觸手活力影響.....	43
圖 26：BEMT 造成細枝鹿角珊瑚片段組織異常的外觀及比率.....	44

表 次

表 1：三種紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚綜合結果.....	45
表 2：三種紫外線過濾劑對細枝鹿角珊瑚綜合結果.....	46

摘要

關鍵詞：紫外線過濾劑、二苯甲酮、阿伏苯宗、隆起軸孔珊瑚、細枝鹿角珊瑚

一、研究緣起

防曬油是現在人們常使用的個人護理產品之一，先前一項為期 10 年的研究中表明，防曬油的使用量持續上升中。紫外線過濾劑是防曬油中主要的防曬成分，近年來紫外線過濾劑對珊瑚的影響研究逐漸被重視，但大多數研究報告主要觀察高濃度下紫外線過濾劑對珊瑚造成的白化或死亡，對於實際野外濃度下紫外線過濾劑對珊瑚的影響報告甚少，紫外線過濾劑對珊瑚造成影響除了特定時節下大量觀光客造成防曬乳流入海中，亦有日常使用並清潔後經由汗水處理廠流入海洋，因此探討在與實際濃度相似的濃度下對珊瑚造成的影響在保護珊瑚礁生態中占有重要位置。

二、目的

使用本實驗室先前開發的以培養皿培養珊瑚系統 (Coral on Laboratory Dish, 以下簡稱 CLD)，探討在與實際環境濃度下三種紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚與細枝鹿角珊瑚的影響。

三、研究方法及過程

使用 CLD 系統進行實驗，將珊瑚剪成小片段，固定在培養皿後放置在培養箱中培養。實驗為期 8 週，選用 3 種紫外線過濾劑 Butyl methoxydibenzoylmethane (BMDM)、二苯甲酮 Benzophenone-3 (BP-3) 和 Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazine (BEMT)，並使用丙酮溶解配置 stock 進行，使用濃度為 0 (控制組)、1、10 $\mu\text{g/L}$ ，在實驗開始前以及第 2 週、第 4 週、第 6 週、第 8 週拍照記錄解剖顯微鏡下珊瑚片段組織狀態，量測共生藻光化學效率，並使用浮力秤重紀錄珊瑚片段與培養皿的重量變化。在第 8 週計數珊瑚蟲食量。分析項目為珊瑚片段存活率，觀察珊瑚組織是否脫落或萎縮來分析片段組織異常率，使用共生藻光化學效率判斷共生藻健康與否，用 Photoshop 分析照片記錄中珊瑚片段面積成長，珊瑚骨頭成長使用重量成長倍率分析，以及使用 RGB 色彩模型分析珊瑚片段的顏色變化來判斷珊瑚是否白化，珊瑚蟲的活力與其觸手伸出程度和食量相關，因此珊瑚蟲活力以其觸手伸出程度和食量做分析。

四、重要發現

BMDM、BP-3 與 BEMT 在不同濃度下會造成隆起軸孔珊瑚成長速率不同程度的降低，以 BP-3 濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 下最為明顯，而在細枝鹿角珊瑚的影響試驗中發現 BEMT 對珊瑚組織可能造成組織異常並死亡，且三種紫外線過濾劑皆會造成其成長速率降低，這在先前研究中並未被提到。

五、結論與展望

且從此次實驗發現，低濃度狀態下的紫外線過濾劑仍可能對造礁珊瑚的成長與光化學效率造成影響，未來須持續深入探討並累積相關研究資料，望實現找出可同時保護人們皮膚以及不傷害珊瑚礁生態之紫外線過濾劑。

前 言

一、研究緣起

防曬油是當今人們最常使用的個人護理產品之一，進入海中的途徑除了水下活動之外，還有污水廠的排放，在澳大利亞汙水處理廠排放的廢水中分析紫外線過濾劑含量，發現無法達到百分百去除紫外線過濾劑，仍有部分殘留並流入大海 (O'Malley et al., 2020)。隨著環境保護意識的提升加上人們對防曬的需求只增不減，市面上開始出現標榜「海洋友善」的防曬油（乳），這些海洋友善防曬油的共通原則為不添加目前已知對海洋環境與生物會有明顯負面影響的紫外線過濾劑，如 Benzophenone-3(二苯甲酮, BP-3)、Octyl methoxycinnamate (甲氧基肉桂酸辛酯)、Octocrylene (奧克立林) 等，將上述成分改為目前研究上對環境影響較低的紫外線過濾劑，它們通常具有低水溶性或高光穩定性的特性，如 Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazine (BEMT)。

部分紫外線過濾劑已知在高濃度下對海洋生物或生態有一定影響 (Lozano et al., 2020)，但在台灣法規上並未完全禁止，僅規範其添加濃度。對於紫外線過濾劑在目前海水中存在濃度所造成的潛在影響尚未可知，了解其影響對訂定法規與保護珊瑚礁生態具有重大意義。

二、問題背景

在大眾對於防曬油需求不減的前提下，紫外線過濾劑會長時間以低濃度形式存在海洋中，因此除了測試在短時間高濃度下的急性毒性之外，仍需對於它們的長期影響（如成長速率）做研究與觀察。此研究成果未來可以作為法規上添加相關紫外線過濾劑的劑量調整和使用依據；也希望可以證明，這些紫外線過濾劑在短期內雖然影響較不顯著，但長期累積下也會成為嚴重的環境問題，並期許可以在其他化學藥品對海洋環境或生物的研究中，重視這些需要長期觀察的環境問題與變化。

三、現況分析

1. 珊瑚礁及石珊瑚的重要性

珊瑚礁是地球上最古老的生態系統之一，擁有超過熱帶雨林的豐富生物多樣性 (Ray, 1988)，覆蓋面積不到地球表面積的 1%，卻是海洋中 25% 動植物的棲息地 (Spalding et al., 1997)，珊瑚礁的覆蓋率影響著魚類物種的豐富度 (Graham et al., 2008)。珊瑚礁在生態系上的功能有 (1) 提供棲地給海洋生物居住與繁衍下一代，維持海洋生物的物種多樣性 (2) 為海洋食物鏈中氮和其他營養元素來源 (3) 有助於固碳和氮以及其他營養成分回收 (4) 蘊含豐富漁業資源 (5) 保護海岸線不受海浪的侵襲和降低颱風帶來的破壞。珊瑚礁是由一群會形成碳酸鈣骨骼的石珊瑚所形成的，早在三疊紀中期石珊瑚便出現在地

球上，歷經了數次大滅絕與氣候變遷、海平面變化生存至今 (Stanley, 2003)，表現出極高的適應力與生存能力。石珊瑚經過數百至數萬年的生長與死亡，為龐大複雜的珊瑚礁生態系建立最堅固的基礎，成為無數海洋生物的棲地以及幼苗的避風港。石珊瑚與蟲黃藻的共生系統能高效的讓養分回收與循環，並在貧營養水域中成長，為原本無生產力的貧營養水域成為生物多樣性熱點 (De Goeij et al., 2013; Rådecker et al., 2015; Roff, and Mumby PJ, 2012; Hoegh-Guldberg, 1999)。

2. 珊瑚礁面臨問題之一海洋污染物

目前世界上珊瑚礁覆蓋率呈現下降的趨勢，導致的原因為：(1) 人為漁業捕撈行為的破壞 (2) 盜採珊瑚 (3) 過度開發海岸線 (4) 人為活動造成的全球暖化導致海水溫度升高 (5) 人類日常生活產生的海洋污染物 (6) 颱風帶來的破壞與海浪衝擊 (7) 珊瑚的掠食者，如棘冠海星及白結螺 (8) 珊瑚疾病等，科學家估計約有 30% 的珊瑚礁已經遭受到嚴重的破壞，到 2050 年 90% 的珊瑚礁可能會消失 (Burke et al., 2004; De'ath et al., 2012; Hughes et al., 2018; Hughes et al., 2003)。這些眾多原因當中，海洋污染物對海洋造成的威脅也逐漸升溫當中，海洋污染物包含肉眼可見的海洋垃圾、農業、工業及生活產生的廢棄物注入到海裡、船舶的燃油洩漏甚至是空氣污染由大氣進入海洋等，這些主要都是人為的行為所產生，其中海水中防曬油 (乳) 中紫外線過濾劑成分造成珊瑚產生白化的現象而導致死亡，成為目前討論的熱門議題之一。

3. 防曬油 (乳) 與紫外線過濾劑

防曬油 (乳) 為了要保護人類的皮膚不受陽光的傷害並降低罹患皮膚疾病的風險 (Mancuso, 2017)，必須添加紫外線過濾劑 (ultraviolet filters) 才能有效保護肌膚避免受到紫外線的傷害，根據紫外線的波長可以分為 UVA、UVB 與 UVC，UVA 波長最長 (400~320 奈米)，可以穿透建築物，並滲透皮膚到達真皮層造成傷害；UVB 波長較短 (320~280 奈米)，大量照射會刺激皮膚產生炎症；而 UVC 波長最短 (280~100 奈米)，會直接被雲層吸收所以不會到達地面。

紫外線過濾劑可分為有機與無機兩種，在市面上稱為化學性與物理性，前者是藉由將紫外線轉化成為熱能釋放來降低對皮膚的傷害，後者則是利用二氧化鈦 (TiO₂) 與氧化鋅 (ZnO) 的金屬粒子來反射、散射或折射紫外線來保護皮膚。每種紫外線過濾劑預防的紫外線波長不一，通常需要同時添加數種不同紫外線過濾劑才能完整的預防 UVA 與 UVB (Tanner, 2006)。目前廣為人知的紫外線過濾劑有 2-Ethylhexyl (2E)-3-(4-methoxyphenyl)prop-2-enoate (Octinoxate, 桂皮酸鹽)、(2-Hydroxy-4-methoxyphenyl)(phenyl)methanone (Oxybenzone, BP-3, 二苯甲酮)、2-Ethylhexyl 2-cyano-3,3-diphenylprop-2-enoate (Octocrylene, 奧克立林)、Bis-ethylhexyloxyphenyl methoxyphenyl triazine (Tinosorb S, BEMT)、Methylene bis-benzotriazolyl tetramethylbutylphenol

(Tinosorb M, MBBT)、1-(4-Methoxyphenyl)-3-(4-tert-butylphenyl)propane-1,3-dione (Butyl methoxydibenzoylmethane, Avobenzene, BMDM, 阿伏苯宗)、Diethylamino Hydroxybenzoyl Hexyl Benzoate (Uvinul A Plus, DHHB) 等。

4. 紫外線過濾劑對海洋生物及珊瑚的影響

紫外線過濾劑會由許多方式進入海洋中，除了因人們進行海域活動直接釋放到海水之外，在陸上使用的日常護理，在進行清潔後會進入污水處理廠，研究分析發現紫外線過濾劑較難被生物降解且多為低水溶性，因此污水處理廠無法百分之百除去水中的紫外線過濾劑，可能會有部分紫外線過濾劑流入海中 (Blair et al., 2013; Sánchez-Quiles, 2020) (Ramos et al., 2016)。有許多研究證實部分紫外線過濾劑對海洋生態具有毒性 (Lozano et al., 2020)，Oxybenzone (BP-3, 二苯甲酮) 的吸收光譜波長為 270 至 350 nm，研發出來後便廣泛的使用在防曬油 (乳) 或其他美妝用品中，但也逐漸被證實其對海洋環境可能造成的傷害，如：BP-3 從毒性鑑定發現為污水廠出水口附近海洋沉積物雌激素來源 (Marina et al., 2020)，在斑馬魚的暴露研究中發現有顯著影響雄性和雌性數量的比例 (Xu et al., 2021)，而在 BP-3 對不同珊瑚影響的先前研究中可以表明：(1) 不同種的珊瑚對於高濃度下 BP-3 的耐受性大不相同，且經過毒性測試確定 BP-3 其為海洋部分區域的雌激素活性來源 (Schlenk et al., 2005)。(2) 研究中有觀察到在 BP3 添加試驗下萼形柱珊瑚胚胎的表皮組織內出現異常骨化 (Ossification)，推測 BP-3 可能會誘導珊瑚的骨骼內分泌異常 (Downs et al., 2015)。(3) 高濃度的 BP-3 會造成珊瑚白化與死亡 (Conway et al., 2021; Downs et al., 2015; He et al., 2019)。

有部分紫外線過濾劑也被證實對水生生物沒有明顯急性毒性反應，如：Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazine (BEMT) 的吸收光譜波長為 280 至 400 nm，因其不但自身光穩定性極高，也會提高其他紫外線過濾劑的光穩定性 (Herzog et al., 2020) 而常和其他紫外線過濾劑一同添加使用。在高濃度 BEMT 的添加試驗下，對豐年蝦與海洋微藻的存活率和生長率與控制組沒有顯著差異 (Thorel et al., 2020)；斑馬魚胚胎孵化率與存活率在含有 BEMT 的沉積物環境中，也沒有顯著降低現象 (Lucas et al., 2021)，且 BEMT 已被證實不會釋放雌激素 (Ashby et al., 2001)，在對細枝鹿角珊瑚的毒性測試中，在濃度 1000 µg/L 下暴露濃度沒有毒性結果 (Stien et al., 2020)。

Butyl methoxydibenzoylmethane (BMDM) 的吸收光譜波長為 315 至 400 nm，因為其吸收光譜廣而被廣泛使用在防曬油 (乳) 中，BMDM 會誘導水蚤 (*Daphnia magna*) 代謝紊亂，以及顯著增加大型蚤的繁殖產量 (Boyd et al., 2020)。在 BMDM 的沉積物暴露毒性測試中，對紐西蘭泥蝸 (*Potamopyrgus antipodarum*)、黑蟲 (*Lumbriculus variegatus*)、血蠕蟲 (*Chironomus riparius*)、瘤擬黑螺 (*Melanoides tuberculata*) 在最高實驗乾重 50 mg/kg 下沒有毒性，且在 48 小時的沉積物接觸試驗中，斑馬魚 (*Danio rerio*) 胚胎在最高實驗乾重

1000 mg/kg 下沒有死亡 (Kaiser et al., 2012)。在萼形柱珊瑚的暴露實驗中，暴露濃度 516 $\mu\text{g/L}$ 下的珊瑚第 6 天開始出現白化，並且在暴露濃度 87 $\mu\text{g/L}$ 下珊瑚無顯著影響 (Fel et al., 2019)。在對細枝鹿角珊瑚的毒性測試中，在濃度 1000 $\mu\text{g/L}$ 下暴露濃度沒有毒性結果 (Stien et al., 2020)。

BEMT 和 BMDM 對珊瑚影響的研究較少，雖然以已知的資訊來說，兩者對於生物短期的影響普遍不明顯，但仍無法證明在長時間的暴露下是否會有生理上的改變或傷害。

四、研究目的

研究防曬油 (乳) 對海洋生物或海洋環境造成的影響紛紛出爐，且在一項為期 10 年的研究中表明，人們對於防曬油 (乳) 的使用量正在持續增加當中 (Peacey et al., 2006)，可以預期未來紫外線過濾劑也將持續流入海中，為保護沿海珊瑚礁的健康以及其生物多樣性，紫外線過濾劑對珊瑚的影響研究在海洋的永續發展上佔有重要位置。關於紫外線過濾劑對生物的影響研究有很多，但討論對象偏向集中部分紫外線過濾劑，如：BP-3、Octocrylene、2-Ethylhexyl (2E)-3-(4-methoxyphenyl)prop-2-enoate (octinoxate, 甲氧基肉桂酸辛酯) 和 (3E)-1,7,7-Trimethyl-3-[(4-methylphenyl)methylene]-2-norbornanone (4-MBC, 4-甲基亞苳基樟腦) 等，目前約有 45 種在全球被授權的紫外線過濾劑沒有相關的生物毒性測試 (Lozano et al., 2020)，而這些研究中有許多測試珊瑚在高濃度下的急性毒性反應和半致死濃度 (Lethal Concentration 50%, LC50)，目前許多研究在實驗室中使用的濃度較高，比較偏向於模擬「最壞的情況」，因此目前仍不清楚研究的濃度有多接近真實的珊瑚礁生態系統，因此對於珊瑚長時間生長在低濃度的紫外線過濾劑的研究較少。

在本實驗室的先前研究中，添加高濃度紫外線過濾劑試驗下，珊瑚因為死亡速度太快而無法觀察，這些紫外線過濾劑會對珊瑚造成什麼樣生理的影響，而無從得知當野外珊瑚在面臨這些紫外線過濾劑時的生理反應，因此低濃度的紫外線過濾劑試驗，能在珊瑚不會快速死亡的情況下，連續記錄與分析珊瑚的存活率、異常率、珊瑚顏色變化、光合作用效率、成長率等數據，從而得知野外珊瑚目前可能遭受的傷害或面對相關環境壓力時的生理反應。

本計畫使用珊瑚培養皿系統 (Coral-on-laboratory dish, CLD; Shikina et al., 2023) 進行低濃度紫外線過濾劑添加試驗，此系統可以使用少量珊瑚來製作大量研究樣本，並且所需的空間較以往使用水族缸系統進行珊瑚研究時更小，且能夠以微觀角度分析珊瑚的健康，如觸手活力和珊瑚蟲攝量變化，也可以在活體狀態下觀察到珊瑚組織細微的變化。

五、研究重點

利用 CLD 系統，在與紫外線過濾劑的環境濃度相似之濃度下培養隆起軸孔珊瑚與細枝鹿角珊瑚，並進行連續而詳細的生理狀態觀察，包含珊瑚片段存活率、組織異常率、顏色變化、共生藻光化學效率、重量成長變化、表面積成長變化、觸手身除程度以及珊瑚蟲食量計算等，來評判紫外線過濾劑對珊瑚的健康狀態影響。

六、預期目標

從 CLD 系統下培養珊瑚片段，觀察與紀錄隆起軸孔珊瑚和細枝鹿角珊瑚的健康變化，初步分析紫外線過濾劑對珊瑚組織或共生藻造成的影響，為未來進一步探討其對珊瑚細胞或 DNA 提供可行的研究方向。另外可將此結果做延伸討論，探討紫外線過濾劑在未來可能造成之危害以及相關濃度規範的訂定標準。

第一章 研究方法及過程

第一節 實驗物種

本實驗使用兩種珊瑚進行試驗，隆起軸孔珊瑚 (*Acropora tumida*) 與細枝鹿角珊瑚 (*Pocillopora damicornis*) (圖 1)。軸孔珊瑚科和鹿角珊瑚科在石珊瑚中為最主要且最佔優勢的造礁珊瑚物種 (Veron and Staffordsmith, 2000)，可以說是珊瑚礁功能健全與否的重要生態指標，這類的珊瑚有較高的生長速度 (Cunning et al., 2018)。

隆起軸孔珊瑚屬於刺胞動物門 (Cnidaria)、六放珊瑚綱 (Hexacorallia)、石珊瑚目 (Scleractinia)、軸孔珊瑚科 (Acroporidae)、軸孔珊瑚屬 (*Acropora*) 的珊瑚，珊瑚外觀為不規則分枝形，通常基底為表覆形，分枝為頂端漸尖的圓筒形，且有粒狀突出，通常生長在珊瑚礁或岩礁淺海，群體呈黃綠、褐色或綠褐色 (戴, 2010)。軸孔珊瑚屬 (*Acropora*) 擁有最多樣化和最豐富的物種分類，其增長率高對珊瑚礁生長、島嶼形成、海岸保護和漁業支持都有很大貢獻，有研究指出軸孔珊瑚屬的某些壓力反應基因，使得牠們能夠應對海洋溫度升高，並在世界各地分散和繁衍 (Shinzato et al., 2021)。

細枝鹿角珊瑚屬於刺絲胞動物門 (Cnidaria)、六放珊瑚綱 (Hexacorallia)、石珊瑚目 (Scleractinia)、鹿角珊瑚科 (Pocilloporidae)、鹿角珊瑚屬 (*Pocillopora*) 的珊瑚，珊瑚外觀為分枝形，大分枝上有許多小分枝，且有疣狀突起。通常生長在淺海礁石表面，顏色呈墨綠、粉紅和黃色，廣泛分布於印度、太平洋海域，在台灣北、東、南以及各離島皆可看到 (戴, 2010)。P. damicornis 對白化有更強的防禦能力，且比大多數的珊瑚物種能更適應環境變化 (Carpenter et al., 2008)。

