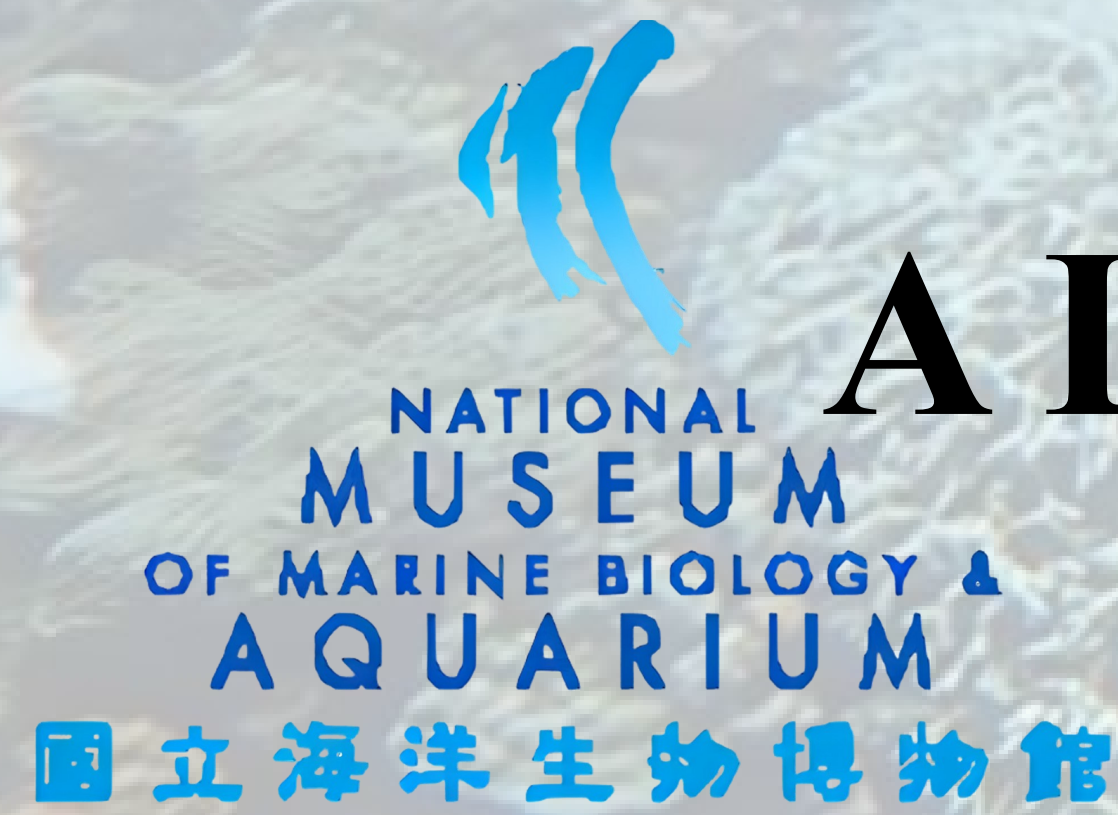


全球變遷悄敲門，怎使珊瑚驚失色——以脂質體學方法來探索珊瑚的熱浪反應

A Lipidomic Approach Reveals Corals' Thermal Responses Following a Heatwave Event

