

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 生物科

080301

回到白堊紀的海中時空

學校名稱：財團法人新北市私立聖心國民小學

作者：  小五 花靖涵  小五 朱晨甄  小五 陳思妤  小五 陳梓淋  小五 王子瑜  小五 蔡佳樂	指導老師：  嚴融怡
---	------------------

關鍵詞：藻類、海星、浮石

## 摘要

白堊紀曾經歷漫長海水滯留以及由隕石撞擊所帶來大量似浮石物質在海洋中擴散。本研究透過模擬試驗配合野外觀察與水樣分析，探索海洋生物若再次遭逢白堊紀兩類極端環境因子所可能產生的後續效應。研究結果顯示長期停滯試驗超過半年，氧化還原電位、溶氧數值將難以經由光合作用恢復，藻類更會逐漸衰老瀕死。因此海水若長期滯留將導致水質劣化、藻類生理衰退。然而衰老藻類若能伴隨健康藻類群體將有助恢復部分生理功能，因此環境復原對於災變衝擊後藻類生理恢復運作相當重要。浮石進入海洋約重量比千分之28.6就足以造成海水黏度高於血液的15mPa·s；研究中亦證明浮石可能為海星帶來衰弱症病原；因此特大浮石事件會同時經由化學與生物層面影響海洋生態。

## 壹、前言

6500萬年前白堊紀—古近紀大滅絕事件 (Cretaceous-Paleogene extinction event) 時期，撞擊地球的隕石不只讓恐龍滅絕，隕石碎屑和野火燃燒的灰燼也讓陽光約有兩年無法抵達大地與海洋，生物經歷了漫長的「撞擊寒冬」，光合作用幾乎完全停止；甚至讓原先具有光合作用能力的鈣板藻 (*coccolithophore*) 或球石藻 (*coccolith*) 為求生存轉而改變為掠食型態，才得以讓海洋在漫長的黑暗時期仍保有複雜食物網的基礎 (Black, 2021)。早在隕石撞擊以前，地球已經歷過白堊紀的兩次中生代海洋缺氧事件 (Mesozoic Oceanic Anoxic Events, OAEs) 這類全球碳循環擾動的重要事件；其中第二次的森諾曼期—土侖期滅絕事件 (Cenomanian-Turonian boundary event, OAE2)，發生於9300-9400萬年前，當時洋底高原噴發曾導致海洋流動停滯，各種海洋無脊椎動物雖然因為海洋長期處於溫暖時期而環境生產力短暫飆升，但隨即受到貧營養狀態甚至水中缺氧情形而長期處於低生育率，也使得食物鏈受到劇烈的衝擊，更導致了上龍類和大多數魚龍類的滅絕 (陸鹿等, 2016; Ohouchi, Kuroda & Taira, 2015; Linnert, Mutterlose & Erbacher, 2010; "Cretaceous-Paleogene extinction event," 2022; "白堊紀," 2022)。另一方面，白堊紀末期的希克蘇魯伯撞擊事件不僅造成巨大的海嘯和地震，噴出大量煙塵與碎片，同時也創造了類似40億年前生命起源的環境條件，例如形成有機反應催化劑的溫泉環境與粘土，以及在撞擊事件後所產生的各類微生物棲息地，包括熱液系統、撞擊坑湖以及性質類似於火山浮石的多孔衝擊岩石 (porous shocked rocks) 和撞擊玻璃 (impact glasses)，可讓許多微生物棲息其中 (Osinski, 2021)。事實上，大量呈現玻璃狀、多孔與富含氣體的浮石也在地球生命初生時期發揮關鍵作用，因為浮石從漂流到掩埋，這些顆粒本身所具備非凡的吸附金屬、有機物和磷酸鹽等物質的能力可能為最早期的微生物群落提供了重要的棲息地 (Brasier, Matthewman, McMahon & Wacey, 2011)。然而，地球畢竟早已不是像生命初生時期那樣地單純，浮石帶來更為複雜的微生物交互作用以及各類夾帶物質傳輸所增添的海洋化學變異情形。在白堊紀的時候，海洋當中的許多浮石以及多孔衝擊岩石曾對於海洋環境造成極大的重塑情形。如果這樣的狀況發生在現在的地球，又會有怎樣的影響呢？

### 一、研究動機

我們常在新聞報導、國家地理頻道、動物星球頻道等電視或網路節目中獲知現今全球環境正在劇烈變遷並且地質事件頻仍發生。就在2021年，日本小笠原群島硫磺島以南約50公里

的海底火山「福德岡之場」在當地時間 8月13日爆發，此後大量的浮石從10月中旬開始漂流到沖繩縣各地海岸並造成魚類的死亡 (閔文昱，2021)，之後更是在11月底陸續進入臺灣各海域，並逐漸影響我們沿岸的生態環境 (廖羿雯、柯金源，2021)。那麼，白堊紀時期的海洋停滯會不會再次發生在我們的星球呢？而如果發生，會讓生態環境有怎樣的變化呢？我們想透過實際研究設法了解，萬一現在的地球重回到白堊紀的海中時空會產生怎樣的變局？

由於浮石進入臺灣海域的階段也剛好是在我們進行北海岸與淡水河口實地環境調查以希望透過背景環境因子來解釋海藻停滯實驗的時期。我們親眼見證海岸受浮石影響的變化(如圖一)，並透過新聞了解到小笠原浮石漂流對於行經海域生物的重大影響，包括掩埋、遮蔽陽光、誤食、以及汙染物釋出等各類問題 (Phillippine Institute of Volcanology and Seismology, 2021)，這也和我們正在探討的白堊紀大滅絕事件有著重要的對應關係，因為當年白堊紀大滅絕時期也曾有過爆量的浮石出現在海洋。我們認為浮石事件對於海洋環境的影響情形與海流停滯都是白堊紀大滅絕造成生態環境混亂的重要成因，兩者之間應該存在某些交互關係。因此對浮石所可能對於海水化學的影響以及對於動植物生態方面的影響設計了模擬試驗，希望結合藻類的模擬試驗、浮石的模擬試驗以及野外海水的調查分析來交互討論，如果今日的海洋生物再次面對白堊紀大滅絕時期大量浮石與水流停滯的情形下，會造成怎樣的結果？以及對我們未來生態環境管理上有怎樣的啟示？

當海洋一旦發生局部或是全面停滯的狀況時，藻類是最先能感受到，並且它們的生長受限也將直接衝擊食物鏈更上階層的生物，甚至因為藻類光合作用以及其他代謝作用的變異進而影響包括水中溶氧或是其他元素循環的情形。我們首先所挑選的研究對象便是藻類。因為海藻正是當年白堊紀一系列變動的關鍵角色。海洋當中，藻類等光合生物提供世界上極大的氧氣生產來源，透過光合作用吸收儲存二氧化碳，並協助調節氣候。藻類作為海洋基礎生產力之一，也支撐海洋許多動物的營養所需，甚至有的藻類本身就作為人類的重要食物來源，有些藻類還被人類進行生質燃料研究 ("藻類生質燃料"，2021)。在日本飲食界甚為流行的海葡萄藻，臺灣北、東、南部也有同屬藻類近親的分布，並有人進行培育(李沛珊、何源興，2016)(施建宏、蘇惠美，2008)(張振乾，民106)。在本次研究中，我們選定臺灣潮間帶也有原生近親物種分布的葡萄藻、羽毛藻與線藻作為探究的素材。藉由本次的研究，我們將探索如果臺灣面對像是白堊紀那樣的海流停滯情形，藻類會如何改變其生活？並進一步探索藻類在海水停滯狀態下的生理變化，以及藻類生理變化對海水水質與海洋生態環境的衝擊。



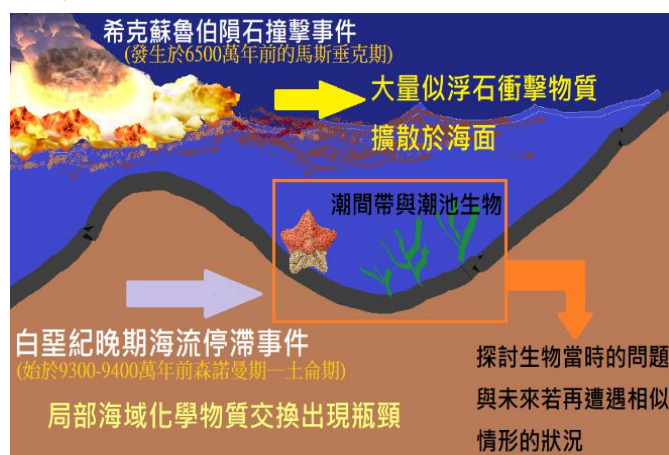
圖一：浮石事件前分布大量藻類的麟山鼻藻礁潮池，以及2021/12/18已遭大片浮石覆蓋的麟山鼻

## 二、研究目的

在本次研究中，我們的研究目的是透過一系列室內模擬試驗配合海岸環境的實際觀察與

水樣分析來探索海洋生物在持續遭遇較為極端的水流停滯環境與大量浮石衝擊會有怎樣的反應。試圖重新回到白堊紀的海中時空，也探索未來我們可能會遭遇到的環境變遷(如圖二)：

- (一) 線藻長期水流停滯模擬：模擬藻類面臨長期海水滯留時的生理變動。
- (二) 衰老藻類與年輕藻類混養試驗：模擬瀕死藻類與健康藻類混養後的綜合表現。
- (三) 浮石對海水黏滯性模擬試驗：探討浮石的添加所對於海水黏滯性與流動的影響。
- (四) 海星藻類綜合缸模擬試驗：探討浮石的侵入對於海洋生物的影響。
- (五) 淡水河口與北海岸環境實測與觀察：透過水質化學的實地分析探討浮石事件前後海洋環境的變動情形。



圖二：研究過程探討的白堊紀時空背景

## 貳、研究設備及器材

### 一、觀察紀錄

- (一) 筆記本、原子筆、鉛筆
- (二) 手機(攝影用)
- (三) 夾鏈袋(收集浮石使用)
- (四) 園丁小鏟(在灘地較深處刮取浮石)
- (五) 筆電、平板電腦(含 WORD 與 EXCEL 等軟體進行數據處理)

### 二、採水裝備

- (一) 德製 Vit-LabPP 定量量杯 1000ml 纏繞童軍繩(如圖四)
- (二) 2公升水瓶兩個(裝自來水用來清洗儀器和現場分析時的稀釋處理)
- (三) 長柄雨傘(可用於搭配量杯在海浪中取水)

### 三、化學分析儀器(其中項目(一)~(六)及(十六)可詳見圖三)與飼養裝置

#### (一) 酸鹼度(pH)

以 pH 筆測定 pH 值。pH 為水中氫離子濃度取負對數( $\text{pH} = -\text{Log}_{10} [\text{H}^+]$ )。在純化學的應用當中，常溫下， $\text{pH} = 7$  是中性，7 以下為酸性，7 以上則為鹼性，然而海水通常呈現弱鹼性，介於 8.1 至 8.3 之間。但是停滯不流動的港灣海域或發生有機物分解大量損耗溶氧，以及厭氧菌大量增生硫化氫等作用下，也能讓局部海水的 pH 下降到 7 以下。在淺海與潮間帶，藻類光合作用對於二氧化碳的消耗有時則可讓局部海水的 pH 值增高到超過 9.0 以上。pH 值變化也受海水深度、溫度與溶氧等變動的影響(羅建明、陳桂清，民92)(謝介士、葉瑾瑜、陳紫瑛，民99)。

#### (二) 總溶解固體含量(TDS)



TDS 是溶解在水中的總固體含量，理論上數值越高表示水中溶質越多，但僅能得知水溶液大致所含有的溶解固體總量 (ppm, mg/L) 變化，無法具體測知這些物質的組成。本研究所使用的 TDS 筆是透過電化學方式進行分析換算，對偵測水中電解質含量較為靈敏，但對於非電解質的有機物質則偵測性能較弱。不過 Anna F Rusydi 在2017年曾指出少數有機物仍可透過 TDS 進行偵測。TDS 也能反映海流中溶質的大致變動狀態。

#### (三) 氧化還原電位 (又稱氧化還原數值，ORP)

以 ORP 筆測定氧化還原數值 (ORP)，ORP 能反映水溶液當中氧化性有機物或營養源以及還原性物質 (如氨氮、亞硝酸、硫化氫) 的變動情形，海水養殖經常會把 ORP 設置在350mV~450mV 的範圍。ORP 有時正值愈高會伴隨 pH 值的降低，但海水中影響 ORP 的因子很複雜，因此水域環境當中除了某些極端條件，pH 和 ORP 之間不一定呈現明顯關係 (儀器相關知識網站，無日期) (養蝦實務與關鍵技術痞客邦部落格，2008)。

#### (四) 電導度 (EC)

以電導度計測量。EC 即溶液導電能力。受到溶液中電解質濃度、活性與離子價數等影響，也受溶液溫度所影響。EC 直接反映水體中鹽分及其他礦物質離子的總量變動。

#### (五) 水溫 (°C)

本研究中以 TDS 筆來測定水溫。水溫若有顯著高低則常反映天氣的變動，以及水體當中重要生化反應所牽涉的能量變動。

#### (六) 溶氧 (DO)

以溶氧測定儀測定。魚類基本存活的水中溶氧需求為 3mg/L 或4mg/L 以上。DO 變動情形常反映水質的變化以及藻類的健康情形。

#### (七) 電子秤3個

用來稱取海水素配置飼養環境以及浮石的相關實驗。

#### (八) 海水素

水族館所販售的 Coral 珊瑚海鹽，可適用於藻類、寄居蟹與海星的飼養。

#### (九) 水族缸

長17x 寬11.5x 高22公分的水缸用以進行藻類長期試驗；長24x 寬15x 高18公分之水缸用以進行海星與藻類混合缸模擬試驗。

#### (十) 塑膠漏斗

用來進行浮石黏滯滴漏實驗。

#### (十一) 玻璃滴管、玻棒 (配製人造海水攪拌使用)

#### (十二) 德製 Vit-LabPP 定量量杯 1000ml、250ml (配製人造海水攪拌使用)

#### (十三) 玻璃比重計

在配製人工海水時使用(搭配圖四的器具)，比重須達到上面所標記的綠色限度值。

#### (十四) 海藻照燈兩組

海藻需要波段上能模擬日光的高亮光源。

#### (十五) 不鏽鋼鍋 (運用於浮石黏滯滴漏實驗)

#### (十六) Quantofix 鐵試紙與硝酸態氮試紙各一組。

#### (十七) 魯米諾、氫氧化鈉、以及3%過氧化氫。1000ml 燒杯四個、300ml 燒杯一個、噴霧罐、



圖三：水質化學檢測設備

50ml 量筒、250ml 量筒、豬肝一份 (用以進行魯米諾測試)。

(十八)刮杓兩個、B5白紙 (作為秤量紙用)二十張、醋與小蘇打各一罐 (測試儀器用)

#### 四、藻類

我們在本次的研究當中所主要使用的藻類，包括以下三種：

##### (一)葡萄藻

葡萄藻，別名長莖葡萄蕨藻或海葡萄 (*Caulerpa lentillifera*)，原生於日本沖繩，是屬於綠藻植物門 (Chlorophyta)、羽藻綱 (Bryopsidophyceae)、羽藻目 (Bryopsidales)、蕨藻科 (Caulerpacae)、蕨藻屬 (*Caulerpa*) 的可食用海藻 (李沛珊、何源興，2016)(施建宏、蘇惠美，2008)(張振乾，民106)。根據陳映方等人2021年的報告指出作為臺灣本土小葉蕨藻近親的葡萄藻可以一定程度模擬小葉蕨藻的特性。