國立臺灣海洋大學海洋環境與生態研究所識名信也教授，在新北市海洋資源復育園區的半開放九孔池中，培育大量的細枝鹿角珊瑚以及隆起軸孔珊瑚，培育的珊瑚群體皆有紀錄珊瑚群體及珊瑚母體來源，因此在取得珊瑚樣本上有很高的便利性與機動性，在未來也可以依照實驗需求挑選編號相同或不同的珊瑚群體進行實驗。

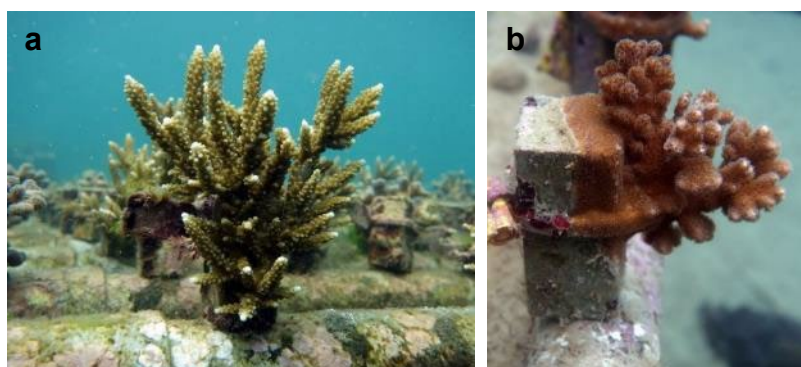


圖 1：隆起軸孔珊瑚與細枝鹿角珊瑚外觀示意圖

a 隆起軸孔珊瑚，b 細枝鹿角珊瑚

第二節 紫外線過濾劑

本實驗使用 3 種紫外線過濾劑 Butyl methoxydibenzoylmethane (BMDM, Sigma-Aldrich, USA) 和二苯甲酮 Benzophenone-3 (BP-3, Sigma-Aldrich, USA)、Bis-Ethylhexyloxyphenol Methoxyphenyl Triazine (BEMT, Sigma-Aldrich, USA) 3 種藥品皆無法溶解在海水中，所以使用丙酮當作溶劑溶解 3 種紫外線過濾劑 (Thorel, 2020) 製作 stock 後進行實驗。

第三節 以培養皿中培養珊瑚系統(coral-on-a-laboratory dish, CLD)

3-1 CLD 與樣本製備

CLD 可在培養皿中培養如細枝鹿角珊瑚、隆起軸孔珊瑚、五邊角菊珊瑚等 7 種珊瑚 (Shikina et al., 2023)。珊瑚可以附著在培養皿上，培養 3 個月以上且維持生理功能，如：成長、骨頭生成、與共生藻共生及無性生殖等，相較於水族缸系統，CLD 可以節省大量空間與設備成本，也能增加更多實驗樣本數，此外利用 CLD 培養珊瑚進行實驗，有許多優點，例如：能清楚觀察到珊瑚蟲的細微反應、珊瑚無性生殖、成長變化、觸手是否伸出、共肉膨脹或萎縮及珊瑚顏色變化等 (Shikina et al., 2023)。

挑選深色健康的隆起軸孔珊瑚與細枝鹿角珊瑚，各三個不同群體，將隆起軸孔珊瑚剪成 1 cm × 1 cm × 0.5 cm 的片段、細枝鹿角珊瑚剪成 0.5 cm × 0.5 cm × 0.5 cm 的片段，使用水下膠 (INSTANT GLUE, ISTA, Taiwan) 將三個片段固定在直徑 9 公分之培養皿內，使用鹽度 35 ppt 且經 0.22 μm 濾杯過濾之人工海水，分別培養隆起軸孔珊瑚(70 ml)、細枝鹿角珊瑚(50 ml)，再封上 parafilm 防止水分蒸發，培養在單溫層培養箱內，溫度維持在 25 °C，光照使用 LED 光源 (Xmini, Illumagic, Taiwan)，強度控制在 60-80 μmol/m²/s，光週期為 12 小時光照和 12 小時黑暗 (圖 2)。

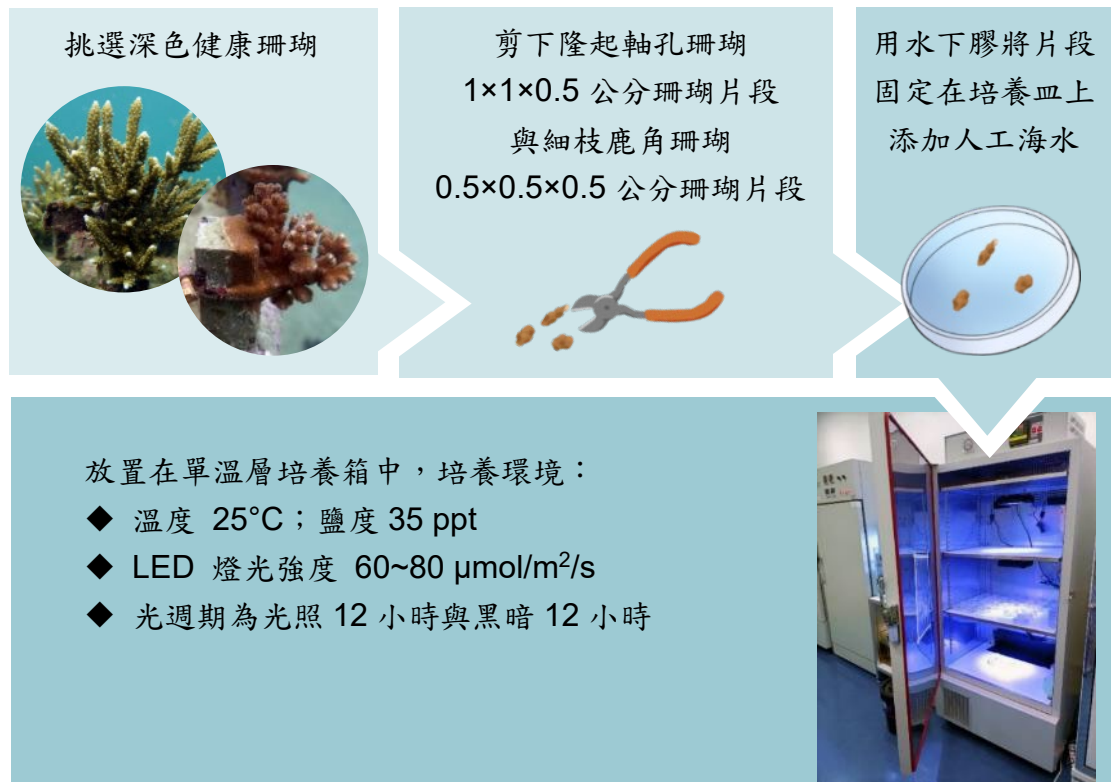


圖 2：培養皿中培養珊瑚系統 (CLD)

3-2 實驗流程

紫外線過濾劑添加試驗一共進行 8 週，試驗時間參考先前低濃度 BP-3 研究 (Wijgerde et al., 2020) 以及 CLD 飼育珊瑚的成長結果 (林等人, 2022; 張等人, 2020; Shikina et al., 2023)，實驗中控制組與所有實驗組分別有 3 個培養皿，9 個來自同一珊瑚群體的片段，隨機且平均放置在 3 個培養皿中 (n=27) 進行實驗 (圖 3)。

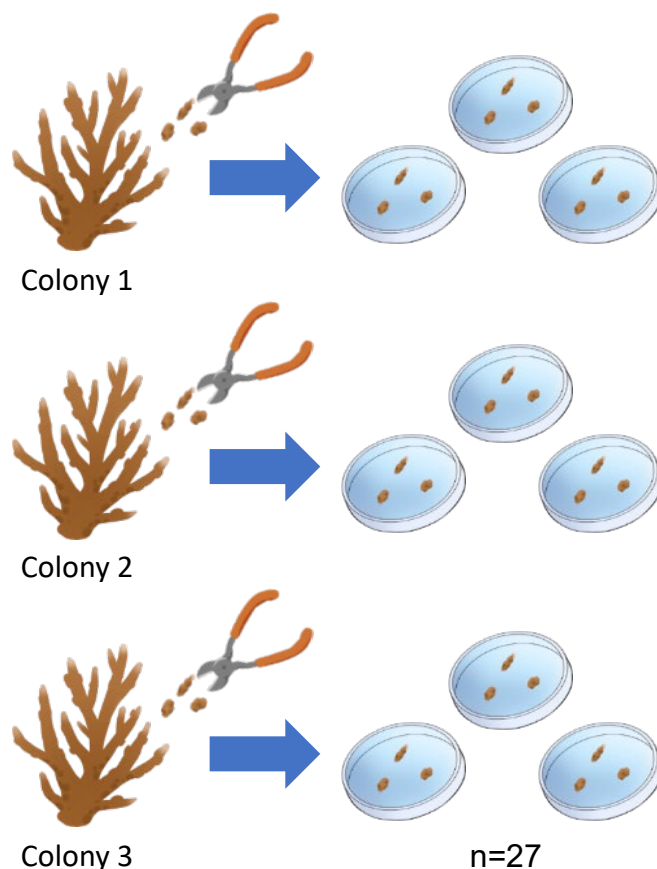


圖 3：控制組與實驗組樣本製備示意圖

BP-3、BMDM 與 BEMT 添加濃度分別為 1 和 10 $\mu\text{g/L}$ (參考先前研究中 BP-3 環境濃度，且確認不會導致珊瑚死亡 (He et al., 2019; Kung et al., 2018))。1 組控制組與 4 組實驗組，每組 3 個群體各 3 個培養皿 (n=27)。所有實驗使用相同 3 個珊瑚群體。

在第 0 天實驗開始前，使用數位相機 (RX100, SONY, Japan) 拍照記錄珊瑚片段在解剖顯微鏡下組織狀態，量測共生藻光系統II的光化學效率，以及以浮力秤重紀錄珊瑚片段與培養皿總重量。實驗過程中，每日觀察珊瑚片段的組織變化，加入藥劑後每隔 2 週進行拍照紀錄，測量共生藻光系統II的光化學效率與浮力秤重珊瑚片段與培養皿總重量，在第 4 週 (第 28 天) 和第 8 週 (第 56 天) 做珊瑚蟲攝食量測試。每週第 2 天和第 5 天進行換水與餵食豐年蝦。(圖 4)。

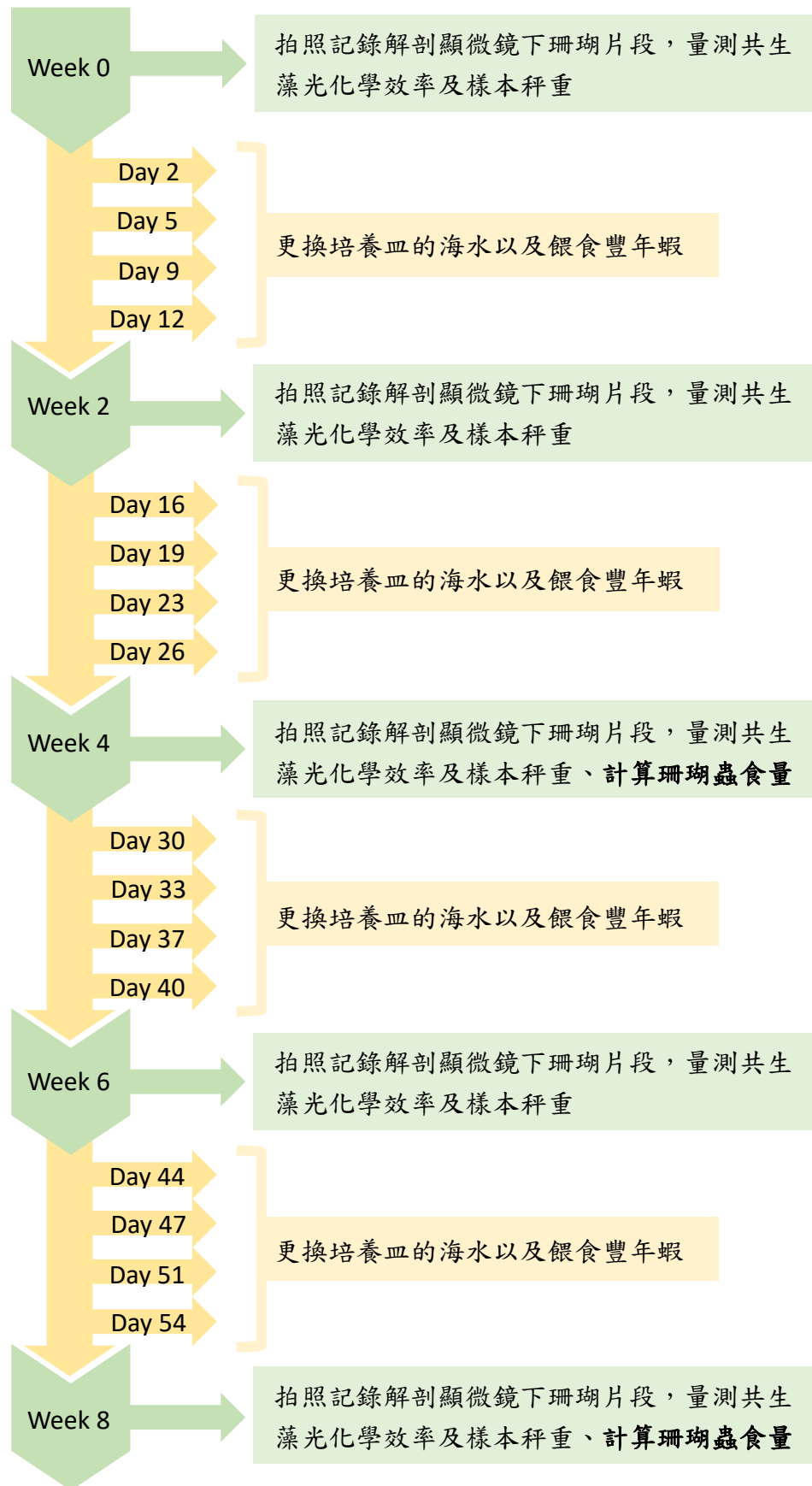


圖 4：實驗流程

第四節 珊瑚健康狀態評估方式

在過去的研究中，紫外線過濾劑對珊瑚影響研究多集中在探討珊瑚的存活率和白化與否。為了可以更詳細分析其對珊瑚可能造成的影響，本次實驗增加了珊瑚健康狀態分析：(1)藉由異常分析組織的完整性，(2)使用珊瑚的面積成長變化與重量成長變化來分析珊瑚組織與骨頭的成長，(3)使用光化學效率來分析珊瑚體內共生藻的健康狀態。

4-1 珊瑚片段的存活率

珊瑚當受到環境壓力時，可能會產生不正常的生理狀態或其他特徵，甚至死亡。觀察與紀錄珊瑚片段在第 0 週、第 2 週、第 4 週、第 6 週與第 8 週的存活數量。珊瑚片段存活的定義為：片段上有存活的珊瑚蟲，即視此片段存活（圖 5）。將存活與死亡定義為 1 與 0，計算存活率方法如下：

$$\text{存活率 (\%)} = \frac{\text{存活的珊瑚片段數量}}{\text{原有的珊瑚片段數量}} \times 100$$

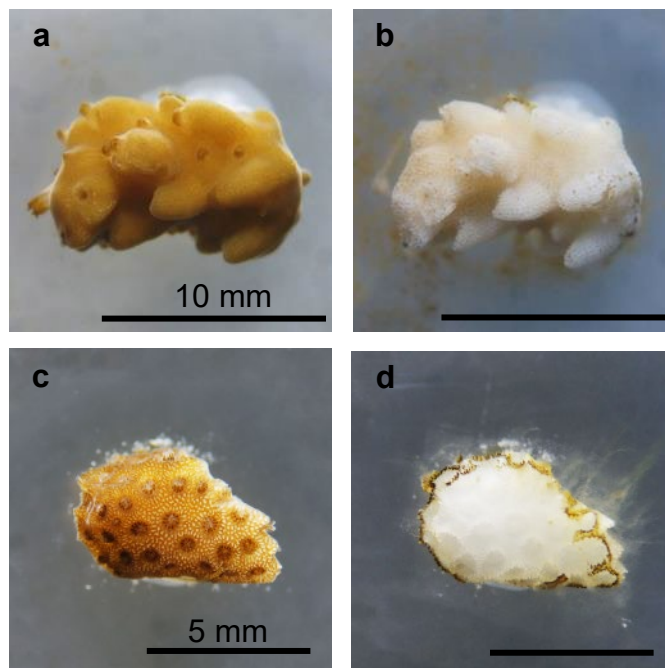


圖 5：珊瑚片段的存活與死亡示意圖

a 隆起軸孔珊瑚存活的片段，b 隆起軸孔珊瑚死亡的片段，c 細枝鹿角存活的珊瑚片段，d 細枝鹿角珊瑚死亡的片段。

4-2 珊瑚片段的異常率

珊瑚當受到環境壓力時，可能會產生不正常的生理狀態或其他特徵。觀察與紀錄珊瑚片段在第0週、第2週、第4週、第6週與第8週的異常情形。珊瑚片段的異常定義為：片段上出現共肉萎縮、消失或組織剝落、珊瑚蟲從骨頭脫落現象，不論出現的面積大小皆視為片段異常（圖6）。將正常與異常定義為1與0，計算異常率方法如下：

$$\text{異常率 (\%)} = \frac{\text{異常的珊瑚片段數量}}{\text{原有的珊瑚片段數量}} \times 100$$

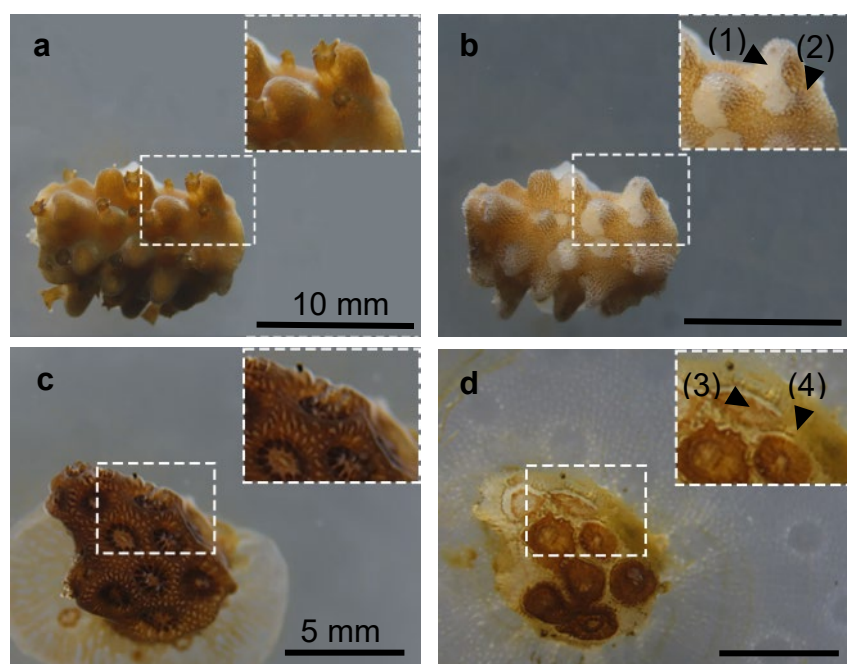


圖 6：珊瑚片段的正常組織與出現異常的組織示意圖

a 隆起軸孔珊瑚健康的片段，珊瑚組織完整；b 隆起軸孔珊瑚異常的片段，箭頭為(1)珊瑚組織消失以及(2)共肉萎縮露出骨頭；c 細枝鹿角珊瑚健康的片段，珊瑚組織完整；d 細枝鹿角珊瑚異常的片段，箭頭為(3)珊瑚蟲脫落以及(4)共肉萎縮露出骨頭。