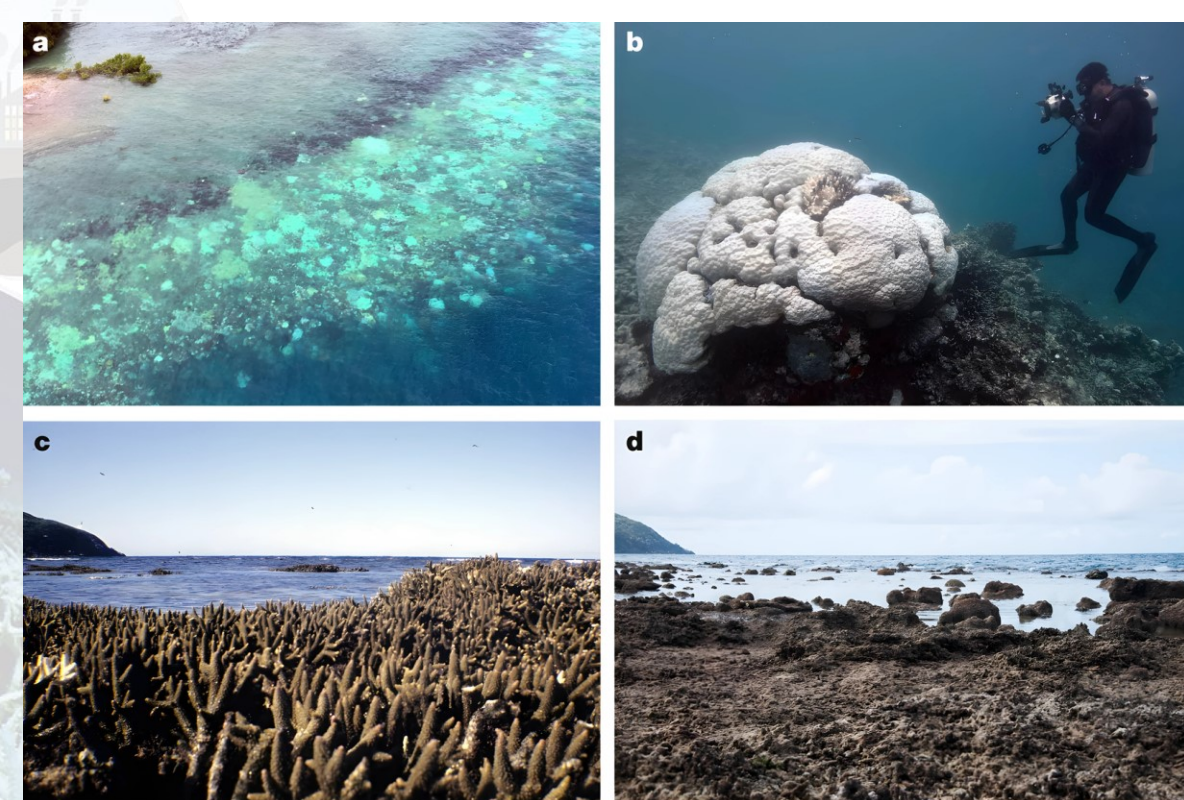
實習單位：國立海洋生物博物館 生物馴養組

實習學生：呂芊儀 指導老師：林靖愉 教授 單位指導：唐川禾 博士



珊瑚礁白色警報

珊瑚礁被譽為「海洋熱帶雨林」，是熱帶淺海中生物多樣性最豐富的生態系統之一，不僅維繫海洋生態平衡，也與人類社會發展緊密相關。然而，全球暖化所引起的熱浪已成為對珊瑚最直接的威脅，頻繁且劇烈的白化事件正導致大規模珊瑚死亡與礁體退化。