##### (二)線藻

線藻，別名粗硬毛藻 (*Chaetomorpha crassa*)，色澤淡綠至深綠色，散生絲狀或錯綜成線團狀，質地較硬且不分枝，通常浮於水面或纏繞於其他海藻。分佈於臺灣北海岸與屏東縣小琉球等海域 (黃淑芳，1988)(張振乾，民106)。

##### (三)羽毛藻

羽毛藻又被稱為針葉蕨藻 (*Caulerpa sertularioides gipes*)，羽毛藻藻體鮮綠色，具有假根部、匍匐莖及直立部的分化，匍匐蔓生。直立莖為單條或分歧，由兩邊長出對生的羽狀小枝。廣佈熱帶和亞熱帶海域包括琉球群島、臺灣、海南島、菲律賓、馬來西亞、印尼、紅海、斯里蘭卡等地。在臺灣主產於恆春半島和小琉球 (黃淑芳，2014)。



圖四：配製人工海水的配備(如左)；採樣器具(如右)。

#### 五、海洋動物

此研究採用兩間水族館所建議生活在受潮汐影響區域、較能忍受鹽度變化並且在環境中相當耐命的正海星 (*Protoreaster nodosus*)。根據沖繩美麗海水族館的網頁資料以及水族館老闆的敘述，正海星又稱為原瘤海星、朱古力海星與巧克力豆海星等，分佈於日本奄美、琉球群島、小笠原群島以南的印度洋及西太平洋區域。這類海星大多棲息於有大葉藻類植物的砂地，身體較厚實沉重，腕長可達20公分，背面可觀察到有如疙瘩般明顯的肉突。由於牠是東南亞一帶就有生長的海星，並且分布範圍達到小笠原群島附近，因此在野外的個體應該很有可能也直接受到小笠原浮石事件的影響，因此適合模擬觀察牠與浮石之間的交互關係。

## 參、研究過程與方法

### 一、線藻長期水流停滯模擬 (我們設計了一個類似潮池海流停滯條件的模擬環境)

(一) 自水族館帶回線藻備好。

(二) 將水缸放入清水至八分滿，接下來輕輕放入玻璃比重計，緩慢添加海水素至水族缸中。然後輕輕以玻棒攪拌溶解均勻。仔細注視比重計上的綠色限制標記線，持續添加海鹽或加入清水稀釋，直到水位線剛好貼齊比重計上的限制標記線。完成人造海水配製。

(三) 將線藻輕輕加入到水缸中。架設海藻照燈，維持每天照光十二小時、黑暗十二小時。此後每三周到一個月之間換水一次，並量測藻類長期水流停滯期間的水溫、pH、EC、TDS、ORP 和 DO 各化學數值，再比較分析與討論。自2021年五月設置，預計進行半年的時間。

### 二、衰老藻類與年輕藻類混養試驗

(一) 將原先在長期海水滯留試驗當中已經衰老垂死的線藻加以修剪，剪除掉不健康的片段，僅保留少部分仍具備活性的淺綠部位。將健康的線藻混合葡萄藻以體積比約3份:比上1份垂死的線藻進行飼養。

(二) 觀察混合藻類在光照與黑暗交替情形下的水質變化

1. 於配置第一天先進行連續三小時照光後、連續六小時照光後的水溫、pH、EC、TDS、ORP、DO 和含鐵量各化學數值的分析。在連續照光十二小時後，讓藻類重新置於黑暗下十二小時。此後維持光照十二小時、黑暗十二小時。

2. 測試看看兩周末換水的水化學變化情形。分析連續黑暗六小時後的各化學數值。之後連續光照十六小時後測試化學分析數值。

3. 測試看看一周未換水的水化學變化情形。分析連續光照後一小時、兩小時、八小時以及十二小時等時間段落的水化學數據。之後討論分析各數據的變動成因。

(三) 嘗試以魯米諾螢光測試法看看是否能夠在前述長期水流停滯模擬以及混合衰老健康藻類實驗之後的水溶液中找到配位鐵的存在。

1. 依據泰宇文化授課橘網站以及葉明蕙、楊水平所在2010年陳述的方法，以魯米諾 0.05g、氫氧化鈉1.5g、水110ml 以及3%過氧化氫1ml 製作混合試劑。

2. 以豬肝血先進行魯米諾試劑是否可以有效發光的檢視。

3. 將長期水流停滯模擬試驗以及混合衰老健康藻類實驗的水溶液吸取少量再滴入魯米諾試劑看看是否能夠產生螢光反應。

### 三、浮石對海水黏滯性模擬試驗

我們認為浮石顆粒所附著的生物性物質在腐敗分解後除了會影響海洋生態的溶氧、電導度等數值外，還有可能衍生菌膜和黏性物質，甚至浮石顆粒本身的推擠都可能對海水的黏度造成影響，而在局部的海岸環境(例如地形受限的潮池或是海岸岩石間隙、低灘地含水層間隙原先海水可流動的區域，這些往往也都是潮間帶生物賴以為生的棲息地空間)或是像日本還有河道也被浮石所侵入而改變原先河道水流的沖積物環境 (鄭郁萱，2021)可能造成對於生物非常不利的水流停滯情形，因此參照1927年湯瑪士·帕奈爾 (Thomas Parnell)所設計，並在2005年讓後繼研究者憑藉同一實驗研究而獲得搞笑諾貝爾獎 (Ig Nobel Prize)的『經典瀝青滴漏實驗(英語：Pitch drop experiment)』設計了浮石摻入海水所對海洋黏度造成改變情形的滴漏實驗。由於我們

在麟山鼻藻礁所採集的浮石最多，並且海洋長期停滯實驗主要也是在模擬類似麟山鼻這類的潮池環境當中藻類萬一遭遇停滯效應所可能帶來的後果，因此這項浮石黏滯性模擬試驗我們統一採用麟山鼻的浮石來進行實驗。

#### (一) 浮石對河流水域的黏滯性影響模擬

定量取浮石50克，然後加入500ml 水中混勻，再將其倒入漏斗中計數滴漏完畢的時間。之後直接以等量自來水500ml 進行相同步驟，並計算滴漏時間。由於水的黏度為 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，因此將浮石混合溶液滴漏時間除以清水滴漏時間的數值再乘以 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$  即可獲得浮石混合溶液的黏度。將浮石量改換為15克，然後加入500ml 的水中混勻，再次進行同樣的滴漏計時步驟；之後直接以等量自來水500ml 進行相同步驟，並計算滴漏時間；這時可以用相同方式計算得知新的黏度，並可得知當浮石數量減少時所對淡水黏滯性的影響情形。

#### (二) 計算海水的黏度以及浮石對海水黏滯性的影響模擬

取人工海水500ml 倒入乾淨漏斗當中計算其完全滴漏的時間。之後取自來水500ml 倒入乾淨漏斗當中計算其完全滴漏的時間。將海水滴漏時間除以自來水滴漏時間然後再乘以純水的黏度 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，即可獲得海水的黏度。這時再以浮石15克與海水500ml 混勻，然後倒入乾淨漏斗中，計算完全滴漏的時間，再以此時間除以自來水500ml 的滴漏時間，然後乘以純水的黏度 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，便可獲得浮石摻入海水後的黏度數值，之後再進行綜合比較和討論。

### 四、海星藻類綜合缸模擬試驗

(一) 首先模擬浮石如果長期滯留不動的海水所可能會對生物的影響。將1公升海水加入200g 浮石停滯兩週時間，然後測定 pH、DO、ORP、TDS、溫度、EC 和鐵質。

(二) 接下來是模擬正常保持更新的海水當中浮石侵入所對於海洋生物的影響。將正海星與羽毛藻、線藻一起飼養一段時間，之後再加入浮石，在整個過程中不定期分析水質，包含：DO、TDS、溫度、pH、硝酸態氮( $\text{NO}_3$ )以及亞硝酸態氮( $\text{NO}_2$ )等，並且持續注意觀察海星的行為變化以及藻類的生長情形(如圖五)。

### 五、淡水河口與北海岸環境實測與觀察

自2021年五月份至2022年二月份，不定期前往淡水河口(包含八里龍形、八里渡船頭、關渡中港河碼頭、淡水金色水岸碼頭)與北海岸的麟山鼻藻礁潮池、老梅綠石槽與金山中角灣等地(如圖六)進行實地的環境觀察與水質分析，並比較這段期間海水與環境的變化。再與模擬實驗的結果進行整合討論。



圖五、海星藻類飼養缸

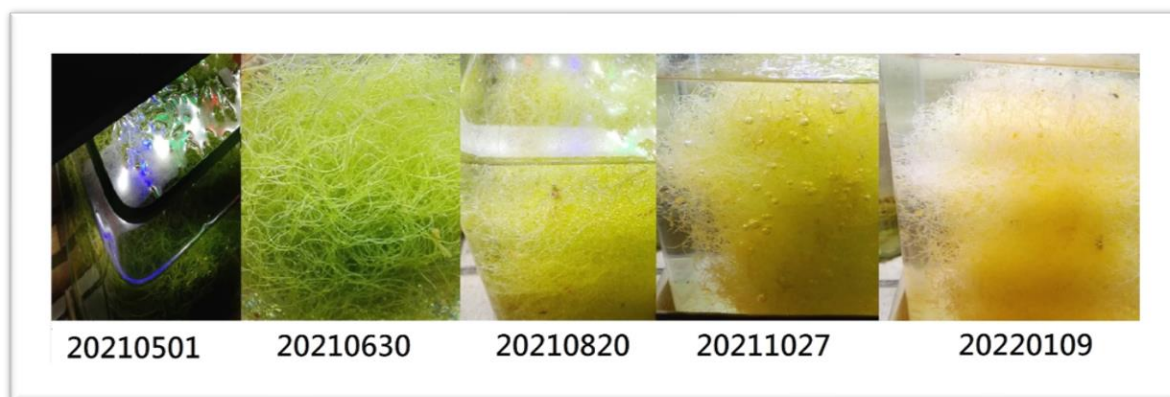


圖六、實地採樣與觀察據點



## 肆、研究結果

### 一、線藻長期水流停滯模擬



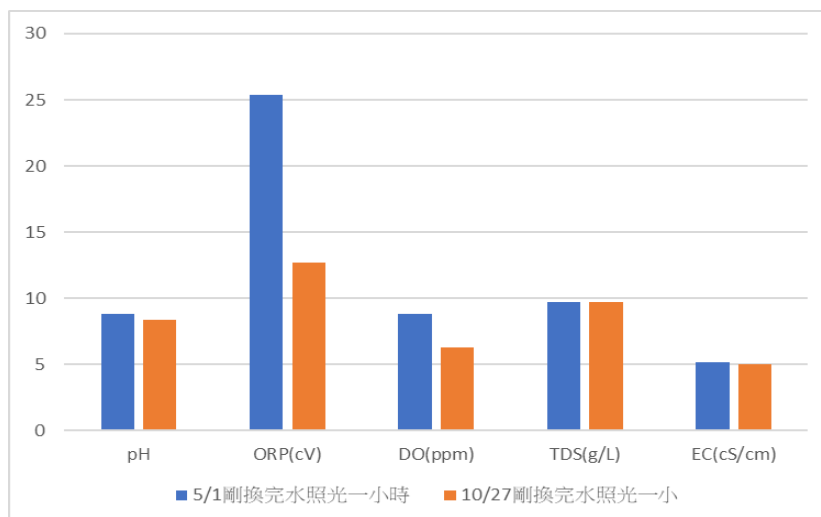
圖七、線藻長期水流停滯模擬試驗的變化情形

這一試驗模擬白堊紀時期海流長期停滯所造成的後果。從不同日期的線藻照片(如圖七)當中可以發現，當維持將近每個月才換水一次，線藻的健康狀況每況愈下，不僅大片組織黃化、白化，而且就連新生的組織也無法變綠，到最後線藻從原先只有1/3水缸的體積增生到幾乎占據整個水缸，但是所增生的幾乎都是不健康而光合作用低落的無效組織，並且逐漸邁向衰亡。八到十月份每次新換水時線藻還能夠讓它增生的組織產生許多小氣泡(氧氣)，但是到了十一月份即使剛換新水也已經沒有辦法再有小氣泡的產生。而水體觸感的變化則從最初在五到八月份每次換水時越來越多的黏稠分泌物逐漸變得越來越少分泌物，這顯示藻類外部的組織有大部分都已逐漸死亡。我們最後在一月初發現發現外圍白色的線藻甚至產生被黴菌侵入腐化的黑色霉斑，水面上也有霉斑的產生。因此停止了這項試驗(詳細分析紀錄(如表一))。

表一、線藻長期水流停滯模擬試驗水質抽測

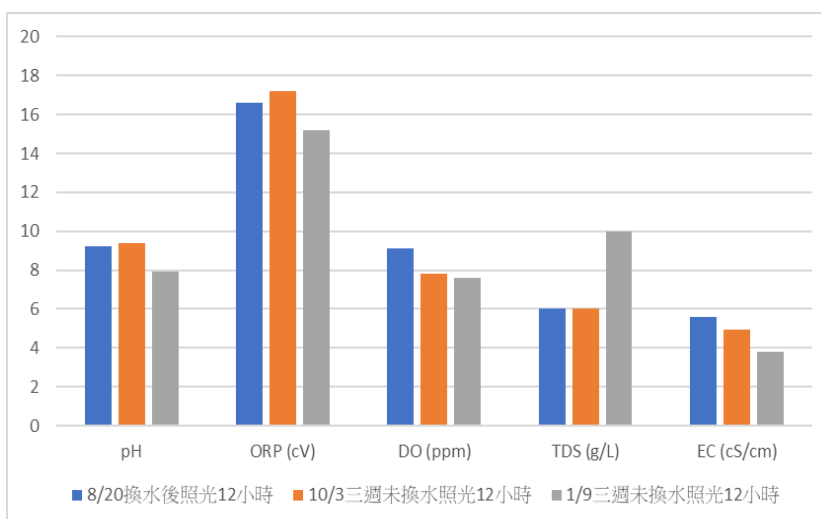
	20210501	20210707	20210820	20211003	20211027	20220109
測定時間	23:35	0:00	14:35	15:43	0:51	11:45
pH	8.8	9.0	9.2	9.4	8.4	7.9
ORP (mV)	254	152	166	172	127	152
DO (ppm)	8.8	2.4	9.1	7.8	6.3	7.6
TDS (ppm)	9680	6380	6030	6030	9680	9990
水溫 °C	25	25	26	23	25.5	20.9
EC ( $\mu$ S/cm)	51375	49000	56125	49200	50375	37720
備註	剛換完水，並照光一小時，水質清澈	一個月未換水，連續黑暗8小時。線藻白化日趨嚴重，水呈暗綠混濁。	剛換完水並照光12小時，水質清澈，水中很多氣泡，綠藻白化叢中有些已泛黃，但整體體積增加，有新長綠色部分。	三周末換水，連續照光12小時，青綠混濁。	剛換完水，並照光一小時，水質清澈。	三周末換水，連續照光12小時。水色仍澄清，但水面上出現黑色小黴菌，同時有水面有粘液狀物質和小蚊蚋屍體。