4-3 觸手張開程度分析

珊瑚蟲觸手張開的程度，可以反映珊瑚的攝食和生理狀態。每天觀察觸手打開的程度，每隔 1 週拍照 1 次進行分析，共記錄 8 次。第 0 天，統計各珊瑚片段上珊瑚蟲數量，分析照片記錄中未伸出觸手的珊瑚蟲數量及定量觸手及珊瑚蟲伸展的程度（圖 7）

$$\text{觸手打開的程度} = \frac{\text{珊瑚蟲觸手伸出等級總和}}{\text{珊瑚蟲總數}}$$

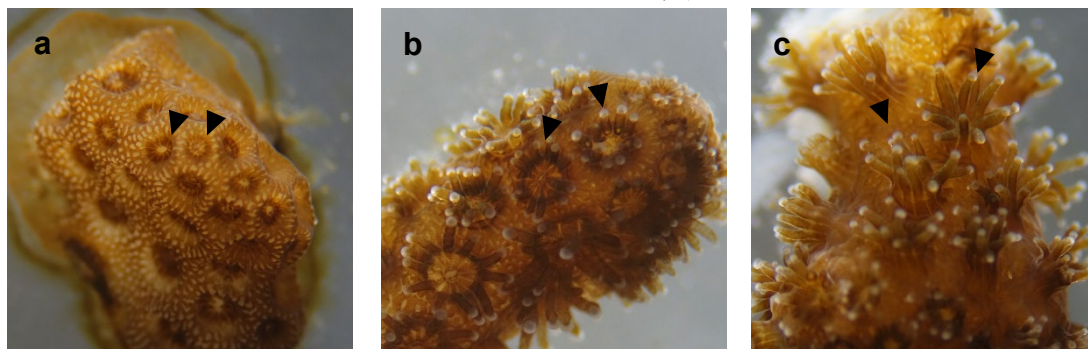


圖 7：細枝鹿角珊瑚觸手打開程度分析示意圖

a 觸手完全萎縮，可以看到骨頭的隔板，定義為 0 級。b 觸手頂端伸出，定義為 1 級。c 為珊瑚蟲完全伸展出來，可以看到珊瑚蟲的體腔，定義為 2 級。

4-4 珊瑚顏色變化分析 (RGB 色彩模型分析)

正常健康的珊瑚通常有鮮豔的顏色，而珊瑚白化或受到壓力影響時，顏色可能變得較淡或出現異常。參考先前研究中，使用 RGB 色彩模型分析珊瑚的顏色變化分析即白化程度。RGB 為光三原色色彩模型，以紅、綠、藍三個顏色組成，每個顏色數值範圍為 0-255，當三個顏色數值皆為 0 時代表黑色 (R=G=B=0)，反之當三個顏色數值皆為 255 時則為白色 (R=G=B=255) (Hirayama et al., 2017)。分析方法為使用數位相機在第 0 週、第 2 週、第 4 週、第 6 週與第 8 週，拍攝解剖顯微鏡下珊瑚片段外觀顏色，每次拍攝時解剖顯微鏡維持同一燈光亮度及倍率，並且使用黑色塑膠瓦楞紙製作遮光罩將顯微鏡避光 (圖 8a)，以確保照片結果不受環境光影響。將照片匯入 Adobe Photoshop 後，使用魔術棒工具與套索工具圈選珊瑚片段存活範圍，接著使用色皆分布圖功能，分析珊瑚片段的 RGB 色彩組成 (圖 8b)，使用第 0 天珊瑚片段面積範圍分析第 2、4、6、8 週之珊瑚片段照片 (圖 8c,d,e,f)，經過下方公式計算顏色變化百分比，所得百分比越高代表珊瑚片段顏色變越深，百分比越低則表示顏色變白，珊瑚白化程度越高。

$$\text{顏色變化 (\%)} = \frac{\text{Total RGB (Week 0)} - \text{Total RGB (Week n)}}{\text{Total RGB (Week 0)}} \times 100$$

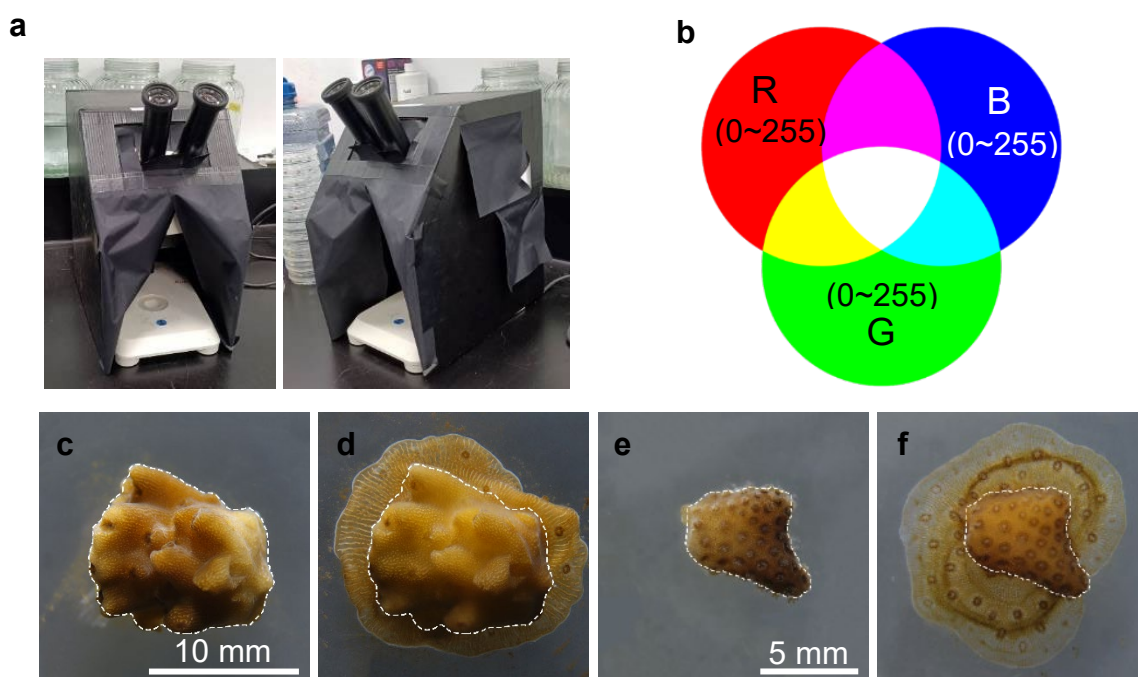


圖 8：RGB 光色彩模型與分析珊瑚顏色變化

a 解剖顯微鏡的遮光罩外觀；b 為 RGB 色彩模型，R=紅色、G=綠色、B=藍色，三個數值皆有 0-255，當 RGB 皆為 0 (R, G, B=0, 0, 0) 時為白色，RGB 皆為 255 (R, G, B=255, 255, 255) 則為黑色；c 為隆起軸孔珊瑚第 0 天分析顏色變化，d 為隆起軸孔珊瑚第 8 週分析顏色變化，e 為細枝鹿角珊瑚第 0 天分析顏色變化，f 為細枝鹿角珊瑚第 8 週分析顏色變化，虛線為分析顏色變化的範圍。

4-5 珊瑚組織內共生藻光系統II光化學效率變化分析

珊瑚體內具有共生藻，共生藻藉由光合作用將陽光轉化為能量，並且提供珊瑚所需的養分，測定光化學效率可以確定共生藻是否正常運作。測量並記錄珊瑚體內共生藻在第 0 週、第 2 週、第 4 週、第 6 週與第 8 週的光系統II光化學變化。測量方法為將待測量的樣本靜置在黑暗的環境中 30 分鐘以上，接著使用 Pulse-amplitude modulated (PAM, Heinz Walz GmbH, JUNIOR-PAM, Germany) 藉由紅光在黑暗的環境下，隨機挑選珊瑚片段上存活組織範圍內的兩個位置點(圖 9)， F_t 值固定為 240 ± 30 ，測量光系統II的光化學效率 (PSII photochemical efficiency, F_v/F_m)，將兩個數據的平均，即視為此一片段的光系統II的光化學效率。

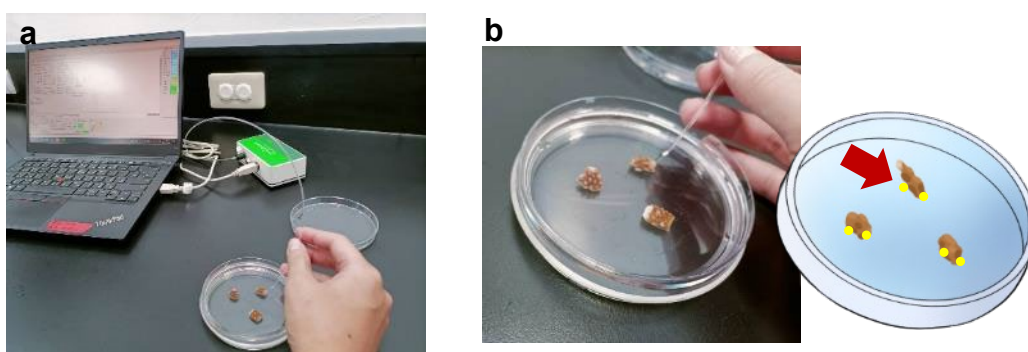


圖 9：量測共生藻光化學效率示意圖

A Pulse-amplitude modulated 使用示意圖，b 隨意挑選珊瑚片段上的任意 2 個位置做量測，該兩點平均後的數值為該片段共生藻光化學效率。

4-6 珊瑚片段的表面積成長倍率

珊瑚片段附著在培養皿上，才能擴展其組織及產生新的碳酸鈣骨骼，珊瑚片段的面積增加，代表珊瑚有成長。在解剖顯微鏡下拍攝在第 0 週、第 2 週、第 4 週、第 6 週與第 8 週的珊瑚片段，將照片匯入 Adobe Photoshop 後使用魔術棒工具與套索工具圈選珊瑚片段存活組織的範圍，接著使用度量紀錄功能，依照顯微鏡倍率設定畫素與公分的單位換算後，分析珊瑚片段被圈選的面積大小(圖 10)。計算珊瑚片段面積成長倍率的方法如下：

$$\text{面積成長倍率 (\%)} = \frac{\text{第 } n \text{ 週 珊瑚片段面積}}{\text{第 } 0 \text{ 週 珊瑚片段面積}}$$

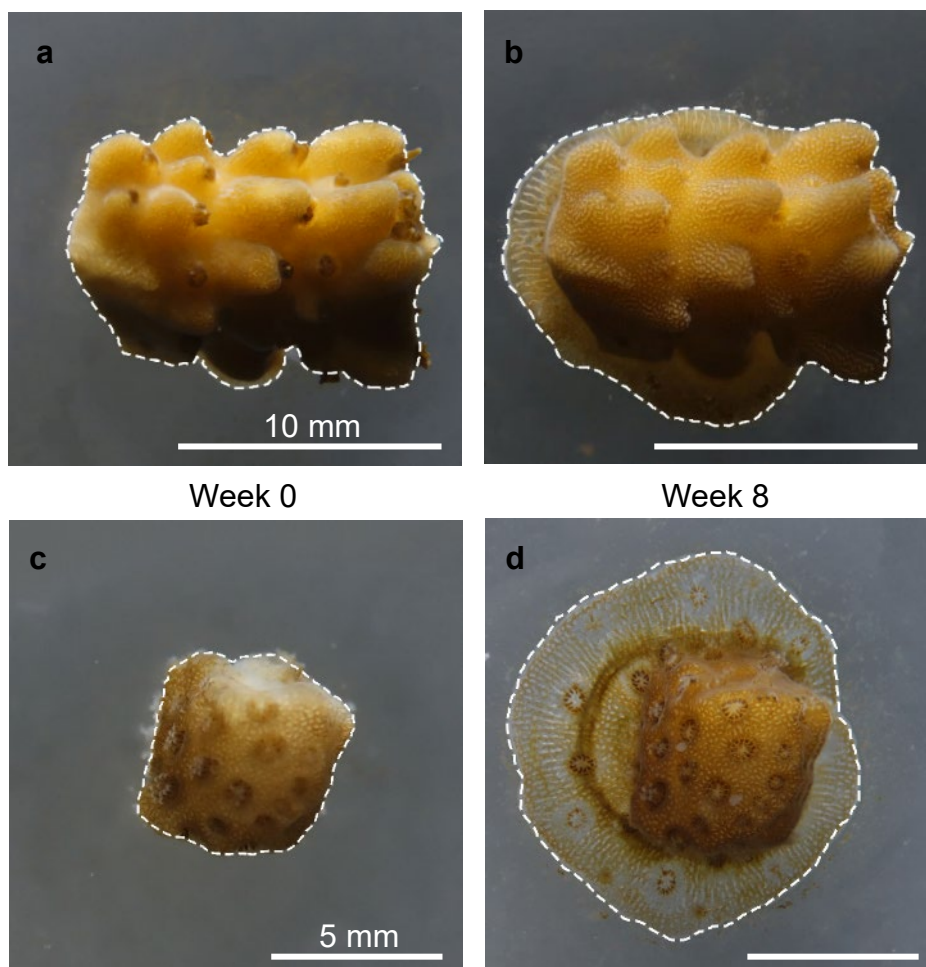


圖 10：面積成長倍率分析示意圖

虛線為使用 Adobe Photoshop 魔術棒工具與套索工具圈選珊瑚片段存活組織的範圍，用於分析珊瑚片段的面積大小。a、b 隆起軸孔珊瑚，分別為第 0 週和第 6 週的外觀；c、d 細枝鹿角珊瑚，分別為第 0 週和第 8 週的外觀

4-7 珊瑚片段的重量成長倍率

珊瑚片段附著在培養皿上，才能擴展其組織及產生新的碳酸鈣骨骼，珊瑚片段重量增加，代表珊瑚有成長。將分析天秤（Fisherbrand Analytical Series, UK）放在木製單層櫃上方，櫃內放置裝滿過濾人工海水的玻璃缸，櫃上方木板挖洞對準分析天秤下方的吊鉤，另準備一條釣魚線，在頭尾各綁上一個塑膠勾環，一端掛上分析天秤下的吊鉤，另一端可固定培養皿，在釣魚線下方約 1/3 位置處用中通圓鉛塊與長條形太空豆使線呈現直線狀態（圖 11），完成秤重準備。在第 0 週、第 2 週、第 4 週、第 6 週與第 8 週秤量培養皿與珊瑚重量，秤重前將培養皿內的海水倒掉，培養皿固定在塑膠勾環後放入玻璃缸中，靜待分析天秤數值平衡後記錄培養皿與珊瑚片段的重量，每一培養皿皆重複秤重三次，將三次數據平均後，視為此培養皿與珊瑚片段的重量。珊瑚片段重量成長倍率計算方式如下：

$$\text{重量成長倍率 (\%)} = \frac{\text{第 } n \text{ 週 珊瑚片段重量}}{\text{第 } 0 \text{ 週 珊瑚片段重量}}$$

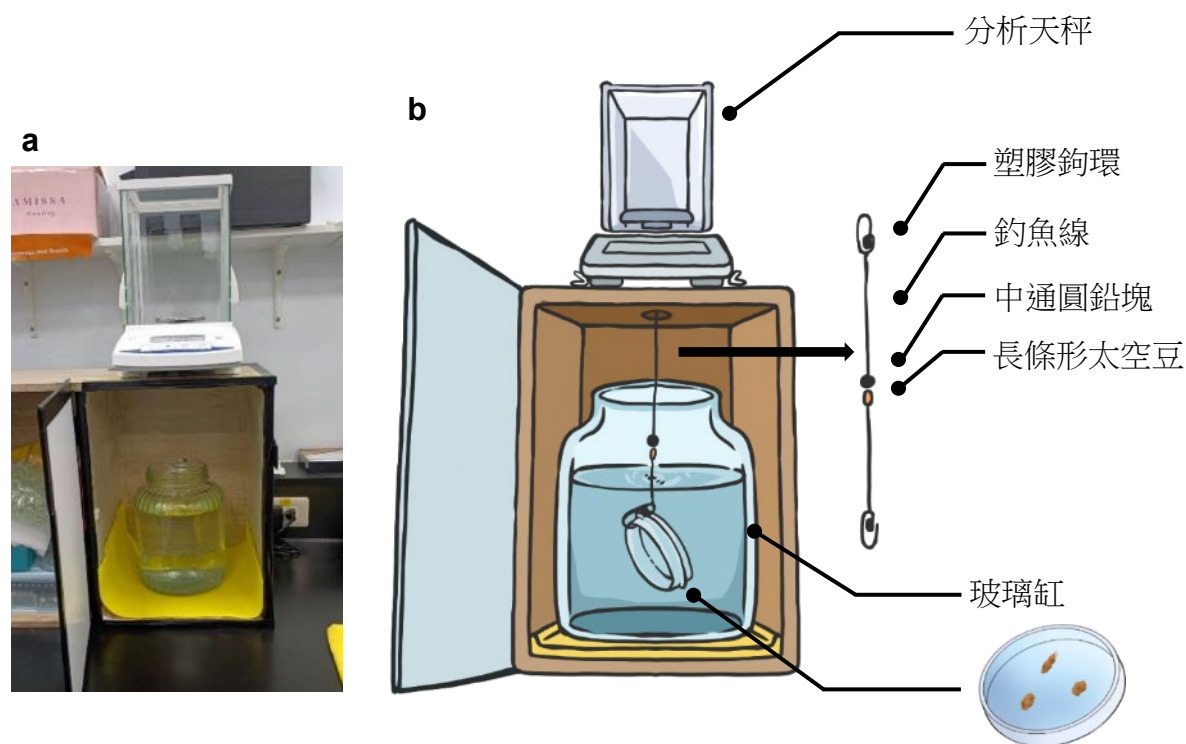


圖 11：浮力秤重裝置示意圖

a 為浮力秤重裝置實用示意圖，b 為裝置各部件示意圖。

4-8 珊瑚蟲食量分析

珊瑚蟲攝食，可視為珊瑚活動力指標之一，在第 4 週與第 8 週分析珊瑚蟲食量，從每盤培養皿的三個片段中隨機挑選一個片段，在餵食豐年蝦前使用自製餵食罩包圍片段，計數 100 隻豐年蝦後加入餵食罩內，靜置 3 小時將餵食罩內剩餘之豐年蝦取出並再次計數，同時計算當下珊瑚片段上具有攝食功能之珊瑚蟲數量。珊瑚蟲食量分析方式如下：

$$\text{珊瑚蟲食量} = \frac{100 - \text{剩餘豐年蝦數量}}{\text{珊瑚蟲數量}}$$

第五節 統計方法

數據使用 SPSS 統計軟體 (IBM SPSS Statistic Data Editor) 進行 one-way ANOVA 分析，若數據沒有符合常態分佈則會使用 Kruskal-Wallis test 進行統計分析，若組內有顯著差異則會以 Tukey's multiple range test 進行事後檢定比較組間是否有顯著差異，顯著水準皆為 $P < 0.05$ 。所有數據以平均值 \pm 標準誤差 (mean \pm SE) 表示。

第二章 研究結果

第一節 三種紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚的影響

1-1 BMDM 對隆起軸孔珊瑚的影響

在不同濃度的 BMDM 下隆起軸孔珊瑚存活率達 93%，且珊瑚片段皆有附著在培養皿上，向外擴展出新的珊瑚組織(圖 12a)，培養 8 週珊瑚片段雖然有白化 (<20%)，但珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，代表珊瑚是健康的。濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 的 BMDM 實驗組，在第 4 週部分珊瑚片段出現死亡，第 8 週控制組的存活率為 100%；濃度 1 和 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組的存活率皆為 93% (圖 12b)。珊瑚片段的顏色變化結果顯示，控制組顏色變化在第 8 週相較於第 0 天白化 19%，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組則分別白化 9% 與 8% (圖 12c)。控制組與實驗在實驗 8 週後，其珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，顯示培養過程中，珊瑚是健康的 (圖 12d)。珊瑚組織表面積成長倍率分析中，控制組在第 8 週增加為原本的 2.1 倍，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.9 倍，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.65 倍 (圖 12e)，說明珊瑚在不同濃度的 BMDM 下珊瑚會生長增加組織的表面積。珊瑚重量成長倍率分析中，控制組在第 8 週重量為原本的 1.09 倍，濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 重量為原本的 1.08 倍，表示珊瑚能維持生長 (圖 12f)。在第 4 週與第 8 週量測珊瑚蟲食量中，控制組在第 4 週平均食量為 1.78 隻豐年蝦，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 平均食量分別為 1.95 隻與 1.29 隻；在第 8 週的控制組食量為 1.4 隻，BMDM 濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 平均食量分別為 1.37 隻與 1.36 隻 (圖 12g)。

