

108 年馬祖海域棲地及資源保育計畫 成果報告書

執行單位:國立臺灣海洋大學

藍眼淚	1
1. 前言.....	1
1.1 馬祖海域棲地及資源.....	1
1.2 夜光蟲的分布與馬祖海域棲地.....	1
1.3 夜光蟲的生態與資源保育.....	2
2. 材料與方法.....	3
2.1 採樣時間、地點及方法.....	3
2.2 細胞觀察與計數.....	3
2.3 營養鹽測量.....	4
2.4 葉綠素測量.....	4
3. 結果.....	5
3.1 溫度、鹽度、pH 值、葉綠素值及溶氧值.....	5
3.2 營養鹽濃度.....	7
3.3 夜光蟲數量.....	10
4. 討論.....	11
4.1 馬祖周遭海洋監測.....	11
4.2 馬祖周遭夜光蟲生態調查.....	12
4.3 夜光蟲實驗室培養.....	13
4.4 48 小時連續採樣觀測.....	14
4.5 藍眼淚研究成果.....	15
5. 總結.....	18
6. 參考文獻.....	19
附件、委員期中、期末審查提問與回答.....	21
藍眼淚生態館.....	23
發表文章.....	29
龍蝦	37
1. 東引北海坑道龍蝦培育紀錄及評估.....	37
1.1 東引北海坑道龍蝦培育紀錄.....	37
2. 建立龍蝦種蝦與蝦苗繁殖培育技術.....	42
2.1 抱卵種蝦龍蝦收集及孵化.....	42
2.2 龍蝦葉狀幼苗 (phyllosoma) 培育特殊人工餌料測試.....	44
2.3 龍蝦葉狀幼苗培育.....	46
3. 東引海域地區龍蝦資源調查及放流評估.....	50
3.1 東引海域地區龍蝦資源水下調查.....	50
3.2 東引島龍蝦資源捕撈調查.....	53
4. 結論.....	55
5. 參考資料.....	55
藍眼淚及龍蝦成果發表會(記者會).....	57

108 年馬祖海域棲地及資源保育計畫

藍眼淚

1. 前言

1.1 馬祖海域棲地及資源

馬祖列島位於台灣海峽西北方，西臨閩江口東臨台灣海峽，由南竿、北竿、東莒、西莒、東引等二十個大小島礁組成。儘管總面積僅約二十九平方公里，圍繞各島嶼的海岸線及海域資源則非常的豐富。馬祖列島位處暖寒海流相匯邊緣，因此馬祖海域漁產非常豐饒，其中常見經濟魚種包括黃雞魚、黑鯛、黑毛、鱸魚、黃魚、黃鰭鯛、嘉納、紅甘等。

國立臺灣海洋大學團隊於 2016 年 4/12~4/15 期間，於馬祖南竿介壽澳口單一測站進行初步的水文探勘與設備架設，目的在了解連江縣南竿鄉介壽澳口海洋環境參數的變化，並累積馬祖海域棲地及資源的基礎資料。固定採集的海水相關參數包括溫度、鹽度、溶氧、pH 值、葉綠素等，同時亦觀察計數水中浮游植物及浮游動物等相關生物數據。期間於沿岸表層海水樣本水體裡發現能產生生物冷光的夜光蟲、並著手於實驗室培養。由於夜光蟲(藍眼淚)為馬祖觀光的主要熱點之一，因此嘗試探討海水水文相關參數與夜光蟲豐度的關係。

2017 年八月起由於『馬祖海域棲地及資源保育計畫』的支持，本研究團隊得以繼續於連江縣南竿鄉介壽澳口採集海洋環境參數及夜光蟲的豐度的數據，隔年再新增兩個採樣點—福澳港及北海坑道。目的希望利用所取得的相關生地化數據，一探藍眼淚出現的時機及機制，作為後續藍眼淚的預報準則或培養條件。

1.2 夜光蟲的分布與馬祖海域棲地

夜光蟲(*Noctiluca scintillans*)為一非常大、且呈腎形或氣球狀之渦鞭毛藻(蟲)單細胞生物。蟲體直徑介於 200-2000 μm (0.2-2 mm)之間。腹面後端凹下縱溝處為口部，口部前端有一小鞭毛，鞭毛前有一大觸手，觸手上具有黏膜以抓取食物，再將食物送入口部並在體內形成食泡。食泡會分泌消化酶以消化食物。分類上，夜光蟲科下僅有一個屬及一個種類。夜光蟲依生理表現可分為紅夜光蟲及綠夜光蟲，前者無法行光合作用，而後者群體內具共生藻(*Protoeuglena noctilucae*) (Wang et al., 2016)，因此呈現體色為綠色。綠夜光蟲雖然可攝食行異營性生活，但也可不攝食，僅靠共生藻光合作用所提供能量存活(Furuya et al. 2006, Saito et al.

2006)。另一方面，部分研究顯示綠夜光蟲無法單靠體內共生藻提供之能量存活(Gomes et al. 2014)。兩種夜光蟲分布區域不同，紅夜光蟲主要分布於熱帶、副熱帶與溫帶沿岸水域，綠夜光蟲主要分布於西太平洋與印度洋熱帶水域。馬祖發現之夜光蟲屬於紅夜光蟲(Harrison et al., 2011, Nakamura 1998b)。其營養模式完全靠攝食餌料於蟲體食物泡內，以維持族群的生存。餌料包括細菌、甲藻(渦鞭毛藻)、矽藻、纖毛蟲、橈足類幼生及卵等等(Kirchner et al. 1996, Quevedo et al. 1999, Fonda Umani et al. 2004, Huang and Qi 1997, Mikaelyan et al. 2014, Nakamura 1998a)。早期研究認為其非常貪吃遇到什麼吃什麼不具餌料選擇性(Uhlig and Sahling 1990, Saito et al. 2006)，但目前了解比較愛吃矽藻及渦鞭毛藻(Kjørboe and Titelman 1998, Fonda Umani et al. 2004, Liu and Wong 2006)。夜光蟲雖然缺乏游泳運動能力，但可藉由浮力在水表層生活。夜光蟲分布範圍非常廣，是個常見的沿岸種，並為一種赤潮(red tide)生物(Padmakumar et al. 2010, Miyaguchi et al. 2006)。

夜光蟲本身並不含毒性，然而在生長過程中，體內會累積許多氨。當該族群藻華(bloom)時，出現海域的海水溶氧會降低，進而影響生活於同一海域的其他生物。另一方面，當夜光蟲大量死亡時，體內的氨隨即流出並與海水混和。此時海水具高濃度的氨，直接影響、甚至造成周邊生物的死亡。儘管夜光蟲體內並不具任何毒性，由於該生物會釋出高濃度的氨、消耗海水溶氧並黏附於魚類的腮，因此仍被視為有害藻種(Harmful algal species, HAB)。

全世界沿岸海域在晚春到初夏海面非常平靜時，有時看到鮮紅到暗紅呈塊狀或條狀分布之水塊，此極可能就是夜光蟲形成之赤潮(Fonda Umani et al. 2004, Fukuda and Endoh 2006, Dela-Cruz et al. 2002)。此紅色為夜光蟲體內類胡蘿蔔素所造成。夜光蟲出現在溫帶、亞熱帶與熱帶沿岸及湧昇流水域(Gomes et al. 2014)，甚至在水溫 3°C 的阿拉斯加水域也曾發現它的足跡，目前為止僅有南極未見其蹤影(Harrison et al. 2011)。由此可知夜光蟲為分布極廣之廣溫性富營養水域浮游生物。由於其分布溫度範圍極大，因此有科學家推測溫帶與副熱夜光蟲適應溫度範圍不同，應該屬於不同品系。馬祖藍眼淚現象主要是由夜光蟲所表現的，而馬祖海域棲地亦是孕育夜光蟲的搖籃之一(Tsai et al. 2018)。目前鄉親說法，由於馬祖海岸地形、洋流、漲退潮等的特性，更有利於聚積原生族群及外來族群的夜光蟲，使當地有條件並利於開發藍眼淚生態觀光旅遊。

1.3 夜光蟲的生態與資源保育

夜光蟲為靠攝食維生之異營性無毒生物，雖然其經常出現在湧昇流或沿岸等富營養鹽高生產力海域，但造成其藻華現象之主因為，營養鹽帶動植物性浮游生物之成長，特別是矽藻。豐富之餌料促使夜光蟲能充分攝食獲得足夠能量，進而快速成長使族群數量急遽增加，因此夜光蟲屬於沿岸海域無毒異營性渦鞭毛藻，

在沿岸生態系可取代橈足類成為植物性浮游生物之主要消費者，扮演矽藻藻華終結者角色。所以在許多沿岸生態系均可發現此種矽藻與夜光蟲交替之藻華輪替現象。此種不同藻種藻華輪替現象在日本奈戶內海及南海也為常見的海洋生態現象。馬祖當地將夜光蟲藻華稱為「丁香水」，相傳看到這種生物大量出現，以它們為食物的丁香魚群就會大量出現。由以上所述可知馬祖位於閩江河口生態系，在此一富營養河口生態系中，夜光蟲出現或形成藻華為一正常海洋生態現象，對海洋環境或生態而言並非一個警訊或具有特別警示意義。

目前全世界夜光蟲藻華數目有增加情況，其中部分原因為大眾對環保意識增強所以警覺性增強。但也可能與全球環境暖化或沿岸富營養化有關，特別是沿岸生態系富營養化使營養鹽濃度快速累積，促使藻類數量快速增加，進而使夜光蟲藻華機率增加。因此在沿岸生態系環境監控，對環境保育來說是一個重要課題，特別是河口生態系之馬祖。

2. 材料與方法

2.1 採樣時間、地點及方法

本研究除了固定於連江縣南竿鄉介壽澳口測站進行採樣外，還增加了福澳港測站及北海坑道測站，目的在持續了解南竿夜光蟲數量(濃度)變化是否有年間的區域差異。採樣時使用水桶採集表層海水，立即以 Multiparameter Waterproof Meter (HANNA)量測海水溫度、鹽度、pH 值。然後以水桶裡的部分表層海水潤洗 8 L 裝的樣本桶後，剩餘的表層海水立即裝滿 8 L 樣本桶，並迅速帶回實驗室進行後續生物樣本固定、營養鹽及葉綠素樣本收集的實驗步驟。以夜光蟲出現與否分做兩種採樣頻率，包括 1) 3 月至 7 月間夜光蟲數量高峰期間盡量每天採樣一次與 2) 2 月前及 8 月後因幾乎未發現夜光蟲的存在，因此改為每個禮拜採集一次樣本。

2.2 細胞觀察與計數

將透明廣口聚丙烯瓶 (polypropylene bottle, Nalgene) 潤洗後，盛裝 500 ml 海水樣本，以福馬林溶液 (neutralized Formalin) 固定使最終濃度為 2%，用以量測夜光蟲細胞直徑大小並計數夜光蟲、矽藻以及潛在藍眼淚物種的數量。用以計數矽藻及夜光蟲數量的福馬林樣本，在進行沉澱前先將樣本瓶輕輕地上下搖混均勻後，倒入 100 ml 沉澱管中，讓沉澱管靜置 24 小時以上 (Utermöhl, 1958) 後，將沉澱管中的上層水移除製成玻片。製成玻片的過程，為保護已沉澱至玻片凹槽內的樣本，以蓋玻片覆蓋玻片。將製好的玻片放置於 Nikon-TMD 300 倒立式螢

光顯微鏡，以 200× 進行矽藻細胞的計數與觀察並觀察夜光蟲體內的內容物。再將玻片置於解剖顯微鏡，以 20× 進行夜光蟲細胞的計數並量測細胞直徑大小。

2.3 營養鹽測量

硝酸鹽 (nitrate, NO_3) 是以 Stickland and Parsons (1972) 和 Pink Azo Dye 方法 (Pai et al., 1990b) 作為測定原理。樣水先與氯化銨溶液($\text{pH}=8.5$)混合，經過錳銅還原柱將水中的硝酸根還原成亞硝酸根，再依序加入酸性磺胺試劑、NED 試劑反應，形成粉紅色的產物。最後以分光光度計 (SP-830+, Metertech Inc.) 在波長 543 nm 下測定，此方法之偵測極限：0.3 μM 。

磷酸鹽 (phosphate, PO_4) 是以氫鉬還原法 (Pai et al., 1990a) 作為測定原理。加入酸性鉬酸銨和錒的混合容易與樣水中的磷反應產生錯化合物 (phosphomolybdic heteropoly acid)，之後使用還原劑 (ascorbic acid, 3%) 形成藍色的化合物。最後以分光光度計 (SP-830+; Metertech Inc.) 在波長 880 nm 下測定，此方法偵測極限：0.03 μM 。

矽酸鹽 (silicate, SiO_3) 是以矽鉬還原法 (Pai et al., 1990a) 作為測定原理。添加酸性鉬酸銨混合溶液和樣水中的矽反應生成黃色的化合物 (silicomolybdic aci)，接著使用抑制劑 (tartaric acid) 避免化合物自身還原和磷酸鹽等的干擾，再加入還原劑 (ascorbic acid, 4%) 形成藍色的錯化合物 (silicomolybdic complex)。最後以分光光度計 (SP-830+, Metertech Inc.) 在波長 812 nm 下測定，方法偵測極限：0.2 μM 。

2.4 葉綠素測量

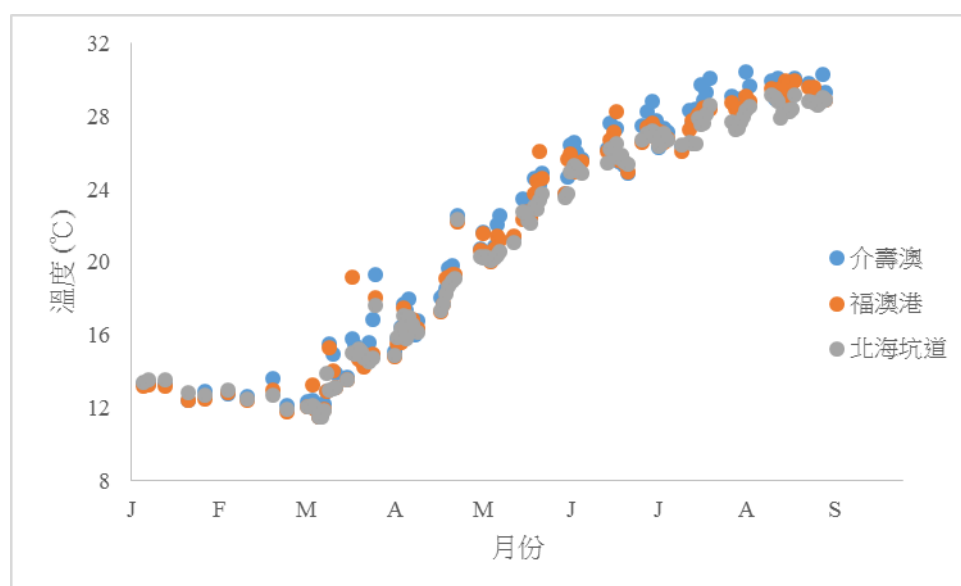
葉綠素 a (過濾 GF/F 與 2 μm) 資料是由國立臺灣海洋大學龔國慶老師實驗室提供。葉綠素 a (chlorophyll a, Chl a) 樣本以 1 公升的棕色聚丙烯瓶 (polypropylene bottle; Nalgene) 裝取，帶回實驗室後，再以抽氣過濾裝置將樣水分別過濾於玻璃纖維濾紙 (GF/F 25 mm, Whatman Ltd.) 與 2 μm 上，期間壓力維持在 100 毫米汞柱以下；將過濾後的濾紙的含顆粒物質之面朝內對折兩次避免光照，置於包埋盒內後存放於 -20°C 。

葉綠素 a 樣本是依據 Welschmeyer (1994) 改良的不加酸螢光法進行測定，操作過程應盡量避免光照。以 100% 丙酮進行萃取，萃取液再以具有藍光光源之螢光光度計 (Fluorometer, 10-AU, Turner Designs Inc.) 進行測量，方法偵測極限：0.01 mg Chl a m^{-3} 。

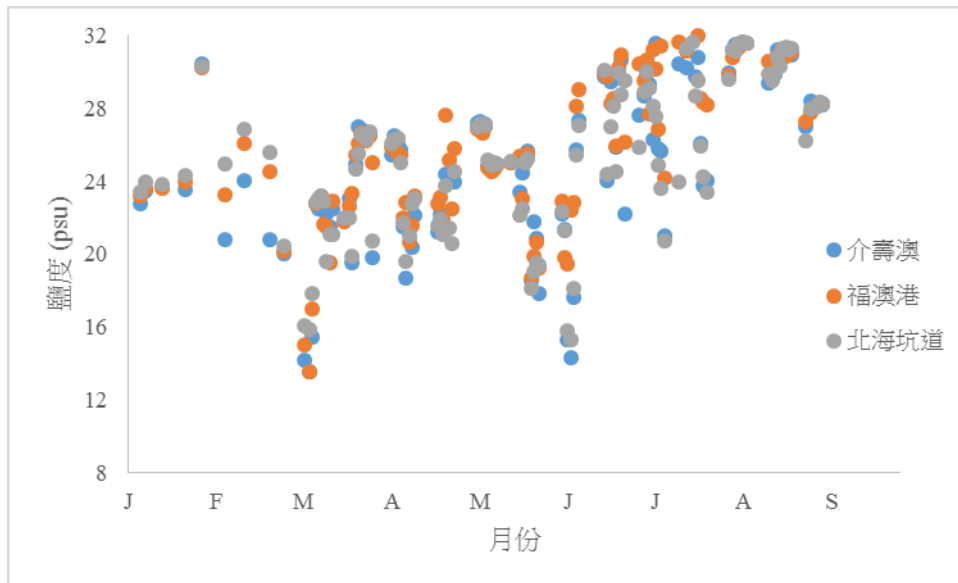
3. 結果

3.1 溫度、鹽度、pH 值、葉綠素值及溶氧值

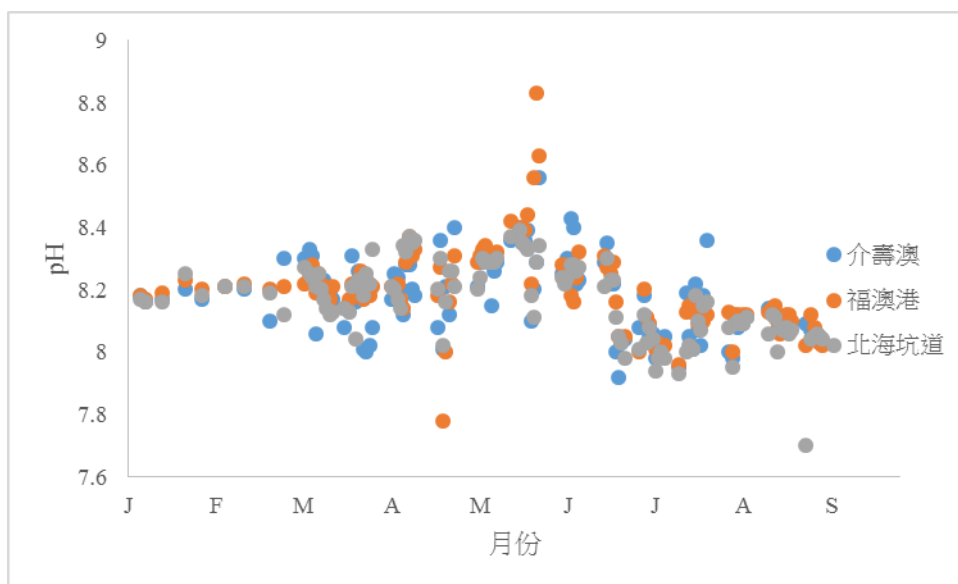
2019 年 1 月至 9 月之數據顯示海水表層溫度於三個採樣點有些微差異，大致上溫度由高而低依序為介壽澳口、福澳港及北海坑道，然而整體表層水溫隨時間的季節趨勢是一致的。3 月海水表層溫度最低，呈現約 12 °C，並隨著時間逐漸上升至 9 月初呈現約 29 °C 的高值(圖一)。採樣期間表層海水鹽度變化介於 13-32 之間，兩次表層海水鹽度極低值發生於 3 月初及 6 月初兩個期間，期間仍發生幾次低海水鹽度的現象；相反地，海水表層鹽度高值發生於 7、8 月前後(圖二)。海水表層 pH 值於研究期間介於 7.7-8.8 之間，期間有一次突然升高的高值，發生於 5 月底及數次降低的低值，時間介於 3 月底至 8 月中期間(圖三)。圖四顯示 2019 年 1 月到 9 月的表層海水葉綠素值(GF/F)的變化，圖中可發現葉綠素值在三個測站同採樣時間彼此間變化非常大，尤其在 3 月至 8 月之間。整體來說，三個測站的葉綠素值於 3 月初(< 0.2 mg/m³)開始有逐漸升高的趨勢，到六月初達到最高值(> 20.0 mg/m³)後，接著葉綠素隨著時間減少至 9 月初，並回復為冬季低值(< 0.2 mg/m³)狀態。介壽澳口有較頻繁的葉綠素高值出現，接著為福澳港站，而北海坑道葉綠素高值出現的頻率最低。單一葉綠素最高值出現於福澳港，時間發生於 6 月初(約 23 mg/m³)。如圖五所示，溶氧百分比在研究期間變化不大，約落在 60-110%之間。高值出現在二月底、三月中及五月中。在七月中後的溶氧數據有明顯呈現降低的趨勢，三個測站之數值均低於 100%。



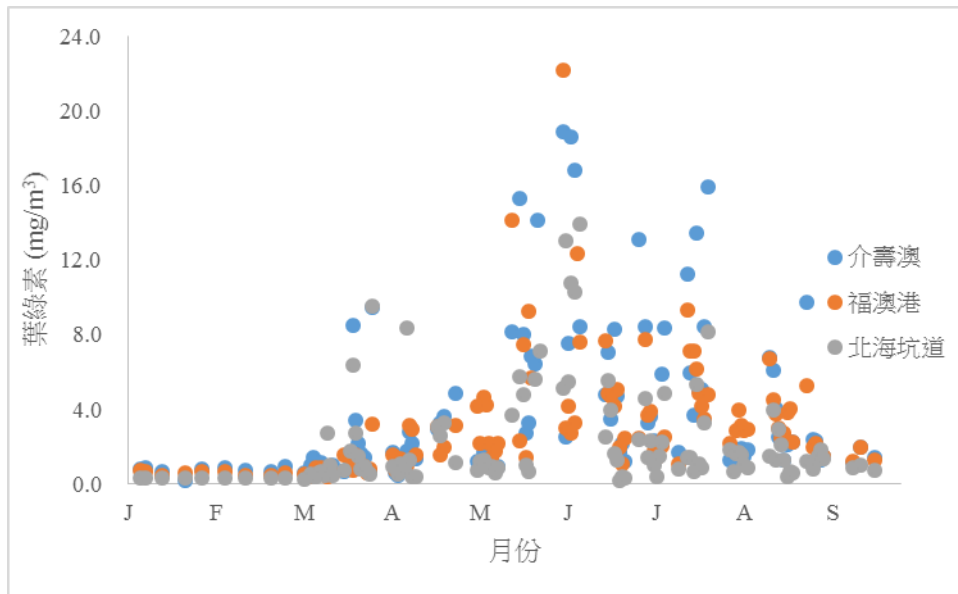
圖一、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水溫度隨時間的變化圖。