在七月份一個月未換水又連續黑暗的情形下，溶氧一度掉到 2.4ppm，可以知道藻類在連續未換水又無法行使光合作用情形下可以讓水體的溶氧掉到非常少的狀態。通常連續照光能夠讓藻類逐漸製造氧氣而增加溶氧，並且也會使得 pH 和氧化還原電位有所增加，但是我們可以發現到了十月份即使是換過水並且照光十二小時也難以和五月份剛剛開始進行實驗時健康的藻類行使光合作用一小時的 DO、pH 以及 ORP 相比。甚至到了一月份 (這項實驗已進行半年)，連續照光十二小時的 ORP 也僅能增加到和七月份連續黑暗的 ORP 差不多的數值



圖八、不同時期剛換完水照光一小時的水質比較

在圖八當中，同樣是剛換水照光一小時，五月份線藻仍相當深綠而健康時，ORP 和溶氧都能夠迅速飆高，同時 pH 也比較高。這顯示線藻剛開始進行實驗的光合作用以及對於還原性代謝物的清理是比較有效率的。隨著實驗的持續進行，線藻的光合作用能力和其代謝的能力也越來越衰弱。



圖九、不同日期連續照光12小時的比較圖

我們從不同日期的連續照光12小時的比較圖 (圖九)中可以看出，同樣是照光12小時，雖然 pH 與 ORP 有所波動，但是整體而言到了一月份，pH 逐漸朝向酸化的方向進行，ORP 與溶氧朝向下降的方向進行，這顯示藻類的光合作用已經不足以將水體中的二氧化

碳帶走，也有可能藻類本身代謝失調或者部分組織死亡進而出現了有機酸類產物甚至是腐敗分解性物質而使得溶氧被消耗、水體變得比較趨向還原性。值得注意的是當長期沒有換水的情形下，藻類環境所對於電導度 (EC) 的下降耗損加快，但是總溶解物質的數值卻提高了。我們推測這當中消耗的電導度是藻類所比較容易運用的海水養分 (像是鉀、鈣、鎂等離子)，而總溶解固體 (TDS) 的飆高則應該是藻類本身的代謝物或是死亡組織分解的物質。整體而言，可以得知線藻在這半年的長期水流停滯模擬試驗當中代謝能力是持續衰退的。

我們發現類似線藻這類多細胞藻類只是在一個月沒有換水便可能會逐漸因為自身的代謝廢物在水體累積，加上水中可用的養分越來越少，因此使得生物體逐漸老化壞死，而在白堊紀時期由於地質與氣候變動使得海流發生停滯的情形，發生的頻率很可能是經常性的，而維持停滯的時間可能更長，這對於線藻這樣的基礎生產者而言損害極大，當作為海洋中重要生產者的藻類也難以支撐時，自然會造成生態系統的重大崩潰情形。而由於人類兩百多年來化石燃料的持續燃燒正引致氣候暖化的加劇與海洋的脫氧，海灣和河口又因為排入的城市污水和化肥流失越來越多而造成優養化的情形。根據環境資訊中心 2018 年轉述《科學》期刊的研究，今日無氧的海洋死亡區面積已經是 1950 年代的四倍大，海岸附近極低氧區數量已經有十倍之多。而當海流自淨的速度比不上汙染的速度，補充溶氧的速度又不及由於優養化耗氧與海水暖化脫氧的速度時，這樣的情形其實也和白堊紀的海流停滯有相類似的影響情形，類似像線藻這類的大型藻類將因為水體無法更新而逐漸死去，而當各區域綠色生產者崩潰時，也就無可避免海洋整體性生物死亡甚至滅絕的浩劫產生。

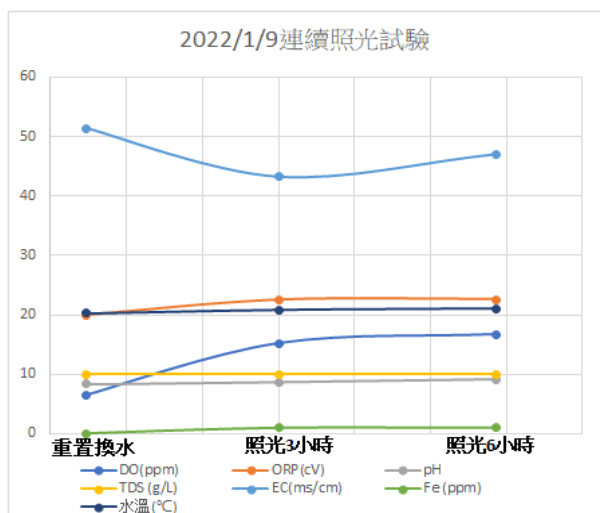
## 二、衰老藻類與年輕藻類混養試驗

在長期停滯試驗結束後，由於根據水族館老闆的建議，衰老的藻類如果與健康藻類加以混合是能夠有機會再生部分的機能。因此我們將原先在長期海水滯留試驗當中已經衰老瀕死的線藻加以修剪，剪除掉不健康發霉與白化徒長缺乏光合作用功能的大量片段而僅保留少部分仍有活性(仍保持淺綠)的段落。然後與健康的線藻以及葡萄藻以體積比約1:3的比例加以重新混合栽種於人造海水，並進行照光試驗。試驗結果如表二與圖十~圖十三所示。

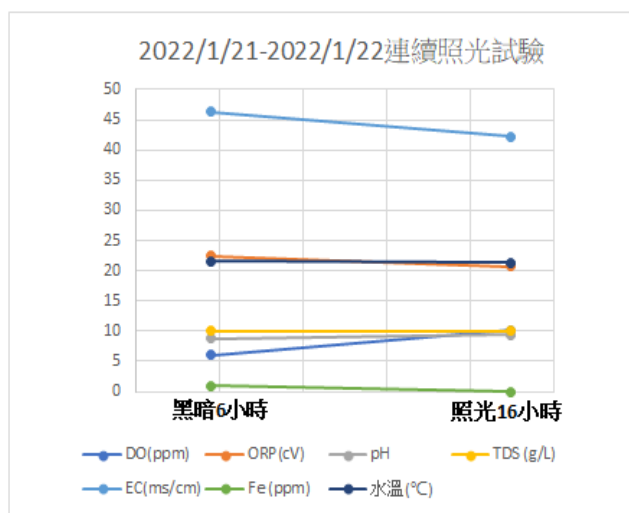
表二、新置線藻與葡萄藻搭配 1/4 老化瀕死線藻水質分析數據比較表

採樣時間	累計時間 照光(+) 黑暗(-) (小時)	DO (ppm)	ORP (mV)	pH	TDS (ppm)	EC ( $\mu$ S/cm)	Fe (ppm)	水溫(°C)	其他
20220109 14:58	0	6.5	200	8.4	9990	51375	0	20.3	重置換水
20220109 18:00	+3	15.2	225	8.7	9990	43222.5	1	20.8	持續吐泡 泡，有一隻 蝸飛入。
20220109 21:26	+6	16.7	226	9.1	9990	47000	1	21.0	冒泡量減少
20220121 23:29	-6	6.0	224	8.8	9990	46250	1	21.6	兩周末換 水，水綠

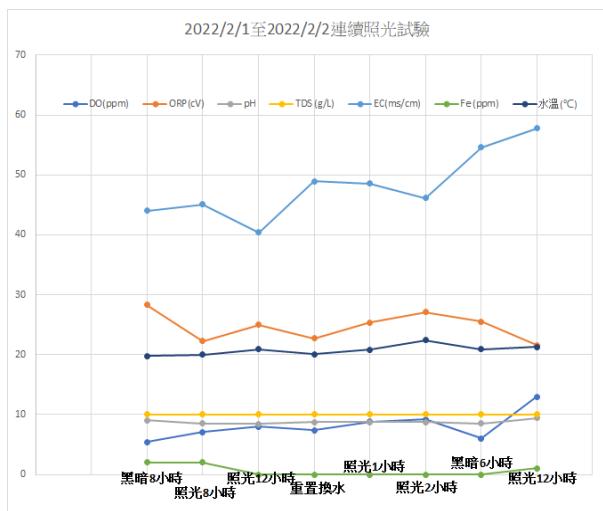
20220122	+16	10.1	207	9.4	9990	42250	0	21.3	
16:42									
20220201	-8	5.4	283	9.0	9990	44000	2	19.8	一週未換水，水綠
1:24									
20220201	+8	7.1	223	8.5	9990	45100	2	20	水綠；沒有泡泡
8:14									
20220201	+12	8.0	250	8.4	9990	40425	0	20.9	水綠，沒有泡泡
14:10									
20220201	0	7.4	227	8.7	9990	48950	0	20.1	重新配水照光
16:40									
20220201	+1	8.8	254	8.7	9990	48600	0	20.8	出現小泡泡
17:40									
20220201	+2	9.2	271	8.7	9990	46125	0	22.4	小泡泡量增多
18:47									
20220202	-6	6.0	255	8.5	9990	54600	0	20.9	有些小泡泡
0:45	+1								
20220202	+12	13.0	216	9.4	9990	57750	1	21.3	藻類持續吐出很多小泡泡
11:45									



圖十、連續照光實驗(2022/1/9)



圖十一、連續照光實驗(2022/1/21-2022/1/22)



圖十二、連續照光實驗(2022/2/1-2022/2/2)



圖十三、健康藻類(左)與衰老瀕死藻類(右)在混合照養下都一起吐泡泡，經由溶氧計檢測發現這些都是氧氣。



在實驗當中我們發現衰老的線藻確實有重新復甦的情形，衰老線藻的冒泡情形更為蓬勃了。根據陳映方等人在2020年的研究指出藻類飼養缸在行光合作用的過程當中會有溶氧分布不平均的情形，而我們在這次的混合飼養研究當中也確實發現同樣的情形，但是我們發現新舊混合的藻類缸當中，衰老藻類不僅重新恢復光合作用產氣冒泡，當我們將測溶氧電極接近衰老藻類時，發現它們的溶氧數值其實只比年輕健康的藻類群少了1~3ppm 左右或甚至沒有差異的情形。這顯示在環境劣化的情形之下，倘若線藻這類多細胞藻類在本身遭受重創之後，如果能重新被遷移到較為健康的環境下，其實是有機會維持存活並復甦特定光合作用功能的。

值得注意的是，當我們將時間軸線拉短時，發現混合藻類的光合作用其實是在照光前三小時的光合作用效能增加最快，而之後則遞減。以短期的時間間距(一天之間)而言，藻類開始行使光合作用的時候，溶氧會持續上升，pH 值也會隨之逐漸上升(可能因為消耗了二氧化碳)但不會很明顯，然而氧化還原電位(ORP)則會下降，我們估計當中可能有部分人造海水中的營養鹽被藻類所消耗掉，並且當中產生了一些我們所無法測得的代謝產物；加上水中的溶氧增加，而使得水中微生物跟著一起進行增生並且代謝產生了某些還原性的物質(例如氨或是鐵離子)。我們有發現鐵離子其實在實驗當中會有些微的變動，並會伴隨藻類的光合作用而產生，但是我們在原先所配製的海水中其實以手邊的鐵試紙是無法測到鐵的，因此鐵的來源應該是來自於藻類本身。而藻類除了在光合作用下會產生鐵的釋放以外，還會產生其他的小分子代謝物質，也因此雖然總溶解固體(TDS)沒有什麼波動，但是電導度卻會在光合作用進行期間產生小幅度上升。當光合作用持續進行而加強時，電導度又會降低其上升幅度甚至下降，這是因為藻類應該在後續的反應過程當中又將一些水中的溶解物質加以吸收再利用。水溫與溶氧之間的正向關係則應該是源自於人造強光燈光照的關係而使水溫有所增溫。

與長期停滯實驗不同的地方在於，海水長期停滯會造成水體中的總溶解固體(TDS)會逐漸上升，而電導度(EC)卻會下降，因為水體中可以被藻類所運用的可溶性物質會越來越少，即便經過這個半封閉的藻類缸生態系統當中的循環使用也入不敷出；但是隨著藻類有部分組織死亡而釋放的細胞殘體卻會逐漸累積，有些則被微生物所分解成 TDS 可以測量到的總溶解固體。而長期停滯實驗當中 ORP 也會因為還原性物質(腐敗物質)的持續增加而呈現下降的趨勢，而且由於藻類的生理代謝變差，因此無法再回收利用，最終也就無法將這些物質消耗掉，並造成水體的滯留而形成一整缸灰綠的死水。在混合實驗當中我們還發現藻類在重置換水之後會有明顯較高的光合作用效能，同樣是12小時的連續照光，經過重置換水的溶氧量明顯高於兩週未換水的情形。這也再次應證了水體更新所對於藻類健康甚至是生態系統健康的重要性，當環境如果被大量沖積物質所堰塞(如浮石或是人工埋沙)也會影響藻類的健康，這方面的模擬實驗過去也曾有前人研究過藻礁當中的殼狀珊瑚藻如果埋砂超過 3cm 並且五天以上便極有可能產生色素裂解的情況(盧佳秀，2018)。我們估計除了光合作用會受到沉積物的遮蓋影響，滯留的代謝廢物也會對藻類產生很不利的傷害。因此藻類在平時生活當中短期略帶有週期性的 DO、ORP、TDS、EC 等數值變動反而可以用來偵測藻類是否健康。



圖十四、以魯米諾試劑進行豬肝血測試與藻類海水溶液分析實驗



圖十五、豬肝血在魯米諾試劑下的清晰螢光，但是海藻水無法呈現這樣的顏色

另一方面，根據 Raven 在2013年的研究指出：鐵作為所有生物體的必需元素，參與了大量的主要氧化還原催化劑，在光合作用、呼吸作用、氧化氮和硫化合物的還原、固氮等方面都具有非常重要的作用；然而在光合生物生活的表層海洋當中，基本元素鐵的生物利用率相當低，在許多海域鐵還構成了生長的限制因子；因此包括矽藻與海帶在內許多藻類所屬的不等鞭毛類 (stramenopiles) 家族也都具備各自對鐵利用的生理機制，它們有時會在特定條件下降低自己對鐵的需求，或是加強對鐵的儲存。但是根據水族館老闆的說法，在藻類死亡時也會釋放出平時所儲存的鐵，這類鐵質有時也會對其他水產生物造成危害。由於以前從 Discovery 頻道的知識介紹當中知道鐵參與光合作用和呼吸作用，常常是透過配位化合物的方式去進行，其中最常見的案例便是參與動物呼吸作用的血紅素。因此我們有想過是否藻類死亡所釋放的鐵質也可以透過法醫學上經常使用的魯米諾試劑來做檢測到配位鐵的存在。我們首先在市面上購得豬肝血，以魯米諾試劑進行豬肝血的測試實驗有獲得成功，可以輕易透過螢光反應測得血跡中的鐵 (如圖十四、圖十五)。但是運用魯米諾試劑進行藻類的鐵質測試時卻是失敗的，無論是運用在長期水流停滯模擬試驗後的瀕死海藻水或是運用在混合飼養實驗的海藻水都無法以魯米諾來測出配位鐵(無法顯示螢光)。但是我們在瀕死海藻水以鐵試紙卻可以測到1ppm 的鐵，之後在混合衰老藻類與健康藻類的試驗中也常能測到鐵，因此我們推測實際上藻類在行光合作用時可能或多或少都有鐵的釋放，而當藻類死亡時所釋放出的鐵，可能它的化學組成有較多不是屬於鐵試紙能測出的鐵離子，也不是能讓魯米諾測出的鐵，而可能是其他類型的鐵化合物。也有可能藻類組織死亡的過程中有其他的微生物迅速將藻類釋放的鐵加以吸收運用，比方說我們在水流停滯實驗最後所觀察到的黴菌生長，因而讓我們無法即時偵測到鐵的存在。