異常率在分析時不納入已死亡片段，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第二週分別有 7% 與 15% 的珊瑚片段出現組織消失或萎縮情形，第四週出現異常的片段數量上升，分別為 15% 與 16%，在第 6 週異常率下降至 0% 與 8%，異常率下降原因除片段死亡外，原組織消失部分又繼續成長出新組織 (圖 13 a,b)

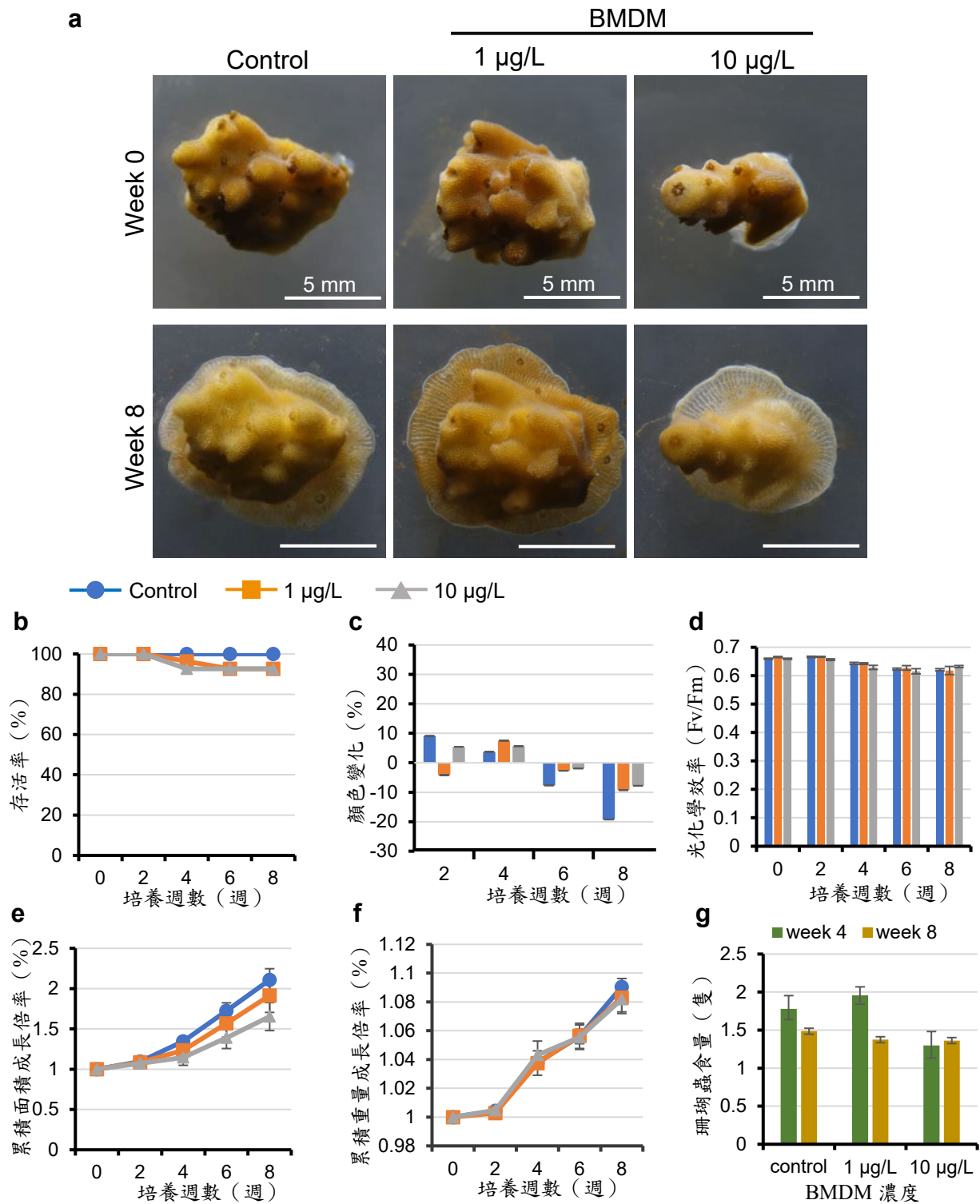


圖 12：BMDM 對隆起軸孔珊瑚的影響

a 為培養在含有 BMDM 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 外觀圖，b 為存活率，c 為珊瑚片段顏色變化，d 為共生藻光化學效率，e 累積面積成長倍率，f 為累積重量成長倍率，g 為珊瑚蟲食量。經 One-way ANOVA 統計結果顯示顏色變化、共生藻光化學效率以及珊瑚蟲食量在控制組與實驗組間沒有顯著差異，樣本數 $n=3$ colonies, 27 fragments。

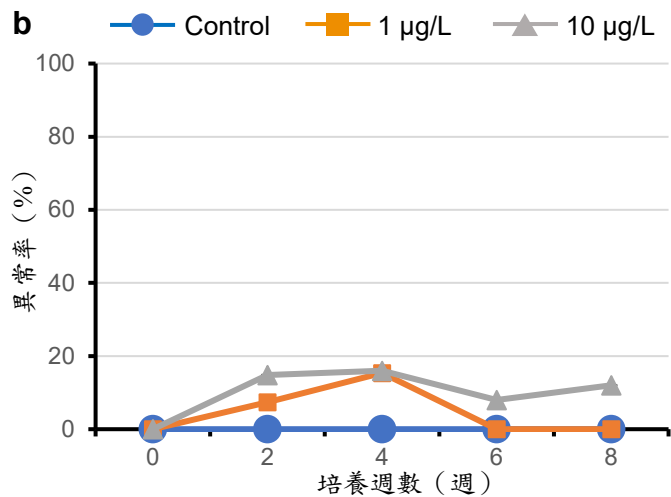
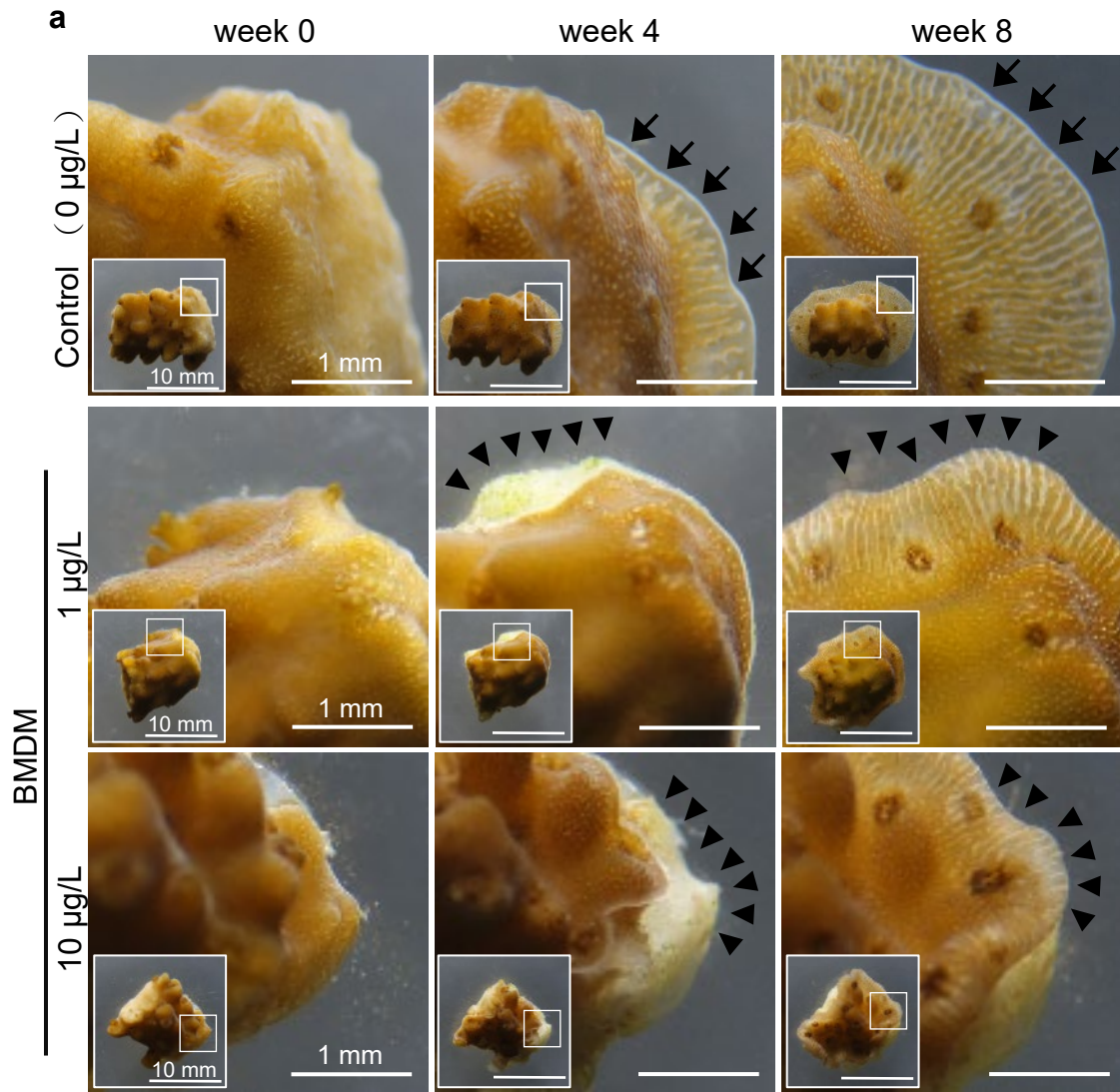


圖 13：BMDM 造成隆起軸孔珊瑚片段組織異常的外觀及比率

a 為控制組組織正常的珊瑚片段以及培養在含有 BMDM 濃度 1、10 µg/L 中出現異常的珊瑚片段外觀，箭頭表示組織消失、長出位置；b 為 BMDM 的珊瑚片段異常率。

1-2 BP-3 對隆起軸孔珊瑚的影響

在不同濃度的 BP-3 下隆起軸孔珊瑚存活率達 89%，且珊瑚片段皆有附著在培養皿上，向外擴展出新的珊瑚組織(圖 14a)，培養 8 週珊瑚片段有白化(>20%)，但珊瑚體內共生藻的光化學效率>0.6，且出現明顯組織異常，代表珊瑚的健康有受到影響。濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 的 BP-3 實驗組，在第 4 週部分珊瑚片段出現死亡，第 8 週控制組的存活率為 100%；濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組的存活率分別為 89% 與 85% (圖 14b)。珊瑚片段的顏色變化結果顯示，控制組顏色變化在第 8 週相較於第 0 天白化 19%，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組則皆為白化 23% (圖 14c)。控制組與實驗組在實驗 8 週後，其珊瑚體內共生藻光化學效率皆>0.6，顯示培養過程中珊瑚是健康的 (圖 14d)。珊瑚組織表面積成長倍率分析中，控制組在第 8 週增加為原本的 2.1 倍，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.7 倍，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 則僅增加為原本的 1.37 倍 (圖 14e)，說明珊瑚在不同濃度的 BP-3 下珊瑚會生長增加組織的表面積。珊瑚重量成長倍率分析中，控制組在第 8 週重量為原本的 1.09 倍，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 重量為原本的 1.07 倍與 1.06 倍，表示珊瑚能維持生長(圖 14f)。在第 4 週與第 8 週量測珊瑚蟲食量，控制組在第 4 週平均食量為 1.78 隻豐年蝦，BP-3 濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 平均食量分別為 1.45 隻與 1.57 隻。在第 8 週的控制組食量為 1.4 隻，BP-3 濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 平均食量則分別為 1.18 隻與 1.29 隻，經統計分析後第 4 週與第 8 週的實驗組和控制組間無顯著差異 (圖 14g)。

珊瑚片段的異常率在分析時不納入已死亡片段，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組未出現組織異常，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 在第 4 週有 24% 的珊瑚片段出現組織異常情形，在第 6 週時除異常片段死亡之外，因原組織消失部分長出新組織使異常率降低至 9% (圖 15a,b)。

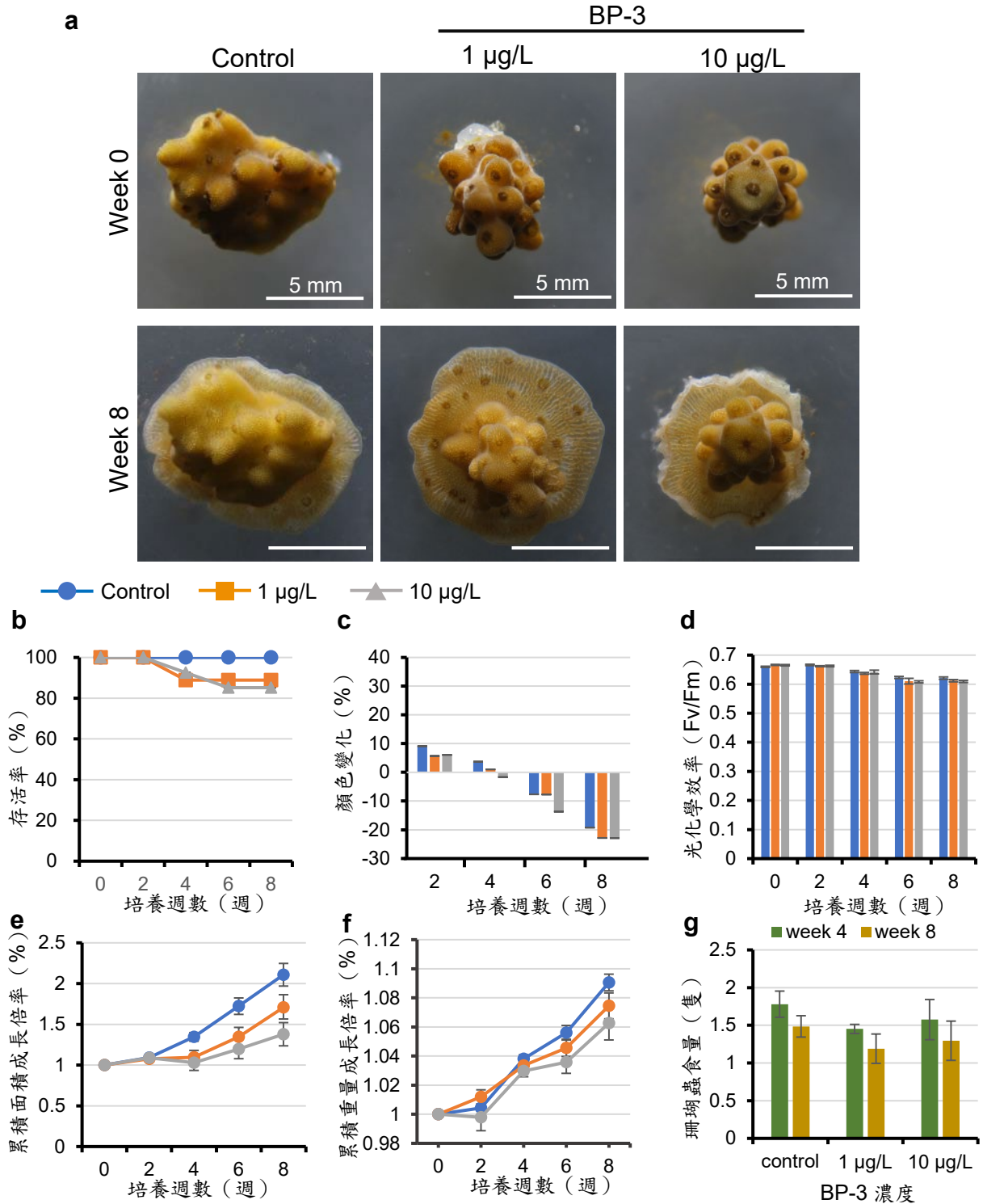


圖 14：BP-3 對隆起軸孔珊瑚的影響

a 為培養在含有 BP-3 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 珊瑚外觀圖，b 為存活率，c 為珊瑚片段顏色變化，d 為共生藻光化學效率，e 累積面積成長倍率，f 為累積重量成長倍率，g 為珊瑚蟲食量。經 One-way ANOVA 統計結果顯示顯示顏色變化、共生藻光化學效率以及珊瑚蟲食量在控制組與實驗組間沒有顯著差異，樣本數 $n=3$ colonies, 27 fragments。

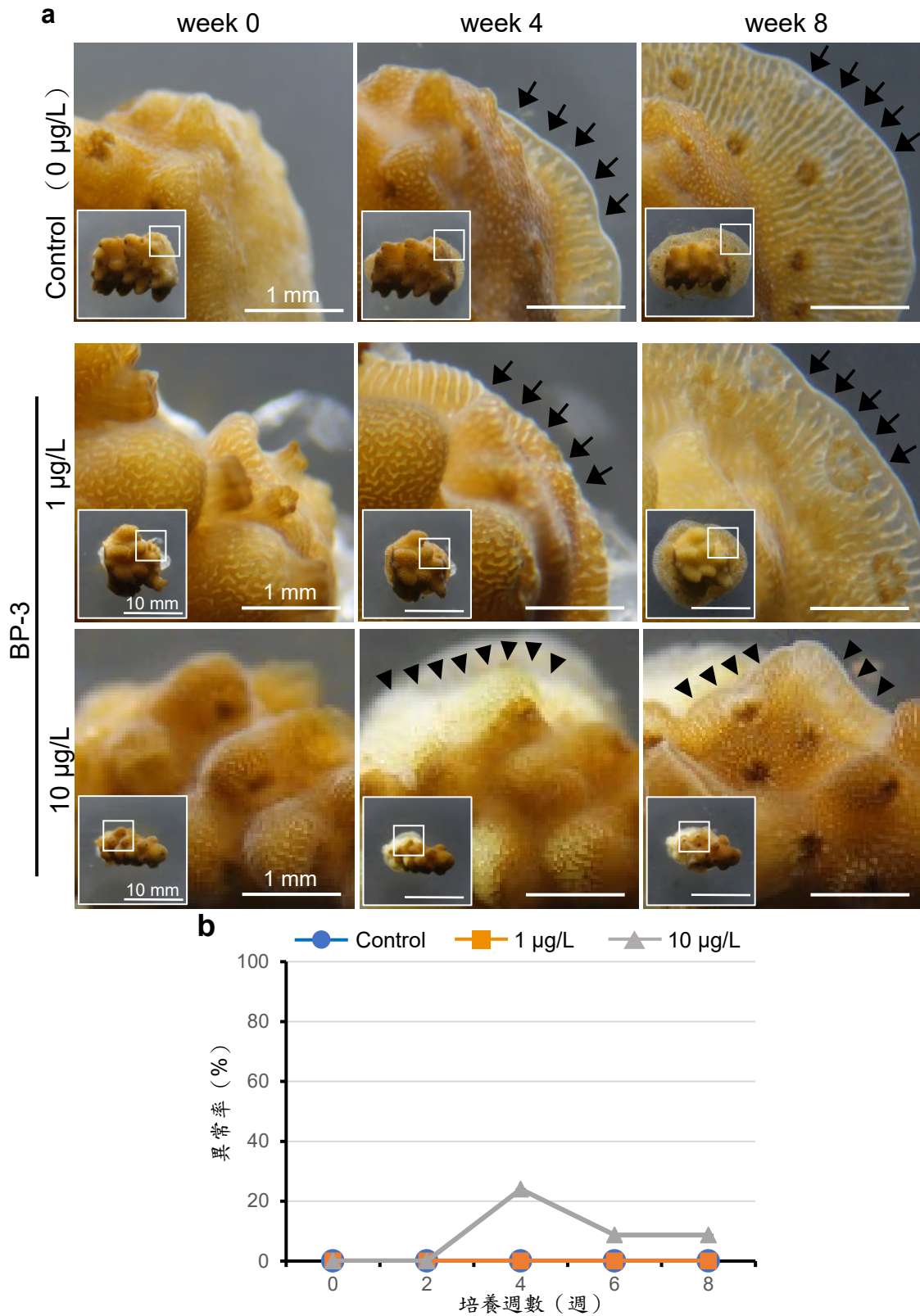


圖 15：BP-3 造成隆起軸孔珊瑚片段組織異常的外觀及比率

a 為控制組組織正常的珊瑚片段以及培養在含有 BP-3 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 中出現異常的珊瑚片段外觀，箭頭表示組織消失、長出位置；b 為 BP-3 的珊瑚片段異常率。