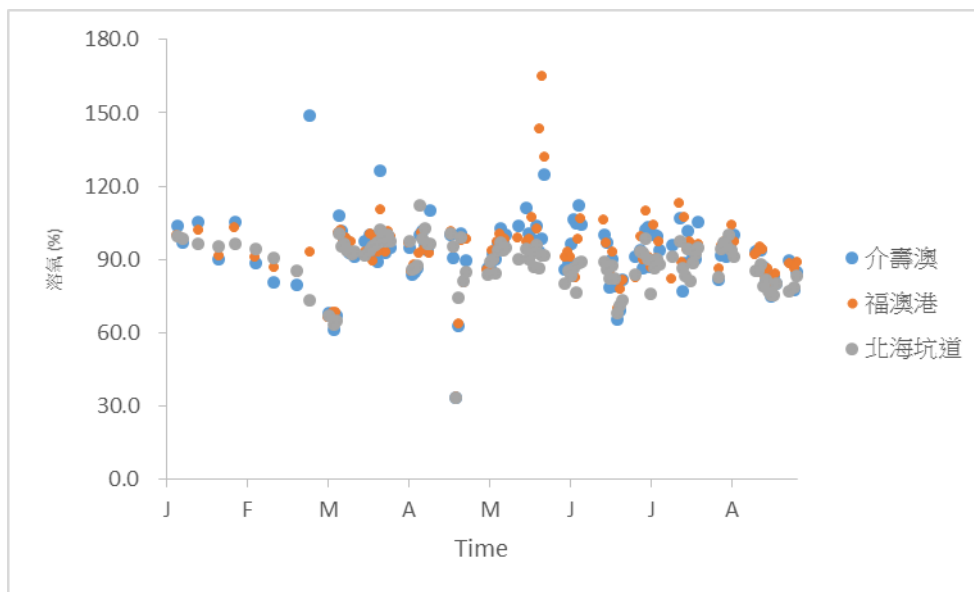
圖二、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水鹽度隨時間的變化圖。



圖三、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水 pH 值隨時間的變化圖。



圖四、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水葉綠素值(GF/F)隨時間的變化圖。



圖五、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水溶氧值(%)隨時間的變化圖。

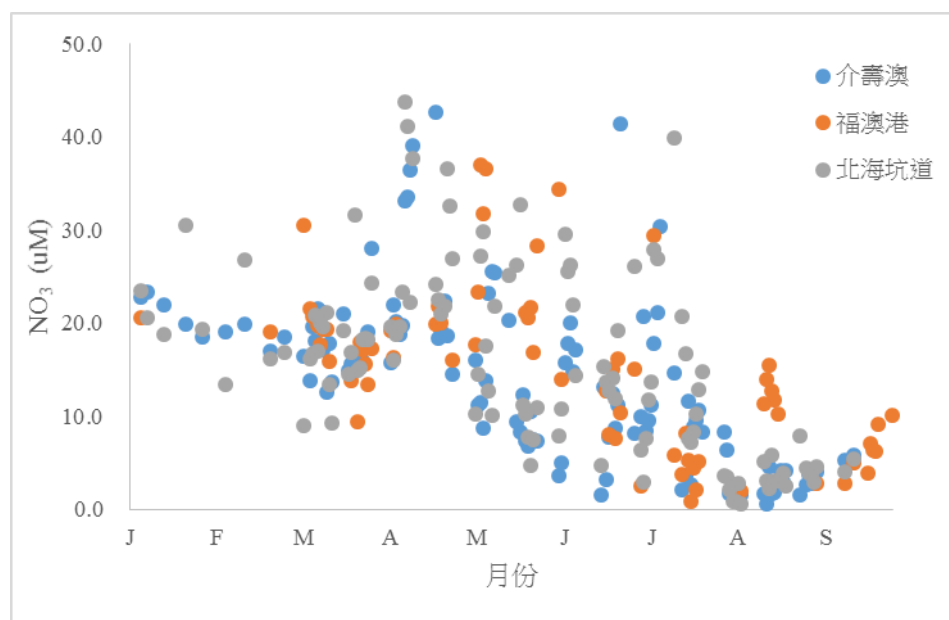
3.2 營養鹽濃度

三個測站研究結果顯示硝酸鹽、亞硝酸鹽、磷酸鹽與矽酸鹽的濃度變化除了少數幾個樣本不一致之外，整體趨勢非常相似(圖六-九)。圖六顯示硝酸鹽於4月初在介壽澳口及北海坑道測站均呈現高值(約 $44 \mu\text{M}$)，隨後慢慢遞減至8月約 $5 \mu\text{M}$ 的濃度。福澳港測站所測得之硝酸鹽趨勢與另兩側站相似，唯獨在八月中及九月中有較高值出現。整體硝酸鹽在八月後三個測站均於 $0\text{-}15 \mu\text{M}$ 之間

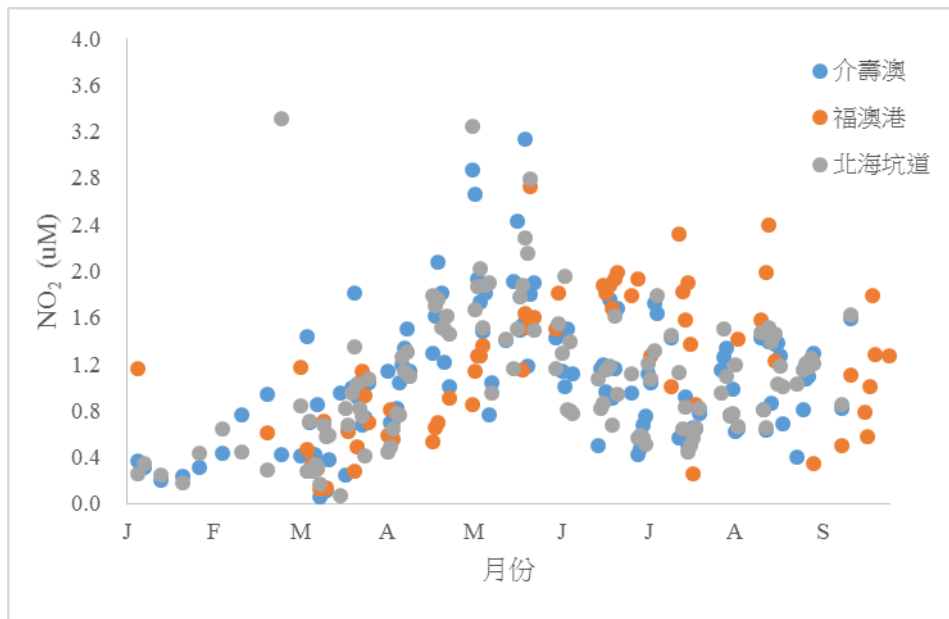
浮動。三測站中以介壽澳口與北海坑道所測得之硝酸鹽較高，福澳港則較低(圖六)。亞硝酸鹽在研究期間三個測站亦呈現同步之現象，由1月底濃度約0.2 μM 慢慢升高至5月初濃度約3.2 μM ，再慢慢降低至9月初，濃度範圍介於0-1.6 μM 之間(圖七)。

扣除掉零星幾個高值，三個測站之磷酸鹽趨勢幾乎一致，由1月的高值(約1.6 μM)一路降低至9月(<1.0 μM)。最高值出現在七月底的福澳港樣本，磷酸鹽約6.5 μM ，依序為北海坑道的6.2 μM 及介壽澳口的5.0 μM 。整體來說所測得之平均磷酸鹽值以介壽澳口最高、福澳港次之、而北海坑道則最低(圖八)。

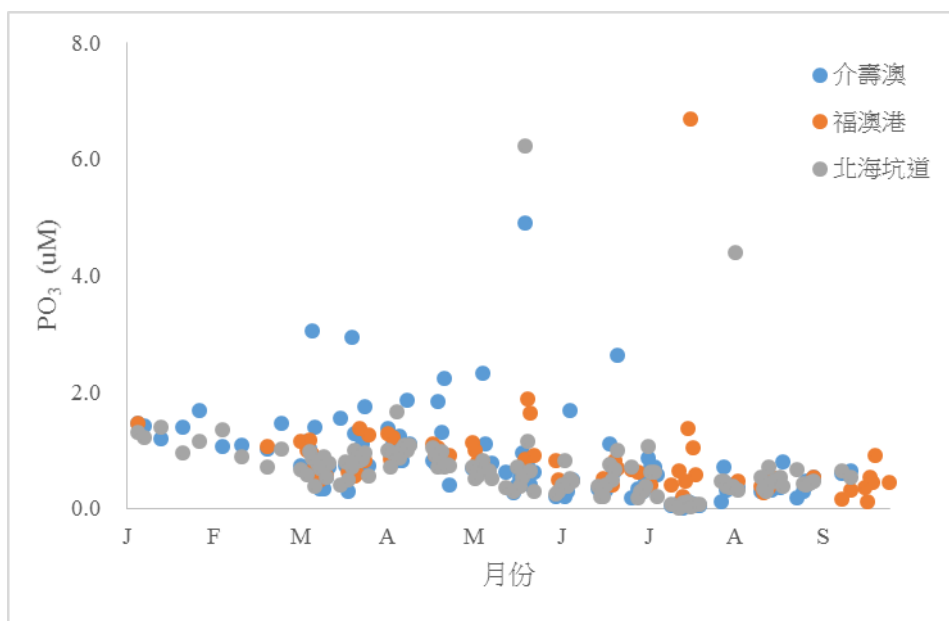
矽酸鹽在三個測站的濃度介於5-90 μM 之間，整體低值由1月約30.0 μM 一路降至6月中約8.0 μM (圖九)。1月至2月期間，矽酸鹽濃度顯得較穩定，各測站數值隨時間變化不大。而3月開始則出現數值變化較大的現象，其中變化最大值出現在6月底7月初之間，約有80 μM 的變化量，矽酸鹽濃度呈現非常不穩定的狀態。到了9月，矽酸鹽又慢慢地趨於穩定，濃度變化量10 μM 。



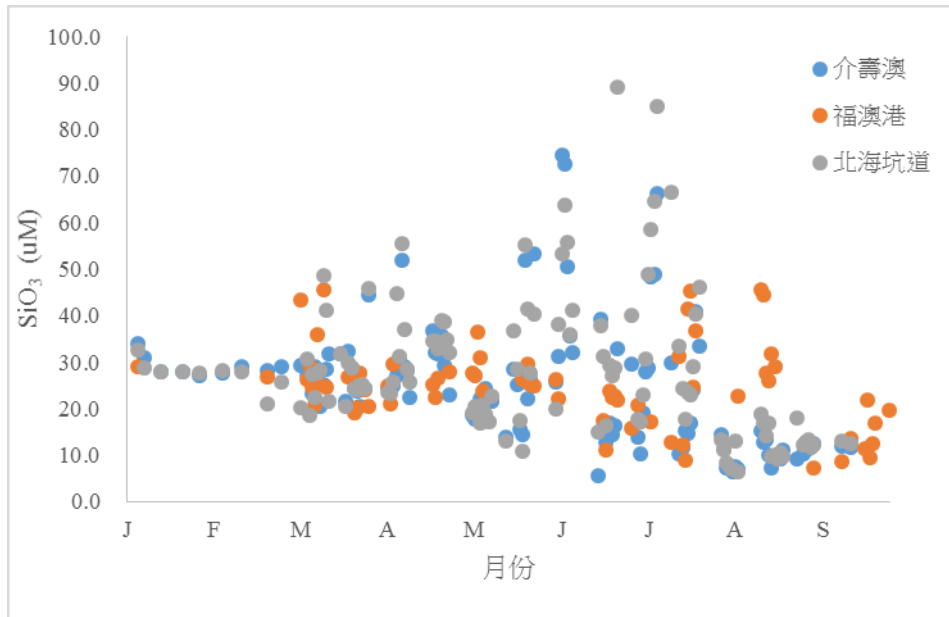
圖六、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水硝酸鹽隨時間的變化圖。



圖七、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水亞硝酸鹽隨時間的變化圖。



圖八、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水磷酸鹽隨時間的變化圖。

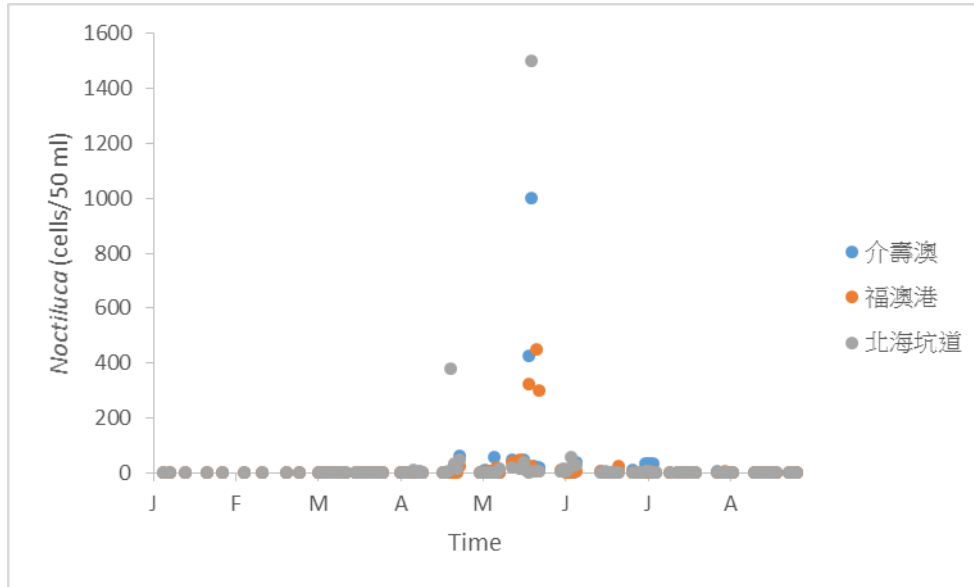


圖九、2019 年連江縣南竿鄉各測站海水矽酸鹽隨時間的變化圖。

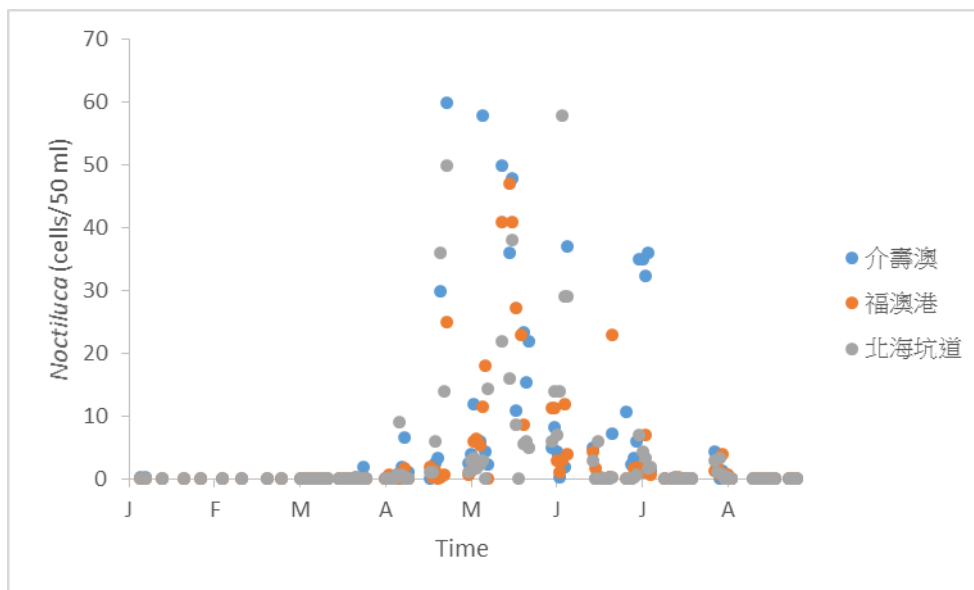
3.3 夜光蟲數量

研究採樣期間於 2019 年 1 月起至 8 月。由圖十可知，夜光蟲數量高值(大於 200 cells/50 ml)出現在 4 月中至 5 月之間。整體採樣水體中夜光蟲的數量(濃度)於 3 月底開始增加，最高值出現在 4 月中至 6 月初之間，7 月初過後夜光蟲數量明顯減少並趨近於零，除了 7 月底於三個採樣點有夜光蟲出現外(圖十一)。4 月至 6 月期間，介壽澳口及北海坑道均有兩個採樣天呈現超過 200 cells/50 ml 夜光蟲濃度的高值，部分採樣天出現大於 50 cells/50 ml 的數據，其餘時間夜光蟲數量則均低於 50 cells/50 ml。其中北海坑道最高值達 1500 cells/50 ml，高於介壽澳口的最高值 1000 cells/50 ml。儘管福澳港有三個採樣天顯示夜光蟲數量高於 200 cells/50 ml，但是最高值也僅接近 500 cells/50 ml，明顯較其他兩個測站的最高值來得低許多，其餘時間夜光蟲數量則均低於 50 cells/50 ml。整體來說，除了 7 月低頻度觀察到少量的夜光蟲之外，8 月之後採樣水體均不曾再發現夜光蟲的蹤跡。

四月至六月期間，夜光蟲在三個採樣點(介壽澳口、福澳港及北海坑道)的濃度範圍約落在 0 cells/50 ml 之間(圖十一)。在濃度大於 20 cells/50 ml 的條件下，夜光蟲在介壽澳口出現的次數(頻率)高於北海坑道，而福澳港出現的次數最低。因此相較於其他兩個測站，介壽澳口所觀察到的夜光蟲數量或次數均來得相對穩定。



圖十、連江縣南竿鄉各測站夜光蟲數量(cells/50 ml)隨時間的變化圖。



圖十一、連江縣南竿鄉各測站夜光蟲數量(cells/50 ml)隨時間的變化圖。

4. 討論

4.1 馬祖周遭海洋監測

本研究為馬祖海域棲地及資源保育計畫，針對介壽澳口測站進行了三年的海洋監測工作，目的在了解連江縣海洋環境參數隨時間的變化，作為馬祖海域棲地的背景資料及後續海洋監測的依據。其中3月至7月夜光蟲數量高峰期以

每天採樣一次的頻率進行；而 2 月前及 8 月後由於水體葉綠素明顯將低，因此改為每個禮拜採集一次樣本的頻率。調查數據包括海水溫度、海水鹽度、海水葉綠素值、水體營養鹽及夜光蟲現存量等海洋生物化參數。

本研究所得之海水溫度隨時間變化在三年期間(2017 至 2019 年)所呈現的資料非常接近，亦即溫度自 4 月低值(17°C)開始上升至八月底。鹽度的變化主要受到淡水注入影響，因此三年的數據彼此有點不同。

葉綠素值於三月開始有慢慢增加的趨勢，整體呈現初春(3 月)表層海水葉綠素由低值(< 0.5 mg/m³)慢慢增加至 7 月中的高值後，又開始逐漸降至低值(< 1 mg/m³)的範圍。營養鹽的部分可了解到三個採樣年在硝酸鹽、亞硝酸鹽、磷酸鹽與矽酸鹽的濃度變化趨勢均非常相似。

由葉綠素及營養鹽的資料說明著，三年的數據趨勢相似、變化也相似。亦即海水表層營養鹽濃度的減少主要轉換成基礎生產力(葉綠素)--當葉綠素值高時，大部分營養鹽被植物性浮游生物吸收以進行光合作用，最終降低海水表層營養鹽濃度。反之，當海水裡的葉綠素濃度降低時，亦即植物性浮游生物較少，需要的營養鹽也相對少，此時環境中的營養鹽濃度慢慢增加，而有營養鹽隨時間增長而增加的現象。

4.2 馬祖周遭夜光蟲生態調查

為了解連江縣海洋環境參數的變化與夜光蟲的豐度隨時間的變化，本年度研究在現有海洋環境觀測點，包括介壽澳口、福澳港及北海坑道共三個採樣點進行監測紀錄。由於 3 月至 8 月為夜光蟲數量的高峰期，因此採取每天採樣一次的頻率；而 2 月之前及 9 月之後因幾乎未發現夜光蟲的存在，因此每個禮拜僅採集一次樣本作為水文背景數據累積。三個觀測點各計 120 次樣本數，共計 360 次數據資料，包括量測海水溫度、鹽度、營養鹽(亞硝酸、硝酸、磷酸根、矽酸鹽)及葉綠素與夜光蟲計數等海洋生物化學參數。

本研究所得之溫度隨時間變化與過去研究資料相似，亦即溫度自 2 月低值(約 12°C)開始上升至八月初。鹽度則介於 13-33 之間，其中於 3 月及 7 月鹽度急遽降低至約 13 左右，主要與淡水注入有關。

目前呈現夜光蟲數量數據期間為 2019 年 1 月至 8 月，夜光蟲出現的月份分別介於 3 月底至 7 月初之間。3 月底前無任何夜光蟲的蹤跡，而七月後夜光蟲濃度(數量)大都為零，僅少數零星的採樣天有觀察計數到夜光蟲。此結果與 2016 及 2018 年的數據相似，夜光蟲豐度的高峰期主要坐落於四月到六月間，隨後即幾乎消失不見蹤影，僅有零星的夜光蟲出現。歷年來儘管十月後溫度已降至夜光蟲適合生存的條件，但是仍未見夜光蟲高頻率且大量出現。由圖四可知葉綠素值在八月末呈現與冬季二月前一樣的低濃度，推測該濃度不足以供應夜光蟲基本的生存能量，因此夜光蟲主要受到餌料不足的影響，所以儘管溫度又回到

適合的條件仍不見夜光蟲的蹤影。

由此連續三年(2016-2019)的結果可知，藍眼淚沿岸(野外)生態觀光季，亦即藍眼淚(夜光蟲)大量出現的期間，主要落在四月到六月期間。儘管夜光蟲野外的濃度有幾次高值 6-30 cells/ml 出現(300-1500 cells/50 ml)，但是大部分濃度均不超過 1 cell/ml (50 cells/50 ml)，遠低於藍眼淚生態館體驗區內的夜光蟲的最低濃度(~50 cells/ml)。

夜光蟲對連江縣來說是個重要的資源，他不僅具有生態教育的重要性、同時也是帶動馬祖觀光的重大能量。由於夜光蟲的餌料包括甲藻(渦鞭毛藻)、矽藻等等，而上述生物部分為潛在的有害藻類生物。當上述生物大爆發時(亦即發生藻華時)，貪吃的夜光蟲對調控海裡的浮游生物具有一定的能力，可以及時將有害的藻類攝食並抑制該藻類的族群量。因此在馬祖海域可以觀察到浮游生物的更迭現象，即浮游植物大量發生後，隨即伴隨著貪吃的夜光蟲大量發生，夜光蟲再被其他攝食者掠食，最後向上傳遞至最高食物階層的魚類，形成一完整的食物鏈。由於夜光蟲體內含氮量非常多，當夜光蟲死亡或著被掠食時，勢必將排出體內部分的氮於海水裡。儘管夜光蟲在水體裡數量的消長或多或少會影響環境中的氮的濃度，但是此消長與夜光蟲體內氮的排出之間的有無對等性仍是個謎，因此暫時無法解釋夜光蟲的消長與環境中氮的平衡關係，待後續的研究繼續探討。