鐵試紙所能夠測出的鐵離子是生物相對比較容易使用的鐵，因為根據儀器行的工程師表示鐵試紙能夠拿去測定食物當中的含鐵量；這相較於魯米諾才能測出的配位鐵而言，無疑是生物較能運用的鐵元素類型，而我們證實了在藻類還存活的過程當中就會伴隨鐵的釋放，而且不是只有在死亡時才釋放鐵。但有關鐵的釋放率到底是有什麼更細部的原因去影響它則可能仍需後續的進一步研究。

### 三、浮石對海水黏滯性模擬試驗

#### (一) 浮石對河流域的黏滯性影響模擬 (如圖十六)



圖十六、清水混入浮石的滴漏實驗

自然界當中，清水的黏度為 $1\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，血液（ $37^{\circ}\text{C}$ ）為 $4\sim 15\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，橄欖油為 $102\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，蜂蜜則為 $104\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。而受到浮石摻入的水域會在黏度上發生怎樣的變化？我們發現當水和浮石重量比約為 $500\text{ml}:50\text{g}$ （清水比重約為 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ） $\approx 10\text{g}:1\text{g}$  的情形時，則滴漏時間從原先的 $9\text{又}36/100$ 秒增加為一分鐘又 $66/100$ 秒，也就是從 $9.36$ 秒增加至 $60.66$ 秒，約增加 $6.48$ 倍。這代表淡水水域只要浮石數量夠多而達到水體的 $1/10$ 時，則當局部河流環境發生類似擠在漏斗口的瓶頸效應時，浮石群體的擠壓加上浮石顆粒本身所附著的複雜物質將使水的黏度增加為 $6.48\text{mPa}\cdot\text{s}$  的情形，這樣的黏度約為血液的黏度。而當清水和浮石重量比減少到約為 $500\text{ml}:15\text{g}$ （清水比重約為 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ） $\approx 500\text{g}:15\text{g}=33.33$ 倍（也就是水體中約只有 $3\%$ 的浮石侵入情形時），則滴漏時間將從 $7.65$ 秒增加到 $38.60$ 秒，即便水體中只有 $3\%$ 的浮石也會使得黏度增加到約 $5.05\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，約相近於血液的黏度。這顯示當浮石群侵入淡水水域時有機會造成河岸環境部分區域的水流停滯情形，這樣除了有可能影響魚蝦的活動，對於固著性的藻類或是某些移動能力較差且生活範圍受限但卻需要水流更新的底棲生物可能有更大的衝擊。



圖十七、秤取膠黏成塊狀的浮石顆粒沉積物



圖十八、自來水、海水與海水混入浮石的滴漏實驗

針對海水的黏滯性試驗（圖十七、圖十八），首先我們透過人工海水與自來水（清水）同樣在 $500\text{ml}$  滴漏實驗的時間比換算得知海水的黏度為 $14.38:11.26=1.28\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，浮石如果是



在比淡水要黏稠的海水當中侵入的話，則以海水比上浮石500ml:15g (海水密度一般在1.02~1.07 g/cm<sup>3</sup>之間，我們取1.05 g/cm<sup>3</sup>)  $\approx 500 \text{ cm}^3 \times 1.05 \text{ g/cm}^3 : 15\text{g} = 525:15 = 35$  倍的重量比例，也就是大約每一公斤海水約夾帶28.6克重的浮石，則滴漏時間變成2分鐘47.04秒，也就227.04秒，相比於清水的11.26秒，約為20.16倍，因此海水摻入重量比千分之28.6的浮石，就可能造成20.16mPa·s，這已經比血液最黏稠狀態的15mPa·s 還要高。因此當黏滯效應發生時，這對於原生地海洋生物所造成的衝擊也會是相當大的，可能會阻滯藻礁潮池的海水流動進而造成藻類無法獲得更新的海水，甚至於阻滯魚類的鰓部呼吸等等。

事實上在我們操作浮石實驗時，部分小顆粒的浮石本身就相當容易附著在手上，很容易沾附得到處都是，因此我們可以知道當比較大型的海洋動物(像是海龜)遭遇到這些浮石時應該很難避開，除了黏附全身以外，也容易導致誤食。2021年十二月浮石入侵最嚴重的時期，墾丁國家公園裡的風吹砂景觀區，在岸上和潮間帶都遭到火山浮石大面積入侵；其中潮間帶被浮石覆蓋較嚴重區域深達幾十公分，過往隨處可見的角眼沙蟹、白紋方蟹、瘤突斜紋蟹等也都消失了(廖羿雯、柯金源，2021)。我們相信在白堊紀大滅絕時期由於火山作用以及隕石衝撞作用所造成更大量行星災難等級的類浮石顆粒物質必定也對當時的生態環境造成數倍以上的衝擊。而在未來太平洋火環帶的地質活動可能越來越頻繁(李佳恆，2016)，類似日本小笠原的火山浮石漂流事件很可能還會再次發生在我們的海洋；依據我們的研究數據，呼籲相關單位也必須持續針對這樣的天然災害做好監測和應對。

雖然根據澳洲昆士蘭科技大學地質學家布萊恩(Scott Bryan)的研究認為浮石其實是數十億隻海洋生物暫時的庇護所，包括藤壺、珊瑚、螃蟹、蝸牛、蠕蟲等海洋生物，都可以搭上這類岩石的順風車，而航向澳洲海域，成為恢復大堡礁的潛在機制(吳洛瑩，2019)。我們的確也在北海岸的浮石曾發現大量的生物附著其上。然而，浮石在白堊紀大滅絕時期應該也曾擔負這樣的雙面刃角色：一方面作為阻滯海水與破壞傷害生態環境的殺手，但另一方面卻又作為某些小生物或是生物幼體的交通載具，並提供牠們短期附著的生活空間，協助牠們找到新的棲息地重塑新的生態系統。

#### 四、海星藻類綜合缸模擬試驗

##### (一) 模擬浮石在長期滯留不動的海水所可能對生物的影響。

我們在實際上的環境調查當中發現野外的浮石是會滯留在潮間帶的，而且有些潮池和岩石間隙還會長期有浮石的滯留，有些浮石則可能被海風所移動，已位移到漲潮海水所無法帶離的較高灘地。這些浮石如果位在排水不好的潮池會有怎樣的影響？我們製作了一個浮石停滯狀態小實驗(如圖十九)，發現浮石在人工海水中停滯兩週會逐漸產生硫化氫(臭雞蛋的味道)，而且會讓氧化還原數值降到極端還原的負值(如表三)，這也是厭氧菌活動的範圍，也就是極度缺氧與各類對生物具有一定毒性的還原性物質(包括硫化物、氨、屍胺等)產生的條件，由於我們所採集的浮石上面有發現不少小生物，包括小型的鵝頸藤壺、紡錘狀藤壺等，因此在靜置期間應該也有一些小生物死亡而腐敗，同時浮石表面和孔隙也應該有吸附大量的微生物，這些都是之後形成腐敗物質的來源，也因此我們發現到浮石的有機質分解製造了低溶氧、低氧化還原以及較高的溶解物質體現在TDS和EC方面；甚至於還有鐵質的釋放(如表三)。



表三、藻礁浮石停滯狀態模擬試驗

分析項目	人工海水	1 公升海水加入 200g 浮石 停滯兩週時間
DO(ppm)	8.0	0.3
ORP(mV)	225	-233
pH	8.1	7.2
TDS(ppm)	8500	9800
EC ( $\mu$ s/cm)	25000	35020
Fe (ppm)	0	3
溫度 $^{\circ}$ C	20.1	20.2



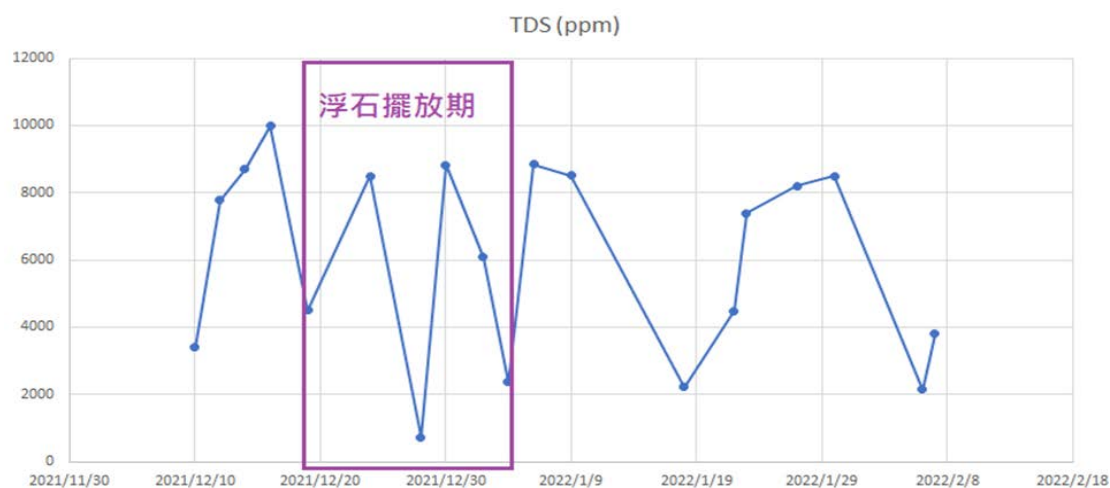
圖十九、分析停滯浮石溶液

## (二) 模擬浮石侵入正常保持更新的海水所對於海洋生物的影響

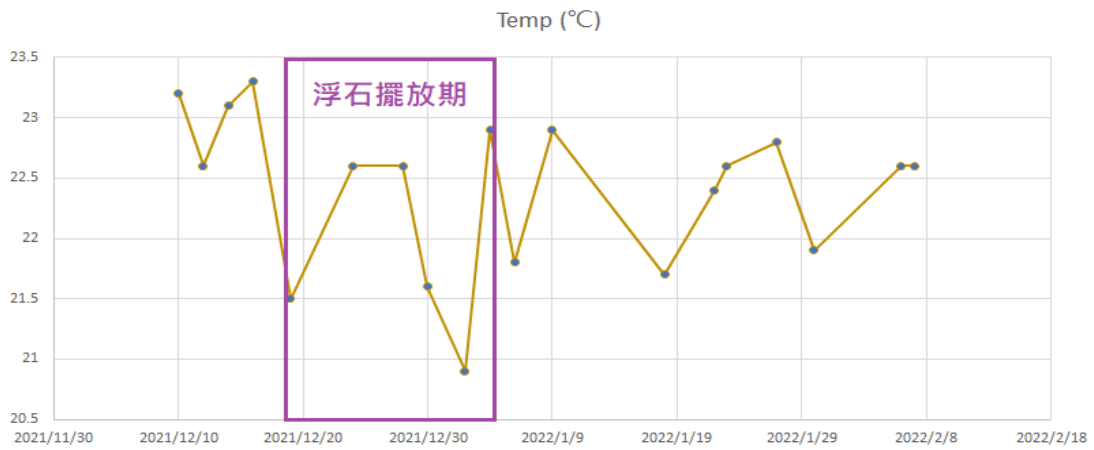
在海星與線藻、羽毛藻混合飼養的試驗 (詳見表四、圖二十~圖二十四)當中，我們發現浮石的加入並沒有讓各類水質化學的數值有非常顯著的差異變動，但是浮石的加入有讓溶氧略有下降的趨勢，在 pH 的變化數值範圍也略為向下轉移，硝酸態氮的變化數值範圍則略有升高。雖然原則上並未有劇烈的起伏。其中硝酸態氮還遠低於海星最初來到綜合海藻缸的時候，pH 最低的兩次也和海星最初來到海藻缸的時候差不多。我們的海星在浮石放置期間還會掠食上面的小藤壺。然而就在浮石拿走的十九天後，海星出現重大的變化，牠發生了多次的自殘，主動將自己身上的肉突加以扯斷。由於近幾年全球海星有爆發海星衰弱症候群(Sea star wasting disease; SSWD)，感染這項疾病的海星，牠們身上主管呼吸的皮鰓缺氧而造成海星無法呼吸而自行撕扯身上的部位，最後甚至裂解死亡。海星衰弱症候群與海洋中的有機物有關，包括來自微藻 (microscopic algae) 的滲出物、浮游動物的排泄物以及腐爛動物屍體的滲出物等等。有的文獻認為這些可能會激發嗜營養細菌 (copiotrophs) 這類微生物的大量增生，它們會大量增生並迅速消耗有機物質。而這些食腐的細菌在漂移附著在海星表面附近時也會在分解代謝有機物的過程中消耗海星表面的氧氣 (Aquino, Besemer, DeRito, Kocian, Porter, Raimondi, Rede, Schiebelhut, Sparks, Wares, & Hewson, 2021)。由於我們先前有針對浮石進行簡易的停滯模擬實驗，雖然當浮石擺在綜合海藻缸當中並沒有造成像是擺在量杯當中的厭氧發酵以及造成酸性物質的產生等極端的情形，然而很可能有些微生物已經附著在海星身上，並造成海星的不適，因此即便我們更換了乾淨的水源，同時水體的溶氧等數值也沒有顯著的變動，但海星仍然繼續將自己的身體部位去做扯斷的情形，且至 2月20日海星身體已有多處潰爛，在添加抗生素 Ofloxacin 之後仍舊無法救回，最終在 2月23日解體死亡。因此，這也顯示我們應該要注意浮石所可能吸附與夾帶的各類微生物和化學物質，相關的研究者也應該持續長期監測浮石對於我們生態環境的影響。回顧白堊紀大滅絕時期，當大量類似浮石的物質在海洋中擴散與漂移，應該也同時夾帶了不少生物和各類物質而造成空前的海洋環境混亂。(海星在模擬試驗期間從健康體態轉變為對自身肉突的折斷與自殘，可參閱圖二十五~圖二十八)。

表四、海星與海藻缸混入浮石飼養實驗

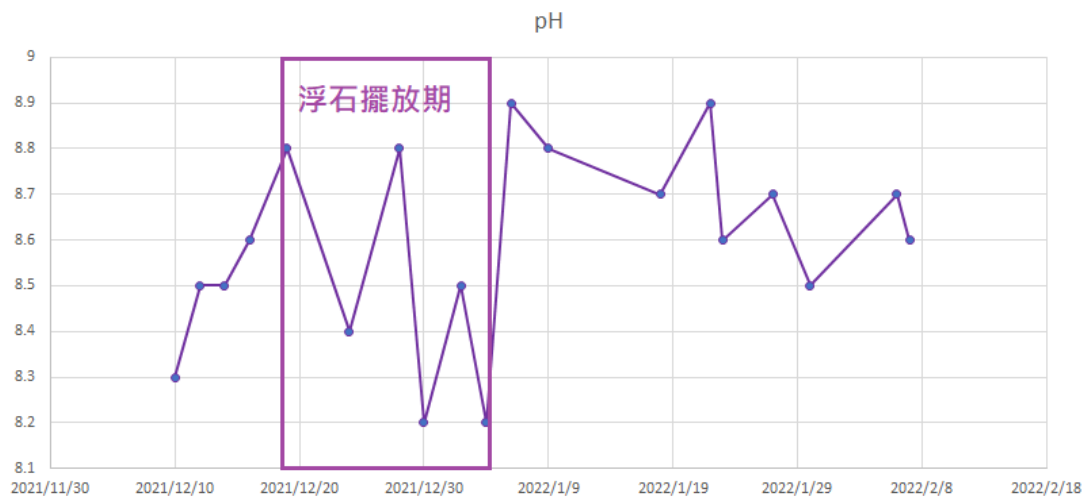
日期	TDS (ppm)	Temp (°C)	pH	NO <sub>3</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	DO (ppm)	海星活動	其他
12/10(五)	3390	23.2	8.3	250	1		翻身	
12/12(日)	7780	22.6	8.5	17	0		手微彎	換水
12/14(二)	8700	23.1	8.5	10	0		吸在牆上	
12/16(四)	9990	23.3	8.6	25	1			
12/19(日)	4500	21.5	8.8	0	0			放浮石、換水
12/24(五)	8490	22.6	8.4	4	0		吸盤動	
12/28(二)	737	22.6	8.8	5	1	26	吃了 2 個藤壺	
12/30(四)	8830	21.6	8.2	10	1			
1/2(日)	6080	20.9	8.5	7	0	14.8	沒動	加入大量浮石
1/4(二)	2370	22.9	8.2	6	0			把浮石拿走
1/6(四)	8840	21.8	8.9	9	1	27.9	往上爬	
1/9(日)	8510	22.9	8.8	0	1	38.2		換水
1/18(二)	2220	21.7	8.7	7	0			
1/22(六)	4480	22.4	8.9	0	0	36.6	吸盤動	
1/23(日)	7400	22.6	8.6	0	1	28.9	自殘弄斷背上兩個突出物	換水
1/27(四)	8210	22.8	8.7	0	0		又弄斷了一個突出物	
1/30(日)	8500	21.9	8.5	0	0			換水
2/6(日)	2140	22.6	8.7	0	0	31.7		
2/7(一)	3800	22.6	8.6	0	0	44.3	斷了一個突出物	換水