1-3 BEMT 對隆起軸孔珊瑚的影響

在不同濃度的 BEMT 下隆起軸孔珊瑚存活率達 100 %，且珊瑚片段皆有附著在培養皿上，向外擴展出新的珊瑚組織(圖 16a)，培養 6 週珊瑚片段雖然有白化(<20%)，但珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，代表珊瑚是健康的。BEMT 在 8 週內的實驗組皆沒有出現死亡片段(圖 16b)。珊瑚片段的顏色變化結果顯示，控制組顏色變化在第 6 週相較於第 0 天變深 2 %，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組則分別白化 8 %與 2 % (圖 16c)。控制組與實驗在實驗 6 週後，其珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，顯示培養過程中，珊瑚是健康的(圖 16d)。珊瑚組織表面積成長倍率分析中，控制組在第 6 週增加為原本的 1.8 倍，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 2.1 倍，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.9 倍(圖 16e)，說明珊瑚在不同濃度的 BMDM 珊瑚會生長增加組織的表面積。珊瑚重量成長倍率分析中，控制組在第 6 週重量為原本的 1.06 倍，濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 重量皆為原本的 1.07 倍，表示珊瑚能維持生長(圖 16f)。

BEMT 兩個濃度的實驗組至第 6 週皆未出現異常，珊瑚片段正常地向外生長組織與珊瑚蟲(圖 17a,b)。

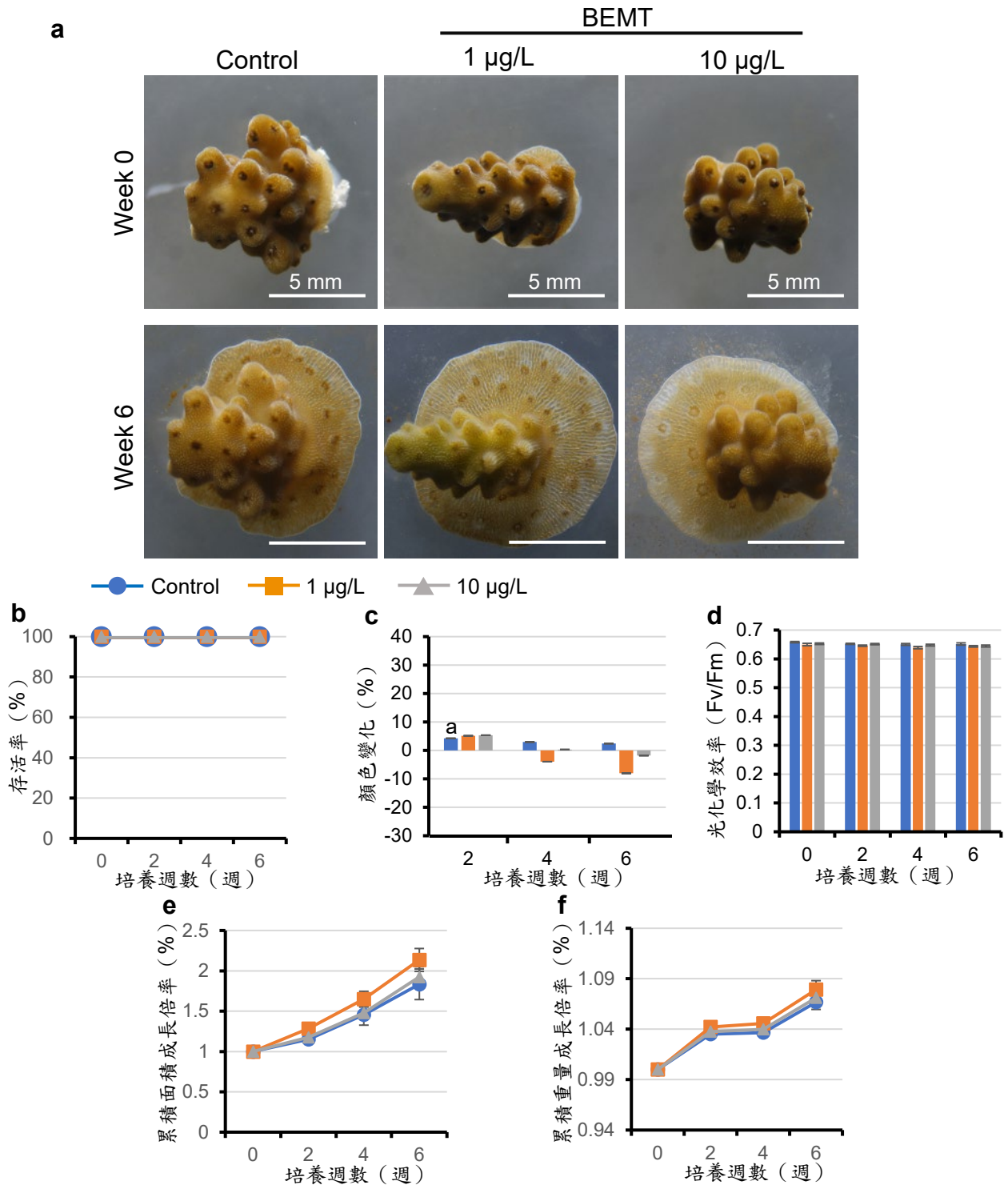


圖 16：BEMT 對隆起軸孔珊瑚的影響

a 為培養在含有 BEMT 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗外觀，b 為存活率，c 為珊瑚片段顏色變化，d 為共生藻光化學效率，e 累積面積成長倍率，f 為累積重量成長倍率。經 One-way ANOVA 統計結果顯示顏色變化以及共生藻光化學效率在控制組與實驗組間沒有顯著差異，控制組樣本數 n=3 colonies, 18 fragments，實驗組樣本數 n=3 colonies, 27 fragments。

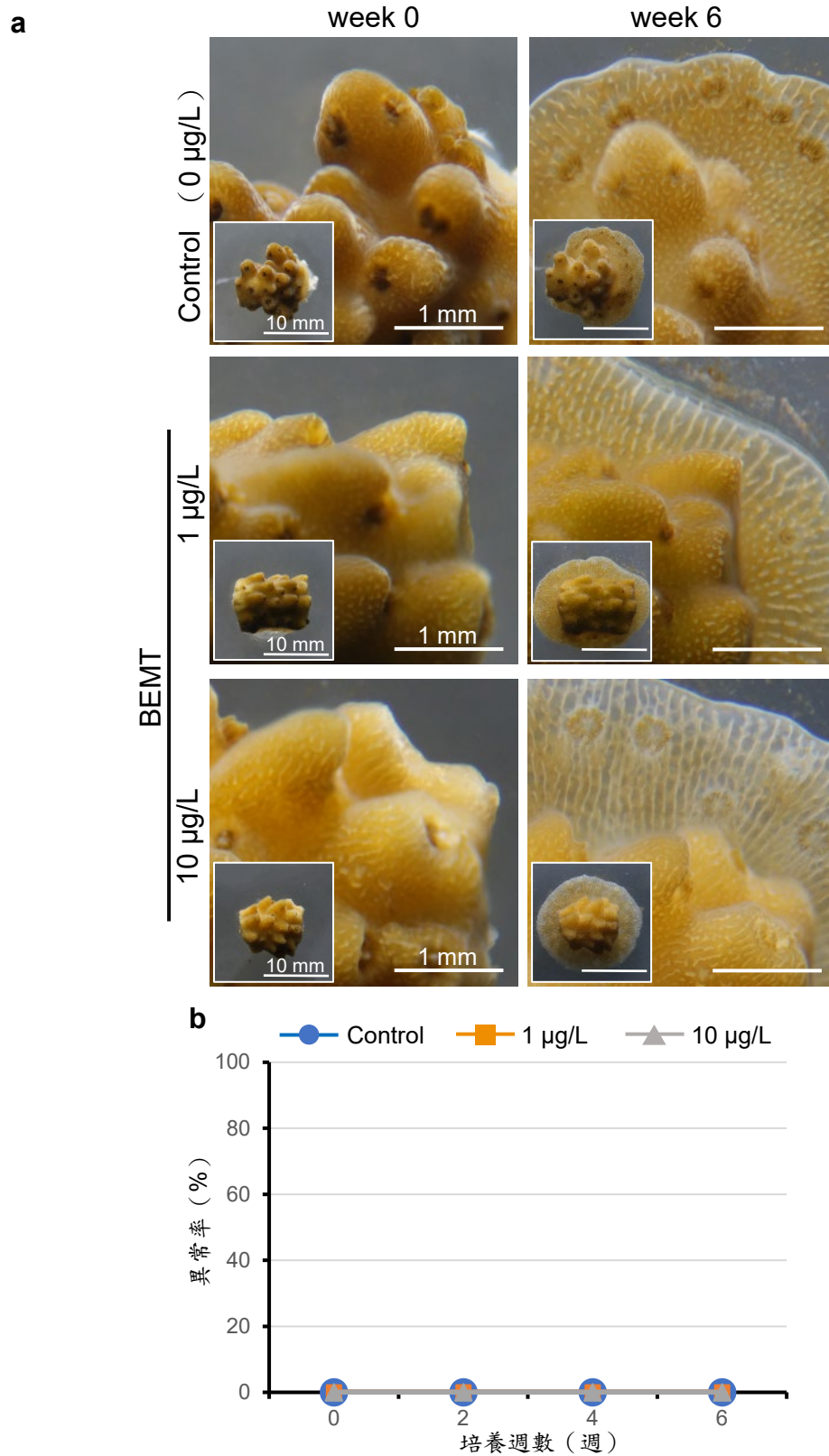


圖 17：BEMT 造成隆起軸孔珊瑚片段組織異常的外觀及比率

a 為控制組與培養在含有 BEMT 濃度 1、10 µg/L 的珊瑚片段外觀照片，b 為 BEMT 的珊瑚片段異常率結果。

第二節 三種紫外線過濾劑對細枝鹿角珊瑚的影響

2-1 BMDM 對細枝鹿角珊瑚的影響

在不同濃度的 BMDM 下細枝鹿角珊瑚存活率達 63%，且珊瑚片段皆有附著在培養皿上，向外擴展出新的珊瑚組織(圖 18a)，培養 8 週珊瑚片段雖然有白化 (<20%)，但珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，代表珊瑚是健康的。控制組與濃度 1 的 BMDM 實驗組，在第 4 週部分珊瑚片段出現死亡，第 8 週控制組的存活率為 64%；濃度 1 和 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組的存活率皆為 62% (圖 18b)。珊瑚片段的顏色變化結果顯示，控制組顏色變化在第 8 週相較於第 0 天白化 13%，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組則分別變深 3% 與白化 1% (圖 18c)。控制組與實驗在實驗 8 週後，其珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，顯示培養過程中，珊瑚是健康的 (圖 18d)。珊瑚組織表面積成長倍率分析中，控制組在第 8 週增加為原本的 3.89 倍，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 減少為原本的 0.95 倍，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.75 倍 (圖 18e)，說明珊瑚在不同濃度的 BMDM 下珊瑚會生長增加組織的表面積。珊瑚重量成長倍率分析中，控制組在第 8 週重量為原本的 1.01 倍，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 重量分別為原本的 1.03 倍與 1.01 倍，表示珊瑚能維持生長 (圖 18f)。

觸手伸出程度分析時不納入已死亡之珊瑚蟲。控制組與 BMDM 濃度 1 和 10 $\mu\text{g/L}$ 兩個實驗組中的珊瑚片段在實驗開始時接觸手皆有伸出(圖 19a)。控制組在第 0 週觸手伸出程度為 1.64，至第 6 週下降至 0.96，第 8 週則為 0.91。濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組觸手伸出程度第 0 週在 1.8，第 8 週下降至 1.41，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 0 週伸出程度為 1.54，第 8 週則為 1.25 (圖 19b)。珊瑚蟲食量分析在第 8 週控制組的珊瑚片段上之珊瑚蟲平均每隻約吃 1.15 隻豐年蝦，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組中珊瑚片段之珊瑚蟲平均食量分別為 1.27 隻與 1.13 隻 (圖 19c)。

珊瑚片段的異常率在分析時不納入已死亡片段，控制組在第 8 週出現 13% 的異常率，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組從第 2 週出現 4% 的異常率，持續上升至第 8 週異常率為 24%，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 4 週出現異常率為 12%，持續上升至第 8 週異常率為 27%。(圖 20a,b)。

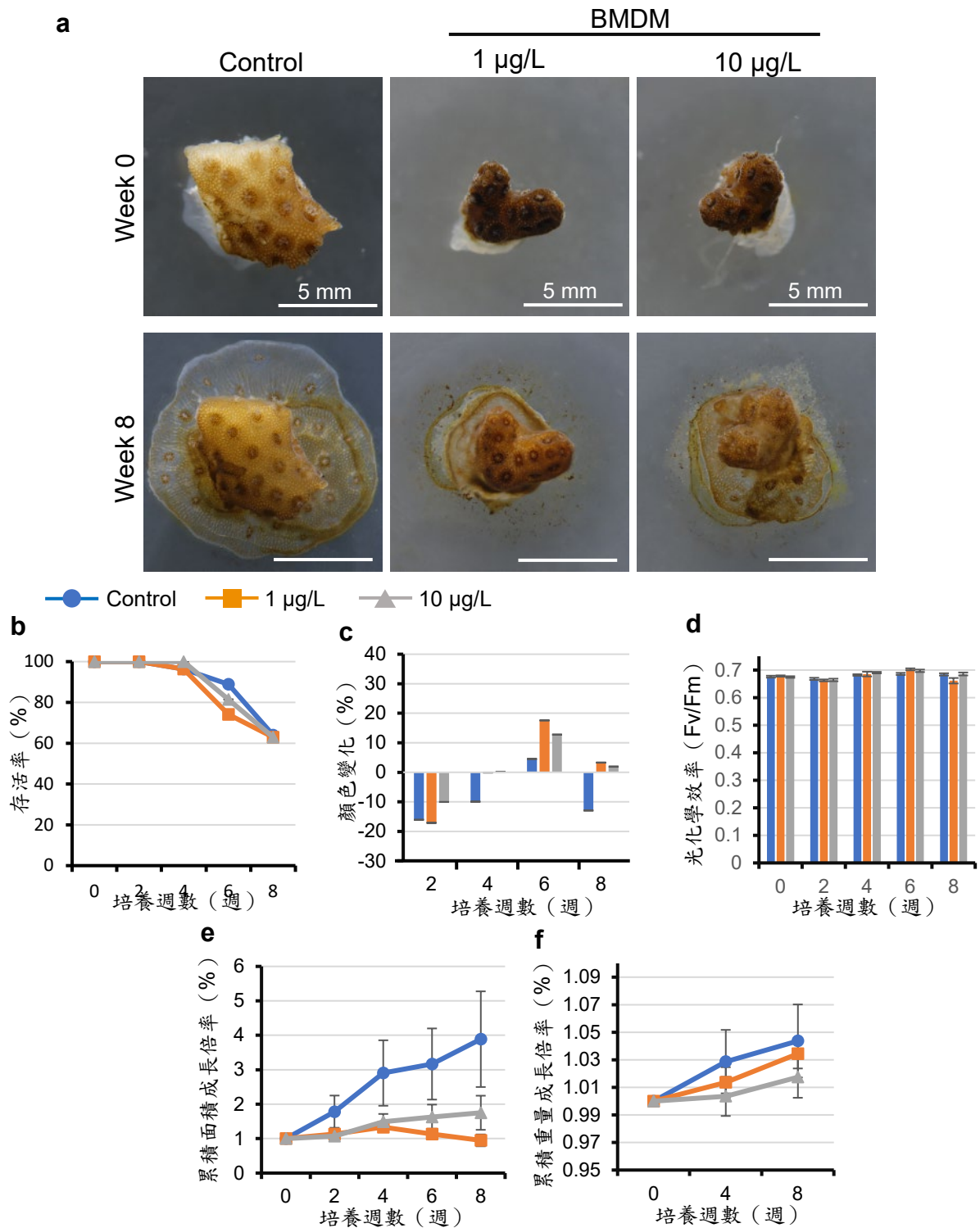


圖 18：BMDM 對細枝鹿角珊瑚的影響

a 為細枝鹿角珊瑚培養在含有 BMDM 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗的珊瑚外觀照片，b 為存活率，c 為珊瑚片段顏色變化，d 為共生藻光化學效率，e 累積面積成長倍率，f 為累積重量成長倍率。經 One-way ANOVA 統計結果顯示顏色變化與共生藻光化學效率在控制組與實驗組間沒有顯著差異，樣本數 $n=3$ colonies, 27 fragments。

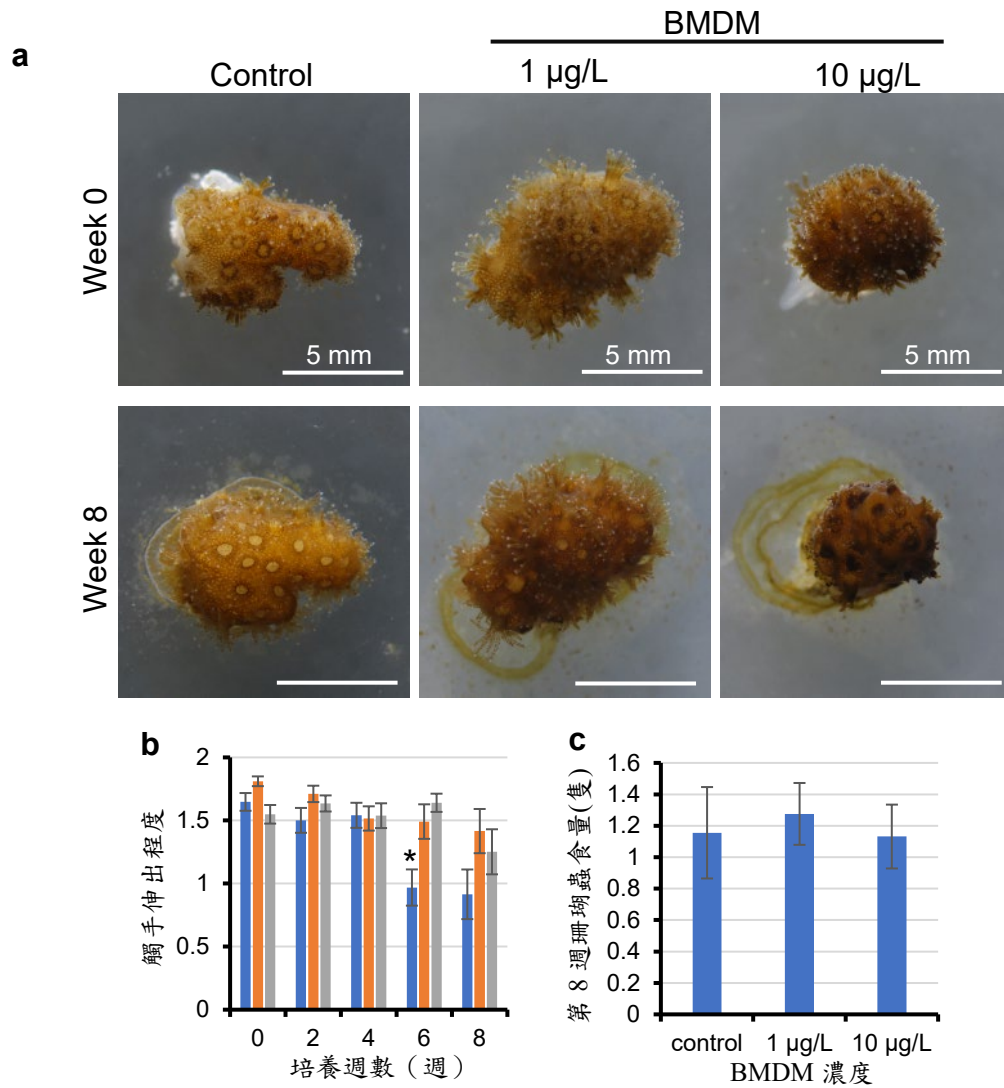


圖 19：BMDM 造成細枝鹿角珊瑚之珊瑚蟲觸手活力影響

a 為細枝鹿角珊瑚培養在含有 BMDM 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗觸手伸出外觀，b 為觸手伸出程度，c 為第 8 週珊瑚蟲食量。*經 One-way ANOVA 統計結果顯示觸手伸出程度在的 6 週控制組與兩個實驗組間有顯著差異 ($p < 0.05$)，樣本數 $n = 3$ colonies, 27 fragments。