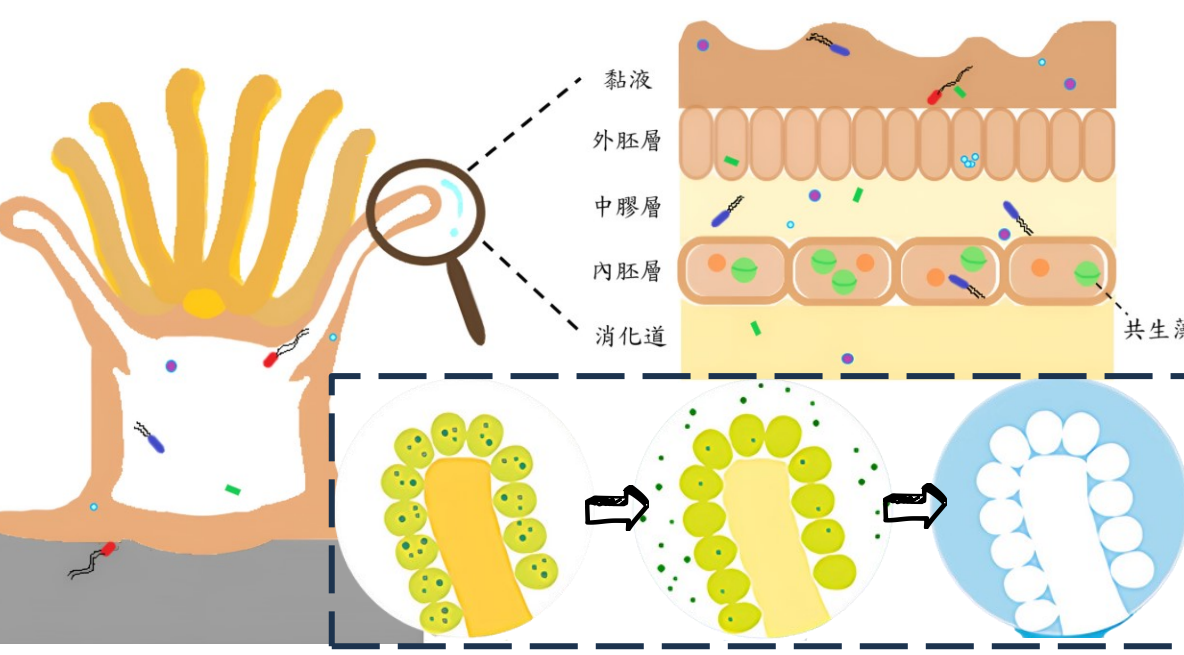
▲ 熱浪驅動的珊瑚白化事件

紀錄顯示，1998年全球曾有16%的珊瑚死亡，而在2014至2017年間，許多珊瑚礁區域更經歷連續性的白化事件，部分地區的珊瑚死亡率甚至超50%。根據IPCC 2023報告，若全球升溫達1.5°C，預計將有70%至90%的珊瑚礁消失；若升溫至2°C，恐高達99%的珊瑚礁滅絕。

珊瑚與共生藻關係決裂的真相

在健康珊瑚中(Health Coral)，珊瑚與共生藻(*Symbiodiniaceae*)維持穩定共生關係。共生藻透過光合作用提供能量，珊瑚則提供養分與棲息環境，雙方透過養分交換在貧養海域中維持生存。海溫升高會影響珊瑚共生生理的調控，造成共生藻光生理過程失衡而引起光緊迫，使得珊瑚氧化壓力升高(Stressed Coral)。若光溫緊迫持續，則會導致共生關係瓦解，最終導致珊瑚白化(Bleached Coral)。失去共生藻的珊瑚將面臨飢餓的處境，而處於虛弱狀態。

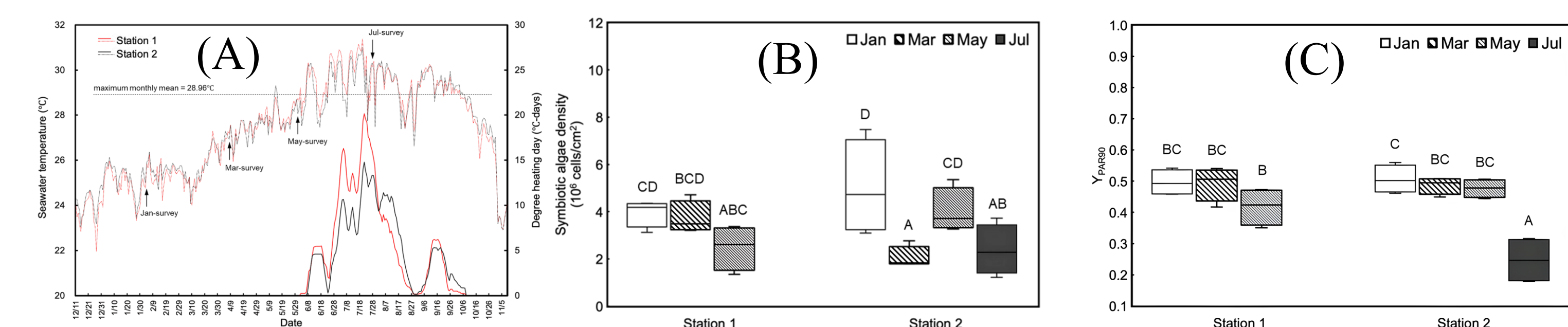
共生藻光生理緊迫被視為是導致珊瑚熱白化的主因之一，是環境暖化對珊瑚造成的後期傷害效應。然而，珊瑚細胞面對環境增溫的最初反應為何？又如何演變為熱緊迫狀態？則是目前尚待探究的問題。