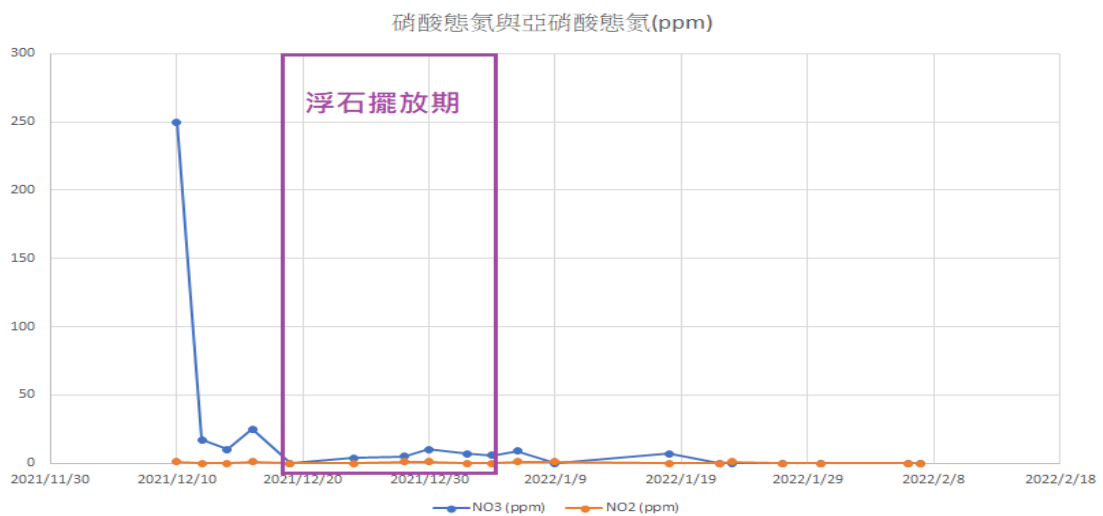
圖二十、海星飼養期間的 TDS 數值



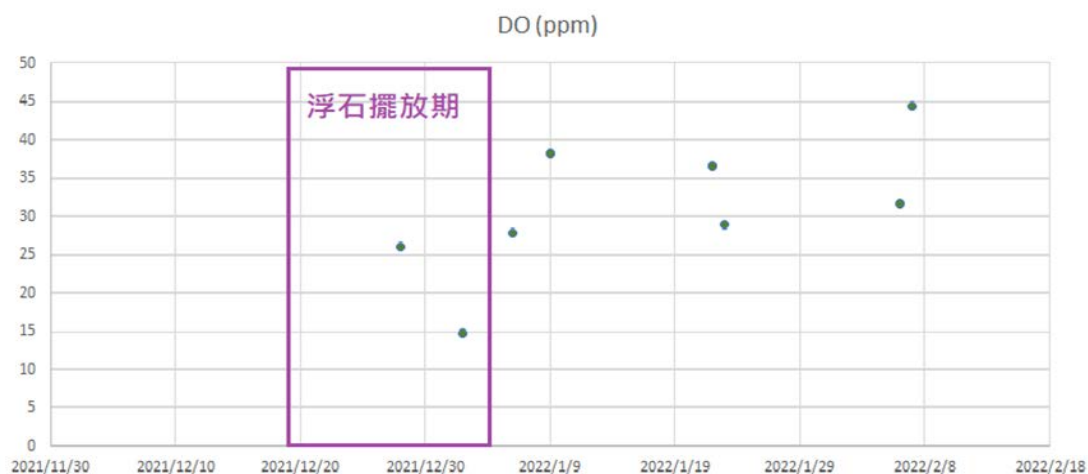
圖二十一、海星飼養期間的溫度變化數值



圖二十二、海星飼養期間的 pH 數值變化



圖二十三、海星飼養期間的硝酸態氮與亞硝酸態氮的數值變化



圖二十四：海星飼養期間溶氧的數值變化



圖二十五、健康而肉突完整的正海星與線藻、羽毛藻的混合缸。



圖二十六、正海星在掠食大塊浮石上的藤壺，此時正海星正處於健康活躍的情形。



圖二十七、正海星的觸手彎曲以及扯斷的肉突



圖二十八、已經扯斷四根肉突的正海星

### 五、淡水河口與北海岸環境實測與觀察

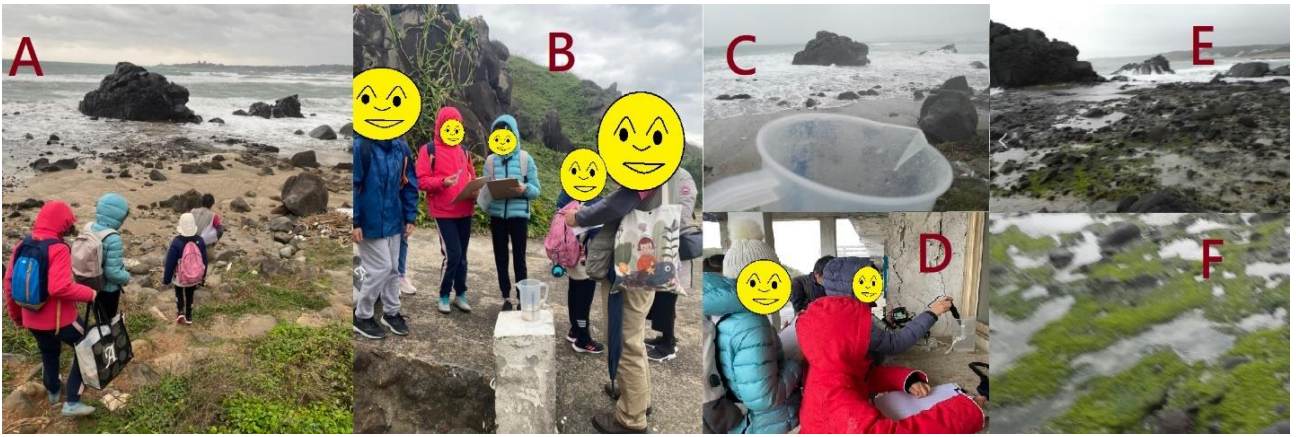
麟山鼻藻礁潮池在我們的調查當中是一個充滿海藻分布，而且生物相也非常豐富的地方，當中有野生的貝類、蝦蟹與海星可被找到，同時溶氧也極高，2021年5月份可以達到12.6ppm，比鄰近海域的老梅還要高（詳見表五、圖二十九）。10月份的調查行動當中，我



們的溶氧計損壞，而從附近保麗龍垃圾與低度的氧化還原電位來看，可以知道這個海域可能受垃圾的汙染而使氧化還原電位極低，但還是可以找到一些小動物，藻類也未受影響。然而，自從 12 月份新聞中陸續傳出北海岸各地遭受浮石衝擊事件之後，我們在 12 月 18 日在麟山鼻再也無法找到原來的那些動物，潮池的藻類有一段時間也幾乎消失和掩沒在浮石堆當中。我們發現自從浮石事件之後，此區的 TDS 和 EC 都有顯著的增高，而 pH 和 ORP 都再也無法回升到 2021 年 5 月份的情形，這當中可能受到浮石事件的影響，一如我們所在模擬試驗所發現，浮石很可能提供夾帶較多的溶解物質進入到這個海域，並且由於浮石所攜帶的有機物或生物殘體的分解，也讓這裡的 ORP 因而下降，甚至也帶來了硝酸態氮和亞硝酸態氮的數值提升；加上原先的藻類因為掩沒在浮石沉積物當中而無法行使充分光合作用，這也使得這裡的溶氧無法恢復原先的水平。值得注意的是，到了 2022 年的二月份，浮石的影響逐漸消褪，原先正常的海沙沉積物逐漸取代浮石，藻類也有重新生長的趨勢，而 DO 和 ORP 也都有相對應的提升，相信這裡未來應該仍有機會重新透過自然界的再生力量而回復原貌。

表五、麟山鼻藻礁潮池樣點分析數據比較表

日期	20210529	20211009	20211218	20220130	20220207
潮汐與 水位概況	中水位	退潮	漲潮	漲潮，潮水淹 沒所有潮池	漲潮稍退
天候狀況	多雲	多雲	陰冷，風浪很大	風雨浪極大	陰偶雨，風 浪漸增
採樣時間	11:20	17:50	9:18	9:00	16:35
水溫(°C)	22	25	17.5	17.5	18.1
TDS (ppm)	6170	6030	8080	9990	9990
EC ( $\mu$ s/cm)	19920	43960.67	43786.67	64000	69874.82
pH	9.0	8.7	7.9	8.0	8.0
DO (ppm)	12.6	儀器維修	7.1	8.4	9.0
ORP (mV)	325	47	151	221	270
NO <sub>2</sub> (ppm)			<10ppm	0	0
NO <sub>3</sub> (ppm)			<1ppm	0	0
Fe (ppm)			1	0	2
水色目測	透明	灰	藍灰色海水，水 樣上都是浮石	灰，含少量浮 石	清澈透明
環境紀錄	生物豐富，有 海星、螃蟹和 許多小型貝類	附近垃圾很 多，還多出一 批保麗龍碎 屑，但還是有 部分小螃蟹與 貝類	潮池與藻礁環境 全被大量浮石所 掩埋，海水中攜 帶大量浮石。原 有的生物已經找 不到，但是浮石 中夾帶大量小型 鵝頸藤壺與藤壺	潮池被海水淹 沒，灘地的浮 石群已經看不 到藤壺了。	潮池的綠藻 已經有大片 重新生長， 並且有新的 海沙覆蓋， 浮石覆蓋區 域局限於高 灘地。



圖二十九、(A)2021年12月18日麟山鼻灘地上佈滿的浮石掩蓋了幾乎所有的藻礁潮池。(B)麟山鼻水樣分析。(C)、(D)一月份面對大雨和風浪甚大的情形只能躲入廢棄房屋屋簷下做分析。(E)、(F)二月份麟山鼻潮池逐漸恢復的藻類生長情形。

我們將老梅的野外分析紀錄如表六、圖三十與圖三十一。根據老梅綠石槽當地居民的說法，綠石槽的海藻即使在寒冷的冬季也還會有一點點保留，雖然不能和春季旺盛的翠綠相比。在我們2021年12月18日的調查當中發現老梅石槽幾乎完全被浮石所掩沒，潮間帶上看不太到藻類，而更令人怵目驚心的是海面上大量的泡沫(詳見圖三十)，雖然老梅過去也有過泡泡海的發生，但據當地遊客表示從未看過如此龐大的泡泡海景象。根據東森新聞雲2012年9月27日的報導，過去蘇格蘭也曾發生過因為沿岸藻類大量死亡腐爛後流入大海，再與海鹽、海水和空氣混合成高濃度物質，再遇到大風浪，而形成類似「洗衣機洗衣服」的攪拌拍打作用，進而形成整個沿岸甚至逐以入侵城鎮的大量泡泡。根據溫玉琪、譚逸凡在2008年所指出：泡泡的產生，是因為液體的表面張力，當液體中如果含有高分子量物質則有利於製造黏度條件而形成大泡泡；一些帶有黏性的液體(如甘油)的黏度會影響泡泡的存留時間。我們在老梅現場收集的浮石表面發現大量的鵝頸藤壺類的小生物，有些浮石摸起來黏黏的。而在室內模擬實驗中也確認浮石因為本身就攜帶大量有機質，在特定情形(如擁擠的孔隙環境和瓶頸效應)，會使海水黏度上升，也會帶來腐敗物質。加上老梅現地原先生長藻類的石槽與潮池都被浮石所掩蓋，因此我們推斷也有不少藻類因而死亡腐敗成為黏性的來源。在我們十二月的調查當中，也發現老梅和麟山鼻附近至少有三隻以上的黑鳶一直不斷在盤旋，由於當天氣溫冷而風浪大，且風速既強又紊亂，並不適於猛禽的盤旋。我們推測黑鳶出現可能源自於海岸有牠們的食物，因為在國際新聞當中，浮石事件確實常造成海洋動物群體死亡。而黑鳶實際上也常會撿拾死魚或其他死動物來吃。

老梅在 TDS 的反應上與麟山鼻類似，在浮石事件之後，TDS 便一直居高不下，而 ORP 則呈現較為下降的趨勢。但是老梅直到2022年2月7日，附近環境仍然沒有顯著的復原跡象，因此這很可能是溶氧無法重新提升的原因。由於老梅的水域比起麟山鼻藻礁潮池要來得開闊，因此也比麟山鼻藻礁潮池有時在退潮時期會形成半封閉狀態要更容易受到外界海水的影響。我們預估除非外界海水不再攜帶大量浮石進入此區，才有辦法讓老梅全然恢復舊觀。