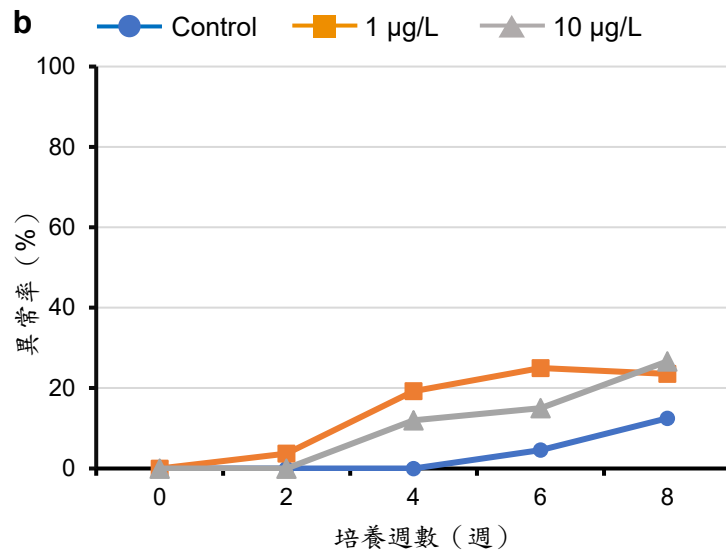
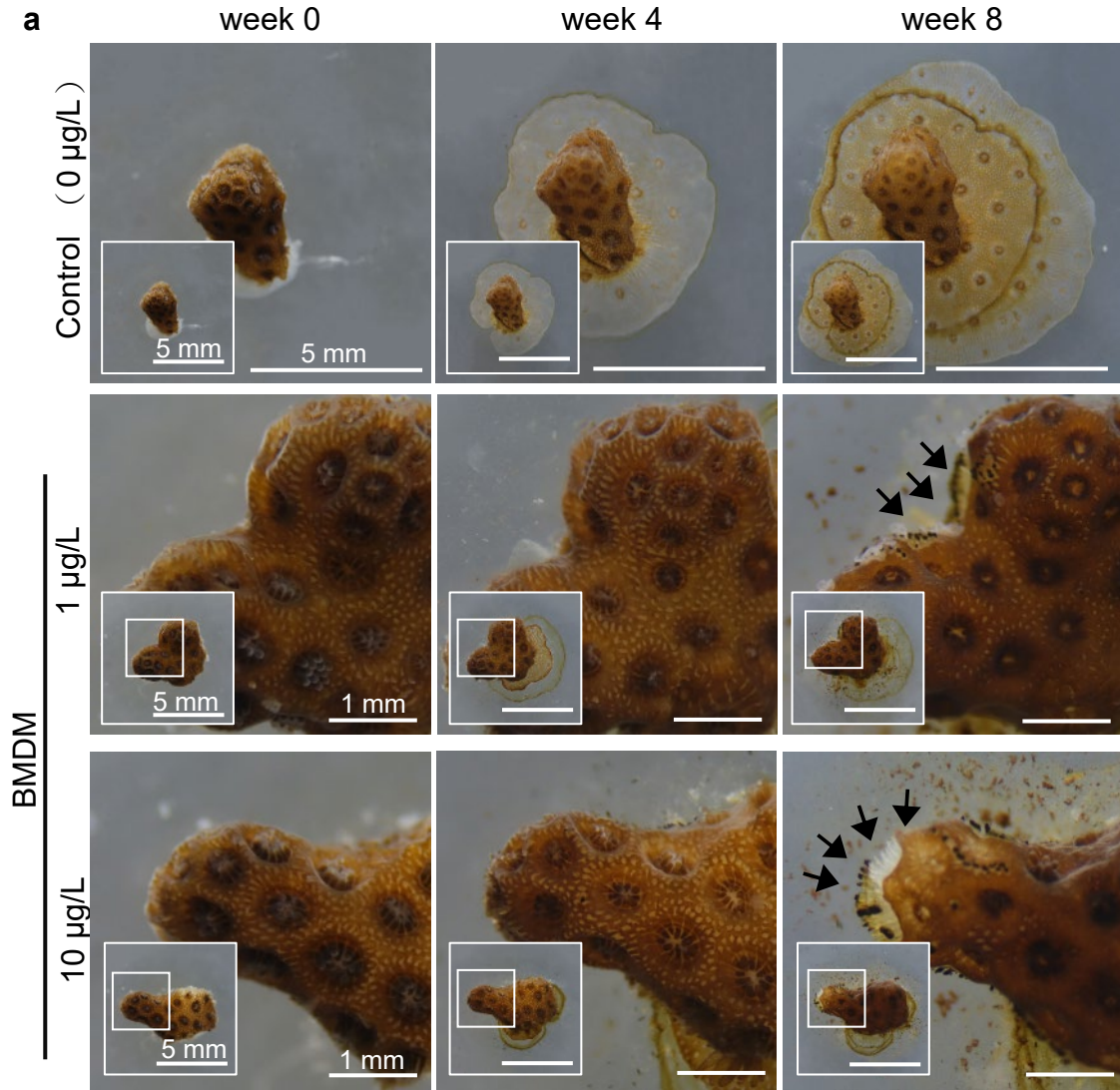


圖 20：BMDM 造成細枝鹿角珊瑚片段組織異常的外觀及比率
 a 為控制組組織正常的珊瑚片段以及培養在含有 BMDM 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 中出現異常的珊瑚片段外觀，b 為 BMDM 的珊瑚片段異常率結果。

2-2 BP-3 對細枝鹿角珊瑚的影響

在不同濃度的 BP-3 下細枝鹿角珊瑚存活率達 48%，且珊瑚片段皆有附著在培養皿上，向外擴展出新的珊瑚組織(圖 21a)，培養 8 週珊瑚片段雖然有白化(<20%)，但珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，代表珊瑚是健康的。控制組與濃度 1 的 BP-3 實驗組，在第 4 週部分珊瑚片段出現死亡，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 2 週部分珊瑚片段出現死亡，第 8 週控制組的存活率為 64%；濃度 1 和 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組的存活率分別為 59%與 48% (圖 21b)。珊瑚片段的顏色變化結果顯示，控制組顏色變化在第 8 週相較於第 0 天白化 13%，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組則分別白化 6%與 8% (圖 21c)。控制組與實驗在實驗 8 週後，其珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，顯示培養過程中，珊瑚是健康的 (圖 21d)。珊瑚組織表面積成長倍率分析中，控制組在第 8 週增加為原本的 3.89 倍，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.95 倍，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 則減少為原本的 0.75 倍 (圖 21e)，說明珊瑚在不同濃度的 BP-3 下珊瑚會生長增加組織的表面積。珊瑚重量成長倍率分析中，控制組在第 8 週重量為原本的 1.01 倍，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 重量皆為原本的 1.02 倍，表示珊瑚能維持生長 (圖 21f)。

觸手伸出程度分析時不納入已死亡之珊瑚蟲，控制組與濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 兩個實驗組中的珊瑚片段在實驗開始時接觸手皆有伸出(圖 22a)。控制組在第 0 週觸手伸出程度為 1.64，至第 6 週下降至 0.96，第 8 週則為 0.91。濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組觸手伸出程度在第 0 週為 1.82，第 8 週下降至 1.6，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 0 週伸出程度為 1.57，第 8 週則為 0.99 (圖 22b)。珊瑚蟲食量分析在第 8 週控制組的珊瑚片段上之珊瑚蟲平均每隻約吃 1.15 隻豐年蝦，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組中珊瑚片段之珊瑚蟲平均食量分別為 1.05 隻與 0.98 隻 (圖 22c)。

珊瑚片段的異常率在分析時不納入已死亡片段，控制組在第 8 週出現 13% 的異常率，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組從第 4 週出現 11% 的異常率，持續上升至第 8 週異常率為 46%，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 2 週出現 8% 的異常率，持續上升至第 8 週異常率為 42%。(圖 23a,b)。

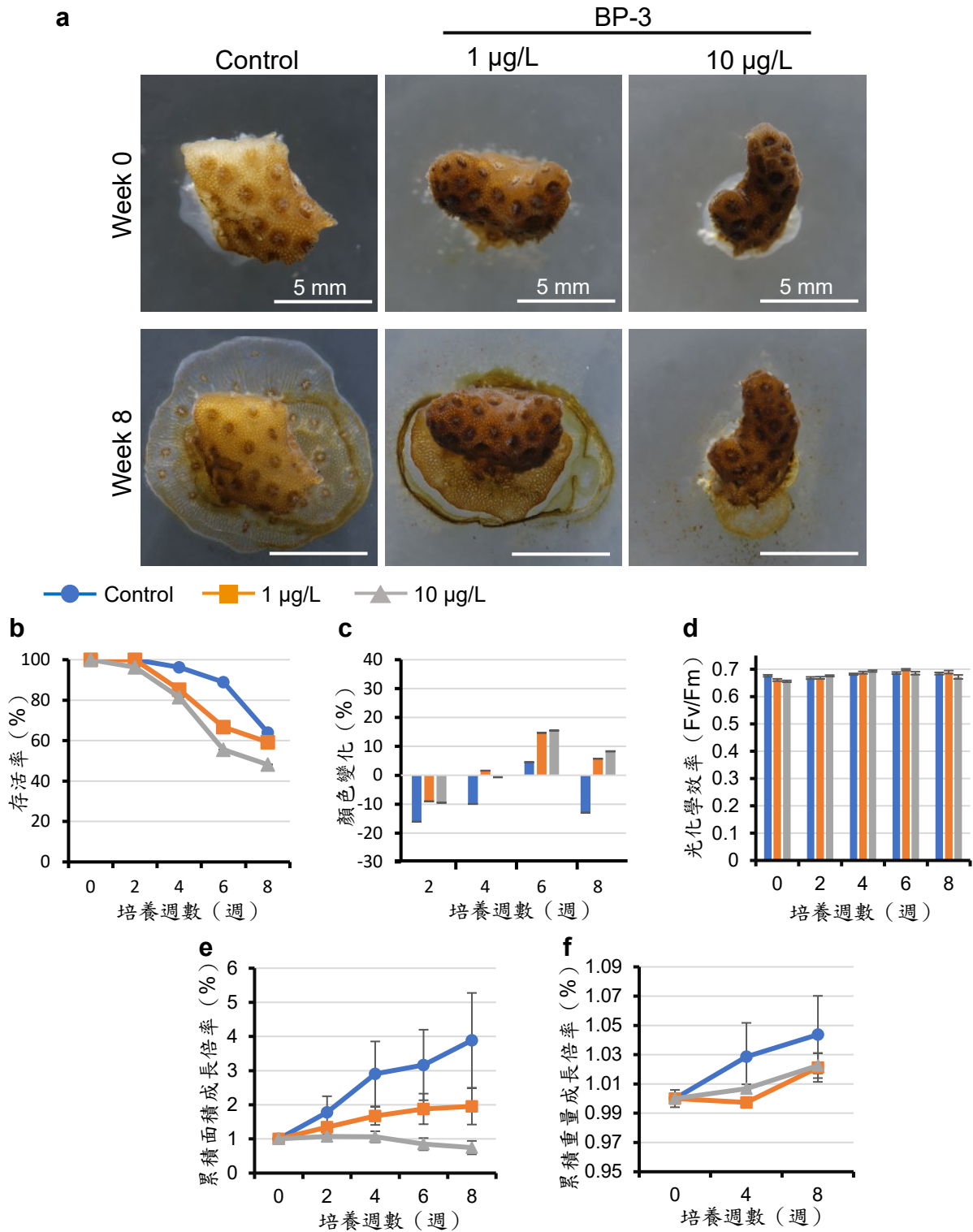


圖 21：BP-3 對細枝鹿角珊瑚的影響

a 為細枝鹿角珊瑚培養在含有 BP-3 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗珊瑚外觀照片，b 為存活率，c 為珊瑚片段顏色變化，d 為共生藻光化學效率，e 累積面積成長倍率，f 為累積重量成長倍率。經 One-way ANOVA 統計結果顯示顯示顏色變化與共生藻光化學效率在控制組與實驗組間沒有顯著差異，樣本數 $n=3$ colonies, 27 fragments。

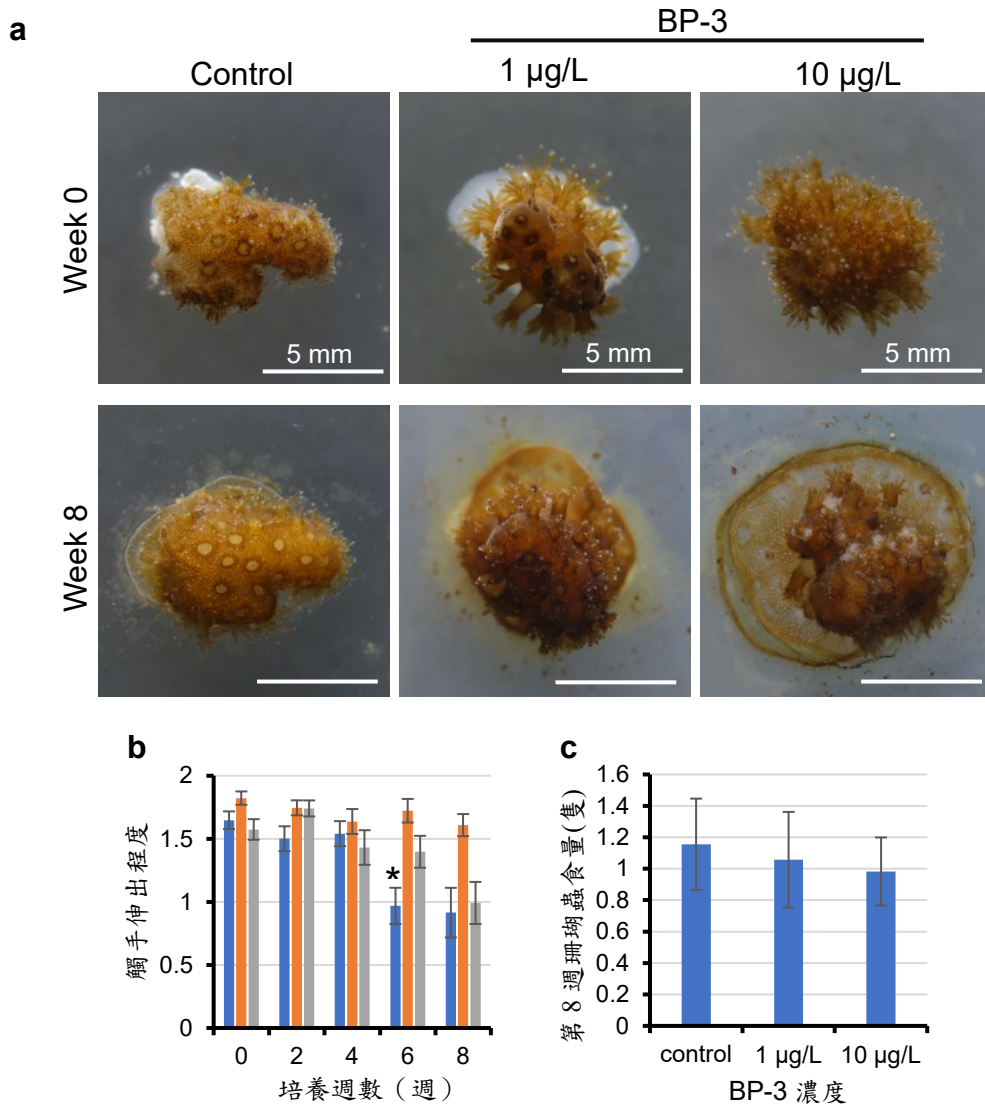


圖 22：BP-3 造成細枝鹿角珊瑚之珊瑚蟲觸手活力影響

a 為細枝鹿角珊瑚培養在含有 BP-3 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗觸手伸出外觀，b 為觸手伸出程度，c 為第 8 週珊瑚蟲食量。*經 One-way ANOVA 統計結果顯示觸手伸出程度在的 6 週控制組與兩個實驗組間有顯著差異($p < 0.05$)，樣本數 $n = 3$ colonies, 27 fragments。

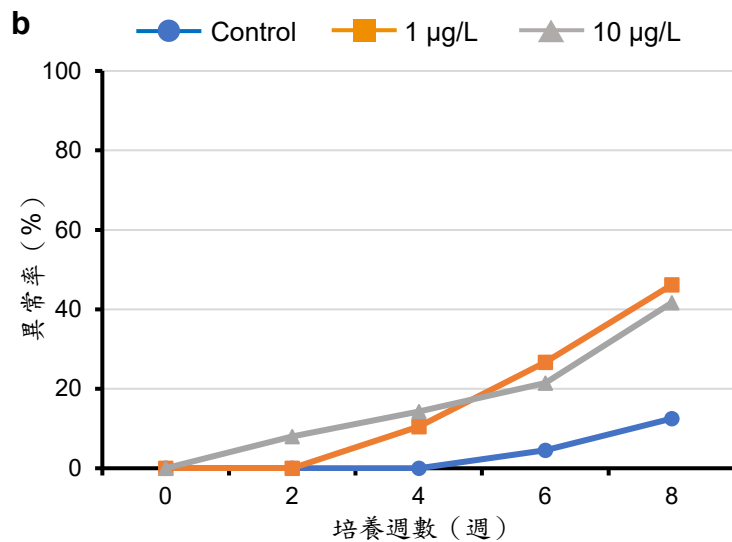
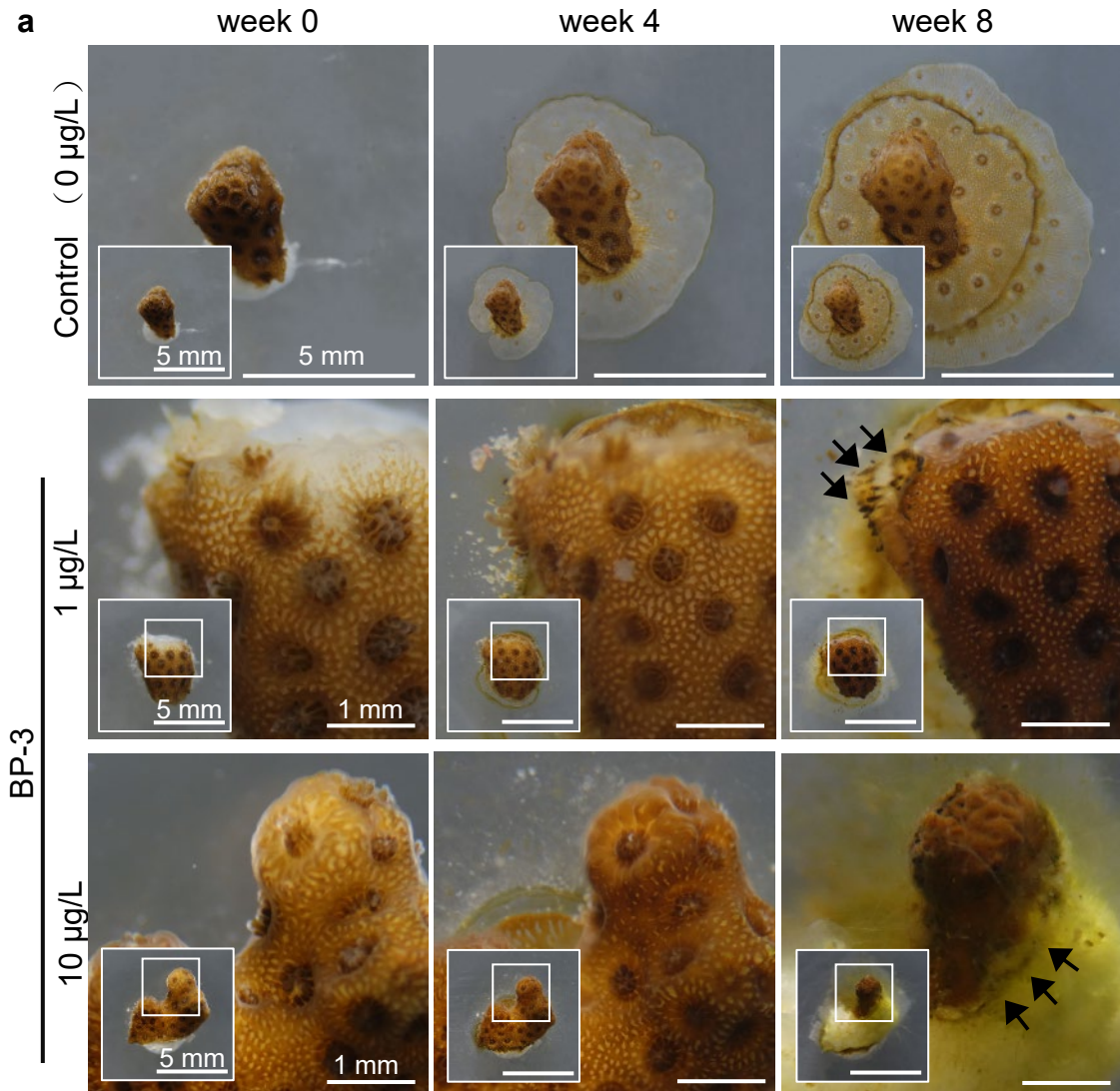