▲ 珊瑚構造及白化過程示意圖

我的研究工作發現

本研究分別於1月、3月、5月及7月共進行4次野外調查，日平均海溫呈現季節性升高的趨勢(Figure 3A)，5月之後，海溫普遍超過珊瑚熱緊迫閾值溫度，導致7月調查時出現大規模珊瑚白化現象。其中，測站1較為嚴重，所標示的珊瑚株皆全面白化，這也被反應在珊瑚共生藻密度(Figure 3B)及光合作用效率(Figure 3C)的驟降上。在此之前，海溫與珊瑚生理變化之間的關聯性則較弱。



▲ Figure 3. 研究測站平均海溫變化(A)；共生藻密度(B)和光合作用效率(C)盒鬚圖

在此以測站2為例，分別分析珊瑚宿主與共生藻在常態升溫與熱緊迫下的脂質變化。結果顯示，7月的脂質組成與其他月份不同(Figure 4A and 5A)，這可歸咎於珊瑚是否處在緊迫狀態。

在珊瑚宿主中，隨常態升溫呈現相反變化的脂質含有不同生理效果的不飽和脂肪酸(Figure 4B)，帶有促發炎脂肪酸的膜脂質隨溫度升高而增加，而帶有抗發炎脂肪酸的膜脂質則隨溫度升高而下降。在熱緊迫條件下(Figure 4C)，除了上述情形變得更為明顯外，lyso-PCs、TGs與Glycine Betaine顯著升高，可能與宿主細胞應因緊迫狀態有關。

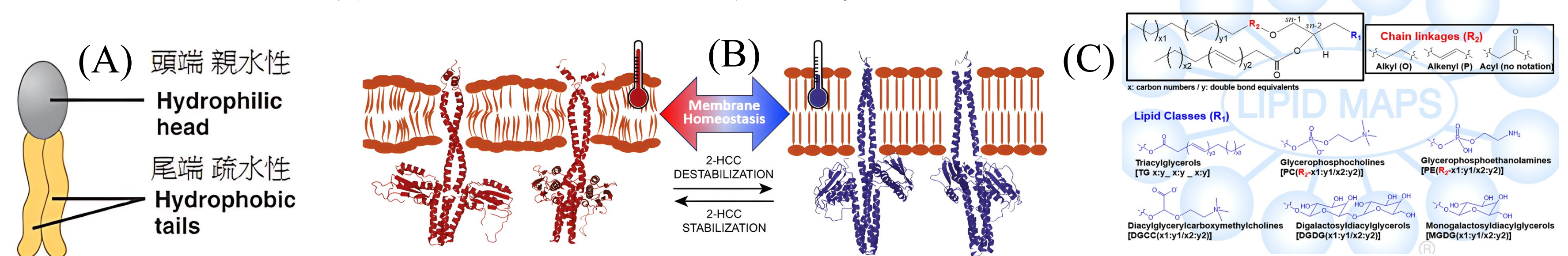
參考資料

1. Vanwonderghem and Webster, 2020. Coral Reef Microorganisms in a Changing Climate.
2. Hughes, T., Kerry, J., Álvarez-Noriega, M. *et al.* Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature* 543, 373–377 (2017).
3. Emilio Saita, Daniela Albanesi, Diego de Mendoza, 2016. Sensing membrane thickness: Lessons learned from cold stress.
4. Jame Lee Reading Club, 2012. Phospholipids Are the Main Structural Components of Cell Membranes.
5. 許嘉合、野澤洋耕。世襲和招募——棲息於珊瑚蟲幼生的微生物運作體系。6. Third Receiving Terminal.