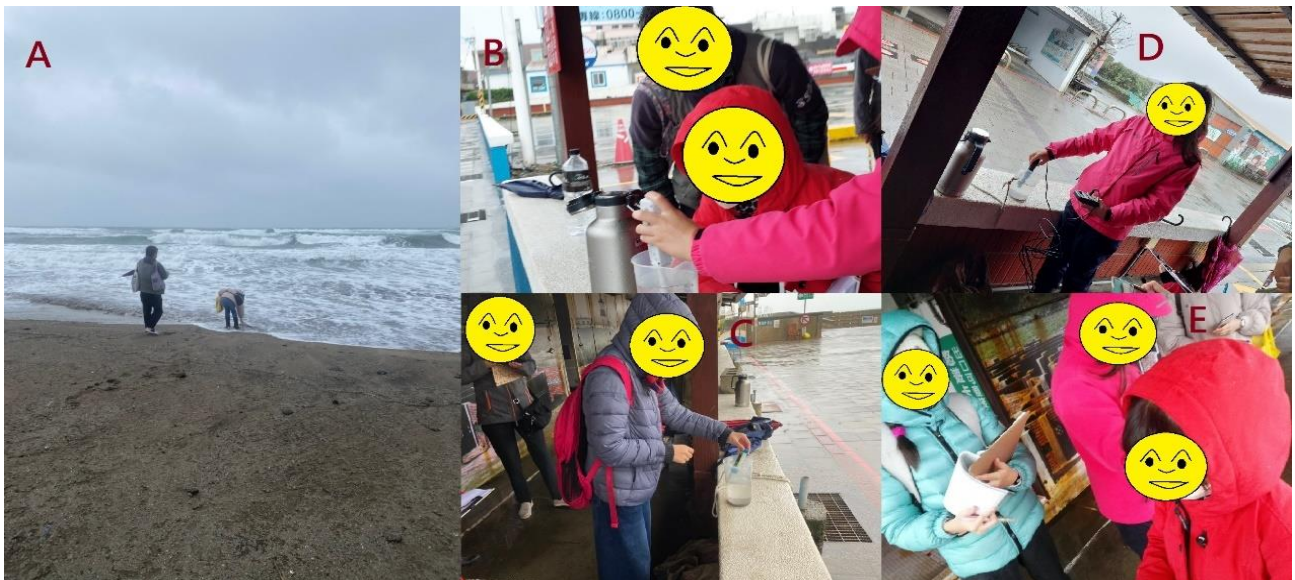
表六、老梅綠石槽樣點分析數據比較表

日期	20210529	20211218	20220130	20220207
潮汐與 水位概況	中水位	漲潮	漲潮，潮水淹沒 所有潮池	漲潮
天候狀況	多雲	陰冷，大浪大風	風雨浪極大	陰偶雨；起風雨 勢開始加大。
採樣時間	11:38	10:46	9:55	16:10
水溫(°C)	23	17.4	16.0	21.4
TDS (ppm)	6830	9500	9990	9990
EC ( $\mu$ s/cm)	42030	故障	20000	77343.75
pH	8.2	7.9	8.0	8.1
DO (ppm)	8.0	8.6	8.3	8.6
ORP (mV)	332	165	250	270
NO <sub>2</sub> (ppm)		0	0	0
NO <sub>3</sub> (ppm)		0	0	0
Fe (ppm)		0	0	1
水色目測	藍灰	灰藍色海水	灰	灰，採樣水面仍 有一些浮石
環境紀錄		海面上泡泡極多， 整個海岸的泡沫彷彿 洗澡間，甚至會被風 吹到房屋屋頂以及人 的身上。天空中出現 黑鳶。浮石上有很多 鵝頸藤壺和其他類型 小藤壺附著。	沙灘上充滿浮石	漲潮海水直接連通 潮池，石槽潮池水 仍布滿浮石。沙灘 浮石分布沒有太大 變化。但綠石槽有 少部分藻類有重新 長出來。



圖三十、(A)、(B)老梅綠石槽在2021年12月18日漫佈整片海岸的泡沫。(C)、(D)老梅海灘浮石上的許多鵝頸藤壺。(E)海邊採集浮石。(F)十二月份採樣天空中經常伴隨我們的黑鳶。





圖三十一、(A)2022年1月30日在風雨大浪中的採樣。(B)大雨中躲入攤商雨棚分析 EC。(C)大雨中躲入攤商雨棚中分析 ORP。(D)大雨中躲入攤商雨棚分析溶氧。(E)計算整理數據。

我們在金山中角灣的野外分析中(如表七、圖三十二)，浮石量最大的 2021 年 12 月 12 日測定到最低的溶氧數值，此後的 TDS 和 EC 也有攀升的跡象。我們認為金山中角灣海域的海洋化學變動情形應該也受到類似麟山鼻和老梅的浮石事件的干擾因素。但是所不同的是，金山中角灣據當地衝浪者的敘述，一直是海沙位移和沙灘地形變化較大的區域，在這裡海流也比較複雜，因此我們在海水化學的數值上也看到了它確實具有較不同於麟山鼻和老梅的不穩定變動。

表七、金山中角灣樣點分析數據比較表

日期	20211212	20211218	20220130	20220207
潮汐與 水位概況	漲潮	漲潮	漲潮，高灘地以 下全部淹沒	漲潮
天候狀況	雨，風浪大	陰，風浪大	小雨風浪大	陰
採樣時間	16:30	11:37	10:40	15:23
水溫(°C)	19	17.9	15.6	21.3
TDS (ppm)	5900	8130	9990	9990
EC ( $\mu$ s/cm)	21035.29	40400	33066.67	77656.25
pH	8.0	7.9	8.1	8.1
DO (ppm)	5.9	8.0	8.5	8.5
ORP (mV)	148	144	260	267
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0
NO <sub>3</sub> (ppm)	0	0	0	0
Fe (ppm)	1	0	1	0
水色目測	藍灰色	灰	灰	灰



環境紀錄

現場到處都是浮石，下撈海水採集水樣也全是滿滿的浮石。是我們在野外採樣第一次遇見浮石的日子。

沙岸階梯狀沉積地形明顯，大量浮石在海岸呈帶狀分布綿延數公里

水樣中含浮石與海砂

水樣中的沉澱物已恢復為原來海沙。附近沙灘相當不平整，而時有崩塌。浮石分布有被限縮的跡象。



圖三十二、(A)金山中角灣環境觀察 (B)金山中角灣2021/12/12漲潮海浪中夾帶極多褐色浮石。(C)正在分析 pH。(D)大雨中躲在公共浴室分析溶氧。(E)大雨中躲在公共浴室測定鐵質。(F)2022/01/30大風大浪大雨下的金山中角灣。

我們在淡水河口的樣區分析當中(如表八、圖三十三)一直沒有發現浮石的侵入情形，而在水化學的數值上，淡水河河口的 TDS、EC 似乎受到河水的影響較大而自成一格，與北海岸較不一樣。其中中港河在退潮時還有特別低的 TDS 和 EC，因此受到河流淡水的影響又高於其他的樣點。這一區域或許受城市本身的汙染以及河水和海水在漲退潮交錯之間物質夾帶流動的影響比較大，而並未顯著受到這次浮石漂流事件的影響。

這次浮石事件對於北海岸的衝擊尺度雖然遠沒有白堊紀大滅絕事件那樣全範圍性的行星尺度，但是我們仍然可以見微知著，可以了解到即便是應對短期而範圍侷限的浮石漂流事件，也還是會對原生環境構成重大的破壞性衝擊。因此在未來全球氣候變遷以及可能的地質災害事件頻度增加的情形下，我們有必要更為注意生態環境的長期監測。

表八、淡水河河口樣點分析數據比較表

採樣點	八里龍形	八里龍形	八里龍形	八里渡船頭	關渡中港河碼頭	淡水金色水岸船舶區
採樣日期	20211027	20211222	20220130	20220130	20220130	20220130
採樣時間	12:38	12:30	15:35	14:40	17:53	16:44
潮汐	稍退	漲潮	漲潮	稍退	退潮	退潮

天候狀況	大晴天	陰小雨起霧	小雨風浪大	大雨	陰	小雨起霧
水溫(°C)	26.5	19.4	13.3	13.3	13.7	13.5
TDS (ppm)	8310	9990	4180	9990	1030	6400
EC ( $\mu s/cm$ )	4180	39950	4290	16083.33	620	8938.79
pH	8.2	8.0	7.5	7.8	7.8	7.4
DO (ppm)	6.7	6.6	5.9	6.3	5.0	5.8
ORP (mV)	138	158	293	256	278	249
Fe (ppm)		0	2	0	2	2
水色目測	灰	灰色混濁	灰	棕色混濁	灰	灰



圖三十三、(A)淡水河河口 ORP 採樣與數據整理。(B)八里龍形滿水位情形。(C)採樣前儀器室內測試。

## 伍、討論

### 一、線藻長期水流停滯模擬

藻類在面臨長期超過半年的海水滯留模擬時會發生大量增生但是光合作用低落且白化的組織。同時生理活動會越來越差，其所生長水體的 DO、pH 以及 ORP 也會越來越趨於下降。當藻類自身的代謝廢物在停滯水體中累積並可能造成危害(如 ORP 的下降)，加上水中原先容易被藻類運用的養分越來越少，將使得生物體逐漸老化壞死。而在白堊紀時期由於地質與氣候變動而使得海流發生停滯的情形，當這樣的情況如果發生在現今也將會造成嚴重的生態災難。

### 二、衰老藻類與年輕藻類混養試驗

當線藻這類多細胞藻類在經歷長期水流停滯狀態所造成的傷害後，如果能重新被遷移到較為健康的環境下(或者海流環境轉變並帶來其他健康藻類)，則仍有機會維持存活並復甦其原有的生理功能，這顯示了環境復原所對瀕死生物體的重要性。

觀察藻類短期略帶有週期性的 DO、ORP、TDS、EC 等數值變動情形是有助於了解其健康情況的。藻類平時的生活除了 DO、ORP、TDS、EC 等數值，也會帶動水體中鐵元素這個海洋生態中的限制營養元素進行變動的情形，但詳細的交互作用可能需要後續進一步的研究工作。



### 三、浮石對海水黏滯性模擬試驗

浮石確實會對水體造成黏滯性的增加。浮石進入海洋約重量比千分之28.6便足以讓海水黏度高於血液的15mPa·s。而增加的黏滯性也可能增添局部生態環境水流停滯或阻塞的風險。白堊紀後期的大量浮石應該會透過黏滯性增加而對生態環境造成不利影響。

### 四、海星藻類綜合缸模擬試驗

根據 Yoshikazu Ohno 等人2022年的研究指出大量浮石汨濫足以影響溶氧在海水中的下沉，並抑制海面氣體交換與初級生產者的光合作用；浮石長時間干擾更會導致生態系統劣化。我們雖未進行浮石遮光的試驗，但從停滯實驗中也已看到溶氧的負面影響。

根據 Aquino 等人在2021年的研究指出，野外的海星衰弱症候群常帶有一些疾病跡象，像是收縮、變色、浮腫、手臂扭曲/捲曲、肢體自體切除、體壁損傷以及幽門盲腸和性腺的糜爛和突出等。在我們實驗期間海星確定曾發生手臂扭曲、肢體自己切除、體壁損傷以及中央盤部位潰爛等症狀(如圖三十四)。加上2013年北美太平洋西北地區海星疫情爆發最嚴重時期，除了北美，澳洲以及中韓之間的黃海等地也都記錄到零星的海星衰弱症候群案例，後者已鄰近日本小笠原群島。在盛行海流的帶領下，是有機會將病原透過浮石帶入到台灣海域的。2019年東加海底火山噴發的大量浮石雖然給予當地環境相當大的負面衝擊，但浮石上許多孔洞所附著的微生物、珊瑚與藻類隨著海流飄移至澳洲海域，卻幫助大堡礁恢復生機(吳洛瑩，2019)。根據我們在野外的觀察與室內實驗的情形而言，浮石確實可帶來像是鵝頸藤壺這樣的大批小動物提供給海星作為新的食物，但是浮石也可能帶來了不明的微生物而使得海星生病並且發生類似科學家所發現的海星衰弱症候群的自殘行為，甚至最後死亡。因此我們的實驗雖然印證了浮石確實可作為許多微小生物交通載體的前人研究，但是這樣的載體是否對於海洋原生生態環境是有利的？則需要視特定的狀況而定。白堊紀末期的大量浮石一定也曾帶來大量生物移動的大混亂。



圖三十四、(A)正常健康的海星 (B)表面開始糜爛的海星 (C)海星中央盤與腕解體並死亡

### 五、淡水河口與北海岸環境實測與觀察

我們觀察到北海岸在小笠原浮石事件當中確實遭受到了一定程度的衝擊，包括原生海洋生物的消失或是遭到掩埋，以及水質化學上的變動，例如部分海域 TDS 和 EC 的整體上升，以及 pH、ORP 和 DO 的下降等等。而在二月，當浮石衝擊比較緩和時，也看到了麟山鼻藻礁有復原的跡象。因此如果是白堊紀那樣行星等級的全面性大量浮石，應該所受到的衝擊會更為劇烈而龐大。未來的海洋將會面臨越來越顯著的極端天氣與各類的變動，衝擊著珊瑚礁以及許多海岸環境 (陳明德、陳宏瑜、周文臣、陳惠芬、廖

正信、王佳惠、黃向文，2020)(國家實驗研究院，無日期)，因此我們有必要加強海洋生態環境的持續監測活動。

## 陸、結論

藻類在遭遇長期海水滯留而無法更新水源將導致光合作用衰退，甚至被自身代謝廢物所危害，類似白堊紀時期長期海水滯留所對海洋生物的危害是相當嚴重的。而當環境劣變所導致生理衰微的藻類如果能伴隨健康藻類群體一起生活可能有助於恢復其部分生理功能，因此環境復原對於藻類正常生理復原的運作相當重要。火山浮石對於海洋是一個雙面刃，既能帶給海洋生物附著與遷移的憑藉，卻也會帶來海洋化學包括黏滯性與水質方面的變動以及微生物分布的變異，進而影響生物的演替。小笠原浮石事件造成北海岸潮間帶受到明顯的影響，包括原生海洋生物的消失或是遭到掩埋，以及水質化學上的變動。因此白堊紀末行星等級的浮石擴散，勢必更為衝擊海洋環境。

通常提到白堊紀大滅絕，人們的第一反應都是想到恐龍，但是生態系統的崩潰通常都是從基底開始的。我們的研究證明白堊紀從海流的停滯起始，生態系統先從藻類的死亡開始崩盤，並進而影響海洋其他較上層的生命體系。白堊紀晚期的海洋又進一步遭逢隕石撞擊所帶來大規模似浮石物質的擴散與衝擊，並終致大滅絕的發生。由於海洋生態系統關係到地球整體的養分循環與氣候變動，而藻類正是一個具有關鍵作用的生產者。海洋生物在面臨未來氣候變遷與火山爆發事件頻率的增強情形下，有可能會重塑白堊紀大滅絕時期的極端環境而增加其生存上的考驗。

## 柒、參考文獻資料

- 一、 白堊紀. (2022, January 5). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from <https://zh.wikipedia.org/wiki/白堊紀>
- 二、 李沛珊、何源興(2016年11月28日)。東部海洋生物研究中心種原庫新寶種品項—葡萄藻。行政院農業委員會水產試驗所電子報，第127期。  
<https://www.tfrin.gov.tw/friweb/frienews/enews0127/h1.html>
- 三、 李佳恒(2016年04月18日)。116年來共19次規模8.3以上強震 兩大地震帶再度進入活躍期。風傳媒。取自 <https://www.storm.mg/article/105029>
- 四、 吳洛瑩(2019年09月04日)。澳洲白化大堡礁有救了 東加海底火山噴發浮石助珊瑚重生。上報。取自 <https://reurl.cc/k1kMRK>
- 五、 沖繩美麗水族館（無日期）。朱古力海星。美麗海生物圖鑑。2022年2月12日，取自：<https://churaumi.okinawa/sp/tc/fishbook/00000006/>
- 六、 東森新聞雲(2012年09月27日)。【影】「海泡」入侵蘇格蘭漁村 海陸「打」成一片。取自 <https://www.ettoday.net/news/20120927/107726.htm>
- 七、 施建宏、蘇惠美(2008年10月27日)。綠色魚子醬—海葡萄。行政院農業委員會水產試驗所電子報，第30期。<https://www.tfrin.gov.tw/friweb/frienews/enews0030/s2.html>
- 八、 姜唯（2018年01月09日）。脫氧海洋！研究：「死亡區」自1950年擴大四倍。環境資訊中心。取自 <https://e-info.org.tw/node/209392>
- 九、 姜唯（2020年02月05日）。海洋熱浪讓更多鯨魚受困漁網 專家將研發預測工具。環境資訊中心。取自 <https://e-info.org.tw/node/222854>