儘管夜光蟲藻華(bloom)時，可能造成出現海域的海水溶氧會降低，進而影響生活於同一海域的其他生物。另一方面，當夜光蟲大量死亡時，體內的氮隨即流出並與海水混和，此時海水具高濃度的氮，將直接影響、甚至造成周邊生物的死亡。再者，大量死亡的夜光蟲亦可能提供細菌能量來源，造成水體大量細菌的滋長，嚴重影響海水水質。儘管有上述三種可能，但是目前於馬祖觀察到的夜光蟲藻華現象，僅僅維持不超過三天，期間夜光蟲生物量消散過程可能受到洋流帶離或著生物間的競爭攝食過程影響。因此在馬祖發生的夜光蟲藻華並不會影響馬祖週遭海水的水質，即不會發生上述三種可能的情況。夜光蟲(藍眼淚)無毒害，馬祖藍眼淚現象實為食物鏈生態上生物更迭的一過程，當夜光蟲的餌料生物增加，接踵而來的就是攝食該餌料的夜光蟲，此一現象不足以作為一種汙染指標。

4.3 夜光蟲實驗室培養

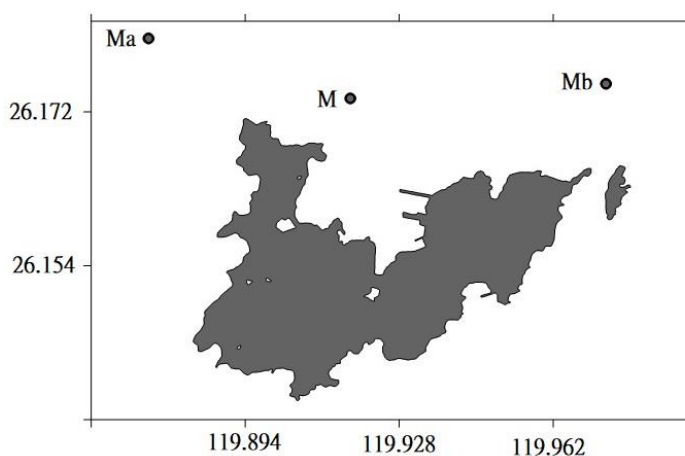
由於水體生物間的相互作用、風向的變化、潮汐漲退、月之陰晴圓缺等因素的影響，夜光蟲出現時機難以掌握。儘管旅客於每年 4 月至 6 月期間至馬祖當地追淚，撲空的機會高達 7 成(縣府官方統計)，更遑論非淚況好發期之其他月份，即 7 月至隔年 3 月共 9 個月期間。另一方面，馬祖地區屬亞熱帶海洋性氣候，受季風、洋流及地理位置影響，在好發藍眼淚(夜光蟲)奇景之春夏季期間多霧，使

飛機無法起降，造成馬祖常處於鎖島狀態，旅客想一探馬祖之秘境亦不得其門而入。此為馬祖藍眼淚觀光旅遊發展之重大瓶頸。為解決此一難題，目前已利用單離後大量實驗室培養的夜光蟲進行『馬祖藍眼淚生態館』之室內展示，並穩定提供小規模商業展示所需之培養夜光蟲。

送至藍眼淚展覽館體驗區之夜光蟲，淘汰後將帶回實驗室，加入漂白水使其最終濃度低於適用於一般家居清潔的濃度(1:99 稀釋家用漂白水)，約以 10 毫升漂白水混和於 10 公升清水內，作為清除夜光蟲的一方法。在稀釋的漂白水加入淘汰的夜光蟲水體時，明顯可以觀察到極亮的藍色生物冷光產生，然而隨著夜光蟲浸泡漂白水時間的增加，生物冷光的亮度越來越低，代表殺滅夜光蟲正進行中。最後再以攪拌棒擾動水體確認水體夜光蟲均無藍色生物冷光產生，才確認已完成夜光蟲的清除。夜光蟲現階段夜光蟲培養已從 40 公升的培養技術升級到 60 公升，完成本年度中規模培養的目標，而後續超過 60 公升之大規模培養及展示條件，目前仍存在許多盲點待克服，需後續的計畫經費繼續支持。

4.4 48 小時連續採樣觀測

107 年額外嘗試於馬祖外海單一測站進行 24 小時觀測，瞭解夜光蟲日周變化與潮汐的關係，希望究明漲退潮是否會對夜光蟲數量造成影響，結果顯示兩者似乎有很好的關係存在。推測漲潮時將外海的夜光蟲帶到馬祖海域，並持續累積達到可觀賞藍眼淚之濃度。本年度利用國立台灣海洋大學海研二號研究船於 4 月 22 日至 26 日於馬祖南竿及北竿間的海域，設計三個樣本採集點(同 107 年測站左右約 4 公里處各增加一個測站，亦即 Ma 及 Mb 站)，進行採樣及觀測研究(圖十二)。此三個採樣點主要依據海水漲退潮流的方向設計，期待能獲得受漲退潮影響下三個測站呈現不同夜光蟲生物量(生物濃度梯度)的數據，目的在提供更精確數據，以佐證漲退潮確實影響夜光蟲生物量的變化。



圖十二、馬祖採樣測站位置圖。

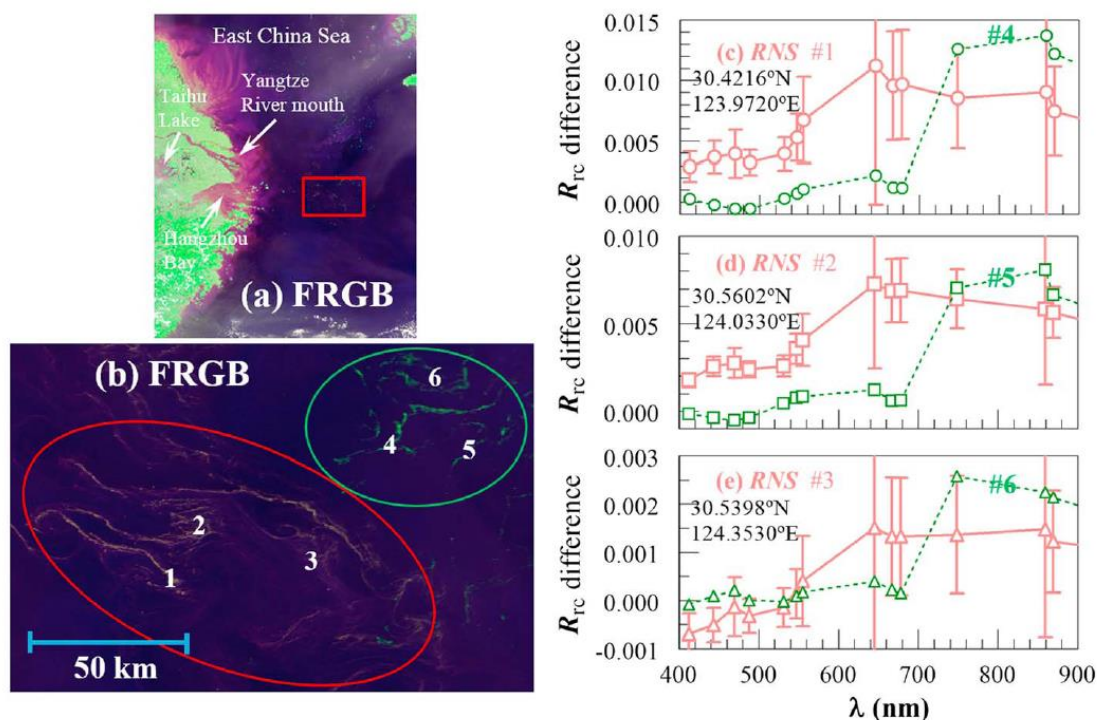
潮汐與夜光蟲的關係

由於 Ma 站靠近中國大陸，受到閩江沖淡水的影響較 M 站及 Mb 站大，數據較不穩定，故排除 Ma 站，後續僅分析 M 站及 Mb 站的潮汐動向與夜光蟲的關係。然而不管是代表著物理意義的鹽度，或是代表生物意義的夜光蟲，兩者的分析結果並不理想，亦即 M 站觀測到的夜光蟲數量變化，並不能以東西方向的水流(平流)來解釋，意味著馬祖海域的海水變動可能還受到其他因素影響，如南北向水流。去掉潮汐因子後，3 個測站表層的鹽度由東至西遞減，底層鹽度則相反。受到閩江沖淡水影響，鹽度、密度較低的淡水在上層由西向東流，而鹽度、密度較高的海水則在下層由東向西流，由此可知馬祖海域表層水流與底層水流相反，故以一維東西向的平流來計算，可能會忽略閩江沖淡水的影響。

4.5 藍眼淚研究成果

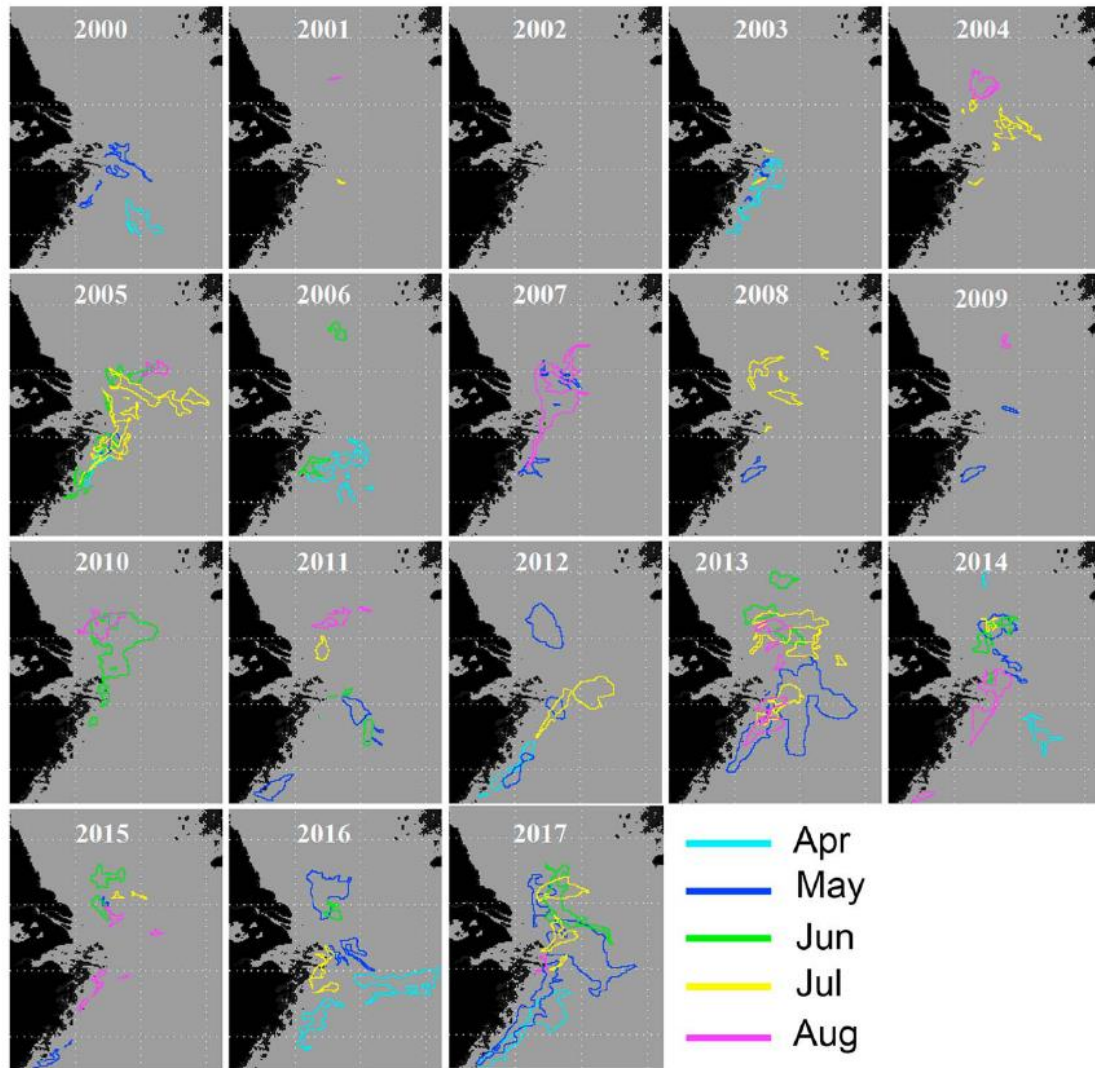
2019 年登載於國際知名學術期刊地球物理研究通訊(Geophysical Research Letter)，該雜誌為該領域 196 個國際期刊中排名第 14，影響因子超過 4，為非常受到國際重視之重量級學術刊物。該論文提及研究夜光蟲的重要性在於，1)它是能形成赤潮的異營性鞭毛蟲、2)它可以在晚上產生藍色生物冷光(藍眼淚)吸引遊客、及 3)以其他浮游植物和浮游動物為食，並在海洋生態上扮演重要角色。然而，幾乎所有基於現場或實驗室所獲得的夜光蟲的相關研究，均受到空間和時間上的限制(採樣密度及頻度的限制)，在此條件下是很難解釋夜光蟲大爆發的動態。

由於夜光蟲顯示出獨特的吸收和散射光特性，可以使其與其他藻類區分開來。這是因為藍色反射光譜的增強及夜光蟲本身散射光增強所致，造成相關光譜的反射率高於其他沒有夜光蟲的水域(圖十三)。比利時學者於沿岸水域比較夜光蟲在現場和衛星所獲得的數值，證實了理論上衛星遙感影像中可以將夜光蟲與其他藻類區分開來。其鑑別度主要取決於夜光蟲濃度是否高到足以產生可檢測的信號，更重要的是，此衛星遙感影像技術可以從大範圍的空間中檢測出較小的夜光蟲區塊。



圖十三、藉由一般解析影像之分光輻射計遙測所感應到的光譜可監測及鑑定夜光蟲大爆發之實例證明。(a) 2017 年 5 月 18 日一般解析影像之分光輻射計所顯示之研究區域圖像。(b) 將圖 a 內紅正方形放大後，表層黃棕色及綠色的線條可明顯被觀察到，並各別隨機取三個點進行影像分析比較，並呈現於圖(c)、圖(d)及圖(e)。由圖(c)、圖(d)及圖(e)可知夜光蟲的光譜明顯與其他藻類的光譜不同，並以此作為夜光蟲特徵辨識。

由於東海已有許多夜光蟲大爆發的野外觀察報告，且長江沿岸實為高度複雜的生態系統，因此本研究利用每 1-2 天高頻率密集地衛星遙感海色數據，探討過去 20 年東海長期夜光蟲的分佈，目的在嘗試運用遙測技術捕捉光學複雜的水中夜光蟲大爆發的證據(圖十四)。希望以此研究作為研究概念初探，促進其他具有相似的光學和生物複雜性的區域之夜光蟲研究。



圖十四、藉由一般解析影像之分光輻射計及光譜分析顯示，2000 年至 2017 年間夜光蟲於四月至八月期間在東海的樂分布情況。未出現之顏色即代表該年度該月份(代表顏色)並未發現夜光蟲的蹤跡。

總體來說由於夜光蟲的生物量具短暫存在的特性，因此一般的研究方法很難追蹤。本研究利用夜光蟲其獨特的吸收光和散射光特性，以衛星遙感數據進行夜光蟲現存量的剖析及識別。利用東海 2000-2017 年間既有之衛星遙測成像光譜數據的回顧，嘗試分析及探討夜光蟲於東海的分布情形，包括季節性分布過程和年間變化等。研究數據呈現夜光蟲大爆發有隨著年間增加的趨勢，並推測水文和生物因素的變化可能受到三峽大壩的建設過程影響。本研究亦發現不管在沿海或東海近海水域都有夜光蟲的蹤跡，最遠甚至可分布到 126°E （距長江口 $> 330\text{ km}$ ），此結果與早期僅限於沿岸的現場採樣研究報告不同。另外與馬祖沿岸海域研究結果不同在於，夜光蟲大爆發亦發生在水溫介於 $28 - 30^{\circ}\text{C}$ 的 8、9 月期間，遠遠超出了先前 27°C 以下的溫度範圍。

5. 總結

閩江在馬祖河口生態系扮演非常重要陸源營養物質供應角色，閩江水帶入之無機營養鹽包括氮、矽與磷，提供微細藻類生長所需，所以在洪水期這些陸源營養物質明顯較高，其中矽明顯控制了微細藻類，特別是矽藻的成長。依據本研究顯示矽藻為夜光蟲主要餌料。所以我們推論夜光蟲大量成長或藍眼淚形成的機制為：洪水期閩江水帶入豐富之陸源性無機營養鹽，特別是矽酸鹽進入馬祖周遭水域，這些營養鹽造成矽藻大量快速成長，這些矽藻為夜光蟲主要餌料，豐富之餌料引發夜光蟲快速成長形成藻華現象，所謂藻華是指微細藻類短期間大量增加狀態。當洪水期結束，河水注入減少，帶入營養鹽也跟著減少，所以矽藻成長受到限制，夜光蟲由於餌料不足，成長受到抑制，所以跟著也自然消失，形成矽藻與夜光蟲交替之藻華輪替現象。此不同藻種藻華輪替現象在日本奈戶內海及南海也為常見的海洋生態現象。

夜光蟲是否為破壞環境之有害藻華生物？一般有害藻華生物，造成環境危害最主要有兩個原因，一為生物本身會排放有毒物質，一為藻華結束後，因為細菌大量分解死亡藻類，耗盡水中氧氣，造成魚類因缺氧而大量死亡。馬祖藍眼淚為夜光蟲所形成，夜光蟲為無毒渦鞭毛藻，所以不會產生任何有毒物質。其次馬祖夜光蟲藻華是矽藻刺激誘發所造成，當矽藻被攝食耗盡後，夜光蟲也跟著消失，目前為止也未發現夜光蟲藻華結束後，魚類缺氧死亡之現象。最後需特別強調的是，矽酸鹽是造成馬祖海域矽藻藻華最主要原因，矽之主要來源為陸上砂石，砂石中矽酸鹽溶入河水，最後被帶入海洋，所以矽酸鹽基本上與都市生活廢水或農業施肥無關。馬祖是一個富營養河口生態系，發現夜光蟲出現或形成藻華為一正常海洋生態現象，因此不能以出現夜光蟲即視為海洋環境、生態惡化的指標。

目前初步之藍眼淚預報模式可參考的參數包括 1)溫度--當馬祖周遭海域海水溫度高於 27°C 時，基本上夜光蟲出現的機率微乎其微；2)葉綠素值--夜光蟲的生物量與葉綠素值呈現正相關，葉綠素值亦代表餌料的匱乏與否；3)潮汐--部分數據顯示夜光蟲的高值出現在漲潮期間，有比較好的關係。

上述所有研究成果均可包裝成生態教育的重要知識提材，後續可提供並即時更新馬祖藍眼淚生態館更詳細的夜光蟲研究相關成果與內容，此重要的研究成果將豐富生態館的科普新知、並讓旅遊層次更有深度，將有效帶動地方觀光產業以及增加民眾對於海洋環境之正確觀念。未來更希望將採樣點擴及至北竿、莒光及東引，並再增加其他可能影響夜光蟲之參數監測工作，包括光度、波長等。

本年度藍眼淚研究成果包括 1)夜光蟲的出現為一矽藻與夜光蟲交替之藻華輪替現象；2)夜光蟲有日夜垂直分布的現象；及 3)透過衛星遙測可以觀察到夜光蟲的分布情況。後續相關的影音報導照片等資料，將於 108 年 12 月 25 日成果發表會後補充。

6. 參考文獻

- Dela-Cruz, J., Ajani, P., Lee, R., Pritchard, T. & Suthers, I. 2002. Temporal abundance patterns of the red tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* along the southeast coast of Australia. *Marine Ecology Progress Series*, 236:75-88.
- Eckert, R. 1966. Subcellular Sources of Luminescence in *Noctiluca*. *Science*, 151:349-352.
- Eckert, R. & Reynolds, G. T. 1967. The subcellular origin of bioluminescence in *Noctiluca miliaris*. *The Journal of General Physiology*, 50:1429-1458.
- Fonda Umari, S., Beran, A., Parlato, S., Virgilio, D., Zollet, T., De Olazabal, A., Lazzarini, B. & Cabrini, M. 2004. *Noctiluca scintillans* MACARTNEY in the Northern Adriatic Sea: long-term dynamics, relationships with temperature and eutrophication, and role in the food web. *Journal of Plankton Research*, 26:545-561.
- Fukuda, Y. & Endoh, H. 2006. New details from the complete life cycle of the red-tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (Ehrenberg) McCartney. *European Journal of Protistology*, 42:209-219.
- Furuya, K., Saito, H., Sriwong, R., Omura, T., Furio, E. E., Borja, V. M. & Lirdwitayaprasit, T. 2006. Vegetative growth of *Noctiluca scintillans* containing the endosymbiont *Pedinomonas noctilucae*. *African Journal of Marine Science*, 28:305-308.
- Gomes, H. d. R., Goes, J. I., Matondkar, S. G. P., Buskey, E. J., Basu, S., Parab, S. & Thoppil, P. 2014. Massive outbreaks of *Noctiluca scintillans* blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia. *Nat Commun*, 5:4862.
- Harrison, P. J., Furuya, K., Glibert, P. M., Xu, J., Liu, H. B., Yin, K., Lee, J. H. W., Anderson, D. M., Gowen, R., Al-Azri, A. R. & Ho, A. Y. T. 2011. Geographical distribution of red and green *Noctiluca scintillans*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29:807-831.
- Huang, C. & Qi, Y. 1997. The abundance cycle and influence factors on red tide phenomena of *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) in Dapeng Bay, the South China Sea. *Journal of Plankton Research*, 19:303-318.
- Kirchner, M., Sahling, G., Uhlig, G., Gunkel, W. & Klings, K. W. 1996. Does the red tide-forming dinoflagellate *Noctiluca scintillans* feed on bacteria? *Sarsia*, 81:45-55.
- Kjørboe, T. & Titelman, J. 1998. Feeding, prey selection and prey encounter mechanisms in the heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans*. *Journal of Plankton Research*, 20:1615-1636.
- Liu, X.-J. & Wong, C. K. 2006. Seasonal and spatial dynamics of *Noctiluca*

- scintillans in a semi-enclosed bay in the northeastern part of Hong Kong. *Botanica Marina*, 49:145-150.
- Mikaelyan, A. S., Malej, A., Shiganova, T. A., Turk, V., Sivkovitch, A. E., Musaeva, E. I., Kogovšek, T. & Lukasheva, T. A. 2014. Populations of the red tide forming dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (Macartney): A comparison between the Black Sea and the northern Adriatic Sea. *Harmful algae*, 33:29-40.
- Miyaguchi, H., Fujiki, T., Kikuchi, T., Kuwahara, V. S. & Toda, T. 2006. Relationship between the bloom of *Noctiluca scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay, Japan. *Journal of Plankton Research*, 28:313-324.
- Nakamura, Y. 1998a. Growth and grazing of a large heterotrophic dinoflagellate, *Noctiluca scintillans*, in laboratory cultures. *Journal of Plankton Research*, 20:1711-1720.
- Nakamura, Y. 1998b. Biomass, feeding and production of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan. *Journal of Plankton Research*, 20:2213-2222.
- Padmakumar, K. B., SreeRenjima, G., Fanimol, C. L., Menon, N. R. & Sanjeevan, V. N. 2010. Preponderance of heterotrophic *Noctiluca scintillans* during a multi-species diatom bloom along the southwest coast of India. *International Journal of Oceans and Oceanography*, 4:55-63.
- Quevedo, M., Gonzalez-Quiros, R. & Anadon, R. 1999. Evidence of heavy predation by *Noctiluca scintillans* on *Acartia clausi* (Copepoda) eggs off the central Cantabrian coast (NW Spain). *Oceanologica Acta*, 22:127-131.
- Saito, H., Furuya, K. & Lirdwitayaprasit, T. 2006. Photoautotrophic growth of *Noctiluca scintillans* with the endosymbiont *Pedinomonas noctilucae*. *Plankton and Benthos Research*, 1:97-101.
- Tsai, S.-F., Wu, L.-Y., Chou, W.-C. & Chiang, K.-P. 2018. The dynamics of a dominant dinoflagellate, *Noctiluca scintillans*, in the subtropical coastal waters of the Matsu archipelago. *Marine Pollution Bulletin*, 127:553-558.
- Uhlig, G. & Sahling, G. 1990. Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population dynamics and red tide phenomena 1968–1988. *Netherlands Journal of Sea Research*, 25:101-112.
- Wang, L., Lin, X., Goes, J. I. & Lin, S. 2016. Phylogenetic Analyses of Three Genes of *Pedinomonas noctilucae*, the Green Endosymbiont of the Marine Dinoflagellate *Noctiluca scintillans*, Reveal its Affiliation to the Order Marsupiomonadales (Chlorophyta, Pedinophyceae) under the Reinstated Name *Protoeuglena noctilucae*. *Protist*, 167:205-216.