脂質體述說生命的溫感與調適

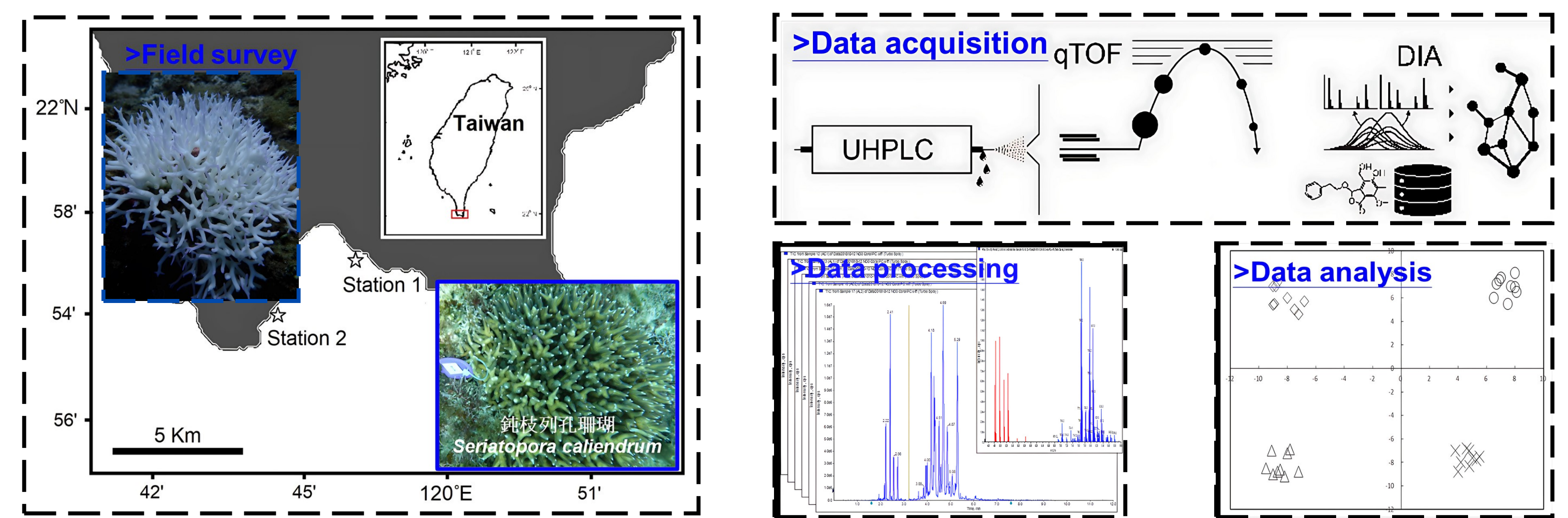
生命系統之所以能感知環境中些微的溫度變化，主要可透過膜脂質在不同溫度下的分子結構熱動態差異來說明。由於膜脂質的分子構形容易隨溫度變化而改變(Figure 1A)，因此當溫度變化時，細胞膜中脂質分子排列也會隨之改變，進而影響細胞膜整體的尺寸與特性。這些變化能觸動或調控膜蛋白的功能，並產生溫感訊號，啟動細胞或生物體的調適反應(Homeoviscous Adaptation)，以維持自身恆定(Figure 1B)。

生命系統中的脂質呈現出高度的分子結構(Figure 1C)多樣性，可在細胞生理過程中扮演多元的角色，除了可作為物質與能量代謝的基質外，也可作為細胞傳訊或蛋白質調控的分子，並能對環境壓力做出反應，且能透過分子集合行為影響細胞膜上發生的生理過程。因此，細胞脂質組成發生變化往往會涉及多重的生理變化。