- 十、黃淑芳(1988/5/20)。[中文名：粗硬毛藻 (A001897)]。中央研究院數位典藏與數位學習聯合目錄。取自 <http://catalog.digitalarchives.tw/item/00/04/86/84.html>
- 十一、黃淑芳(2014)。針葉蕨藻。臺灣生命大百科。教育百科。取 <https://reurl.cc/2ZN6XE>
- 十二、陸鹿、嚴立龍、李秋環、曾璐、金鑫、張玉修、侯泉林、張開均(2016)。洋底高原及其對地球系統意義研究綜述。岩石學報 32, 6, 1851-1876。取自 <https://is.gd/ogE0qI>
- 十三、涂可欣(譯)(2021)。掠食性藻類(原作者：Riley Black)。科學人知識庫，第230期，04月號。臺北市：天下文化。(原著出版年：2021) <https://sa.ylib.com/MagArticle.aspx?id=4964>
- 十四、泰宇文化授課橘網站(無日期)。魯米諾實驗。鑑識科學。取自 <https://is.gd/IKGcRB>
- 十五、陳明德、陳宏瑜、周文臣、陳惠芬、廖正信、王佳惠、黃向文(2020)。海洋科學概論暨其時代議題。基隆市：國立臺灣海洋大學出版中心，大石國際文化。
- 十六、陳映方、李梓齊、吳沛澄(2021)。潮間帶海藻的秘密生活。新北市109學年度中小學科學展覽會。
- 十七、葉明蕙、楊水平(2010年11月15日)。化學示範實驗：利用魯米諾偵測血液(Using the Luminol Test to Detect Blood)。科學Online。取自 <https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=14833>
- 十八、閔文昱(2021年10月30日)。日本沖繩驚見「火山浮石海」！他下潛1秒瞬間遭埋恐怖畫面曝。ETtoday新聞雲。取 <https://www.ettoday.net/news/20211030/2113067.htm>
- 十九、國家實驗研究院(無日期)。極端氣候破壞生態平衡，珊瑚復育面臨嚴苛挑戰【科普講堂】取自 <https://is.gd/QE7Cpi>
- 二十、張振乾(民106)。潮汐的呼喚—探索北海岸潮間帶。新北市：交通部觀光局北海岸及觀音山國家風景區管理處，社團法人台灣環境資訊協會。
- 二十一、詹森(2018)。臺灣區域海洋學(二版)。國立臺灣大學出版中心。
- 二十二、溫玉琪、譚逸凡(2008)。本年度最神奇的泡泡。國立新竹高工。全國高級中等學校小論文。取自 <https://www.shs.edu.tw/works/essay/2008/10/2008103114584884.pdf>
- 二十三、廖羿雯、柯金源(2021年12月27日)。火山浮石漂流記。公視我們的島。取自 <https://ourisland.pts.org.tw/content/8769>
- 二十四、鄭郁萱(2021年10月31日)。浮石流攻佔日海岸！沖繩藝術家親下海 揭危險性。TVBS新聞網。取自 <https://news.tvbs.com.tw/world/1622455>
- 二十五、盧佳秀(2018)。誰「砂」了藻礁？—埋砂對藻礁生態的影響。中華民國第58屆中小學科學展覽會。
- 二十六、黏度。(2021, December 27). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from <https://zh.wikipedia.org/wiki/黏度>
- 二十七、謝介士、葉瑾瑜、陳紫瑛(民99年12月)。生物作用對水中pH值及鹼度之影響，水試專訊，32, 44。取自 <https://reurl.cc/DvA64e>
- 二十八、邁多科技股份有限公司(無日期)。ORP值(氧化還原值)【儀器相關知識】。取自 <https://is.gd/f7IBft>
- 二十九、羅建明、陳桂清(民92)。台灣五大港區海水水質調查分析。交通部運輸研究所。取自 <https://www.ihmt.gov.tw/periodical/pdf/B092120.pdf>

- 三十、瀝青滴漏實驗. (2022, January 12 ). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from <https://is.gd/PAwDWD>
- 三十一、藻類生質燃料. (2021, September 23). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from <https://zh.wikipedia.org/wiki/藻類生質燃料>
- 三十二、Anwar, M. F. (2020, June 23). Ancient algae play a role in building a healthy marine ecosystem: Study. *DownToEarth*. Retrieved June 11, 2022, from <https://is.gd/34Qy8M>
- 三十三、Aquino, C. A., Besemer, R. M., DeRito, C. M., Kocian, J., Porter, I. R., Raimondi, P. T., Rede, J. E., Schiebelhut, L. M., Sparks, J. P., Wares, J. P. and Hewson, I. (2021). Evidence That Microorganisms at the Animal-Water Interface Drive Sea Star Wasting Disease. *Front. Microbiol.* 11, 1-19. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.610009>
- 三十四、Brasier, M. D., Matthewman, R., McMahon, S. and Wacey, D. (2011). Pumice as a Remarkable Substrate for the Origin of Life. *Astrobiology* 11, 7, 725-735. Retrieved from <http://doi.org/10.1089/ast.2010.0546>
- 三十五、Burton, A. R., Gravem, S. A. ,Barreto, F. S. ( 2021). Little evidence for genetic variation associated with susceptibility to sea star wasting syndrome in the keystone species *Pisaster ochraceus*. *Molecular Ecology* 31, 1, 197 DOI: 10.1111/mec.16212
- 三十六、Cenomanian-Turonian boundary event. (2022, February 5). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Cenomanian-Turonian\\_boundary\\_event](https://en.wikipedia.org/wiki/Cenomanian-Turonian_boundary_event)
- 三十七、Cretaceous – Paleogene extinction event. (2022, January 22). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Cretaceous%E2%80%93Paleogene\\_extinction\\_event](https://en.wikipedia.org/wiki/Cretaceous%E2%80%93Paleogene_extinction_event)
- 三十八、Linnert, C., Mutterlose, J., Erbacher, J. (2010). Calcareous nannofossils of the Cenomanian/Turonian boundary interval from the Boreal Realm (Wunstorf, northwest Germany). *Marine Micropaleontology* 74, 1-2, 38-58. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377839809001285?via%3Dihub>
- 三十九、Ohkouchi, N., Kuroda, J. & Taira, A. (2015). The origin of Cretaceous black shales: a change in the surface ocean ecosystem and its triggers. *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci.* 91, 7, 273 – 291. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4631894/>
- 四十、Ohno, Y., Iguchi, A., Ijima, M., Yasumoto, K., and Suzuki, A. (2022). Massive Drift of Pumice Stones Might Trigger Coastal Ecological Transitions. *Research Square* preprint. Retrieved from <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1330235/v1>
- 四十一、Osinski, G. R. (2021, September 17). Meteorite impacts: The good and the bad. *OPEN ACCESS GOVERNMENT*. Retrieved December 31, 2021, from <https://www.openaccessgovernment.org/meteorite-impacts-the-good-and-the-bad/120204/>
- 四十二、Oxygen in the ocean. (2010) *World Ocean Review*. Retrieved from <https://worldoceanreview.com/en/wor-1/ocean-chemistry/oxygen/>
- 四十三、Phillippine Institute of Volcanology and Seismology (2021, November 23). PRIMER ON THE FLOATING PUMICE STONES & VOLCANIC DEBRIS ON THE SHORES OF BATANES PROVINCE: AFTERMATH OF THE AUGUST 2021 ERUPTION OF

FUKUTOKU-OKANOBA SUBMARINE VOLCANO IN JAPAN. Retrieved February 12, 2022, from <https://is.gd/a8b13K>

- 四十四、 Raven, J. A. (2013). Iron acquisition and allocation in stramenopile algae. *Journal of Experimental Botany*, 64, 8, 2119 – 2127. Retrieved from <https://doi.org/10.1093/jxb/ert121>
- 四十五、 Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 118 012019. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/118/1/012019/pdf>

## 【評語】 080301

1. 研究白堊紀隕石撞擊帶來大量浮石在海洋中擴散造成海洋生態上化學與生物的影響。學生設計出實驗模擬藻類面臨類白堊紀年代的生態狀況所產生可能生理功能上的衰退。本研究題目研究範圍過於廣泛，作品題目是研究白堊紀的極端環境下藻類生態，但研究內容又包含淡水河口與北海岸環境實測與觀察，研究主題不夠聚焦。
2. 構想良好，但生物性試驗設計過於簡化白堊紀的環境條件，建議實驗設計宜有邏輯性和明確的變項因子，方能解讀出正確的結果，確立作品的價值性。
3. 作品說明書內容撰寫佳，觀察記錄與對水質變化重要數據的測量皆很詳細。但水質測量實驗至少要做3次以上，再將所得的數據平均以增加說服力。
4. 中文參考文獻最好是引用有審查制度的期刊論文。



## 作品簡報

# 回到白堊紀的 海中時空

組別：國小組

科別：生物科

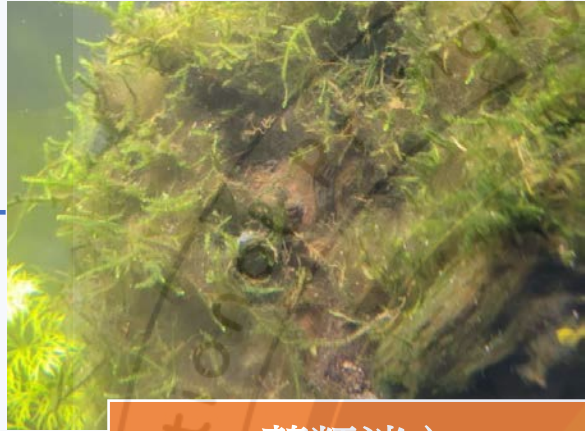
編號：080301





回到白堊紀的海中時空

前言



藻類消亡



隕石撞擊



缺氧/貧養/生物滅絕

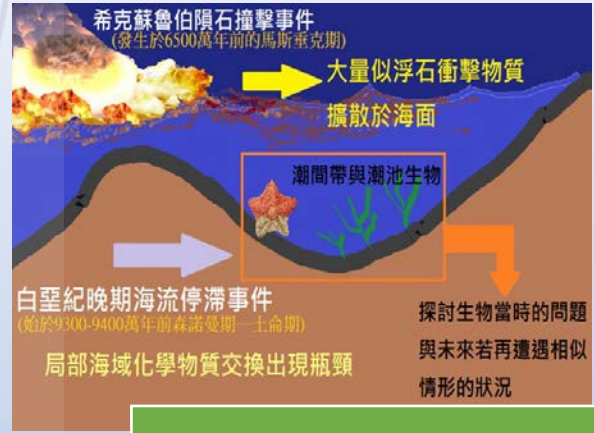
動機



探討水流停滯



日本火山爆發  
浮石漂移至台灣



如果遠古逆境重現？

# 研究過程與方法





# 研究結果

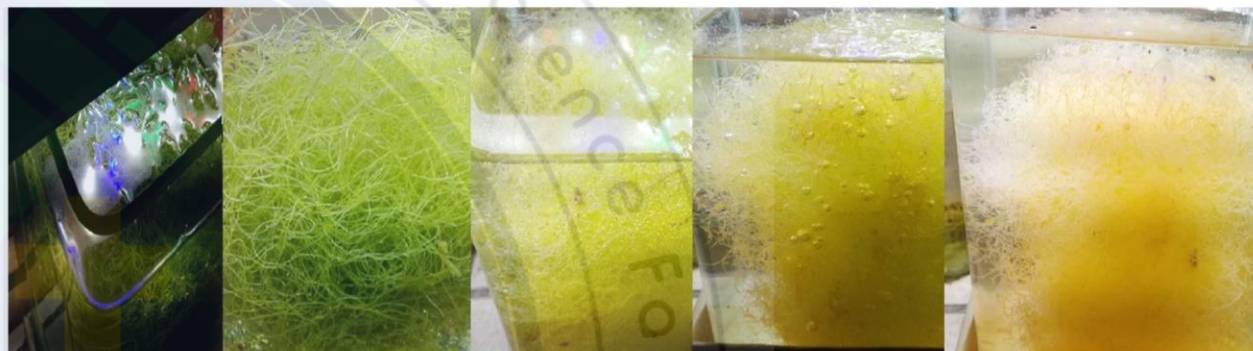
## ◆ 研究一、線藻長期水流停滯模擬

線藻長期水流停滯模擬試驗水質抽測

日期	20210501	20210707	20210820	20211003	20211027	20220109
測定時間	23:35	0:00	14:35	15:43	0:51	11:45
pH	8.8	9.0	9.2	9.4	8.4	7.9
ORP (mV)	254	152	166	172	127	152
DO (ppm)	8.8	2.4	9.1	7.8	6.3	7.6
TDS (ppm)	9680	6380	6030	6030	9680	9990
水溫 °C	25	25	26	23	25.5	20.9
EC (μS/cm)	51375	49000	56125	49200	50375	37720
備註	剛換完水，並照光一小時，水質清澈	一個月未換水，連續黑暗8小時。線藻白化日趨嚴重，水呈暗綠混濁。	剛換完水並照光12小時，水質清澈，很多氣泡，線藻白化叢中有些已泛黃，但整體體積增加，有新長綠色部分。	三周末換水，連續照光12小時，青綠混濁。	剛換完水，並照光一小時，水質清澈。	三周末換水，連續照光12小時。水色仍澄清，但水面上出現黑色小點黴菌，同時水面有粘液狀物質和小蚊蚋屍體。

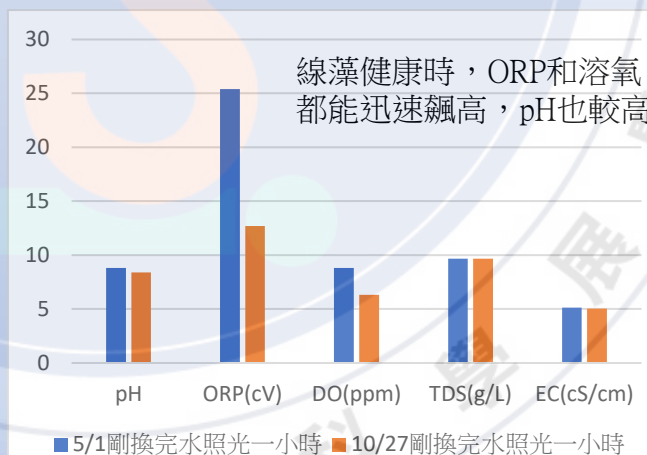
### 發現：

- ◆ 自身的代謝廢物在水體累積
- ◆ 可用的養分越來越少
- ◆ 生物體逐漸老化壞死
- ◆ 生態系統的重大崩潰

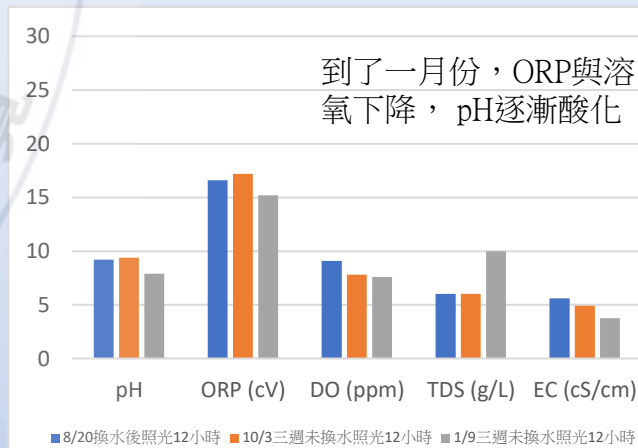


20210501      20210630      20210820      20211027      20220109

線藻長期水流停滯模擬試驗的變化情形



不同時期剛換完水照光一小時的水質比較



不同日期連續照光12小時的比較圖

# 研究二、衰老藻類與年輕藻類混養試驗

新置線藻與葡萄藻搭配1/4老化瀕死線藻水質分析數據比較表

採樣時間	累計時間 照光(+) 黑暗(-) (小時)	DO (ppm)	ORP (mV)	pH	TDS (ppm)	EC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Fe (ppm)	水溫( $^{\circ}\text{C}$ )	其他
20220109 14:58	0	6.5	200	8.4	9990	51375	0	20.3	重置換水
20220109 18:00	+3	15.2	225	8.7	9990	43222.5	1	20.8	持續吐泡泡，有一隻蚋飛入
20220109 21:26	+6	16.7	226	9.1	9990	47000	1	21.0	冒泡量減少
20220121 23:29	-6	6.0	224	8.8	9990	46250	1	21.6	兩周未換水，水綠
20220122 16:42	+16	10.1	207	9.4	9990	42250	0	21.3	
20220201 1:24	-8	5.4	283	9.0	9990	44000	2	19.8	一週未換水，水綠
20220201 8:14	+8	7.1	223	8.5	9990	45100	2	20	水綠；沒有泡泡
20220201 14:10	+12	8.0	250	8.4	9990	40425	0	20.9	水綠，沒有泡泡
20220201 16:40	0	7.4	227	8.7	9990	48950	0	20.1	重新配水照光
20220201 17:40	+1	8.8	254	8.7	9990	48600	0	20.8	出現小泡泡
20220201 18:47	+2	9.2	271	8.7	9990	46125	0	22.4	小泡泡量增多
20220202 0:45	-6 +1	6.0	255	8.5	9990	54600	0	20.9	有些小泡泡
20220202 11:45	+12	13.0	216	9.4	9990	57750	1	21.3	藻類持續吐出很多小泡泡