附件、委員期中、期末審查提問與回答

問題	回答
1. 於實驗室培養之藍眼淚，後續如何處理請說明。	於『4.3 夜光蟲實驗室培養』第二段裡補充說明。
2. 海大報導夜光蟲沒有毒性，但在報告內第一頁下方有寫到期刊「仍被認為有毒藻種」，請再補充說明。	已更改為有害藻種。
3. 藍眼淚對於馬祖觀光發展有非常大的幫助，但仍有不少質疑認為藍眼淚影響水質。藍眼淚若無毒害，那是否可以當作為一種汙染指標，研究團隊請提供這方面的資料補充說明。	新增內容於『4.2 馬祖周遭夜光蟲生態調查』第六段補充說明。
4. 報告中提到7月至8月溫度很高所以沒有藍眼淚，但1月至2月份溫度並不高，為何也沒有藍眼淚，請補充說明。	已於『4.2 馬祖周遭夜光蟲生態調查』第三段補充說明。
5. 夜光蟲數量每月都有調查，但報告中只有寫了大概的分析，沒有像簡報這麼詳細，請將詳細研究內容補充在報告中。	已於『4.2 馬祖周遭夜光蟲生態調查』補充詳細調查內容。
6. 衛星圖研究的部分報告中也沒有看到，請再補充。	新增至『4.5 藍眼淚研究成果』。
7. 於淡季中採樣之海水是否還有夜光蟲的蹤跡，請團隊補充說明。	已於『4.2 馬祖周遭夜光蟲生態調查』補充詳細調查內容。
8. 報告書中第8頁，是否有漏掉段落，請確認。	已補齊遺漏的部分。
9. 對於棲地的資料敘述較少，應多補充相關資料。	『馬祖海域棲地及資源』的部分已於【前言--1.1 馬祖海域棲地及資源】及【結果--3.1 溫度、鹽度、pH值及葉綠素值、3.2 營養鹽濃度】等部分補充相關資料。
10. 夜光蟲的數量與水溫、鹽度，是否都是正相關。	與鹽度有負相關，但是與溫度並沒明顯的關係。
11. 藍眼淚目前培養的基礎模式可否安排專人至馬祖高中做專題介紹。	對夜光蟲培養基礎模式的專題介紹保持正面的看法，並期待馬祖高中的安排。
12. 目前監測站集中在南竿地區，是否有考慮過在其他鄉設置觀測點。建議未來若有機會，可以將莒光、北竿及東引納入觀察點，並設立採樣點。	礙於人力及研究站的限制，所以監測站僅集中在南竿地區。人力閒餘時，不排斥觀察計數縣民自發性提供四鄉

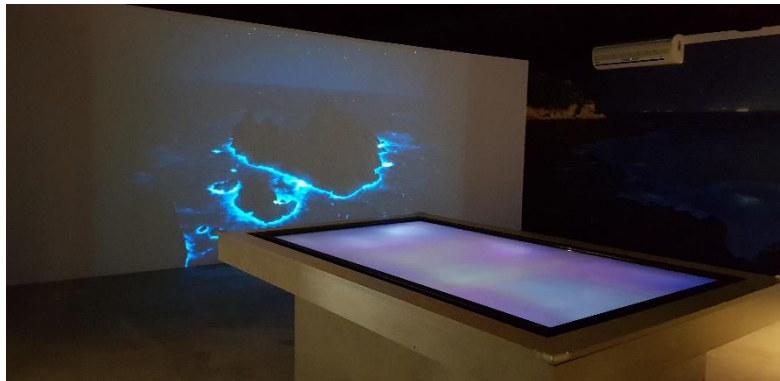
	五島的海水樣本。於【5. 總結】第四段補充說明。
13. 請再補充有關實驗淡菜吃藍眼淚的相關資料。	目前淡菜吃夜光蟲實驗僅有初步的了解，並未正式進行科學實驗及驗證，因此尚無法提供相關數據及資料。
14. 螢光蛋白是否有做研究，請補充說明。	目前無螢光蛋白的研究。
15. 本計畫畢竟是以馬祖海域棲地為稱，目前已有驗海水 PH 值等數據，這些資訊可以用來著重於分析棲地部分，這樣報告書也會比較完整。	『馬祖海域棲地及資源』的部分已於【前言--1.1 馬祖海域棲地及資源】及【結果--3.1 溫度、鹽度、pH 值及葉綠素值、3.2 營養鹽濃度】等部分補充相關資料。
16. 於 108 年 12 月 25 日辦理成果發表會之內容，請於辦理結束後補充相關資料(影音報導照片等)。	已於【5. 總結】最末段提出補充說明。
17. 海洋監測內容需要再加強，並於成果報告中補充說明。	已於【前言--1.1 馬祖海域棲地及資源】及【結果--3.1 溫度、鹽度、pH 值及葉綠素值、3.2 營養鹽濃度】等部分補充相關資料。
18. 目前除營養鹽等評估確認外，是否還有其他因素影響夜光蟲增殖的數量觀測值？(例如光度、波長等)建議可以納入未來研究方向。	已於【5. 總結】第四段提出補充說明。

藍眼淚生態館

本年度完成藍眼淚生態館建置觸控互動裝置與研究成果之應用，將藍眼淚研究資料應用於展館內作為生態展示所用，並展示藍眼淚圖樣、影片及資訊讓民眾皆能認識藍眼淚並且從遊戲中學習。藍眼淚生態館二樓整體規劃包含數位膠卷牆、生態互動桌、藍眼淚 AR 體感遊戲及牆面投影，數位膠卷牆為串接多台觸控螢幕的互動影像區，遊客透過觸控滑動的方式，以影片或照片的方式介紹馬祖藍眼淚(表一)、生態、歷史及人文資訊(圖十五)。生態互動桌是以問答遊戲方式呈現，內容包含藍眼淚研究資料(表二)及馬祖生態特色(圖十六)。而藍眼淚動態投影牆與藍眼淚 AR 體感遊戲區即是讓不同年齡層的民眾皆可透過投影及 AR 體感遊戲方式認識藍眼淚(圖十六、圖十七)。



圖十五、數位膠卷牆



圖十六、藍眼淚動態投影牆(左)、生態互動桌(右)



圖十七、藍眼淚 AR 體感遊戲

表一、數位膠卷牆-藍眼淚項目

編號	內容
1	國立臺灣海洋大學研究團隊一方面以浮游生物網進行大規模樣本採集，經由單離培養後發現冷光生物為夜光蟲。另一方面以次世代定序技術獲得不同發光素氧化酶 RNA 序列，數據顯示 85.1%到 97.2%的序列為夜光蟲所有。由此證明馬祖藍眼淚現象主要為夜光蟲所造成。
2	國立臺灣海洋大學研究團隊發現「淚況」最佳的時期，通常都發生在植物性浮游生物快速成長的藻華期間。特別在藻華結束時夜光蟲數量達到最高值，濃度可達每公升海水超過 300 隻。
3	夜光蟲是會「攝食」的渦鞭毛蟲，本身無法行光合作用，分類上夜光蟲僅有一種，全世界不同海域的夜光蟲均屬於同種生物。
4	夜光蟲細胞呈透明腎形，直徑 200-2000 μm 。腹面後端有一凹下縱溝，在此形成口部，口部之前有一小鞭毛，鞭毛前有一大觸手，觸手上具有黏膜。觸手用來抓取食物，再將食物送入口部並在體內形成食泡，食泡會分泌消化酶，食物在其內進行消化。
5	夜光蟲雖然缺乏游泳運動能力，但可藉由浮力在水表層生活。其攝食餌料非常寬廣，範圍由細菌到魚卵或仔稚魚，目前了解比較愛吃矽藻與綠藻。
6	夜光蟲依其體內是否有共生藻可將其分為兩群，一種為體內不存在共生藻的紅夜光蟲，另一種為具有共生青綠藻(<i>Protoeuglena noctilucae</i>)的綠夜光蟲。馬祖發現之夜光蟲屬於紅夜光蟲。
7	「藍眼淚」四到五月間開始出現，到九到十月間結束。基本上當風吹向海岸時，會讓表層之夜光蟲向海岸線集中，形成藻華現象。
8	沿岸生態系中營養鹽誘使浮游藻類，特別是矽藻，快速成長形成藻華，豐富之浮游藻類餌料被夜光蟲攝食後促使夜光蟲藻華形成，接著可能會促使小型魚類增加。此即為藻華輪替現象帶動整個食物鏈能量向上傳遞。
9	除了夜光蟲會發光之外，美麗的海洋生物中有許多同樣具有發光能力，例如水母、發光蝦和發光烏賊等均具有不同之發光器。
10	在晚春到初夏海面非常平靜的沿岸海域，海面呈現鮮紅到暗紅呈塊狀或條狀分布之水塊，此極可能就是夜光蟲形成之赤潮。此紅色為夜光蟲體內類胡蘿蔔素所造成。
11	國立臺灣海洋大學研究團隊發現馬祖「藍眼淚」中的發光生物以「夜光蟲」為大宗。並指出夜光蟲會大量出現，為植物性浮游生物所誘發，屬自然生態生物演替現象。夜光蟲非海域污染生物，不應視為有害的赤潮生物。

12	在馬祖，夜裡踩星砂成為在當地必體驗的特殊活動，要欣賞星砂的條件是吹南風，海水清澈與漲潮時，比較容易看到，以四至九月最為「亮眼」。星砂，是介型蟲吃夜光蟲後停留在潮間帶的沙土上所產生的美麗景色！
13	馬祖地區，清明過後天氣開始回暖，一直到立夏前後，是漁民捕撈丁香魚的季節。對於這種海面發光的自然現象，漁民慣稱他為「丁香水」。因為，藍眼淚大量出現後，吸引以藍眼淚為食的丁香魚群，故馬祖當地漁民又稱藍眼淚為丁香水。
14	馬祖藍眼淚所發出的藍光為生物冷光（bioluminescence），生物冷光的能量源自生物體內的化學反應。基本原理是獲得能量而達到激發態的分子，在回到低能量之安定態時，將釋出之能量轉換成光子的過程。
15	馬祖藍眼淚以夜光蟲為主，夜光蟲所發出的生物冷光，其波長為475 nm 藍。藍光最不易被水分子所吸收，可以傳遞最遠距離。
16	馬祖藍眼淚為渦鞭毛藻夜光蟲所形成，發光器位於夜光蟲的表皮上(perivacuolar cytoplasm)。每隻大約含有 10^4 個發光器，每個發光器大小為 0.5-1.5 μm ，每個光源大約可放出 10^5 個光子。
17	生物冷光幫助生物本身在暗黑環境生存主要有三種說法。一、利用冷光發現餌料的存在；二、藉由冷光吸引同種生物進行交配；及三、禦敵作用。
18	閩江帶入之豐富陸源性營養鹽促使浮游藻類成長，豐富之浮游藻類使夜光蟲能充分攝食、獲得足夠能量，進而快速成長形成夜光蟲藻華。

表二、生態互動桌-藍眼淚項目

編號	題目	正確答案	答案說明
1	馬祖藍眼淚由哪一個電視台列為世界 15 大奇景之一，也被美國太空總署(NASA)列入國際級特殊景觀？ A: CNN B: BBC C: NHK	A: CNN	馬祖「藍眼淚」曾被 CNN 列為世界 15 大奇景之一。
2	馬祖藍眼淚好發的季節？ A: 全年都有 B: 春夏二季 C: 秋冬二季	B: 春夏二季	馬祖藍眼淚好發的月份為四月到六月
3	馬祖藍眼淚是以何種生物為主？ A: 介形蟲 B: 夜光蟲 C: 矽藻	B: 夜光蟲	國立臺灣海洋大學研究團隊發現馬祖「藍眼淚」中的發光生物以「夜光蟲」為大宗。並指出夜光蟲會大量出現，為植物性浮游生物所誘發，屬自然生態生物演替現象。夜光蟲非海域污染生物，不應視為有害的赤潮生物。
4	觀看藍眼淚時以什麼日子最適合？ A: 沒有月亮的夜晚 B: 滿月的夜晚 C: 弦月的夜晚	A: 沒有月亮的夜晚	藍眼淚適合在無光害的環境下觀賞，因此沒有月亮的夜晚最適合欣賞藍眼淚。
5	最適合馬祖藍眼淚出現的海水水溫？ A: 10～15 度 B: 16～27 度 C: 28～31 度	B: 16～27 度	國立臺灣海洋大學研究結果顯示，大量的藍眼淚出現在溫度介於 16～27 度之間。
6	馬祖藍眼淚會發光的原因？ A: 受到應力 B: 繁殖 C: 長大	A: 受到應力	馬祖藍眼淚為夜光蟲受到應力後，生物本身產生生物冷光(bioluminescence)的現象。
7	自古以來馬祖當地對藍眼淚現象的說法為何？ A: 馬尿水 B: 丁香水 C: 以上皆是	C: 以上皆是	馬尿水、丁香水、東洋水都是馬祖當地對藍眼淚的稱呼。
8	藍眼淚現象在哪一部電影中出現？	C: 少年 PI 的奇幻漂流	導演李安在墾丁勘景時，得知海裡有「藍眼淚」（夜光

編號	題目	正確答案	答案說明
	A: 阿凡達 B: 星際大戰 C: 少年 PI 的奇幻漂流		蟲—渦鞭毛蟲），極為興奮，可惜數量不夠多，無法拍成，徒留遺憾。
9	馬祖不受自然環境影響可以看到藍眼淚的地點？ A: 大漢坑道 B: 安東坑道 C: 北海坑道	C: 北海坑道	旅客在北海坑道中透過搭乘馬祖地區傳統漁船—「搖櫓」，有機會近距離觀賞藍眼淚，體驗如同電影般的夢幻美景。
10	介型蟲吃夜光蟲後停留在潮間帶的沙土上所產生的美麗景色，馬祖稱為？ A: 星砂 B: 淚砂 C: 光砂	A: 星砂	在馬祖，夜裡踩星砂成為在當地必體驗的特殊活動，要欣賞星砂的條件是吹南風，海水清澈與漲潮時，比較容易看到，以四至九月最為「亮眼」。
11	藍眼淚大量出現後，吸引以藍眼淚為食的丁香魚群，故馬祖當地漁民又稱藍眼淚為何？ A: 銀帶水 B: 丁香水 C: 魴仔水	B: 丁香水	馬祖地區，清明過後天氣開始回暖，一直到立夏前後，是漁民捕撈丁香魚的季節。對於這種海面發光的自然現象，漁民慣稱他為「丁香水」。
13	馬祖藍眼淚所發出的藍光為何？ A: 冷光 B: 螢光 C: 磷光	A: 冷光	生物冷光（bioluminescence）的能量源自生物體內的化學反應。基本原理是獲得能量而達到激發態的分子，在回到低能量之安定態時，將釋出之能量轉換成光子的過程。
14	夜光蟲所發出的生物冷光，其波長為何？ A: 475 nm 藍光 B: 565 nm 綠光 C: 702 nm 紅光	A: 475 nm 藍光	外洋種生物最主要發的光為波長在 475 nm 左右的藍光。藍光最不易被水分子所吸收，可以傳遞最遠距離。
15	馬祖藍眼淚為渦鞭毛藻夜光蟲所形成，其發光器位於？ A: 細胞核 B: 細胞質 C: 表皮上	C: 表皮上	發光器位於夜光蟲的表皮上（perivacuolar cytoplasm）。每隻大約含有 10^4 個發光器，每個發光器大小為 0.5-1.5 μm ，每個光源大約可放出 10^5 個光子，

編號	題目	正確答案	答案說明
16	夜光蟲所產生的生物冷光，每次約可持續多久？ A: 0.08 秒 B: 0.8 秒 C: 8 秒	A: 0.08 秒	夜光蟲產生的生物冷光每次大約可持續 0.08 秒。由此可知夜光蟲發光是一閃即過，非照片上看到整個海面均為藍色之長期曝光影像。
17	生物冷光可幫助發光生物本身在環境中生存的主要說法有？ A: 辦派對 B: 禦敵 C: 指引明路	B: 禦敵	生物冷光幫助生物本身在黑暗環境生存主要有三種說法。一、利用冷光發現餌料的存在；二、藉由冷光吸引同種生物進行交配；及三、禦敵作用。
18	馬祖夜光蟲的營養模式為何？ A: 光合自營 B: 攝食異營 C: 混營	B: 攝食異營	夜光蟲為靠攝食維生之異營性生物，本身完全不會行光合作用。
19	馬祖夜光蟲大量出現的原因為何？ A: 丁香魚驅趕聚集 B: 矽藻藻華做為食物供給 C: 吸收閩江水豐富之陸源性營養鹽	B: 矽藻藻華做為食物供給	閩江帶入之豐富陸源性營養鹽促使浮游藻類成長，豐富之浮游藻類使夜光蟲能充分攝食、獲得足夠能量，進而快速成長形成夜光蟲藻華。
20	馬祖夜光蟲的現象發生於哪種生態系統？ A: 井口生態系 B: 可口生態系 C: 河口生態系	C: 河口生態系	馬祖位於閩江河口生態系，在此一富營養河口生態系中，夜光蟲出現或形成藻華為一正常海洋生態現象。

Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER

10.1029/2019GL082667

Key Points:

- Red *Noctiluca scintillans* (RNS), which feeds on other algae, can be fingerprinted from satellite imagery
- The technique can be applied to nearly all existing sensors, regardless of number of bands or spatial resolution
- Long-term distributions of RNS blooms in the ECS provide unprecedented knowledge on their locations and environments

Supporting Information:

- Supporting Information S1

Correspondence to:

C. Hu,
huc@usf.edu

Citation:

Qi, L., Tsai, S.-F., Chen, Y., Le, C., & Hu, C. (2019). In search of red *Noctiluca scintillans* blooms in the East China Sea. *Geophysical Research Letters*, 46, 5997–6004. <https://doi.org/10.1029/2019GL082667>

Received 2 MAR 2019

Accepted 26 APR 2019

Published online 12 JUN 2019

In Search of Red *Noctiluca scintillans* Blooms in the East China Sea

Lin Qi^{1,2} , Sheng-Fang Tsai^{3,4}, Yanlong Chen⁵, Chengfeng Le⁶ , and Chuanmin Hu⁷ 

¹State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen, China, ²Now at School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University (SYSU), Guangzhou, China, ³Institute of Marine Environment and Ecology, National Taiwan Ocean University, Keelung City, Taiwan, ⁴Center of Excellence for the Oceans, National Taiwan Ocean University, Keelung City, Taiwan, ⁵National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, China, ⁶Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, China, ⁷College of Marine Science, University of South Florida, St Petersburg, FL, USA

Abstract Red *Noctiluca scintillans* (RNS) is one of the major species causing red tides and bioluminescence, yet extremely difficult to track due to its ephemeral nature. Here, we show that RNS can be fingerprinted from satellite data due to its unique absorption and scattering properties. Retrospective analysis of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data of 2000–2017 over the East China Sea reveals seasonal patterns and interannual changes as well as an increasing RNS bloom trend, all driven by hydrographical and biological factors and possibly by the construction of the Three Gorges Dam. Unlike earlier reports from field measurements, RNS blooms are found in both coastal and offshore waters of the ECS, to at least 126°E (> 330 km from the Yangtze River mouth). RNS blooms are also found in August and September where water temperature of 28–30 °C is well beyond the earlier reported range of 10–25 °C.

1. Introduction

The dinoflagellate *Noctiluca scintillans* (NS herein after) has been reported in all temperate, subtropical, and tropical coastal waters (Elbrächter & Qi, 1998; Harrison et al., 2011) from field surveys. There are two different forms of NS: red and green, and in this text for convenience they are called RNS and GNS, respectively. While they are both heterotrophic and feed on other phytoplankton and microzooplankton, only GNS contains a photosynthetic symbiont *Protoeuglena noctilucae* (Wang et al., 2016). The review by Harrison et al. (2011) shows that, while GNS is more restricted to a temperature range of 25–30 °C in Southeast Asia and the northern Arabian Sea (as well as adjacent ocean waters), RNS is found over a wide temperature range of 10–25 °C and high-salinity coastal regions all over the world. Indeed, RNS blooms have been reported in many such waters, for example, in the German Bight (Uhlig & Sahling, 1990), in the Seto Inland Sea of Japan (Tada et al., 2004), in the Sea of Marmara (Turkey) (Turkoglu, 2013), and in coastal waters of China (Tsai et al., 2018).

Studies of RNS are of particular importance for several reasons. First, it is one type of heterotrophic dinoflagellate causing red tides. Second, it can produce blue bioluminescence at night (often called “blue tears” in Southeast Asia), attracting tourists (Figure S1 in the supporting information). Finally, it is important to ocean ecology as it feeds on other phytoplankton and zooplankton. On the other hand, nearly all reports and studies of RNS and GNS are based on field and laboratory measurements, which are limited both spatially and temporally, thus making it difficult to explain bloom dynamics. One exception is perhaps in the northern Arabian Sea where satellite remote sensing has been used to characterize GNS blooms (do Rosário Gomes et al., 2014; others) with long-term trends attributed to eutrophication. Although GNS has distinctive absorption properties (much higher pigment absorption at 440 nm relative to 676 nm) from other commonly found phytoplankton groups (Figure S2a), it has been demonstrated, in the Arabian Sea, that it would be difficult to differentiate GNS from other phytoplankton from pure remote sensing spectroscopy (Thibodeau et al., 2014). It is only when the concentration is high enough near the surface that GNS blooms can be well distinguished from the surrounding waters in the satellite imagery. This is because they form patches or elongated slicks, where a reflectance peak in the green wavelength (555 nm) and a red-edge reflectance in the near infrared (NIR) can be clearly observed (Figure S2b). These reflectance features, on the other hand, are not unique to GNS, so unless some *a priori* knowledge is available, it is still difficult to fingerprint GNS from remote sensing spectroscopy.