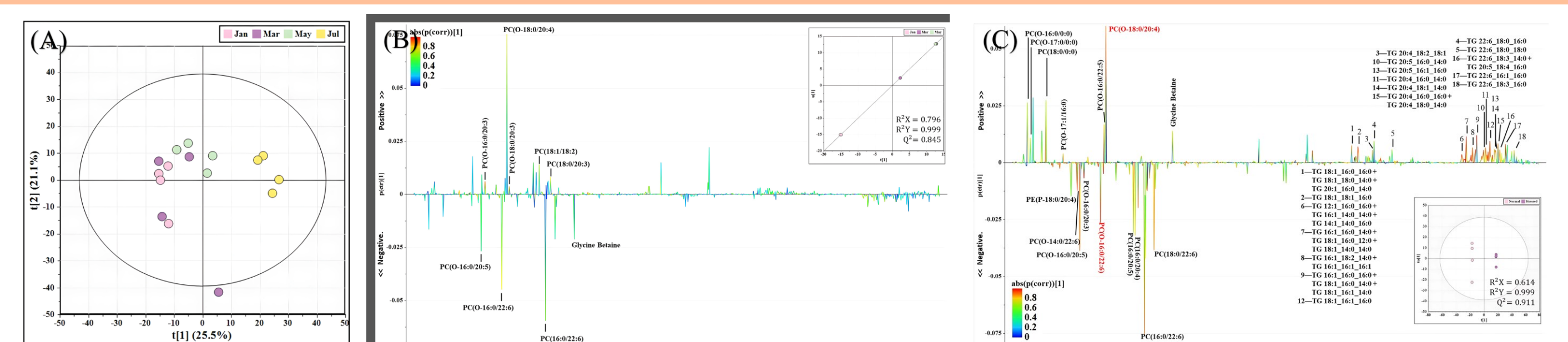


▲ Figure 1. 膜脂質是構成細胞膜的主要成分(A)；溫度變化會對脂膜的物理特性造成影響(B)；脂質分子多樣性及其分類、結構與縮寫(C)

我們假設珊瑚的脂質體組成會隨季節溫度變化而改變。為驗證此假設，本研究選擇墾丁珊瑚礁海域作為研究地點，並定期採集熱敏感的珊瑚樣本進行脂質體分析(Figure 2)，以了解環境升溫過程與珊瑚脂質體變化的關聯，並探究導致熱緊迫的可能原因。

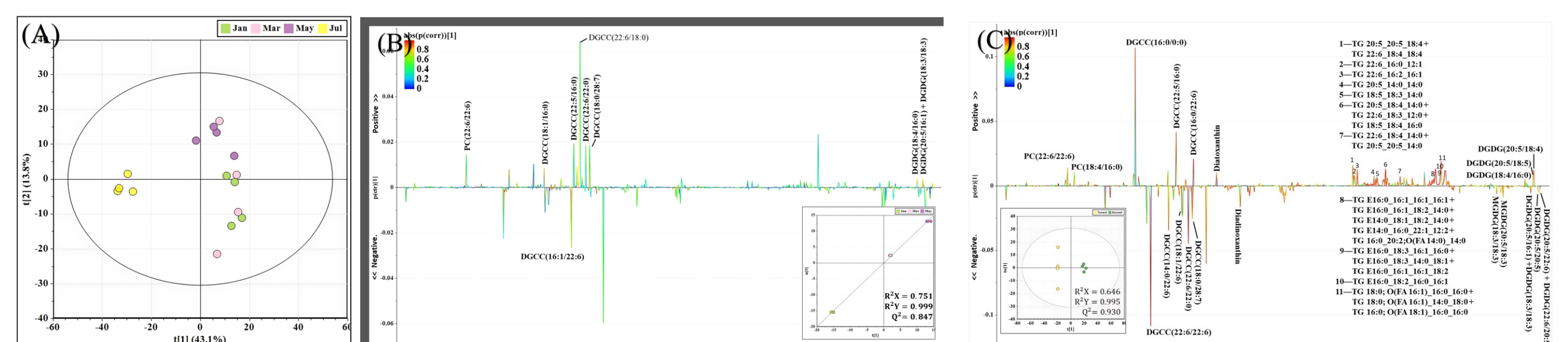


▲ Figure 2. 野外研究地點與珊瑚種類以及脂質體分析流程



▲ Figure 4. 珊瑚宿主脂質變化分析。PCA(A)、OPLS(B)以及OPLS-DA(C)

共生藻的分析結果顯示，隨常態升溫(Figure 5B)，共生藻葉綠體內外的膜脂質皆呈現顯著變化。上述部分脂質在熱緊迫條件下有些變化更為明顯但有些呈現相反變化(Figure 5C)，並伴隨lyso-DGCC與TGs的增加；同時，與葉黃素循環有關的脂溶性代謝物和類囊膜脂亦呈現出明顯變化，反映共生藻受到光緊迫並啟動光保護機制。



▲ Figure 5. 共生藻脂質變化分析。PCA(A)、OPLS(B)以及OPLS-DA(C)

珊瑚與共生藻的代謝會隨溫度變化而受影響，然而在熱緊迫條件下更加明顯。面對環境壓力時，會產生更多額外的脂質來應對；相較之下，未受緊迫時的脂質主要維持正常的環境適應功能。這些脂質從環境適應到熱緊迫反應的變化，值得在未來研究中進一步探討其機制與生理意義。

致謝

由衷感謝唐川禾博士在本次實習及海報製作過程中的悉心指導，同時也感謝實習單位的學姐與實習夥伴一路上的協助與陪伴。