圖 23：BP-3 造成細枝鹿角珊瑚片段組織異常的外觀及比率

a 為控制組組織正常的珊瑚片段以及培養在含有 BP-3 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 中出現異常的珊瑚片段外觀，b 為 BP-3 的珊瑚片段異常率結果。

2-3 BEMT 對細枝鹿角珊瑚的影響

在不同濃度的 BEMT 下細枝鹿角珊瑚存活率達 48 %，且珊瑚片段皆有附著在培養皿上，向外擴展出新的珊瑚組織(圖 24a)，培養 8 週珊瑚片段雖然有白化 (<20%)，但珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，代表珊瑚是健康的。控制組與濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 的 BEMT 實驗組，在第 4 週部分珊瑚片段出現死亡，第 8 週控制組的存活率為 64 %；濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組的存活率分別為 48 %與 59 % (圖 24b)。珊瑚片段的顏色變化結果顯示，控制組顏色變化在第 8 週相較於第 0 天白化 13 %，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組則分別白化 17 %與變深 3 % (圖 24c)。控制組與實驗在實驗 8 週後，其珊瑚體內共生藻的光化學效率皆>0.6，顯示培養過程中，珊瑚是健康的 (圖 24d)。珊瑚組織表面積成長倍率分析中，控制組在第 8 週增加為原本的 3.89 倍，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 減少為原本的 0.82 倍，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 增加為原本的 1.11 倍 (圖 24e)，說明珊瑚在不同濃度的 BEMT 下珊瑚會生長增加組織的表面積。珊瑚重量成長倍率分析中，控制組在第 8 週重量為原本的 1.01 倍，濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 重量皆為原本的 1.02 倍，表示珊瑚能維持生長 (圖 24f)。

觸手伸出程度分析時不納入已死亡之珊瑚蟲。控制組與 BEMT 濃度 1 和 10 $\mu\text{g/L}$ 兩個實驗組中的珊瑚片段在實驗開始時接觸手皆有伸出(圖 25a)。控制組在第 0 週觸手伸出程度為 1.64，至第 6 週下降至 0.96，第 8 週則為 0.91。濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組觸手伸出程度在第 0 週為 1.63，第 8 週下降至 1.2，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 0 週伸出程度為 1.75，第 8 週則降至 0.97 (圖 25b)。珊瑚蟲食量分析在第 8 週控制組的珊瑚片段上之珊瑚蟲平均每隻約吃 1.15 隻豐年蝦，濃度 1 與 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組中珊瑚片段之珊瑚蟲平均食量分別為 1.24 隻與 1.2 隻 (圖 25c)。

珊瑚片段的異常率在分析時不納入已死亡片段，控制組在第 8 週出現 13 % 的異常率，濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組從第 4 週出現 23 % 的異常率，第 6 週時因有死亡片段而降至 10 %，在第 8 週異常率上升為 30%，濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 實驗組在第 4 週出現 8 % 的異常率，第 6 週升至 19 %，第 8 週因片段死亡而下降至 13 %。(圖 26a,b)。

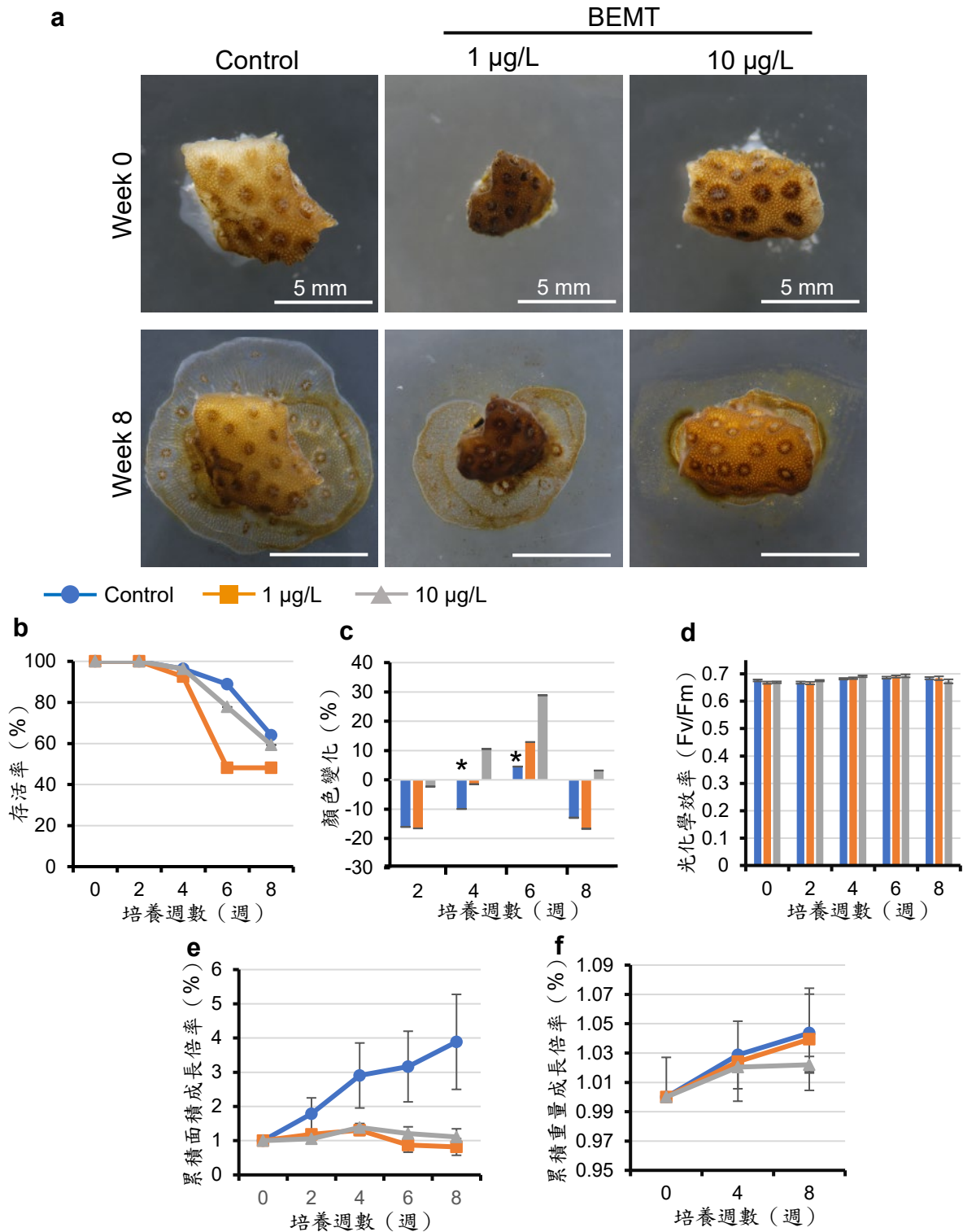


圖 24：BEMT 對細枝鹿角珊瑚的影響

a 為細枝鹿角珊瑚培養在含有 BEMT 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗外觀，b 為存活率，c 為珊瑚片段顏色變化，d 為共生藻光化學效率，e 累積面積成長倍率，f 為累積重量成長倍率。*經 One-way ANOVA 統計結果顯示顏色變化在第 4 週和第 6 週控制組與兩個實驗組間有顯著差異($P < 0.05$)，樣本數 $n = 3$ colonies, 27 fragments。

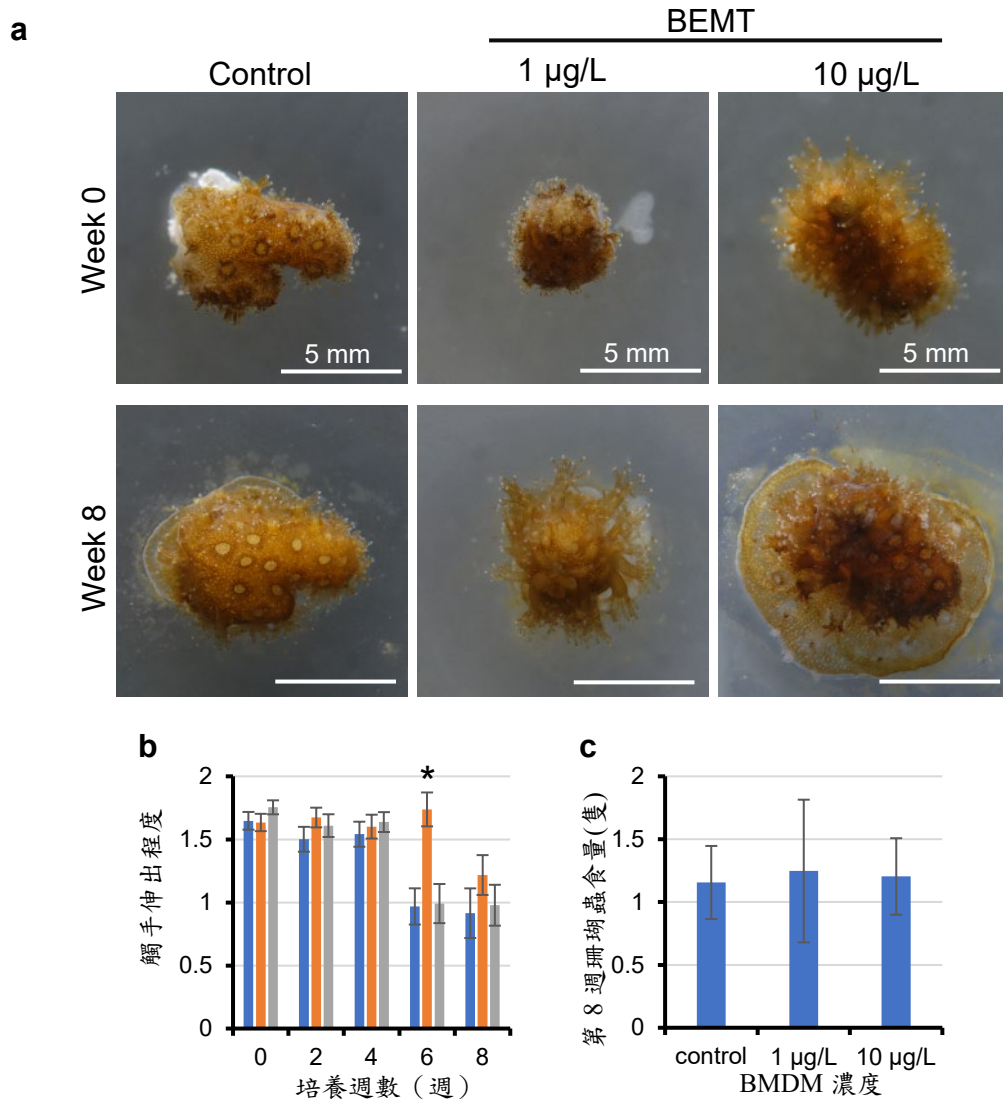


圖 25：BEMT 造成細枝鹿角珊瑚之珊瑚蟲觸手活力影響

a 為細枝鹿角珊瑚培養在含有 BEMT 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 實驗觸手伸出外觀，b 為觸手伸出程度，c 為第 8 週珊瑚蟲食量。*經 One-way ANOVA 統計結果顯示觸手身除程度在第 6 週 BEMT 濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 的實驗組與控制組和濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 的實驗組間有顯著差異 ($p < 0.05$)，控制組和濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 的實驗組間沒有顯著差異，樣本數 $n=3$ colonies, 27 fragments。

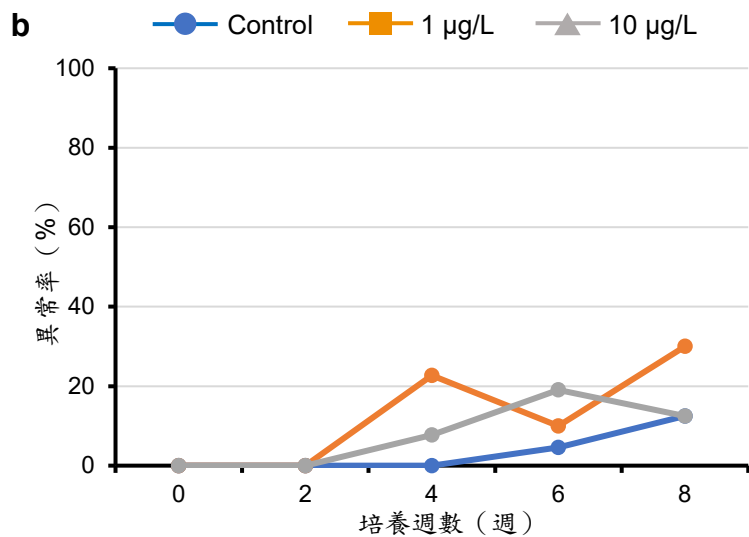
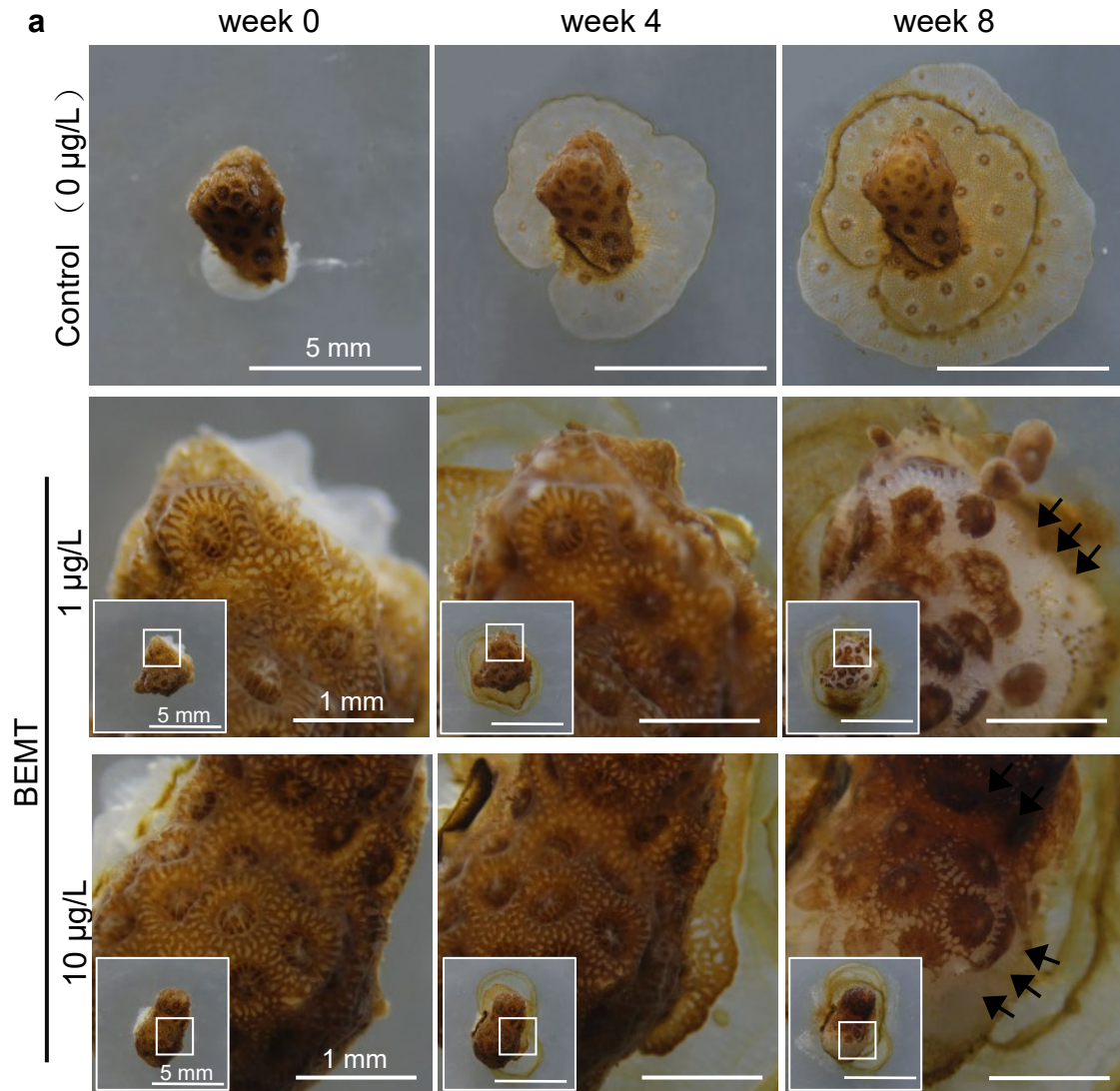


圖 26：BEMT 造成細枝鹿角珊瑚片段組織異常的外觀及比率

a 為控制組組織正常的珊瑚片段以及培養在含有 BEMT 濃度 1、10 $\mu\text{g/L}$ 中出現異常的珊瑚片段外觀，b 為 BEMT 的珊瑚片段異常率結果。

第三章 討論

第一節 紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚的影響

在三種紫外線過濾劑中，以 BP-3 對隆起軸孔珊瑚的影響較為明顯，其次是 BMDM，最後是 BEMT。從 BP-3 與 BMDM 的存活率和異常率趨勢變化來看，隆起軸孔珊瑚似乎會對兩種紫外線過濾劑產生馴化反應，在第 4 到 6 週時存活率與異常率逐漸趨向穩定，而非持續惡化至更多的死亡現象。顏色變化以 BP-3 濃度 10 µg/L 的實驗組最為明顯，且光化學效率為 0.61 亦比另外兩個紫外線過濾劑的實驗組低。以表面積成長倍率來看，BP-3 與 BMDM 的結果皆低於控組，且濃度高的實驗組成長倍率越低，而 BEMT 結果比控制組高。重量成長倍率在實驗期間 BMDM 與 BEMT 的成長趨勢與控制組相似，而 BP-3 則有明顯隨濃度增高而降低的分歧。