In contrast, *RNS* has shown distinctive absorption and scattering properties (Figure S2c; Astoreca et al., 2005), thus making it distinguishable from other algae. This is because the enhanced absorption in the blue and enhanced scattering in the red and NIR lead to much higher reflectance in the red and NIR from *RNS*-rich waters than from surrounding waters (Figure S2d). Indeed, field and airborne measurements of *RNS* bloom patches in Belgium coastal waters confirmed this inference (Figure S2d; Van Mol et al., 2007), indicating that, at least in theory, *RNS* can be well distinguished from other algae in remote sensing imagery. The limitations, as discussed in Van Mol et al. (2007), come from whether the *RNS* concentration is high enough to result in a detectable signal and, more importantly, from whether the spatial resolution of remote sensing imagery is sufficient to detect the small *RNS* patches. In the study (Van Mol et al., 2007), the size of the *RNS* bloom patches or lines range from 0.5 to 50 m, making most of them difficult or even impossible to detect in medium-resolution imagery from, for example, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS; 250 m to 1 km resolution).

This is perhaps why, to date, our knowledge on *RNS* blooms is very limited due to a lack of synoptic and frequent observations. Therefore, given the reported global distribution of *RNS* (Harrison et al., 2011), its ecological and environmental importance, and the wide availability of medium-resolution satellite ocean color data to cover the global oceans every 1–2 days, one objective of this paper is to demonstrate how to remotely search for and fingerprint *RNS* blooms in optically complex waters, where other water constituents (e.g., suspended sediments, other types of algae, and colored dissolved organic matter) may also be abundant. A second objective is to study the long-term distributions of *RNS* blooms in the East China Sea (ECS, 27 to 35°N, 120°E to 126.5°E). ECS is selected because *RNS* blooms have been reported many times from field observations (Tang et al., 2006; Tsai et al., 2018; Tseng et al., 2011; Xu, 2009). On the other hand, located downstream of the Yangtze River, the ECS is biologically and ecologically complex, where blooms of diatoms, dinoflagellate of *Prorocentrum donghaiense* (Lou & Hu, 2014; Shang et al., 2014; Tang et al., 2006; Tao et al., 2017), *Ulva* macroalgae (Hu, Li, et al., 2010; Qi et al., 2016), and *Sargassum* macroalgae (Qi et al., 2017) have frequently occurred. Thus, we hope to use this study as a proof of concept to facilitate studies of *RNS* in many other regions with similar optical and biological complexities.

2. Materials and Methods

2.1. Satellite Imagery and Data Products

Three types of remote sensors are used here (Table S1). One type is multiband medium-resolution (250 m to 1 km) sensors such as MODIS and Geostationary Ocean Color Imager (GOCI); a second type is multiband high-resolution (8–30 m) sensors such as Gao-Fen-1 (GF-1) and Operational Land Imager (OLI); the last type is the Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO, 90 m). While MODIS (both Terra and Aqua) and HICO are used systematically to search for *RNS*, other sensors are used to show their capacity only.

Based on the reported optical properties of *RNS* (Astoreca et al., 2005; Van Mol et al., 2007), image pixels rich in *RNS* should be highly reflective in the red and NIR wavelengths (Figure S2d) because of strong blue-green absorption (Figure S2c). Such elevated reflectance is known to cause atmospheric correction failure (Gordon & Wang, 1994; Stumpf et al., 2003). Therefore, only a partial atmospheric correction was applied to low-level data to generate Rayleigh-corrected reflectance ($R_{rc}(\lambda)$, dimensionless) using the National Aeronautics and Space Administration's SeaDAS software (version 7.4; MODIS and HICO) or software developed in house that utilized the Rayleigh reflectance lookup table embedded in SeaDAS (GF-1). The only exception was OLI, where Acolite software (Vanhellemont & Ruddick, 2015) was used to generate $R_{rc}(\lambda)$. While the band wavelengths, calibrations, and processing steps in SeaDAS and Acolite may be different for these sensors (Table S1), such differences will have negligible impacts on sensor-specific R_{rc} spectra when nearby water pixels are used as the reference (see below).

Because standard ocean color data products cannot be used, two forms of nonstandard imagery products were generated from $R_{rc}(\lambda)$ in order to search for *RNS*:

1. Natural color Red-Green-Blue (RGB) imagery. For MODIS, the RGB bands are 645, 555, and 469 nm, respectively. For other sensors, these bands are adjusted according to their band availability.
2. False color RGB imagery, where a NIR band (859 nm for MODIS) is used to replace the green band (555 nm for MODIS) in the RGB imagery.

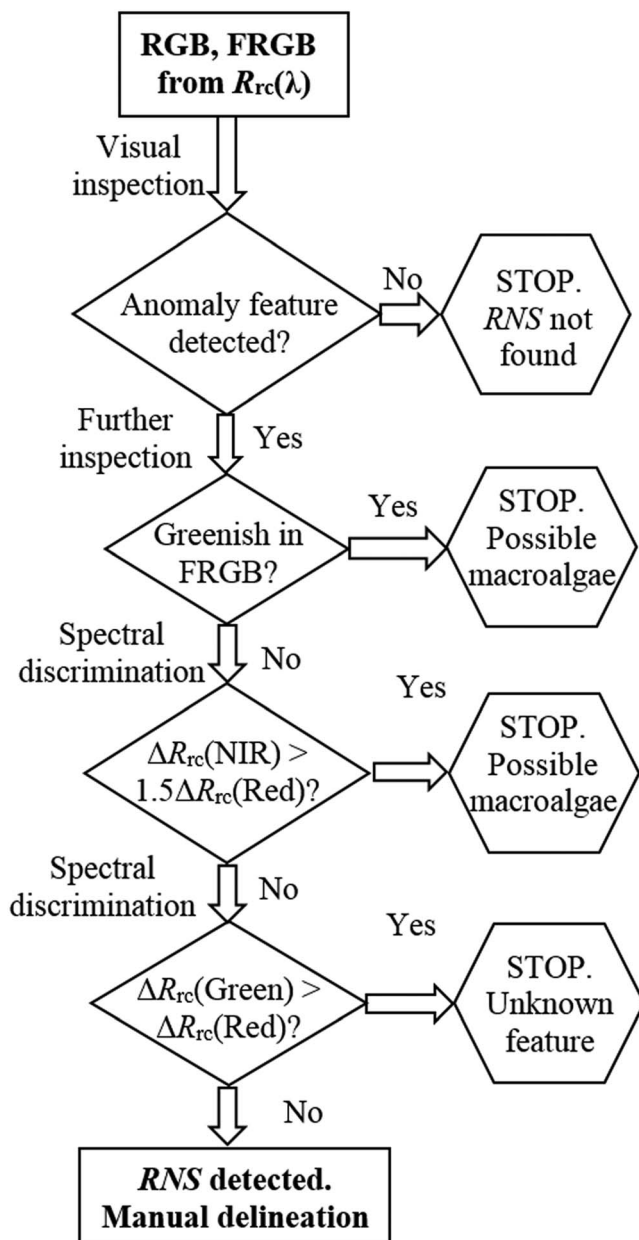


Figure 1. Flowchart showing how to detect RNS features through visual inspection of RGB/FRGB imagery and through spectral discrimination of visually identified features. Here ΔR_{rc} represents R_{rc} difference of the feature pixel against nearby water pixels. NIR can be ~ 750 nm (or ~ 860 nm if 750 nm is not available), Red can be ~ 640 or ~ 660 nm, and Green can be ~ 550 nm. RNS = Red *Noctiluca scintillans*; RGB = Red-Green-Blue; NIR = near infrared.

For MODIS, 2,052 five-minute data granules covering the ECS between 2000 and 2017 for the months of April–August were processed. Of these granules, only half of them (996) were found to have greater than one third of the pixels being cloud free. For HICO, all available 41 data granules covering the ECS from September 2009 to September 2014 were processed to generate $R_{rc}(\lambda)$. For GOCI and other sensors, selected data granules were processed to test their capacity in detecting RNS using the same rules established for MODIS.

Once an image feature was visually identified from RGB or FRGB imagery, spectral analysis was used to examine the spectral shape. Because RNS features may be much smaller than the pixel size, the analysis was performed over the $R_{rc}(\lambda)$ difference against nearby water, which was then compared against known spectra of floating algae. The rules of searching and identifying RNS features were then established (Figure 1).

Such established rules were applied to the entire MODIS time series. Ultimately, an objective method to automatically detect and delineate RNS features is preferred (while masking clouds and cloud shadows). However, because of the frequent nonoptimal observation conditions (see Figure S2 of Qi et al., 2017), for this proof-of-concept study, the RNS features were manually delineated to roughly outline their boundaries. For each calendar month, all such outlined boundaries were merged to derive the aggregated monthly coverage of RNS features, from which an annual summary was obtained for each year between 2000 and 2017.

3. Results and Discussion

While many full-resolution images are presented in the supporting information (Figures S3–S6), several examples are given below to show the concept of detecting RNS blooms using multiband remote sensing data, where the stepwise rules are illustrated in the flow-chart of Figure 1.

Even though RNS can float on the surface of the ocean due to its density being lower than water (Harvey, 1917), the difficulty of finding RNS blooms is demonstrated in Figure 2. Of all 41 HICO images between 2009 and 2014, only one image (Figure 2b) shows some yellowish-brownish slicks near the Yangtze River mouth (Figure 2d). These slicks are difficult to visually identify even by a human analyst, not to mention nearly impossible with automatic digital detection. However, spectral analysis of several randomly selected pixels from these slicks (annotated as 1, 2, and 3 in Figure 2d) indicates near-identical spectral shapes as compared with those from field-measured RNS blooms (Figures 2f and S1d). They all show sharp reflectance increases from ~ 510 to ~ 600 nm, a specific result of RNS absorption and scattering (Figure S1c; Astoreca et al., 2005).

The magnitudes of the HICO spectra are different—a result of different RNS proportion within a pixel. For example, assuming a 100% RNS por-

tion has reflectance of ~ 0.17 in the NIR (Figure S2d), the three pixels in Figure 2f represent approximately 30%, 17%, and 8% of partial RNS coverage within a 90-m HICO pixel. Likewise, the two pixels in Figure 2g represent about 10% and 8% of partial RNS coverage within a 250-m MODIS pixel. Note that because of the larger pixel size, the MODIS image appears more blurred than HICO in revealing the RNS slicks.

Many MODIS images show features that can be determined to be RNS through image inspection and spectral analysis following the stepwise rules established in Figure 1, where Figure 3 presents an example. Figure 3a shows a MODIS FRGB image on 18 May 2017, where a small area is enlarged in Figure 3b. Surface algae slicks of yellowish/brownish and greenish colors, respectively, can be clearly visualized. The

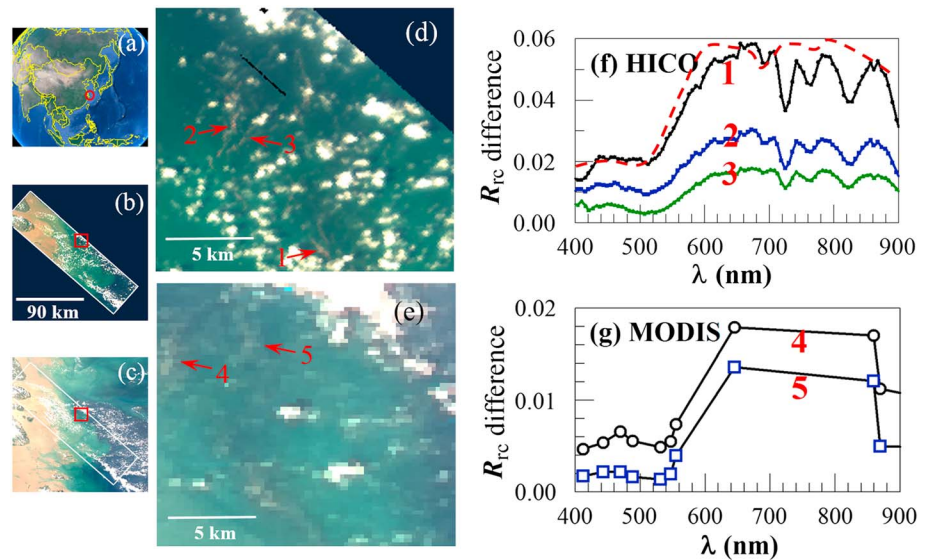


Figure 2. Fingerprinting Red *Noctiluca scintillans* blooms through remote sensing spectroscopy. (a) Google Earth map shows approximate location of the HICO Red-Green-Blue image (b) and MODIS RGB image (c) captured on 9 September 2013 06:08 and 04:45 GMT, respectively, covering the region between 30.25–32°N and 121.75–123.5°E. The white rectangle in (c) corresponds to the HICO coverage in (b). A small region, outlined by the red square in (b) and (c) (31.15–31.30°N, 122.58–122.75°E), is enlarged in (d) and (e), respectively, where some weak image slicks of yellowish-brownish colors can be visualized. Some pixels (annotated by 1–5) are selected randomly for spectroscopic diagnosis in (f) and (g) for HICO and MODIS, respectively. For reference, a typical water-leaving reflectance spectrum from a red *NS* bloom off Belgium (Van Mol et al., 2007) is shown in (f) (red dashed line). HICO = Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean; MODIS = Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

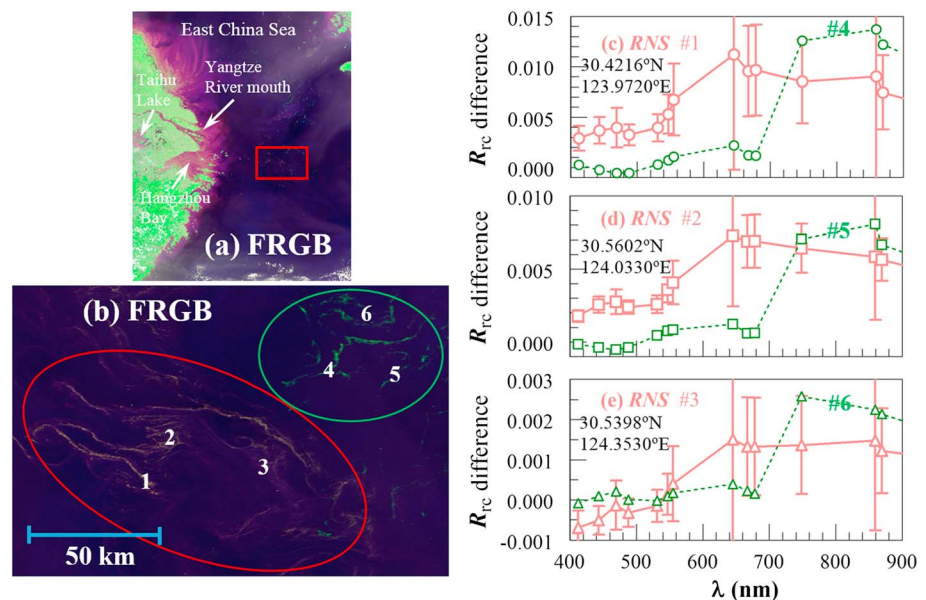


Figure 3. Demonstration of detecting and fingerprinting a RNS bloom in the ECS (27°N to 35°N, 120°E to 126.5°E) through Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer remote sensing spectroscopy. (a) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer FRGB image on 18 May 2017 shows the study region. The area outlined in the rectangle (30.1–31.1°N, 123.5–125°E) is enlarged in (b), where surface slicks of yellowish/brownish and greenish colors can be visualized. Several randomly selected pixels (#1 to #6, location annotated) from both types of features are diagnosed for their R_{rc} difference spectra, which are shown in (c)–(e). Each R_{rc} difference spectrum is an average of 3 km × 3 km centered at the pixel of interest, referenced against nearby water pixels. Vertical bars represent standard deviations, where land bands (645, 859, 469, and 555 nm) show higher standard deviations than other bands because of their higher spatial resolution and patchiness of the algae features. RNS = Red *Noctiluca scintillans*; RGB = Red-Green-Blue.

latter have been reported to be *Sargassum horneri* (Qi et al., 2017), while the former are determined to be *RNS* (Figures 3c–3e). Specifically, R_{rc} difference at >555 nm is significantly higher than in shorter wavelengths, with the maximum at 645 nm regardless of the absolute magnitude (0.0014–0.011 at 645 nm). This spectral characteristic is nearly identical to those reported from field measurements of *RNS* (Figure S2d and dashed line in Figure 2f). Therefore, from a pure spectroscopy perspective, these yellowish/brownish slicks can be inferred to be *RNS*. In contrast, the pixels from the greenish slicks show typical spectral shapes of *Sargassum* (Figures 3c–3e) that are easily distinguishable from those of *RNS*. Note that such a spectral discrimination is performed over the R_{rc} difference spectra rather than R_{rc} spectra, as the latter are often “smeared” by water if *RNS* only occupies a small portion of a pixel (Figure S7).

From results similar to those in Figure 3, the following stepwise rules were established to search for *RNS* from satellite imagery (Figure 1):

1. While both *RNS* and *Sargassum* can be visualized in FRGB imagery, only *RNS* can be revealed clearly in RGB imagery.
2. *RNS* and *Sargassum* (and other macroalgae such as *Ulva*) show different colors in FRGB imagery, with the latter appearing greenish.
3. To qualify for a *RNS*-containing pixel, $\Delta R_{rc}(\text{NIR})$ cannot be more than $1.5\Delta R_{rc}(\text{Red})$, and $\Delta R_{rc}(\text{Green})$ cannot be more than $\Delta R_{rc}(\text{Red})$. Here ΔR_{rc} represents R_{rc} difference between the pixel of interest and nearby water pixels.

This stepwise method (Figure 1) was applied to all MODIS imagery between 2000 and 2017 for the months of April–August. Figure 4 shows a summary of the annual occurrences of *RNS* features and their approximate locations.

The annual sequence shows clear interannual variations in *RNS* bloom location, size, distribution, and occurrence months. For example, in 2002, there was not a single image showing *RNS* features, but in 2017, there were many images in months between April and August that showed *RNS* features. Unlike those reported earlier from field-based observations, although most of the *RNS* features were found near the Yangtze estuary, off Hangzhou Bay, or along the coast of Zhejiang Province, many *RNS* features were found in offshore waters to 126°E (>330 km from Hangzhou Bay). Furthermore, although there is substantial interannual variability, there appears to be an increasing trend in recent years in terms of the *RNS* bloom occurrence size and duration, especially between 2013 and 2017, with 2017 being the maximum year.

These findings provide a more complete picture (than any previous study) on the seasonality and interannual changes of *RNS* blooms (e.g., fewer blooms before 2003). The seasonality of *RNS* bloom formations has been proposed to be regulated by a variety of hydrographical and biological factors (Miyaguchi et al., 2006). Availability of phytoplankton as prey is one of the important factors (Elbrächter & Qi, 1998). The Yangtze River discharges $924.8 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{year}$ freshwater annually into the ECS, contributing nutrient flux of inorganic nitrogen, phosphate, and silicate (Duan et al., 2000; Liu et al., 2003; Tian et al., 1993). The construction of the Three Gorges Dam began in 1994, with the first filling stage of the reservoir completed in June 2003, and full-scale operations began in 2009. Gong et al. (2006) found that the Si:N ratio in the affected Yangtze River region changed from 1.5 in 1998 to 0.4 in 2004 and that primary production had declined by 86% between 1998 and 2003. Hence, the inconstant input of freshwater during the first filling stage of the reservoir might be the main cause of the lower occurrence of *RNS* blooms, especially during years 2001–2003. Accumulation of buoyant cells caused by convergence of surface seawater is suggested as another factor leading to *NS* blooms or aggregations (Elbrächter & Qi, 1998). With the development of a subtropical summer monsoon climate in the ECS in mid-May, the southwest wind is strengthened with time, causing the distribution of *RNS* to shift northward in the same year. Additionally, the increased occurrence of *RNS* after 2013 indicates a rich food supply for *RNS* in recent years (Sriwoon et al., 2008).

Year 2017 is an exceptional year for a prolonged and extensive *RNS* bloom. Figure 4 shows that *RNS* slicks first appeared along the Zhejiang coast in MODIS imagery in April (14 April 2017). Then, by mid-May, *RNS* slicks appeared extensively from the Zhejiang coast to the Yangtze estuary, as well as in offshore waters. By June 2017, *RNS* slicks were only found near the Yangtze estuary and Hangzhou Bay; this lasted until July 2017. In August 2017 only some small *RNS* slicks were found in MODIS imagery. The *RNS* bloom event lasted for at least 3 months between mid-April and mid-July 2017. While the exact reason of the

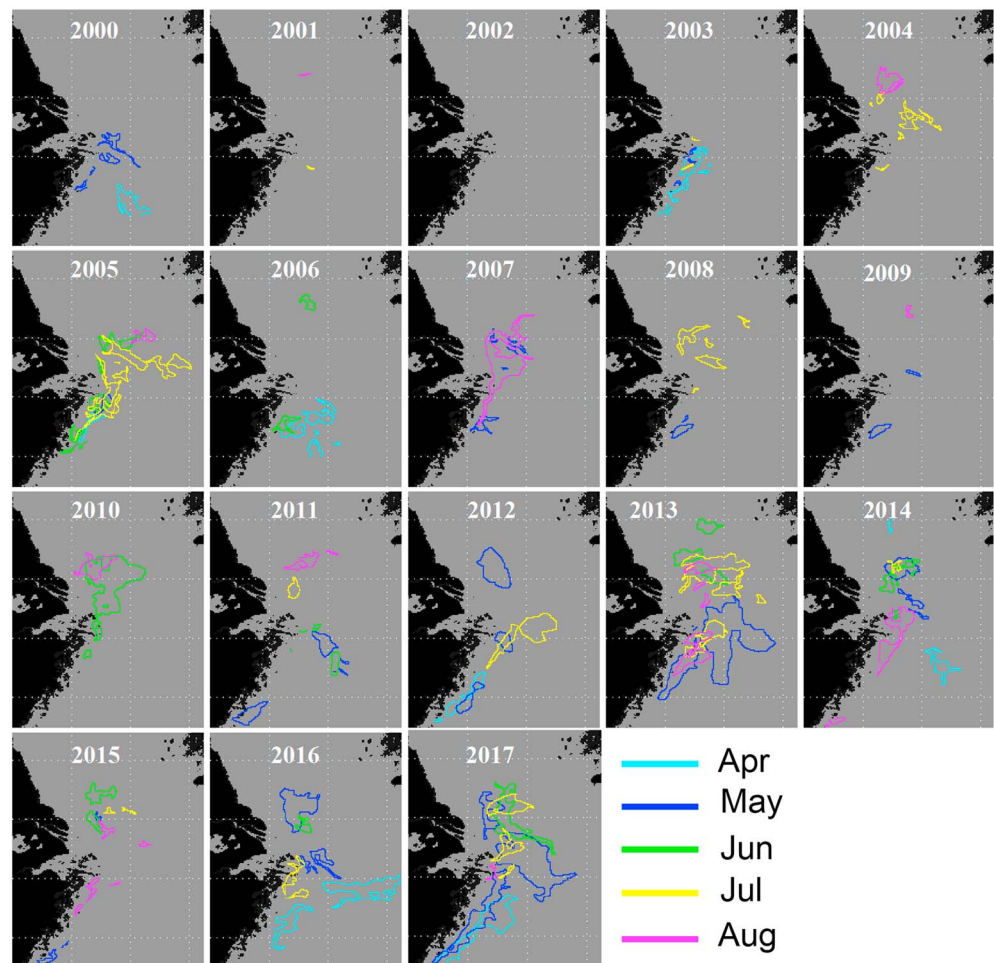


Figure 4. Monthly distributions of approximate *RNS* feature locations for April–August between 2000 and 2017 in the ECS (27°N – 35°N, 120°E – 126.5°E), determined from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer imagery and spectral analysis. Certain (or all) colors may not appear in an annual summary image (e.g., 2002), meaning that no *RNS* features were found in those months.

prolonged and extensive *RNS* bloom in 2017 has yet to be investigated, it is speculated that the unusual red tide blooms of *Prorocentrum donghaiense*, as indicated by the anomalous MODIS nFLH images (see https://optics.marine.usf.edu/cgi-bin/optics_data?roi=YS_ECS&Date=5/18/2017&Pass=A0515), may provide sufficient food to feed *RNS*. As speculated in Qi et al. (2017) to explain the record-high *Sargassum* bloom in the ECS in 2017, recent eutrophication, higher-than-usual temperature, and increased light availability could be other reasons behind the 2017 *RNS* bloom.

Satellite images from GOCI (500 m), OLI (30 m), and GF-1 (8 m) all show the same capacity to detect and differentiate *RNS* features when using the method developed here (see Figures S3–S6). This is despite the differences in their spectral bands, resolutions, and calibrations. The success is attributed to the use of R_{rc} difference rather than the absolute R_{rc} . The difference not only compensates for potential calibration errors (because the errors are the same between the *RNS* and water pixels) and inconsistencies in band wavelengths but also more importantly reveals the unique spectral shapes of *RNS* that are otherwise extremely difficult to differentiate, especially when *RNS* only occupies a small portion of a pixel (Figure S7). On the other hand, although OLI and GF-1 can detect much smaller *RNS* features than those medium-resolution sensors, their scarce coverage makes it impossible to provide a full picture as shown in Figure 4 by MODIS. In any case, the ability to detect *RNS* features from satellite imagery can provide guidance for future field surveys in response to *RNS* bloom events. In turn, field measurements can provide direct validation to satellite observations in addition to detailed information on the *RNS* composition and their living environment. Currently, due to lack of such a guidance, the only field survey that was concurrent

and collocated with satellite detected *RNS* was on 2 May 2016 around 26.7906°N 120.4484°E off the Zhejiang coast. The survey encountered high-concentration *RNS* patches through visual sightings, confirming the OLI observations.

While the capacity of satellite remote sensing in detecting *RNS* blooms is fully demonstrated here, three limitations still exist. The first comes from the data coverage and sensor sensitivity (Hu et al., 2015). Regardless of cloud cover, cloud shadow, sun glint, and other nonoptimal observing conditions, only large-swath medium-resolution sensors such as MODIS can provide near-daily coverage, yet the large pixel size is known to miss small patches of *RNS*. For this reason, *RNS* detection results simply represent those *observable* by the sensor. The second is that it is currently difficult to automate the detection and delineation process due to frequent nonoptimal observing conditions. The third and also the most significant limitation is that the current detection is only applicable to near-surface high concentrations of *RNS*, but *RNS* cells may be well mixed through the water column, presenting a significant challenge in detection and quantification. One major reason behind this limitation is the lack of measurements of *RNS* bio-optical properties (absorption, scattering, and scattering phase function); the works by Astoreca et al. (2005) and Van Mol et al. (2007) are perhaps the only exceptions that show preliminary data. Clearly, future efforts of remote quantification of *RNS* will require coordinated efforts in field and laboratory measurements as well as development of inversion algorithms (e.g., Shang et al., 2014; Tao et al., 2017).

In summary, through image inspection and spectral analysis, this proof-of-concept study demonstrates that it is possible to detect *RNS* blooms through satellite remote sensing using either medium- or high-resolution sensors. The detection is based on the fact that *RNS* has strong absorption in the blue-green wavelengths and strong scattering in all wavelengths, which lead to elevated reflectance in all red and NIR wavelengths. This spectral characteristic makes *RNS* well distinguishable from other types of floating algae (e.g., *Sargassum*, *Ulva*) and also makes *RNS* features distinguishable during image and spectral inspection. Correspondingly, the stepwise rules (Figure 1) can be used to detect *RNS* features from satellite imagery. This is similar to the spectral analysis used to identify a *Mesodinium rubrum* bloom using HICO observations (Dierssen et al., 2015) and detecting *Trichodesmium* blooms using multiband Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor or MODIS observations (Hu, Cannizzaro, et al., 2010; Subramaniam et al., 2002). With the ongoing sensors and the projected hyperspectral PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, and ocean Ecosystem) mission in the near future, the study here is expected to encourage more research on *RNS* bio-optical properties and their ecological behaviors in various tropical and subtropical waters where *RNS* blooms have been reported.

Acknowledgments

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41806208, 41431176), China Postdoctoral Science Foundation (2017M610393 and 2018T110645; Qi), and the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NA15OAR4320064) and the National Aeronautics and Space Administration (NNX14AL98G; Hu). We thank NASA, NOAA, USGS (United States Geological Survey), and KORDI for providing satellite data. We also thank Prof. Dazhi Wang (Xiamen University) for the useful discussions on *RNS* occurrence in the ECS. The extensive comments from an anonymous reviewer are appreciated. All satellite imagery and data are available on the Web (https://optics.marine.usf.edu/cgi-bin/optics_data?roi=ECS¤t=1).

References

- Astoreca, R., Rousseau, V., Ruddick, K., Van Mol, B., Parent, J.-Y., & Lancelot, C. (2005). Optical properties of algal blooms in an eutrophic coastal area and its relevance to remote sensing. In R. J. Frouin, M. Babin, & S. Sathyendranath (Eds.), *Remote Sensing of the Coastal Oceanic Environment, Proc. SPIE*, (Vol. 5885, pp. 245–255).
- Dierssen, H. M., Chlus, A., & Russell, B. (2015). Space station image captures a red tide ciliate bloom at high spectral and spatial resolution. *PNAS*, 112(48), 14783–14787. <https://doi.org/10.1073/pnas.1512538112>
- do Rosário Gomes, H., Goes, J. I., Matondkar, S., Buskey, E. J., Basu, S., Parab, S., & Thoppil, P. (2014). Massive outbreaks of *Noctiluca* scintillans blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia. *Nature Communications*, 5(1), 4862. <https://doi.org/10.1038/ncomms5862>
- Duan, S., Zhang, S., & Huang, H. (2000). Transport of dissolved inorganic nitrogen from the major rivers to estuaries in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 57, 13–22.
- Elbrächter, M., & Qi, Z. (1998). Aspects of *Noctiluca* (Dinophyceae) population dynamics. In D. M. Anderson, A. D. Cembella, & G. M. Hallegraeff (Eds.), *Physiological ecology of harmful algal blooms*, (pp. 315–335). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Gong, G. C., Chang, J., Chiang, K. P., Hsiung, T. M., Hung, C. C., Duan, S. W., & Codispoti, L. (2006). Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three Gorges Dam? *Geophysical Research Letters*, 33, L07610. <https://doi.org/10.1029/2006GL025800>
- Gordon, H. R., & Wang, M. (1994). Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm. *Applied Optics*, 33(3), 443–452. <https://doi.org/10.1364/AO.33.000443>
- Harrison, P. J., Furuya, K., Glibert, P. M., Xu, J., Liu, H., Yin, K., et al. (2011). Geographical distribution of red and green *Noctiluca* scintillans. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29, 807–831.
- Harvey, E. B. (1917). A physiological study of *Noctiluca*, with special reference to light production, anaesthesia and specific gravity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 3, 15–16.
- Hu, C., Cannizzaro, J., Carder, K. L., Muller-Karger, F. E., & Hardy, R. (2010). Remote detection of *Trichodesmium* blooms in optically complex coastal waters: Examples with MODIS full-spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 2048–2058. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.011>
- Hu, C., Feng, L., Hardy, R. F., & Hochberg, E. J. (2015). Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic *Sargassum* macroalgae. *Remote Sensing of Environment*, 167, 229–246. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.022>

- Hu, C., Li, D., Chen, C., Ge, J., Muller-Karger, F. E., Liu, J., et al. (2010). On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 115, C05017. <https://doi.org/10.1029/2009JC005561>
- Liu, S. M., Zhang, J., Chen, H., Wu, Y., Xiong, H., & Zhang, Z. J. B. (2003). Nutrients in the Changjiang and its tributaries. *Biogeochemistry*, 62(1), 1–18. <https://doi.org/10.1023/A:1021162214304>
- Lou, X., & Hu, C. (2014). Diurnal changes of a harmful algal bloom in the East China Sea: Observations from GOCI. *Remote Sensing of Environment*, 140, 562–572. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.031>
- Miyaguchi, H., Fujiki, T., Kikuchi, T., Kuwahara, V. S., & Toda, T. (2006). Relationship between the bloom of *Noctiluca scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Sagami Bay, Japan. *Journal of Plankton Research*, 28(3), 313–324. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbi127>
- Qi, L., Hu, C., Xing, Q., & Shang, S. (2016). Long-term trend of *Ulva prolifera* blooms in the western Yellow Sea. *Harmful Algae*, 58, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.07.004>
- Qi, L., Hu, C., Wang, M., Shang, S., & Wilson, C. (2017). Floating algae blooms in the East China Sea. *Geophysical Research Letters*, 44, 11,501–11,509. <https://doi.org/10.1002/2017GL075525>
- Shang, S., Wu, J., Huang, B., Lin, G., Lee, Z., Liu, J., & Shang, S. (2014). A new approach to discriminate dinoflagellate from diatom blooms from space in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, 4653–4668. <https://doi.org/10.1002/2014JC009876>
- Sriwong, R., Pholpunthin, P., Lirdwitayaprasit, T., Kishino, M., & Furuya, K. (2008). Population dynamics of green *Noctiluca scintillans* (Dinophyceae) associated with the monsoon cycle in the upper Gulf of Thailand. *Journal of Phycology*, 44(3), 605–615. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00516.x>
- Stumpf, R., Arnone, R., Gould, R., Martinovich, P., & Ransibrahmanakul, V. (2003). A partially coupled ocean-atmosphere model for retrieval of water-leaving radiance from SeaWiFS in coastal waters. *NASA Tech. Memo*, 206892, 51–59
- Subramaniam, A., Brown, C. W., Hood, R. R., Carpenter, E. J., & Capone, D. G. (2002). Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery. *Deep-Sea Research Part II*, 49, 107–121.
- Tada, K., Pithakpol, S., & Montani, S. (2004). Seasonal variation in the abundance of *Noctiluca scintillans* in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Biology and Ecology*, 51, 7–14.
- Tang, D. L., Di, B. P., Wei, G., Ni, I. H., Oh, I. S., & Wang, S. F. (2006). Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea. *Hydrobiologia*, 568(1), 245–253. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0108-1>
- Tao, B., Mao, Z., Lei, H., Pan, D., Bai, Y., Zhu, Q., & Zhang, Z. (2017). A semianalytical MERIS green-red band algorithm for identifying phytoplankton bloom types in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 1772–1788. <https://doi.org/10.1002/2016JC012368>
- Thibodeau, P. S., Roesler, C. S., Drapeau, S. L., Prabhu Matondkar, S., Goes, J. I., & Werdell, P. J. (2014). Locating *Noctiluca miliaris* in the Arabian Sea: An optical proxy approach. *Limnology and Oceanography*, 59(6), 2042–2056. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.6.2042>
- Tian, R., Hu, F., & Martin, J. (1993). Summer nutrient fronts in the Changjiang (Yangtze River) estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 37(1), 27–41. <https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1039>
- Tsai, S.-F., Wu, L.-Y., Chou, W.-C., & Chiang, K.-P. (2018). The dynamics of a dominant dinoflagellate, *Noctiluca scintillans*, in the sub-tropical coastal waters of the Matsu archipelago. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 553–558. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.041>
- Tseng, L.-C., Kumar, R., Chen, Q.-C., & Hwang, J.-S. (2011). Summer distribution of *Noctiluca scintillans* and mesozooplankton in the Western and Southern East China Sea prior to the Three Gorges Dam operation. *Hydrobiologia*, 666(1), 239–256. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0587-y>
- Turkoglu, M. (2013). Red tides of the dinoflagellate *Noctiluca scintillans* associated with eutrophication in the Sea of Marmara (the Dardanelles, Turkey). *Oceanologia et Limnologia Sinica/Hai Yang Yu Hu Chao*, 55, 709–732.
- Uhlir, G., & Sahling, G. (1990). Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population dynamics and red tide phenomena 1968–1988. *Netherlands Journal of Sea Research*, 25(1–2), 101–112. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(90\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0077-7579(90)90012-6)
- Van Mol, B., Ruddick, K., Astoreca, R., Park, Y., & Nechad, B. (2007). Optical detection of a *Noctiluca scintillans* bloom. *EARSeL eProceedings*, 6, 130
- Vanhellemont, Q., & Ruddick, K. (2015). Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. *Remote Sensing of Environment*, 161, 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>
- Wang, L., Lin, X., Goes, J. I., & Lin, S. (2016). Phylogenetic analyses of three genes of *Pedinomonas noctilucae*, the green endosymbiont of the marine dinoflagellate *Noctiluca scintillans*, reveal its affiliation to the order Marsupiomonadales (Chlorophyta, Pedinophyceae) under the reinstated name *Protoeuglena noctilucae*. *Protist*, 167(2), 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2016.02.005>
- Xu, Z. (2009). The inter-annual variations in *Noctiluca scintillans* abundance and eutrophication in Changjiang estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 40, 793–798.

龍蝦

1. 東引北海坑道龍蝦培育紀錄及評估

1.1 東引北海坑道龍蝦培育紀錄

107 年執行項目中已經將東引北海坑道清理建設完畢後進行龍蝦復育中心培養所用。於 107 年 12 月投入 4000 隻龍蝦培養；將坑道前段約 30 公尺部分作為培養龍蝦的區域，設置一台水車供氣及空心磚作為龍蝦躲藏之用，交由東引當地廠商餵食及培養。研究團隊於 108 年 3 月進行調查，經人員下水調查後可發現龍蝦群聚棲息於坑道左側岩縫中，隨機抽樣約 100 隻秤重並調查基本水質數據；平均每隻約 200~600 克(圖 1-2)，對比 107 年度研究團隊在東引北海坑道整修前測量數據，測量此數據時坑道未加裝水泥擋水牆。顯示海水水質溫度與溶氧與之前坑道沒有差異度，唯有 pH 偏酸(表一)，顯示龍蝦對於坑道水質環境仍算適應，海水偏酸可能與坑道口擋水牆造成海水交換效率太差，坑道內龍蝦與飼料的代謝廢棄物無法排出造成水質偏酸。關於海水水質偏酸部分，研究單位當場與廠商提出建議：盡量維持坑道內龍蝦培育槽以潮汐自然換水頻率為佳，但廠商表示由於坑道外海堤仍需要施工，現階段並無法維持每日自然潮汐換水，後續會努力處理換水問題。此外廠商反應對於龍蝦出現脫殼不順及食慾差的現象。研究團隊評估這情形可能與餵食次數、換水頻率過低及底泥含硫化物沉積排除不順有關仍建議還是以自然潮汐換水作為解決這問題最好的方法最好(圖 3)。

3/31 由於廠商操作坑道內作業燈時不小心誤關打氣水車一晚，造成坑道內海水耗氧量上升，龍蝦大量死亡(圖 4)。研究團隊於隔天(4/1)前往坑道進行確認及調查；水質檢測後溶氧量為 6.02。評估溶氧量並沒有過低，而水質 pH 為 5.9 較前一次測量過度偏酸，可能與龍蝦死亡時產生的有機廢物有關。但龍蝦會大量死亡原因可能在於水車停止前，無法自然潮汐交換的海水使水質令龍蝦受壓迫。並在水車停止、耗氧量大增的情況下，龍蝦便無法生存而死亡。廠商表示等坑道外海堤工程完畢後願意改善設施後評估繼續龍蝦培育復育的計畫。之後持續於 5 月~12 月由廠商或研究團隊進行坑道的水質調查及紀錄。(如表一及圖 5-6)。

12/7 完成坑道外堤防作業工程並由廠商設計坑道外水道培育槽，經管線及池體清洗後。後續將配合管理廠商的培育計畫，將研究團隊所培育的龍蝦種蝦及實驗用龍蝦共 150 隻(約 500g 波紋龍蝦)開始運送至東引復育中心進行坑道培育田間測試(圖 7)。剩餘 900 隻目前先暫養於海大實驗室中，待坑道設備完備後，經培養廠商熟悉培養龍蝦技術後，逐步送至坑道培育。



圖 1、3/4 觀察放養龍蝦群聚棲息於坑道岩縫之中



圖 2、3/4 調查人員隨機測量龍蝦重量。



圖 3、(左)3/4 龍蝦脫殼困難造成死亡 (右)換水頻率過低造成坑道底部有機物沉積造成
坑道底部黑化現象。



圖 4、4/1 水車停止開關造成的龍蝦死亡量。



圖 4、4/1 坑道外工程造成潮汐阻塞。

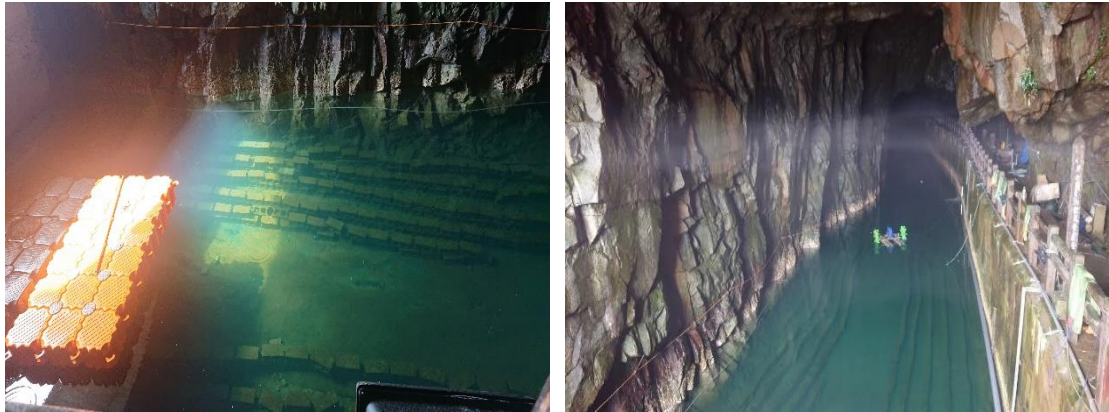


圖 5、7/16 坑道情況，隔離網移除水車停止運作。



圖 6、7/16 坑道因坑道外堤防施工造成坑道內水無法交換。



圖 7、12/7 坑道外堤防施工完畢及廠商設計坑道水道培育槽。(中央社,2018/12/11)

表一、坑道龍蝦及水質紀錄。

測量日期	水質相關數據			備註
	溫度	溶氧	pH	
107.10.23	22.6	8.05	8.18	於坑道未施工清淤前所測量數據
108.03.04	14.6	8.05	6.94	隨機抓測量約 100 隻 未觀察到龍蝦有抱卵或是交配痕跡
108.04.01	16.2	6.02	5.9	水車停擺
108.05.29	19.3	5.24	5.4	未觀察到龍蝦，無法測量
108.06.23	23.4	6.26	6.2	未觀察到龍蝦，無法測量
108.07.16	25.7	5.84	7.2	隔離網拆除，觀察到約 2~5 隻龍蝦存在 坑道最內部，無法測量。
108.08.19	24.2	6.43	7.5	未觀察到龍蝦，無法測量
108.09.26	23.1	7.23	7.3	未觀察到龍蝦，無法測量
108.10.19	21.2	7.93	6.8	未觀察到龍蝦，無法測量
108.11.05	20.6	7.86	7.6	未觀察到龍蝦，無法測量
108.12.11	14.2	8.2	8.1	未觀察到龍蝦，坑道外水池測量

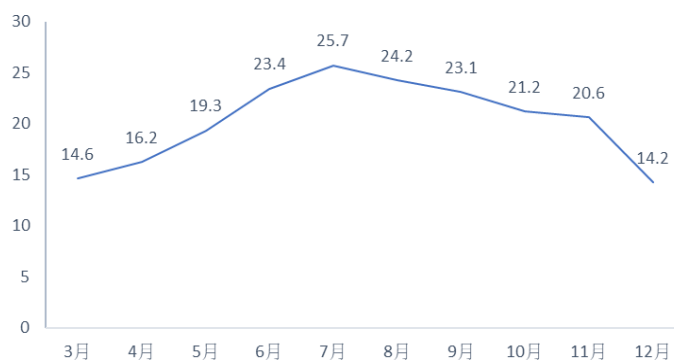


表 1-1、海水坑道內溫度(°C)：本年度溫度以 7 月測量最高，12 月與 3 月最低。
此現象與坑道外海差異並不大，符合坑道為半室內環境的狀況。

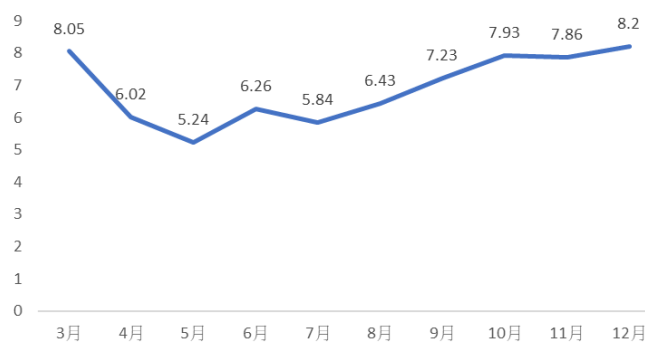


表 1-2、坑道逐月海水溶氧量(DO)：本年度溶氧量從 3 月時的高點 8.05 因為坑道內水車停止後降低最低至 5.24，而後由於坑道內並沒有生物耗氧及因為仍有少許海水交換的關係，溶氧量逐漸回升。

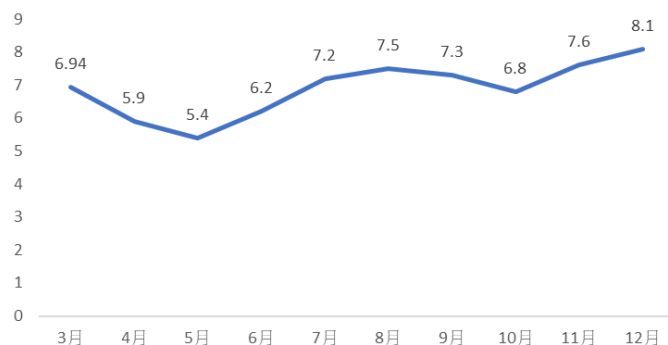


表 1-3、坑道內海水 pH 值：本年度坑道內海水 pH 值最低為 5 月所測量的 5.4 為最低，對比 3 月時坑道內養殖設備正常運作時的 6.94 更為偏酸。顯示坑道內因缺乏正常的潮汐換水所累積於坑道過多的有機物質與龍蝦殘骸造成水質偏酸。6 月開始由於隨著水質交換讓海水慢慢回復正常海水 pH 值。12 月測量時坑道外堤防已完工，坑道海水水質便回復正常海水 pH8.1。