		存活率 (%)	異常率 (%)	顏色 變化 (%) *	共生藻 光化學效率 (Fv/Fm)	表面積 成長倍率 (倍)	重量 成長倍率 (倍)
	Control (0.01 % 丙酮)	100	0	-8	0.62	1.72	1.06
BMDM	1 µg/L	93	0	-3	0.63	1.57	1.06
	10 µg/L	93	8	-2	0.62	1.39	1.06
BP-3	1 µg/L	89	0	-8	0.61	1.35	1.05
	10 µg/L	85	9	-14	0.61	1.20	1.04
BEMT	1 µg/L	100	0	-8	0.64	2.13	1.08
	10 µg/L	100	0	-2	0.64	1.92	1.07

表 1：三種紫外線過濾劑對隆起軸孔珊瑚綜合結果

*顏色變化為正值代表珊瑚片段顏色變深，負值則代表珊瑚片段顏色變白。

第二節 紫外線過濾劑對細枝鹿角珊瑚的影響

控制組在第 4 週開始出現死亡，珊瑚片段在死亡前 4 到 5 天從健康狀態（顏色深、珊瑚蟲觸手皆有伸出）變成珊瑚蟲共肉萎縮、珊瑚蟲脫落至死亡，與隆起軸孔珊瑚的控制組結果不同，推測丙酮可能會在細枝鹿角珊瑚的珊瑚蟲體內累積產生影響，這將在未來實驗中進行測試。從存活率比較來看，BP-3 與 BEMT 較低，而從異常率來比較以 BP-3 最高。顏色變化在控制組變白 13%，而 BEMT 濃度 1 $\mu\text{g/L}$ 實驗組的顏色變化為變白 17%與控制組結果相似，其餘實驗組顏色變化則為變深或僅變白 1%，結果顯示 BMDM 與 BP-3 對細枝鹿角珊瑚較不會產生白化反應。在共生藻光化學效率中，三種紫外線過濾劑結果與控制組皆沒有顯著差異，顯示共生藻沒有受到其影響。

在表面積成長倍率中，控制組成長倍率最高，接近原珊瑚片段的 4 倍，BP-3 濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 成長倍率最低，而重量成長倍率因細枝鹿角珊瑚骨頭形成速度較慢，使成長倍率在 8 週內皆不超過 0.05 倍。分析珊瑚片段觸手伸出程度時發現，在當週珊瑚片段觸手伸出等級低於 1.5 時，隔週較常出現片段異常或死亡。

		存活率 (%)	異常率 (%)	顏色 變化 (%)*	共生藻 光化學效率 (Fv/Fm)	表面積 成長倍率 (倍)	重量 成長倍率 (倍)	觸手 伸出 程度
Control (0.01%丙酮)		64	13	-13	0.68	3.89	1.04	0.91
BMDM	1 $\mu\text{g/L}$	63	24	3	0.66	0.95	1.03	1.41
	10 $\mu\text{g/L}$	63	27	-1	0.69	1.75	1.01	1.25
BP-3	1 $\mu\text{g/L}$	59	46	6	0.69	1.95	1.02	1.60
	10 $\mu\text{g/L}$	48	42	8	0.67	0.75	1.02	0.99
BEMT	1 $\mu\text{g/L}$	48	30	-17	0.68	0.82	1.03	1.21
	10 $\mu\text{g/L}$	59	13	3	0.67	1.11	1.02	0.97

表 2：三種紫外線過濾劑對細枝鹿角珊瑚綜合結果

*顏色變化為正值代表珊瑚片段顏色變深，負值則代表珊瑚片段顏色變白。

第三節 紫外線過濾劑對石珊瑚長期的影響

綜上所述，低濃度之 BMDM 和 BP-3 對隆起軸孔珊瑚的存活與成長會造成影響。在 Wijgerde 等人 BP-3 和高溫對萼形柱珊瑚 (*Stylophora pistillata*) 和柔枝軸孔珊瑚 (*Acropora tenuis*) 的研究結果表示，在濃度 0.06 $\mu\text{g/L}$ 的 BP-3 培養 6 週不會造成珊瑚死亡，但 BP-3 與高溫綜合結果會加速柔枝軸孔珊瑚的死亡率，且造成共生藻光化學效率降低 4 到 5 % (Wijgerde et al., 2020)。在 Fel 等人的研究中，為期 5 週的 BMDM 對萼形柱珊瑚試驗中發現，BMDM 濃度高於 1000 $\mu\text{g/L}$ 才會導致萼形柱珊瑚的光化學效率顯著降低 (Fel et al., 2019)。與本實驗結果在隆起軸孔珊瑚的 BP-3 實驗組之光化學效率降低，以及 BMDM 對隆起軸孔珊瑚和細枝鹿角珊瑚光化學效率沒有影響結果相似。

在 Downs 等人在 2015 年的研究中觀察到，培養在 BP-3 內的胚胎有異常骨化 (ossification) 的情形，且濃度越高越明顯，這可能與 BP-3 為內分泌干擾素有關 (Downs, 2015)，本實驗觀察到隆起軸孔珊瑚培養在 BP-3 內的珊瑚片段骨頭在第 8 週觀察到較厚的型態，未來可針對此一現象進行實驗觀察分析。

第四章 結論

本研究證明了在低濃度下 BMDM 與 BP-3 會對隆起軸孔珊瑚造成影響，而 BMDM、BP-3 與 BEMT 會對細枝鹿角珊瑚造成影響。在過去的紫外線過濾劑研究中，BP-3 對珊瑚的研究較多，其次是 octocrylene (奧克立林)、二苯甲酮-1 和二苯甲酮-8 (Yasmine, 2021)，目前約仍有 45 種在全球被授權的紫外線過濾劑沒有相關的生物毒性測試 (Lozano et al., 2020)。基於目前紫外線過濾劑對珊瑚影響的研究結果，夏威夷、美屬維爾京群島等禁止使用 BP-3、甲氧基肉桂酸辛酯 (octinoxate) 等紫外線過濾劑，隨著保護珊瑚礁的意識升起而出現珊瑚友善的防曬產品，在含有有機紫外線過濾劑珊瑚友善防曬產品中有 92% 使用 BMDM，有 23% 使用 BEMT (Miller, 2021)。以本研究結果表明，在接近野外濃度環境下，BMDM 與 BEMT 對珊瑚也會造成影響，且 BP-3 雖然使光化學效率下降的程度不顯著，但仍不可忽視。

使用 CLD 系統進行毒性試驗，與水族缸系統相比，降低了設備與空間的需求外，提供成分穩定的人工過濾海水培養珊瑚，且可以連續而詳細的觀察分析珊瑚的生理狀態。本研究表明，除了生物毒性反應較明顯的紫外線過濾劑需要詳細的珊瑚影響分析外，其餘的紫外線過濾劑亦需要相關的研究，完善紫外線過濾劑對珊瑚礁生態所帶來的可能影響，並找出真正對珊瑚友善的紫外線過濾劑。

參考資料

- 林子傑。2022。建立石珊瑚的新實驗平台:在培養皿中培養珊瑚。國立臺灣海洋大學。
- 張宇恩。2020。開發在培養皿中飼養珊瑚的技術。國立臺灣海洋大學。
- 戴昌鳳、鄭有容，《台灣珊瑚全圖鑑（上）：石珊瑚》（臺北市：貓頭鷹出版，民109），343。
- 戴昌鳳、鄭有容，《台灣珊瑚全圖鑑（上）：石珊瑚》（臺北市：貓頭鷹出版，民109），82。
- A. Boyd, C. B. Stewart, D. A. Philibert, Z. T. How, M. G. El-Din, K. B. Tierney and T. A. Blewett, "A Burning Issue: The Effect Of Organic Ultraviolet Filter Exposure On The Behaviour And Physiology Of *Daphnia magna*," Science of The Total Environment 750 (Jan. 2021): 141707.
- A. J. Conway, M. Gonsior , C. Clark , A. Heyes and C. L. Mitchelmore, "Acute Toxicity Of The UV Filter Oxybenzone To The Coral *Galaxea fascicularis*," Science of The Total Environment 796 (Nov. 2021): 148666.
- B. D. Blair, J. P. Crago, C. J. Hedman, R. J. F. Treguer, C. Magruder, L. S. Royer and R. D. Klaper, "Evaluation Of A Model For The Removal Of Pharmaceuticals, Personal Care Products, And Hormones From Wastewater," Science of The Total Environment 444 (Feb. 2013): 515-521.
- B. Herzog, J. Giesinger and V. Settels , "Insights Into The Stabilization Of Photolabile UV-Absorbers In Sunscreens," Photochemical & Photobiological Sciences 19, (Dec. 2020):1636-1649.
- C. A. Downs, E. Kramarsky-Winter, R. Segal , J. Fauth, S. Knutson, O. Bronstein, F. R. Ciner, R. Jeger, Y. Lichtenfeld, C. M. Woodley, P. Pennington, K. Cadenas, A. Kushmaro and Y. Loya, "Toxicopathological Effects Of The Sunscreen UV Filter, Oxybenzone (Benzophenone-3), On Coral Planulae And Cultured Primary Cells And Its Environmental Contamination In Hawaii And The U.S. Virgin Islands," Arch Environ Contam Toxicol 70 (Oct. 2015): 265-288.
- C. Lozano, J. Givens, D. Stien, S. Matallana-Surget, and P. Lebaron, "Bioaccumulation And Toxicological Effects Of UV-Filters On Marine Species," The Handbook of Environmental Chemistry 94 (Mar. 2020): 85-130.
- C. Shinzato, K. Khalturin, J. Inoue, Y. Zayas, M. Kanda, M. Kawamitsu, Y. Yoshioka, H. Yamashita, G. Suzuki and N. Satoh, "Corrigendum To: Eighteen Coral Genomes Reveal The Evolutionary Origin Of Acropora Strategies To Accommodate Environmental Changes" Molecular Biology and Evolution 38, Issue 1(Jul 2021): 3495.
- D. Kaiser, A. Sieratowicz, H. Zielke, M. Oetken, H. Hollert and J. Oehlmann, "Ecotoxicological Effect Characterisation Of Widely Used Organic UV Filters,"

Environmental Pollution 163 (Apr. 2012): 84-90.

D. Sánchez-Quiles, J. Blasco, and A. Tovar-Sánchez, “Sunscreen Components Are A New Environmental Concern In Coastal Waters: An Overview,” The Handbook of Environmental Chemistry 94 (Mar. 2020): 1-14.

D. Schlenk, Y. Sapozhnikova, M. A. Irwin, L. Xie, W. Hwang, S. Reddy, B. J. Brownawell, J. Armstrong, M. Kelly, D. E. Montagne, E. P. Kolodziej, D. Sedlak and S. Snyder, “In Vivo Bioassay-Guided Fractionation Of Marine Sediment Extracts From The Southern California Bight, USA, For Estrogenic Activity,” Environmental Toxicology and Chemistry 24, Issue number 11 (Nov. 2005): 2820-2826.

D. Stien, M. Suzuki, A. M. S. Rodrigues, M. Yvin, F. Clergeaud, E. Thorel and P. Lebaron, “A Unique Approach To Monitor Stress In Coral Exposed To Emerging Pollutants,” Scientific Reports 10, Issue number 1(Jun. 2020) : 9601.

E. K. Carpenter et al. , "One-Third Of Reef-Building Corals Face Elevated Extinction Risk From Climate Change And Local Impacts," Science 321(2008):560-563.

E. Thorel, F. Clergeaud, L. Jaugeon, A. M. S. Rodrigues, J. Lucas, D. Stien and P. Lebaron, “Effect Of 10 UV Filters On The Brine Shrimp *Artemia salina* And The Marine Microalga *Tetraselmis sp.*,” Toxics 8, Issue number 2 (Apr. 2020): 29.

E. O'Malley, J.W. O'Brien, R. Verhagen, J.F. Mueller, "Annual Release Of Selected UV Filters Via Effluent From Wastewater Treatment Plants In Australia," Chemosphere. 247 (2020): 125887.

G. De'ath, K. E. Fabricius, H. Sweatman and M. Puotinen, “The 27-Year Decline Of Coral Cover On The Great Barrier Reef And Its Causes,” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 109 (Oct. 2012): 17995-17999.

G. Roff , P. J. Mumby, “Global Disparity In The Resilience Of Coral Reefs,” Trends in Ecology & Evolution 27, Issue number 7 (Jul. 2012): 404-413.

G. C. Ray, Biodiversity: "Ecological Diversity In Coastal Zones And Oceans,"(Washington: National Academy Press, 1988): 36-50.

G. D. Stanley, “The Evolution Of Modern Corals And Their Early History,” Earth-Science Reviews 60, Issue number 3-4 (Feb. 2003): 195-225.

I. B. Miller, S. Pawlowski, M. Y. Kellermann, M. Petersen-Thiery, M. Moeller, S. Nietzer and P. J. Schupp, "Toxic Effects Of UV Filters From Sunscreens On Coral Reefs Revisited: Regulatory Aspects For “Reef Safe” Products,” Environmental Sciences Europe 33(2021): 74.

J. Ashby, H. Tinwell, J. Plautz, K. Twomey and P. A. Lefevre, “Lack Of Binding To Isolated Estrogen Or Androgen Receptors, And Inactivity In The Immature Rat Uterotrophic Assay, Of The Ultraviolet Sunscreen Filters Tinosorb M-Active And Tinosorb S,” Regulatory Toxicology and Pharmacology 34, Issue number 3 (Dec. 2001): 287-291.

- J. B. Mancuso, R. Maruthi, S. Q. Wang & H. W. Lim, "Sunscreens: An Update," *American Journal of Clinical Dermatology* (May. 2017):643-650.
- J. Lucas, V. Logeux, A. M. S. Rodrigues, D. Stien and P. Lebaron, "Exposure To Four Chemical UV Filters Through Contaminated Sediment: Impact On Survival, Hatching Success, Cardiac Frequency, And Aerobic Metabolic Scope In Embryo-Larval Stage Of Zebrafish," *Environmental Science and Pollution Research* 28 (February 2021): 29412-29420.
- J. M. De Goeij, D. Van Oevelen, M. J. Vermeij, R. Osinga, J. J. Middelburg, A. F. De Goeij and A. W. Admiraal, "Surviving In A Marine Desert: The Sponge Loop Retains Resources Within Coral Reefs," *Science* 342, Issue number 6154 (Oct 2013): 108-110.
- J. P. Fel, C. Lacherez, A. Bensetra, S. Mezzache, E. Béraud, M. Léonard, D. Allemand and C. Ferrier-Pagès "Photochemical Response Of The Scleractinian Coral *Stylophora pistillata* To Some Sunscreen Ingredients," *Coral Reefs* 38 (2019): 109–122.
- J. Veron and M. Staffordsmith, "Corals Of The World (Townsville, Australia: Australian Institute Of Marine Science)," *Mitochondrial Dna Part B* (2000), 947.
- K. Hirayama, K. Takayama, S. Haruta, H. Ishibashi and I. Takeuchi, "Effect Of Low Concentrations Of Irgarol 1051 On RGB (R, Red; G, Green; B, Blue) Colour Values Of The Hard-Coral *Acropora tenuis*," *Marine Pollution Bulletin* 124, Issue 2 (Nov. 2017): 678-686.
- L. Burke, K. Reytar, M. Spalding and A. Perry, "Reefs at risk revisit," *World Resources Institute*, Washington, DC124. 2004.
- M. D. Spalding and A. M. Grenfell, "New Estimates Of Global And Regional Coral Reef Areas," *Coral Reefs* 16 (Dec. 1997): 225-230.
- M. G. Pintado-Herrera and P. A. L. Martín, "Fate And Behavior Of UV Filters In The Marine Environment," *The Handbook of Environmental Chemistry* 94 (Mar. 2020): 59-84.
- M. Xu, D. Zheng, S. Gong, "Effects of Low Concentration Benzophenone-3 Exposure on the Sex Ratio and Offspring Development of Zebrafish (*Danio rerio*)," *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 106 (May. 2021): 740-746.
- N. Rådecker, C. Pogoreutz, C. R. Voolstra, J. Wiedenmann and C. Wild, "Nitrogen Cycling In Corals: The Key To Understanding Holobiont Functioning?" *Trends Microbiol* 23, Issue 8, (Aug. 2015): 490-497.
- N. A. Graham, T. R. McClanahan, M. A. MacNeil, S. K. Wilson, N. V. Polunin, S. Jennings, P. Chabanet, S. Clark, M. D. Spalding, Y. Letourneur, L. Bigot, R. Galzin, M. C. Ohman, K. C. Garpe, A. J. Edwards and C. R. Sheppard, "Climate Warming, Marine Protected Areas And The Ocean-Scale Integrity Of Coral Reef Ecosystems," *PLOS One* 27 (Aug. 2008): e3039.
- O. Hoegh-Guldberg, "Climate Change, Coral Bleaching And The Future Of The

World's Coral Reefs," *Marine and Freshwater Research* 50, Issue number 8 (1999): 839-866.

P. R. Tanner, "Sunscreen Product Formulation," *Dermatol Clin* 24, Issue number 1 (Jan. 2006): 53-62.

R. Cunning, R. A. Bay, P. Gillette, A. C. Baker and N. Traylor-Knowles, "Comparative Analysis Of The Pocillopora Damicornis Genome Highlights Role Of Immune System In Coral Evolution," *Scientific Reports* 8 (2018): 16134.

[40] S. Shikina, T. C. Lin, Y. L. Chu, Y. C. Cheng, Y. E. Chang, N. Wada, S. L. Tang, Y. Iizuka and Y. L. Chiu, "Culturing Reef-Building Corals On A Laboratory Dish: A Simple Experimental Platform For Stony Corals," *Frontiers in Marine Science* 10 (July. 2023): 1149495.

S. Ramos, V. Homem, A. Alves and L. Santos, "A Review Of Organic UV-Filters In Wastewater Treatment Plants," *Environment International* 86 (Jan. 2016): 24-44.

T. A. Kung, S. H. Lee, T. C. Yang and W. H. Wang, "Survey Of Selected Personal Care Products In Surface Water Of Coral Reefs In Kenting National Park, Taiwan," *Science of the Total Environment* 635 (Sep. 2018): 1302–1307.

T. He, M. M. P. Tsui, C. J. Tan, K. Y. Ng, F. W. Guo, L. H. Wang, T. H. Chen, T. Y. Fan, P. K. S. Lam and M. B. Murphy, "Comparative Toxicities Of Four Benzophenone Ultraviolet Filters To Two Life Stages Of Two Coral Species," *Science of The Total Environment* 651, Part 2 (Feb. 2019): 2391-2399.

T. P. Hughes, K. D. Anderson, S. R. Connolly, S. F. Heron, J. T. Kerry, J. M. Lough, A. H. Baird, J. K. Baum, M. L. Berumen, T. C. Bridge, D. C. Claar, C. M. Eakin, J. P. Gilmour, N. A. J. Graham, H. Harrison, J. A. Hobbs, A. S. Hoey, M. Hoogenboom, R. J. Lowe, M. T. McCulloch, J. M. Pandolfi, M. Pratchett, V. Schoepf, G. Torda, and S. K. Wilson, "Spatial And Temporal Patterns Of Mass Bleaching Of Corals In The Anthropocene," *Science* 6371, Issue number 359 (Jan. 2018): 80-83.

T. P. Hughes, A. H. Baird, D. R. Bellwood, M. Card, S. R. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J. B. Jackson, J. Kleypas, J. M. Lough, P. Marshall, M. Nyström, S. R. Palumbi, J. M. Pandolfi, B. Rosen, and J. Roughgarden, "Climate Change, Human Impacts, And The Resilience Of Coral Reefs," *Science* 301 (Aug. 2003): 929-933.

T. Wijgerde, M. V. Ballegooijen, R. Nijland, L. Van Der Loos, C. Kwadijk, R. Osinga, A. Murk and D. Slijkerman, "Adding Insult To Injury: Effects Of Chronic Oxybenzone Exposure And Elevated Temperature On Two Reef-Building Corals," *Science of The Total Environment* 733 (Sep 2020): 139030.

Y. S. D. Watkins and J. B. Sallach, "Investigating The Exposure And Impact Of Chemical UV Filters On Coral Reef Ecosystems: Review And Research Gap Prioritization," *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* Volume 17, Issue 5,

(Mar. 2021), 967-981.