2. 建立龍蝦種蝦與蝦苗繁殖培育技術

2.1 抱卵種蝦龍蝦收集及孵化

龍蝦抱卵期約每年的 5~9 月，本年度由和平島漁港購買約 30 隻抱卵種蝦及 20 隻未抱卵的種蝦 (21 隻日本龍蝦及 29 隻波紋龍蝦)經打氣放置運送桶後。運回海洋大學海生所培育室特製水母缸養等待孵化 (圖 8-9)。將已抱卵的野生種蝦培養於室內養殖室中，保持光週期為(光 12:12)、海水為學校外抽取的天然海水。總共 9 隻龍蝦發生踢卵及 1 隻龍蝦脫殼後整批卵拋棄之外，其餘龍蝦別在今年 6/16、7/13、8/19、9/13、9/19，11/6 將孵化卵排出。而隨野外天氣水溫降低後，孵化率從接近 90%降低到約 10%，排卵約持續 2~3 天，剩下未能排出的卵，母蝦會將剩餘的卵都踢除。這些卵經人工打氣處理，孵化率極低不超過 1%。

收集的未抱卵種蝦皆為已交配過於頭胸甲上覆有精英的母種蝦，經適應養殖池環境受進行光週期、水溫及營養的測試。光週期以光(小時)/暗(小時) (12/12、14/10)，水溫以 25℃ 及 28℃ 為測試。營養來源分組成生餌及人工飼料做為測試條件。龍蝦在交配後，公蝦會將精英留在母蝦的頭胸甲上。待母蝦生理及環境成熟時候，母蝦會將卵從體內排出至腹甲後排卵等 3~4 周孵化。108 年度收集之種蝦只有 3 隻母蝦順利排卵出來，最後只有 2 隻成功孵化出蝦苗。對於龍蝦種蝦交配後所需要的營養的研究仍未確認，僅能照文獻及白蝦種蝦所需求的養分來測試。而野外收集帶有精英的種蝦我們並沒有辦法判斷精英的狀況及種蝦健康與否。在本年度所餵食生餌的種蝦中，並沒有順利排卵 (0/15)，餵食基本配方人工餌料的龍蝦仍有三隻順利排卵(3/15)。(表三) 顯示人工餌料可能提供較好的養分給龍蝦讓龍蝦有足夠能量排卵。這部分表示可持續開發龍蝦種蝦需要的養分的人工飼料的潛力。

今年所收集的龍蝦排卵時間約在滿月前後 5 天，這部分與之前的 Abrunhosa 研究觀察到的觀察是一致的(Abrunhosa, Santiago, & Abrunhosa, 2008)(表二)。在其他的海洋生物排卵週期是會受到月亮週期所影響的潮汐緩急是已經被證實的。但本年度所收集的龍蝦都養於本研究室所控制的室內光週期與維持固定水流的循環缸這些海洋潮汐無關的地方。但龍蝦仍會受到月亮週期調控。這部分是否與一些調控基因有關，仍需要更多的學術證明以利之後提升龍蝦孵化成功率將有幫助



圖 8、(左)本年度所使用的龍蝦產卵培育缸、(右)抱卵龍蝦於水母缸之中進行待產。

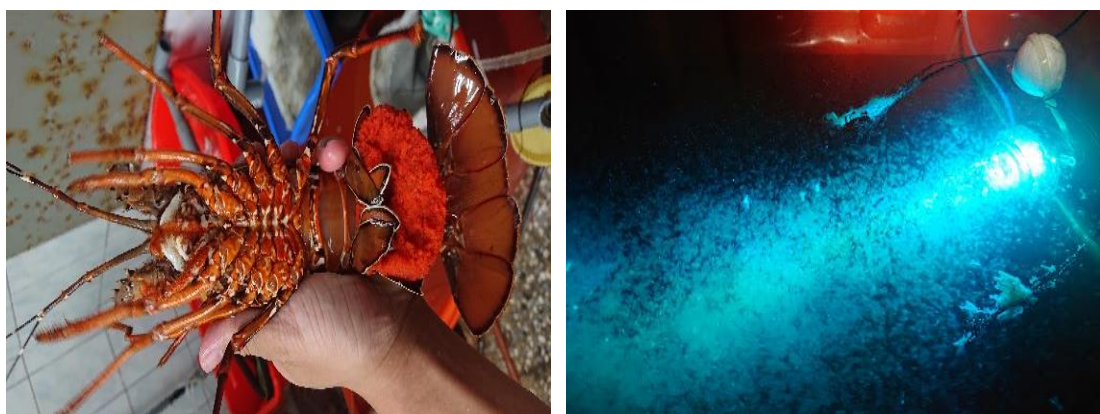


圖 9、(左)本年度所進的抱卵龍蝦、(右)龍蝦苗孵出後對於呈現出趨光性。

表二、本年度龍蝦孵化紀錄表。

排卵龍蝦隻數	農曆日期	光週期(W/D)(hr)	溫度 °C
5	5/14	12/12	28
3	6/11	12/12	28
3	7/19	12/12	28
3	8/15	12/12	28
4	8/21	12/12	28
2	10/10	12/12	28

表三、光週期、水溫、營養測試對龍蝦種蝦孵化測試。

實驗組	光週期 (光 hs:暗 hs)	水溫 °C	營養來源	存活率	抱卵率	孵化率
1	12:12	25	生餌	3/3	0/3	0/0
2	12:12	25	人工餌料	3/3	0/3	0/0
3	12:12	28	生餌	4/4	0/4	0/0
4	12:12	28	人工餌料	4/4	2/4	1/2
5	14:10	25	生餌	4/4	0/4	0/0
6	14:10	25	人工餌料	4/4	0/4	0/0
7	14:10	28	生餌	4/4	0/4	0/0
8	14:10	28	人工餌料	3/4	1/4	1/1

2.2 龍蝦葉狀幼苗 (phyllosoma) 培育特殊人工餌料測試

葉狀幼苗至龍蝦玻璃苗的培育技術為龍蝦培育最為重要的部分，日本在龍蝦幼苗養殖研究已經超過 100 年以上(Hattori & Oishi, 1899)，印度、澳洲、紐西蘭及美國都研究超過 40 年以上。Kittaka 等人於 1988 年首先完成葉狀幼苗培育至玻璃苗的紀錄(Kittaka, Iwai, & Yoshimura, 1988)。但對於規模化培育技術仍為各研究團隊突破或是隱藏的技術，所以並沒有辦法得知完整的成分內容。(Hall et al., 2013)

龍蝦幼苗培育只有透過開發提供正確營養的餌料才能成功，且飼料必須為龍蝦幼苗願意接受並吸收的方式提供。飼料必須有必需的營養和物理性質像是大小、形狀及適口性等，才能夠讓提供幼苗脫殼所需的養分且幫助抵抗病原體。在龍蝦葉狀幼苗培育實驗中，之前參考國外團隊以橈腳類及豐年蝦無節幼蟲。但由於葉狀幼苗游泳能力差，如要滿足葉狀幼苗易於捕食的程度，餌料生物的密度需要極高才能令葉狀幼苗生存(Radhakrishnan & Vijayakumaran, 1986)。以貝類作為餌料測試，龍蝦幼苗培育至第五期(Chakraborty, Chakraborty,

Radhakrishnan, & Vijayan, 2010)。

但以餌料生物餵食龍蝦幼苗有以下缺點：

1. 要提供大量的餌料才能讓捕食能力差的幼苗攝食足夠。
2. 餌料生物無法提供幼苗各個階段所需養分。
3. 餌料生物可能會攜帶病原體造成幼苗死亡。

基於過去其他研究團隊的經驗，本研究團隊以開發龍蝦幼苗特殊人工餌料為建立蝦苗繁養殖技術開發重點；參考目前文獻指出龍蝦葉狀幼苗於野外的天然食物為幼魚、浮游生物或是水母等膠體動物(Wang & Jeffs, 2014)。所以研究團隊將輪蟲、豐年蝦、及貝類受精卵等常見的生餌作為原料搭配不同的凝固劑，嘗試開發龍蝦幼苗的特殊人工餌料(圖 10 左)。經測試以光誘引性、將人工餌料固定在缸壁、或是以做成仿水母懸浮法來作為餵食方法(圖 10 右)。可以觀察到龍蝦葉狀幼苗會以最後一對長附肢攀附於人工餌料後再以其附肢抓穩食物，接著以腹部口器小顎抓食進食並可以觀察到龍蝦幼苗順利排泄，(圖 11) 這部分與文獻紀錄龍蝦葉狀幼苗進食形況為將食物咬碎後，食糜會進入肝胰腺吸收後，經過腸胃道符合。顯示特殊人工餌料取代傳統餌料生物餵食的方法對於龍蝦葉狀幼苗是可開發的方向。

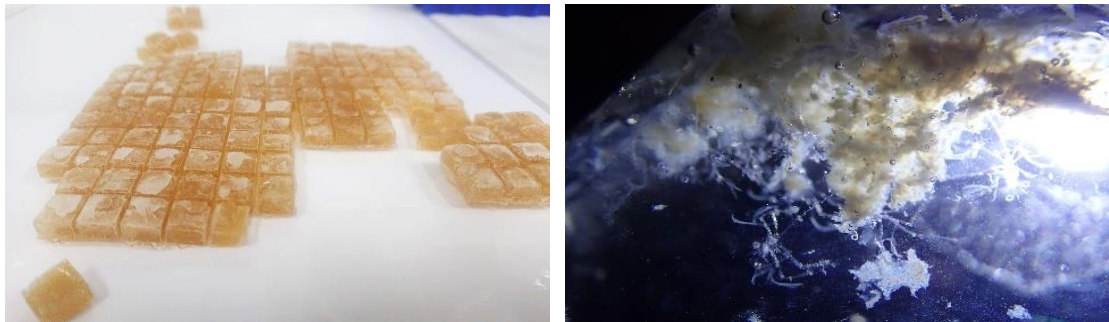
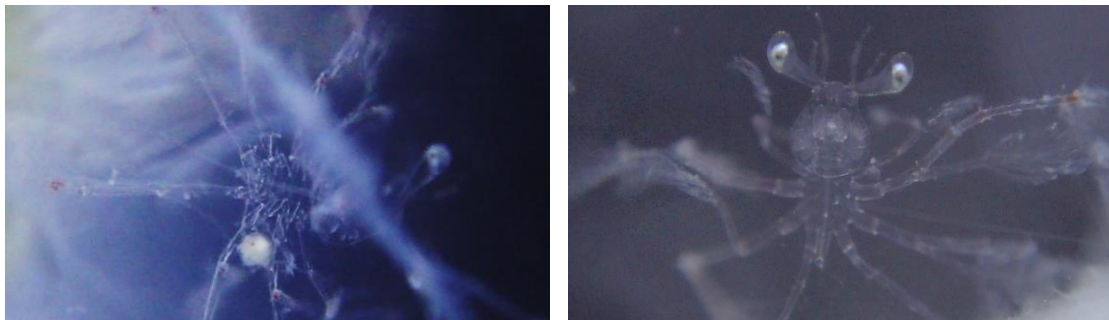


圖 10、(左)龍蝦人工餌料，(右)人工餌料餵食龍蝦葉狀幼苗情形。



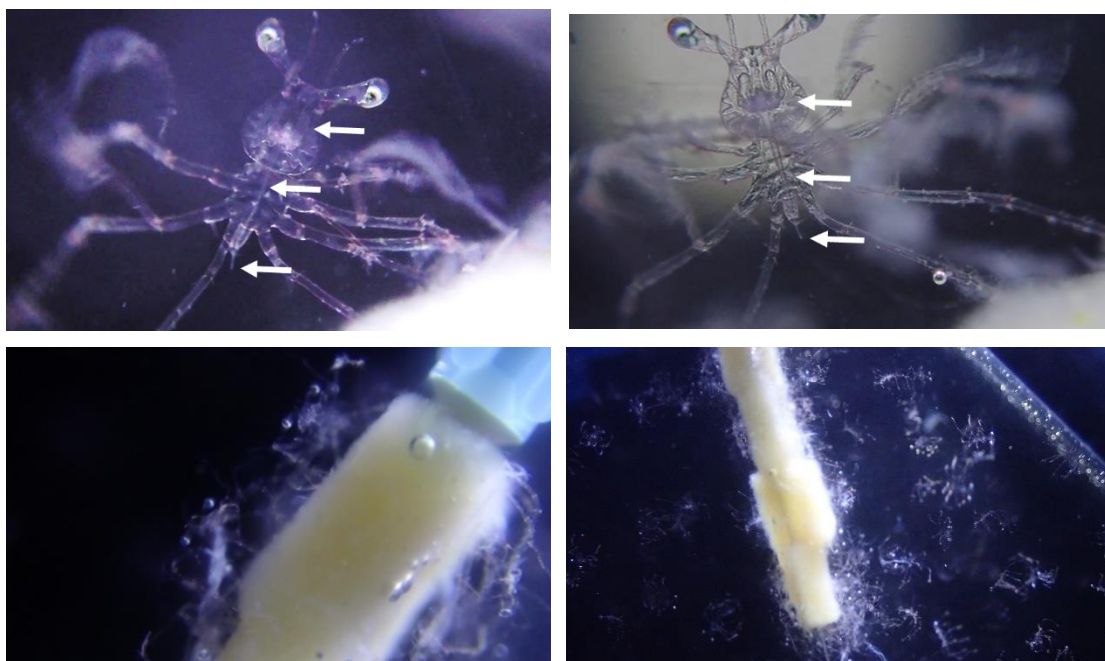


圖 11、龍蝦進食人工餌料情形，可以觀察到餌料順利形成白色透明排泄物(白色箭頭處)。

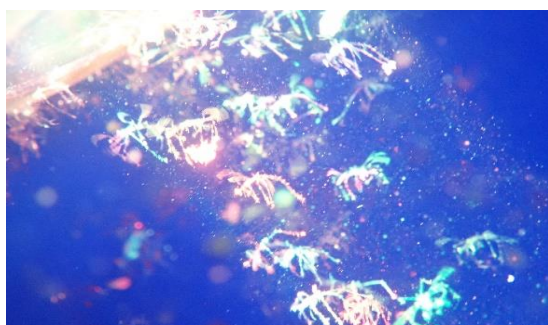


圖 12、龍蝦幼苗受到水中燈吸引趨光情形。

2.3 龍蝦葉狀幼苗培育

本年度在龍蝦幼苗孵化季節中共培育龍蝦幼苗 6 次；每次約培養一千隻投放水母缸之中，孵化後的 24 小時內餵食無節豐年蝦及冷凍水蚤度過幼苗開口期，或以投餵人工餌料並觀察幼苗進食情況。前年度研究團隊以掛食貝類的方法模擬水母狀態提供葉狀幼苗食物可以觀察到葉狀幼苗進食的情況。本年度為建立龍蝦葉狀幼苗人工餌料的基礎配方與餵食方法。研究團隊測試魚類、軟體動物、甲殼類等龍蝦幼苗於天然環境中可能是潛在食物的蛋白質來源，以黏合劑製成人工餌料。測試結果顯示黏合劑的種類對於幼苗的引誘性差異性不大(圖 13)。考量到龍蝦幼苗的適口性，研究團隊也測試不同型態的人工餌料；包括將人工餌料以不同形狀或是擠壓成線狀的飼料測試幼苗攝食狀況(圖 13)。線狀飼料於水母缸環境之中，比較能平均讓葉狀幼苗攝食到。而塊狀飼料比較會讓葉狀幼苗有搶食的情形，但對於生存率並沒有太大影響。觀察缸中存活率與龍蝦

狀況，每 10 天以死亡的龍蝦幼苗數量來估計缸體中的存活率；目前培養在脫殼至第二期的 10 天~20 天中曾經歷大量死亡，經鏡檢評估死亡多為龍蝦脫殼困難及鐘形蟲寄生有關，培養最長時間目前為 61 天(體長約 5mm，約第 4 期)。培養後期葉狀幼苗的死亡率上升，這部分除了與水流與溶氧量有關，也觀察到培養後期葉狀幼苗對於人工餌料的食慾降低許多，如何調整人工餌料內容及養殖環境將是後續努力的方向。不論餌食豐年蝦無節幼蟲或是特殊人工餌料的龍蝦葉狀幼苗，本年度培養的天數最長 8 月培育出的幼苗總共養殖約 61 天(約第四期)。前 10~20 天存活率都能保持 90% 以上，但 20 天以上存活率都會快速下降。觀察死亡的頻率與種蝦 6~8 月與 9~11 月有差異的，可能與種蝦健康程度有關。必須特別注意水流及水質的乾淨；幼苗因為游泳能力差會造成身上的葉狀附肢被泥沙覆蓋造成幼苗無法呼吸而死亡(圖 11)，也必須注意水質中黴菌附著造成龍蝦幼苗活動力減弱、最後導致呼吸道被阻塞死亡(圖 14)

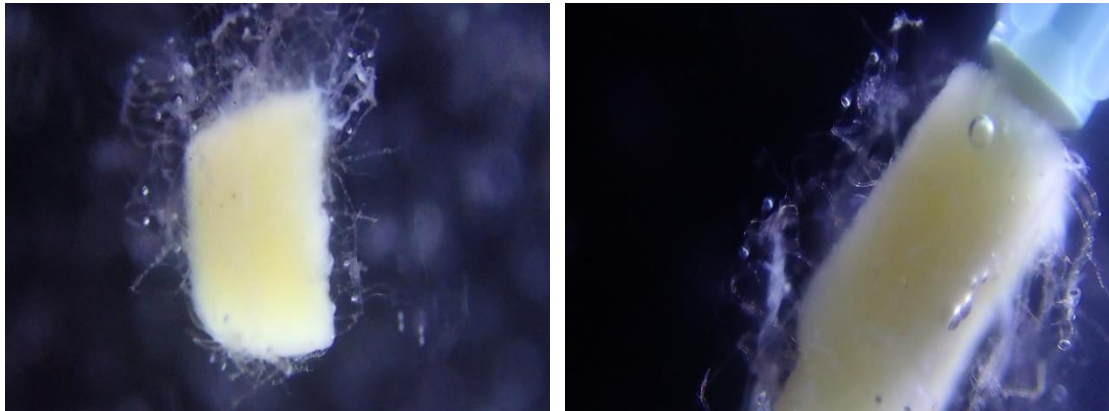


圖 13、塊狀餌料對於幼苗的適口性測試。

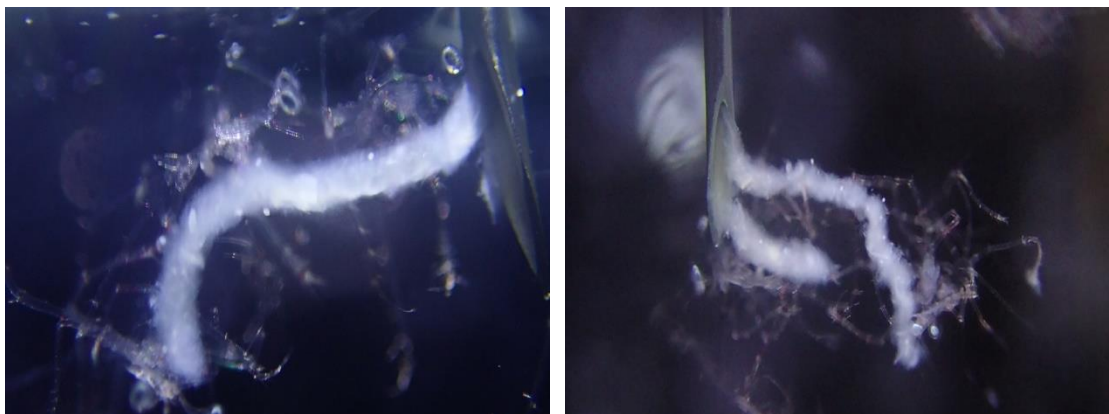


圖 14、線狀餌料對於幼苗的適口性測試。



圖 15、本實驗所使用之水母缸。

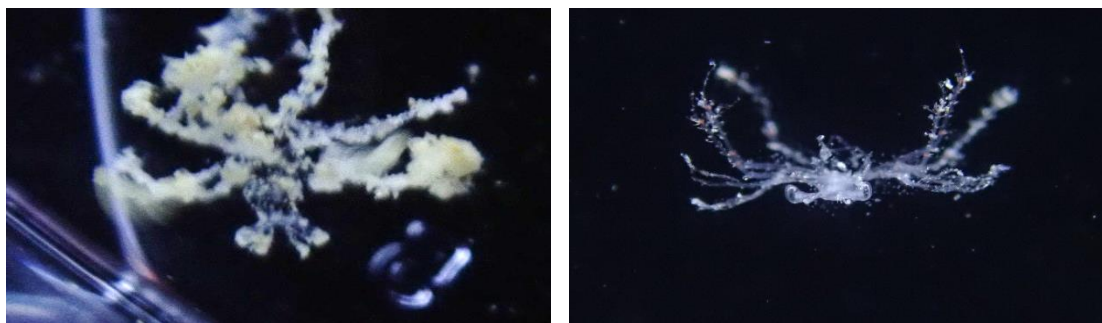


圖 16、(左) 葉狀幼苗因為水中泥沙過多造成死亡 (右) 葉狀幼苗身上被鐘形蟲及水黴所附著。

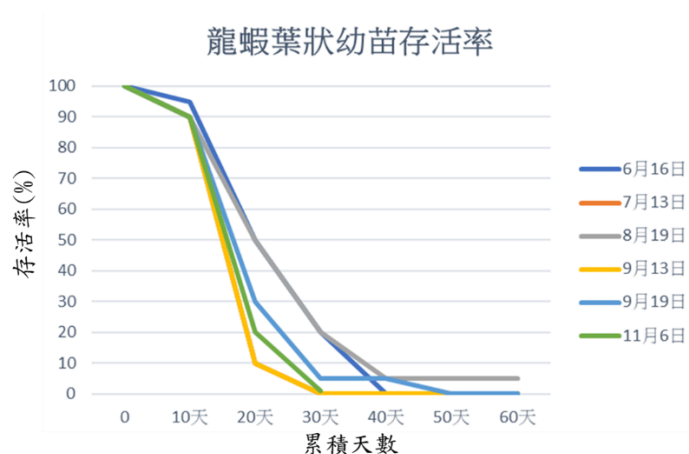


圖 17、今年度所培養 6 次的龍蝦葉狀幼苗存活率：本年度培養龍蝦葉狀幼苗共 6 次培養時間 6/16、7/13、8/19、9/13、9/19、11/6。6~8 月時間培養平均天數較長 (約 30 天)，入秋後所誕生的龍蝦苗培養天數降低。

結論：

龍蝦葉狀幼苗研究方向可以分為；培育系統、餌料生物及人工餌料。本年度所使用的培育系統為水母缸，利用水母缸的水流來帶動人工餌料的浮動幫助龍蝦葉狀幼苗進食。龍蝦人工餌料相對於天然的餌料生物有幾個優勢；1.可以減少所需的餌料生物、提升餌料的被攝食率、降低浪費與減少水質的污染。2.可

以根據幼苗生長階段調整餌料養分比例及免疫物質，提供所需養分及免疫力。

3.方便保存與餵食。4.減少餌料生物攜帶病原體造成龍蝦幼苗死亡的風險。國外團隊餵食以植物性蛋白質、碳水化合物等做的人工飼料測試東澳岩龍蝦(*Sagmariasus verreauxi*)可以培育 119 天(第三期)(Kittaka & Booth, 2000)。本研究團隊以自行開發的特殊人工餌料餵食波紋龍蝦(*Panulirus homarusi*)與日本龍蝦(*Panulirus japonicus*)幼苗經測試可以達到 61 天(第四期)。後續將持續測試龍蝦幼苗各階段所需養分，希望開發出各階段龍蝦幼苗的特殊人工餌料。並於 12/25 於海大發表相關資料。

相關新聞稿資料如下:” 國立臺灣海洋大學 25 日上午在行政大樓三樓會議室舉辦「馬祖海域棲地及資源保育計畫成果發表會」，分別由海大海洋中心蔣國平教授及陳歷歷研發長發表「藍眼淚」及「龍蝦復育」相關研究成果。

海洋大學校長張清風表示，海大成立馬祖校區後，張校長與連江縣劉增應縣長共同推動海洋水產在馬祖的研究，獲得連江縣政府及行政院農委會漁業署的支持，進行「藍眼淚」解密及「龍蝦復育」相關研究。

海洋中心教授蔣國平表示，2016 年起海大研究團隊開始針對在馬祖沿岸、坑道的海面上發出夢幻藍光的「藍眼淚」現象進行深度研究，除了證實馬祖藍眼淚現象是由夜光蟲所造成的之外，也已經掌握了人工繁殖的技術，現在在南竿藍眼淚生態館一年四季都可以欣賞到藍眼淚之美。

海洋中心教授陳歷歷表示，龍蝦屬於高經濟價值的水產品，每年全球龍蝦產值超過 60 億美元，但由於龍蝦還不能完全人工繁殖，目前龍蝦養殖主要還是要靠野外捕撈，造成野外數量日漸減少。然而龍蝦養殖的困難主要因素包括，因為過度捕撈造成種蝦體型偏小，缺乏健康的種蝦及品質好的卵，且孵化率不高，同時葉狀幼體浮游時間長，要人工養成到透明玻璃苗的技術困難，加上成蝦成長緩慢，脫殼時在腸胃道及殼硬化前需要掩蔽物，最關鍵的是，在人工養殖過程中，不同生長期的龍蝦缺乏適當的人工餌料餵養，也讓養殖面臨重重困難。

陳歷歷教授所率領的研究團隊，針對市場上常見的波紋龍蝦，研發中性浮力凝膠餌料，可以根據不同生長期龍蝦的特性與需求，調配專用的營養配方，陳歷歷強調，一般養殖的生物餌讓龍蝦吃得多但吃得不夠營養，人工餌料不僅可以讓龍蝦吃的飽，也能給龍蝦更多的養分，同時人工餌料可以根據不同幼苗期提供複合式的養分強化免疫，不但比生物及新鮮餌料成本低也方便保存，更可以避免飼料擴散於水中，保持水質狀態。

在漁業署的支持下，連江縣政府與海洋大學合作推動計畫，目前研究團隊研發的人工餌料已經可以讓龍蝦從卵孵化到葉狀幼苗養成超過兩個月，這是全球首次開發成功的龍蝦人工飼料，相信未來要達成龍蝦完全養殖將是指日可待。

”

3. 東引海域地區龍蝦資源調查及放流評估

3.1 東引海域地區龍蝦資源水下調查

本年度資源調查及放流評估目前主要為委託東引島當地漁民潛水調查及委託漁民紀錄平日捕撈到龍蝦的情形。水下調查部分受限於東引海域洋流強勁及颱風季風對於海象能見度影響，必須由當地專業潛水夫評估海況與適合潛點後下水觀察。今年於5~9月期間由潛水夫進行水下調查9次(圖13~圖21)。



圖 18、水下調查區域及觀察到龍蝦區域

今年觀察到龍蝦的區域為燈塔及獨角帽的海域(★)，距離 107 年放流區域紅色星號區域並不遠，107 年放流區域為天王澳及犬齒礁，今年水下調查中接近 107 年放流區域的安東坑道及三塊礁部分並沒有觀察到龍蝦。而在東引鄉偏東邊的東引燈塔及獨角帽海域是唯二有觀察到龍蝦的海域，對於東引龍蝦棲地的評估仍需要更長久的調查，才能進一步評估東引海域是否作為龍蝦棲地適合度。



圖 19、鱸魚頭調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 20、西沙二號礁調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 21、雙子礁內溝調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 22、老鼠沙調查照片(左)水上 (右)水下。

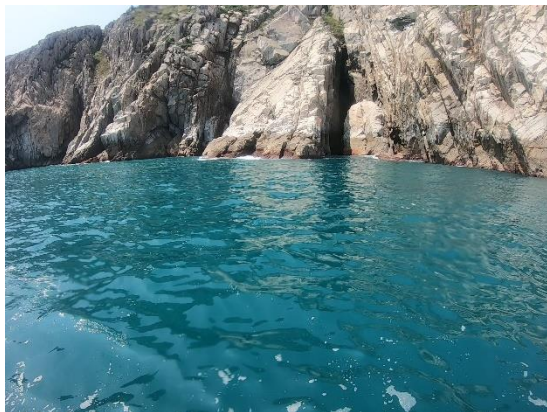


圖 23、 安東坑道調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 24、 三塊礁調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 25、 東引燈塔調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 26、 東引燈塔斜地調查照片(左)水上 (右)水下。



圖 27、獨角帽獨立礁調查照片(左)水上 (右)水下。

3.2 東引島龍蝦資源捕撈調查

根據訪查顯示:本年度捕撈或是下水觀察到波紋龍蝦的比例有提高,而捕撈到的龍蝦體長約在 600 克以上(圖 28)。關於東引海域龍蝦環境調查,由於東引島過去並沒有長期的海域生態環境調查,本年度只能從當地漁民反映中觀察海域變化:根據長期在東引潛水的漁民表示,過去龍蝦多棲息在中柱港沿岸水下約 30~40 米的岩縫之中。但隨著中柱橋的改建後,將東引島與西引島之間的海堤以填滿的形式打造,雖然讓中柱港之類的大海象穩定航班易於停靠,但也讓成東引島即西引島之間南北海流無法互相流通(圖 29)。由於交通部運輸處對於東引港的海流調查最早中柱橋完工後的 2013 年開始。這部分由於缺乏相關水文資料的調查,東引海域的海流及泥沙堆積是否跟東引當地漁民所說的最近 10 年隨著海流改變造成東引周圍海域泥沙堆積,讓原來龍蝦棲息的岩洞被淹沒,而讓龍蝦遷移至東引島比較外海區域甚至離開東引海域棲地。這部分的推測是否是造成龍蝦棲地改變而讓東引周圍龍蝦數量減少的因素,仍需要更多的相關資源調查來證實。





圖 28、東引島漁民所捕獲的東引龍蝦。



圖 29、東引中柱橋阻擋東引島與西引島之間的海流。(左)漲潮前、(右)漲潮後。

4. 結論

儘管龍蝦是高經濟價值的水產品也是各國研究單位及企業長期研究的課題，但龍蝦養殖及復育的發展仍然相當緩慢。主要障礙是葉狀幼苗的培育及龍蝦玻璃幼苗的培育。台灣並沒有太多的龍蝦玻璃幼苗產量的數量以進行相關實驗，相關業者只能從東南亞進口來測試培育的技術，而並沒有相關成果的資訊透露。所以本研究團隊以培育葉狀幼苗的方向進行研究，本年度培養龍蝦種蝦順利孵化產下卵的種蝦共 20 隻，共培育龍蝦幼苗 6 次共約 6000 隻。培養過程中約在 1~2 期死亡率最高，6 次中僅有兩次培養到 20 天還有 50% 存活率。培養最好的

時間為 61 天(約第四期)。龍蝦幼苗人工餌料的開發方向在今年的測試中也取得一定程度的突破,這方向將會努力爭取進行研究。東引早期地區龍蝦產量豐富,可能與過去人為海岸開發程度低,龍蝦棲地維持較好以及戰地任務期間軍事管制令外國漁船濫捕情形不易發生有關。目前由於戰地任務解除,東引海域廣闊執法單位難以取締及阻擋國外漁船捕撈龍蝦。保育放流管理從今年 9 次短期捕撈及水下調查評估的成果僅有 2 次水下觀察到龍蝦。對於東引地區龍蝦棲息地缺乏過去的資料,研究團隊認為放流效益仍需要更多時間觀察,才能確認龍蝦放流的效益。而根據當地漁民觀察的中柱港堤防設施對於龍蝦自然棲地造成的影響。研究團隊建議在漁業管理及自然棲地建立的部分有更進一步的資料前,無論放流龍蝦或是龍蝦幼苗於東引地區海域的效果可能極為有限。

東引北海坑道培育中心的環境可以避免龍蝦在培育過程中,遭受颱風暴雨等影響,海水潮汐交換正常的情況下也可以避免水質過度變化。若能加強培育的管理對於龍蝦培育是個優良的環境。例如:持續引進當地龍蝦種蝦並維持種蝦自然交配孵化龍蝦苗;一方面利用坑道隱密方便管控以保護龍蝦種蝦被盜捕,另一方面可以由坑道內對東引海域自然補充龍蝦幼苗資源,長期下來可望回復東引海域龍蝦資源。建議可以維持與東引坑道培育計畫復育龍蝦資源以及建立更長時間的東引地區龍蝦資源資料。以海洋大學研究團隊執行此計畫的經驗與專長,對於龍蝦卵孵化後的葉狀幼苗培育已有一定的突破。研究團隊將未來在有餘力及實驗空間的狀態下進行一定的研究,希望達到與地方政府及學術單位共同達到復育龍蝦資源的目標。

5. 參考資料

- Abrunhosa, F. A., Santiago, A. P., & Abrunhosa, J. P. (2008). The early phyllosoma stages of spiny lobster *Panulirus echinatus* Smith, 1869 (Decapoda: Palinuridae) reared in the laboratory. *Brazilian journal of biology*, 68(1), 179-186.
- Chakraborty, K., Chakraborty, R. D., Radhakrishnan, E., & Vijayan, K. K. (2010). Fatty acid profiles of spiny lobster (*Panulirus homarus*) phyllosoma fed enriched *Artemia*. *Aquaculture Research*, 41(10), e393-e403.
- Hall, M., Kenway, M., Salmon, M., Francis, D., Goulden, E., & Høj, L. (2013). Palinurid lobster larval rearing for closed-cycle hatchery production. In *Advances in aquaculture hatchery technology* (pp. 289-328): Elsevier.
- Hattori, T., & Oishi, Y. (1899). Hatching experiment on Ise lobster. *Report of the Imperial Fisheries Institute*, 1, 76-132.
- Kittaka, J., & Booth, J. (2000). Prospectus for aquaculture. *Spiny lobsters: Fisheries and culture*, 465-473.

- Kittaka, J., Iwai, M., & Yoshimura, M. (1988). Culture of a hybrid of spiny lobster genus. In: Jasus.
- Radhakrishnan, E., & Vijayakumaran, M. (1986). Observations on the feeding and moulting of laboratory reared phyllosoma larvae of the spiny lobster *Panulirus homarus* (Linnaeus) under different light regimes.
- Wang, M., & Jeffs, A. G. (2014). Nutritional composition of potential zooplankton prey of spiny lobster larvae: a review. *Reviews in Aquaculture*, 6(4), 270-299.

履約項目目錄

- p.37~p.41.
 1. 於東引北海坑道投入種蝦，紀錄相關研究數據，並觀察龍蝦苗孵化狀況。
 - i. 紀錄馬祖龍蝦培育中心內所投養龍蝦隻相關數據(存活率、體長、重量變化等)
 - ii. 購買 50 隻本地種蝦用於北海坑道及實驗室觀察研究。p.42
 - iii. 於東引北海坑道中觀察是否能自然孵化龍蝦幼苗及溢出於北海坑道外海域，按月觀察並近行紀錄至少達 9 次。
- p.42~p.49.
 2. 建立種蝦與蝦苗培育技術(包含種蝦繁養過程中光週期、水溫與營養對受精卵孵化率和蝦苗存活率的影響)
- p.50.~p.53
 - 3.委託漁民於東引海域放網捕撈龍蝦，並根據捕撈狀況進行放流成效評估，每月固定蒐集 1 次，至少達 9 次。
- p.49.
 - 4.辦理龍蝦研究成果發表會(記者會)1 次。
- p.37
 - 5.提供 1 千尾龍蝦並放至東引北海坑道龍蝦養殖區內(議約項目)
- p.49.~p.53
 - 6.放流成效分析需搭配水下攝影及分析結果報告(議約項目)

藍眼淚及龍蝦成果發表會(記者會)

馬祖海域棲地及資源保育計畫在連江縣政府及行政院農委會漁業署支持下，於106年12月開始執行至108年12月結束，並在今(108)年12月25日上午於海洋大學舉辦成果發表會，與會人員包含連江縣政府、行政院農委會漁業署、國立臺灣海洋大學及記者媒體(如簽到表)。

發表會內容主要包含藍眼淚及龍蝦兩部分，藍眼淚研究成果包括1. 夜光蟲的出現為一矽藻與夜光蟲交替之藻華輪替現象；2. 夜光蟲有日夜垂直分布的現象；及3. 透過衛星遙測可以觀察到夜光蟲的分布情況。龍蝦研究成果為已研發中性浮力凝膠餌料，此龍蝦人工餌料相對於天然的餌料生物有幾個優勢；1. 可以減少所需的餌料生物提升餌料的被攝食率降低浪費與減少水質的汙染。2. 可以根據幼苗生長階段調整餌料養分比例及免疫物質提供所需適合養分及免疫力。3. 方便保存與餵食。4. 減少餌料生物攜帶病原體造成龍蝦幼苗死亡的風險。目前研發之人工餌料為全球首次開發成功的龍蝦人工飼料，已可讓龍蝦從卵孵化到葉狀幼苗養成超過2個月。



會議當日與會貴賓致詞及龍蝦餵食人工餌料展示。

相關內容也已報導於新聞網路媒體(如電子檔):

1. 聯合新聞網(產經)[喝馬祖高粱配龍蝦不是夢 海大今發表龍蝦養殖重大突破]

<https://udn.com/news/story/7241/4247817>

2. 聯合新聞網(生活)[研發人工飼料 海大：5 年內幫馬祖養殖龍蝦成功]

<https://udn.com/news/story/11322/4249451>

3. TVBS[首創！海大研發龍蝦飼料 突破人工養殖瓶頸]

<https://www.youtube.com/watch?v=SiOKFFlCbxs>

<https://youtu.be/SiOKFFlCbxs>



4. ETtoday 新聞雲[突破養殖困難！海大開發龍蝦飼料 馬祖北海坑道變身復育基地]

<https://www.ettoday.net/news/20191225/1609988.htm>

5. 經濟日報(產業)[海大推動馬祖龍蝦復育 開發人工飼料]

<https://money.udn.com/money/story/7307/4248404>

6. 農傳媒[龍蝦苗喜歡漂浮抱著吃 海大開發人工餌料突破養殖門檻]

<https://agriharvest.tw/?p=13551>

7. 中國時報[龍蝦卵孵化 海大新突破研發人工餌料 完全養殖不是夢]

<https://turnnewsapp.com/tw/billboard/155460.html>

8. 自由時報[突破人工養殖困難！海大成功開發龍蝦飼料]

<https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/3019540>

9. 青年日報[「海大」馬祖海域保育計畫成果發表]

<https://www.ydn.com.tw/News/365351>

10. 台灣動物新聞網[一年四季都能看「藍眼淚」！海洋大學成功培育夜光蟲]

<http://www.tanews.org.tw/info/18760>

11. 台視[馬祖藍眼淚污染害的？專家研究破謠言 夢幻藍光天然 a 啦 夜光蟲發光無毒無害 -]

<https://www.ttv.com.tw/news/view/10812250030200N/579>

<https://youtu.be/fd9m85jTRqI>



12. 中央社[海大成功開發人工飼料 將投入東引龍蝦養殖]

<https://www.cna.com.tw/news/ahel/201912270042.aspx>

13. 中央通訊社[海大推動馬祖龍蝦復育 開發人工飼料]

<https://www.cna.com.tw/news/ahel/201912250194.aspx>

14. 雅虎新聞[海大完成開發人工飼料 未來龍蝦完全養殖指日可待]

<https://tw.news.yahoo.com/%E6%B5%B7%E5%A4%A7%E5%AE%8C%E6%88%90%E9%96%8B%E7%99%BC%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E9%A3%BC%E6%96%99-%E6%9C%AA%E4%BE%86%E9%BE%8D%E8%9D%A6%E5%AE%8C%E5%85>

%A8%E9%A4%8A%E6%AE%96%E6%8C%87%E6%97%A5%E5%8F%AF%E5%BE%85-074936421.html

15. 馬祖日報[海大成功研發龍蝦餌料 發表會宣布全球首次]

<http://www.matsu->

news.gov.tw/2010web/news_detail_101.php?CMD=open&UID=215267



16. 中天新聞 [「龍蝦養殖」大突破！ 人工飼料養成2月大龍蝦]

<https://www.youtube.com/watch?v=lj9AiBttmVk>



17. 民視英語新聞[Marine ecologists unlock secrets behind Matsu's sea sparkles
(2019/12/26)]

<https://englishnews.ftv.com.tw/read.aspx?sno=3AD65F556D242976E30D3D745C2357DC>



轉刊

18. 雅虎新聞(TVBS)[首創！海大研發龍蝦飼料 突破人工養殖瓶頸]

https://tw.news.yahoo.com/%E9%A6%96%E5%89%B5-%E6%B5%B7%E5%A4%A7%E7%A0%94%E7%99%BC%E9%BE%8D%E8%9D%A6%E9%A3%BC%E6%96%99-%E7%AA%81%E7%A0%B4%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E9%A4%8A%E6%AE%96%E7%93%B6%E9%A0%B8-124445517.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAACGwRuUZ4xYHRAgbZ-YlgwgImEThhaQMELCe1spNUcXlrKWHPaNcMVI_wAWhp5E68qc07Gp4We8rAacBiMACUmFP86h2yAh-xzTJeduzH17PLcrbojtEeLlZGuFzLfpXODRVnND19oRnJugZEs8PzU63W5UeO5XW72MxZryXP6tj

19. 雅虎新聞(中央社)[海大成功開發人工飼料 將投入東引龍蝦養殖]

<https://tw.news.yahoo.com/%E6%B5%B7%E5%A4%A7%E6%88%90%E5%8A%9F%E9%96%8B%E7%99%BC%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E9%A3%BC%E6%96%99-%E5%B0%87%E6%8A%95%E5%85%A5%E6%9D%B1%E5%BC%95%E9%BE%8D%E8%9D%A6%E9%A4%8A%E6%AE%96-023352687.html>

20. 雅虎新聞(中國電子報)[龍蝦卵孵化 海大新突破]

<https://tw.news.yahoo.com/%E9%BE%8D%E8%9D%A6%E5%8D%B5%E5%AD%B5%E5%8C%96-%E6%B5%B7%E5%A4%A7%E6%96%B0%E7%AA%81%E7%A0%B4-215010292.html>

21. 蕃新聞(中央社)[海大推動馬祖海域龍蝦復育開發全新人工飼料]

<http://n.yam.com/Article/20191225905783#>

22. 芋傳媒(中央社)[海大推動馬祖龍蝦復育 開發人工飼料]

<https://taronews.tw/2019/12/25/568772/>

23. HINET 生活誌(中央社)[海大 25 日辦馬祖海域棲地及資源保育計畫成果發表會]

<https://times.hinet.net/news/22709949>

24. HINET 生活誌(中央社訊息服務) [海大推動馬祖海域龍蝦復育開發全新人工飼料]

<https://times.hinet.net/news/22711244>

25. 雅虎新聞(民視)[一年四季都能看「藍眼淚」！海洋大學成功培育夜光蟲]

<https://tw.news.yahoo.com/video/%E5%B9%B4%E5%9B%9B%E5%AD%A3%E9%83%BD%E8%83%BD%E7%9C%8B-%E8%97%8D%E7%9C%BC%E6%B7%9A-%E6%B5%B7%E6%B4%8B%E5%A4%A7%E5%AD%B8%E6%88%90%E5%8A%9F%E5%9F%B9%E8%82%B2%E5%A4%9C%E5%85%89%E8%9F%B2-090640440.html>

<https://tw.news.yahoo.com/%E5%B9%B4%E5%9B%9B%E5%AD%A3%E9%83%BD%E8%83%BD%E7%9C%8B-%E8%97%8D%E7%9C%BC%E6%B7%9A-%E6%B5%B7%E6%B4%8B%E5%A4%A7%E5%AD%B8%E6%88%90%E5%8A%9F%E5%9F%B9%E8%82%B2%E5%A4%9C%E5%85%89%E8%9F%B2-062041309.html>

<https://youtu.be/lfTpugd3tnU>



26. 更生日報(中央社)[海大成功開發人工飼料 將投入東引龍蝦養殖]

http://www.ksnews.com.tw/index.php/news/contents_page/0001331379

27. 聯合新聞網(中央社)[海大成功開發人工飼料 將投入東引龍蝦養殖]

<https://udn.com/news/story/6928/4252159>

馬祖海域棲地及資源保育計畫成果發表會會議簽到表

時間：108 年 12 月 25 日（三）上午 9 時 30 分

地點：國立臺灣海洋大學行政大樓 3 樓會議室

單位	職稱	姓名	簽名	備註
國立臺灣海洋大學	校長	張清風	張清風	
	研發長	陳歷歷	陳歷歷	
	海洋中心主任	陳天任	陳天任	
	海洋環境與生態研究所特聘教授	蔣國平	蔣國平	
	海洋環境與生態研究所助理教授	蔡昇芳		
	水產養殖系助理教授	徐德華	徐德華	
	環境生物與漁業科學系助理教授	藍國璋	藍國璋	
	海洋生物研究所	黃博鈺	黃博鈺	
	海洋中心	陳怡慧		

馬祖海域棲地及資源保育計畫成果發表會會議簽到表

時間：108 年 12 月 25 日（三）上午 9 時 30 分

地點：國立臺灣海洋大學行政大樓 3 樓會議室

單位	職稱	姓名	簽名	備註
連江縣政府	縣長	劉增應	劉增應	
	立法委員	陳雪生		
	議長	張永江	張永江	
	教育處處長	陳冠人		
	產發處處長	劉德全	劉德全	
	馬祖日報社長	宋志富	宋志富	
	產業發展處漁牧科 科長	賴文啟	賴文啟	
	縣長秘書	陳麗玲	陳麗玲	
	產業發展處漁牧科 承辦人	陳柏价	陳柏价	
行政院 農委會 漁業署	漁政組副組長	劉家禎	劉家禎	
	漁政組資源管理科 科長	沈珍珍	沈珍珍	
	漁政組資源管理科 技士	陳思樺	陳思樺	

馬祖海域棲地及資源保育計畫成果發表會會議簽到表

時間：108 年 12 月 25 日（三）上午 9 時 30 分

地點：國立臺灣海洋大學行政大樓 3 樓會議室

單位	職稱	姓名	簽名	備註
北奇調頻 中合	會長	金穎	金穎	
惠傳時	記名	朱明祥	朱明祥	
李月	記名	黃以仁	黃以仁	
台灣導報	記名	李治之		
聯合報		吳淑君	吳淑君	