混養缸吐泡泡



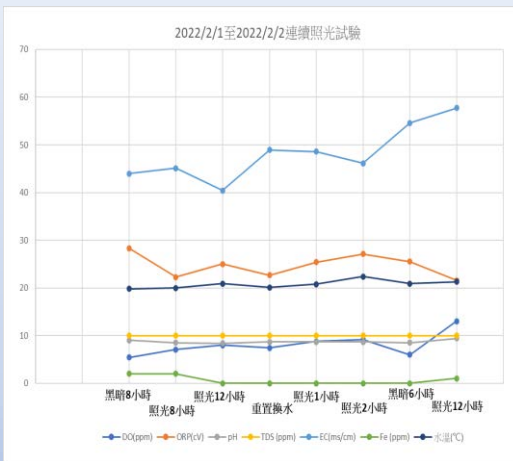
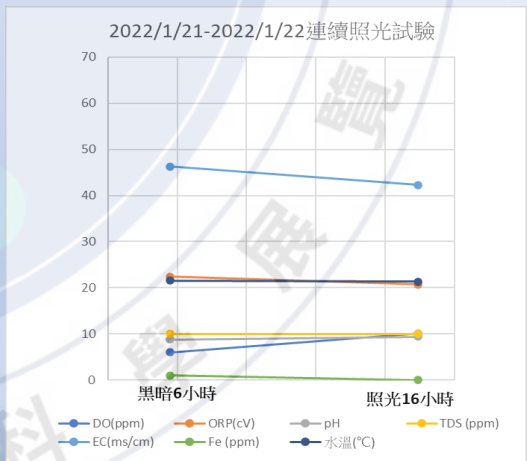
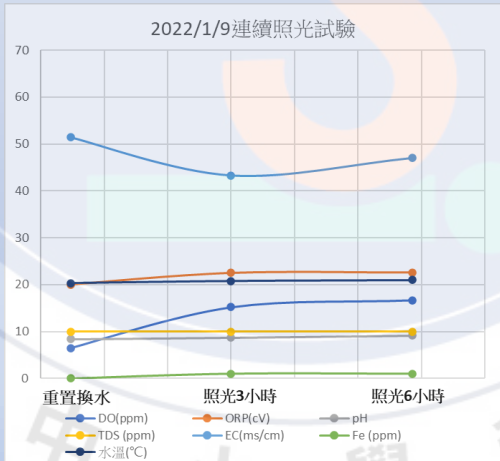
以魯米諾試劑進行豬肝血測試與藻類海水溶液分析實驗



豬肝血在魯米諾試劑下的清晰螢光，但是海藻水無法呈現這樣的顏色

藻類死亡時會釋放出平時所儲存的鐵，但是運用魯米諾試劑進行藻類的鐵質測試時卻是失敗的，鐵試紙卻常可測到1ppm的鐵

- 發現：**
- ◆ 衰老藻類重新恢復光合作用產氣冒泡
  - ◆ 光合作用在照光前三小時效能增加最快
  - ◆ 行光合作用及死亡時會釋放鐵質





## ◆ 研究三、浮石對海水黏滯性模擬試驗



清水混入浮石的滴漏實驗



自來水、海水與海水混入浮石的滴漏實驗

測試者	A		B		C		
清水ml	500	500	500	500	500		
人工海水ml						500	500
浮石g		50		15			15
秒數sec	9.36	60.66	7.65	38.6	11.26	14.38	167.04
黏度mPa·s	1	6.48	1	5.05	1	1.28	20.16

### 發現：

- ◆ 黏滯效應發生時
  - 阻滯藻礁潮池的海水流動
  - 藻類無法獲得更新的海水
  - 阻滯魚類的鰓部呼吸
- ◆ 小顆粒浮石易附著在手上
  - 大型的海洋生物難避開，易誤食



# ◆ 研究四、海星藻類綜合缸模擬試驗

## (一) 模擬浮石在長期滯留不動的海水所可能對生物的影響

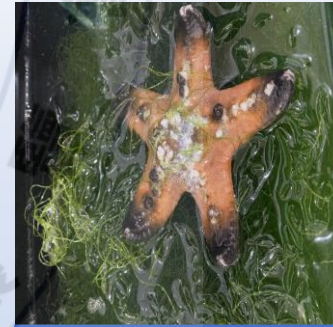
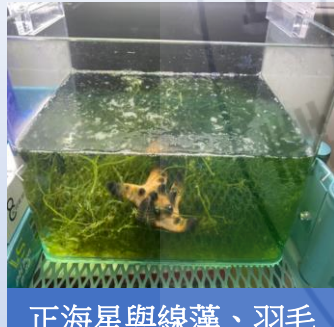
藻礁浮石停滯狀態模擬試驗		
分析項目	人工海水	1公升海水加入 200g浮石停滯兩 週時間
DO(ppm)	8.0	0.3
ORP(mV)	225	-233
pH	8.1	7.2
TDS(ppm)	8500	9800
EC (μs/cm)	25000	35020
Fe (ppm)	0	3
溫度°C	20.1	20.2



### 發現：

- 產生硫化氫
- 有小生物，如鵝頸藤壺
- 腐敗物質降低溶氧，改變TDS、EC，釋放鐵質

## (二) 模擬浮石侵入正常保持更新的海水所對於海洋生物的影響



### 發現：

- 海星會掠食浮石上的鵝頸藤壺
- 浮石拿走後19天發生自殘

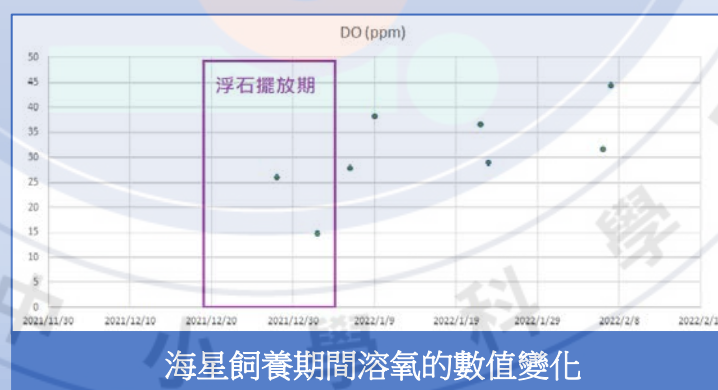
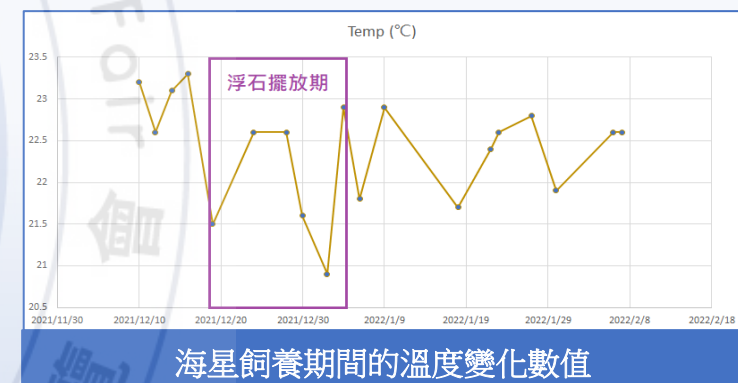
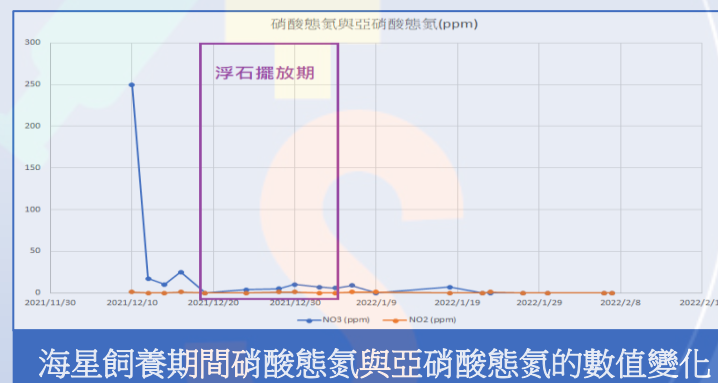
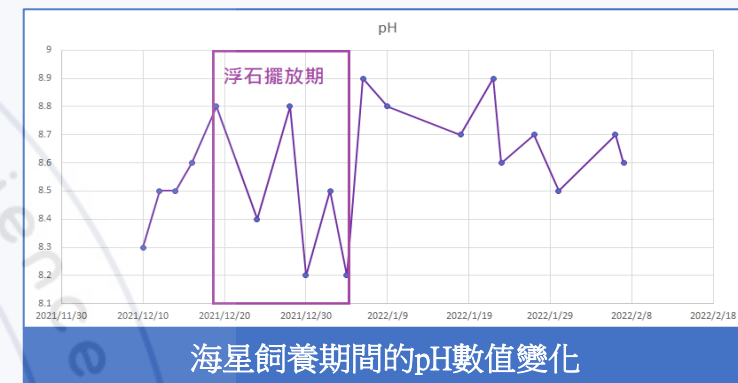
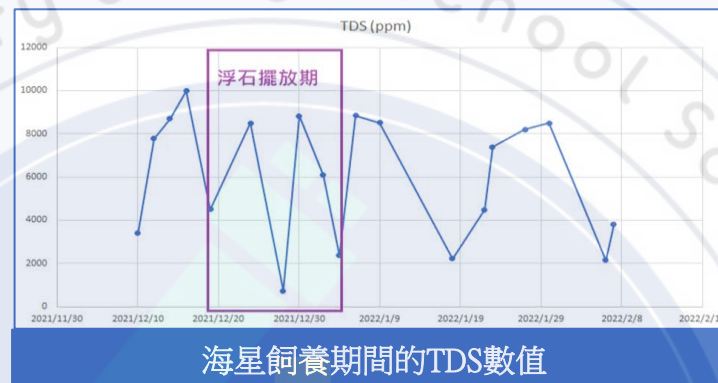
- 海星持續自殘，將肉突扯斷
- 添加抗生素Ofloxacin後無效
- 2022/2/23解體死亡



## (二) 模擬浮石侵入正常保持更新的海水所對於海洋生物的影響

### 海星與海藻缸混入浮石飼養實驗

日期	TDS (ppm)	Temp (°C)	pH	NO <sub>3</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	DO (ppm)	海星活動	其他
12/10(五)	3390	23.2	8.3	250	1		翻身	
12/12(日)	7780	22.6	8.5	17	0		手微彎	換水
12/14(二)	8700	23.1	8.5	10	0		吸在牆上	
12/16(四)	9990	23.3	8.6	25	1			
12/19(日)	4500	21.5	8.8	0	0			放浮石、換水
12/24(五)	8490	22.6	8.4	4	0		吸盤動	
12/28(二)	737	22.6	8.8	5	1	26	吃了2個藤壺	
12/30(四)	8830	21.6	8.2	10	1			
1/2(日)	6080	20.9	8.5	7	0	14.8	沒動	加入大量浮石
1/4(二)	2370	22.9	8.2	6	0			把浮石拿走
1/6(四)	8840	21.8	8.9	9	1	27.9	往上爬	
1/9(日)	8510	22.9	8.8	0	1	38.2		換水
1/18(二)	2220	21.7	8.7	7	0			
1/22(六)	4480	22.4	8.9	0	0	36.6	吸盤動	
1/23(日)	7400	22.6	8.6	0	1	28.9	自殘弄斷背上兩個突出物	換水
1/27(四)	8210	22.8	8.7	0	0		又弄斷了一個突出物	
1/30(日)	8500	21.9	8.5	0	0			換水
2/6(日)	2140	22.6	8.7	0	0	31.7		
2/7(一)	3800	22.6	8.6	0	0	44.3	斷了一個突出物	換水



**發現：**

- ◆ 加入浮石後
  - 各類水質化學數值無顯著差異
  - 溶氧略有下降

# ◆ 研究五、淡水河口與北海岸環境實測與觀察

## (一) 麟山鼻



麟山鼻藻礁潮池樣點分析數據比較表

日期	20210529	20211009	20211218	20220130	20220207
潮汐與水位概況	中水位	退潮	漲潮	漲潮，潮水淹沒所有潮池	漲潮稍退
天候狀況	多雲	多雲	陰冷，風浪很大	風雨浪極大	陰偶雨，風浪漸增
採樣時間	11:20	17:50	9:18	9:00	16:35
水溫(°C)	22	25	17.5	17.5	18.1
TDS (ppm)	6170	6030	8080	9990	9990
EC (μs/cm)	19920	43960.67	43786.67	64000	69874.82
pH	9.0	8.7	7.9	8.0	8.0
DO (ppm)	12.6	儀器維修	7.1	8.4	9.0
ORP (mV)	325	47	151	221	270
NO <sub>2</sub> (ppm)			<10ppm	0	0
NO <sub>3</sub> (ppm)			<1ppm	0	0
Fe (ppm)			1	0	2
水色目測	透明	灰	藍灰色海水，水樣上都是浮石	灰，含少量浮石	清澈透明
環境紀錄	生物豐富，有海星、螃蟹和許多小型貝類	附近垃圾很多，還多出一批保麗龍碎屑，但還是有部分小螃蟹與貝類	潮池與藻礁環境全被大量浮石所掩埋，海水中攜帶大量浮石。原有的生物已經找不到，但是浮石中夾帶大量小型鵝頸藤壺與藤壺	潮池被海水淹沒，灘地的浮石群已經看不到藤壺了。	潮池的綠藻已經有大片重新生長，並且有新的海沙覆蓋，浮石覆蓋區域局限於高灘地。

## (二) 老梅綠石槽



老梅綠石槽樣點分析數據比較表

日期	20210529	20211218	20220130	20220207
潮汐與水位概況	中水位	漲潮	漲潮，潮水淹沒所有潮池	漲潮
天候狀況	多雲	陰冷，大浪大風	風雨浪極大	陰偶雨；起風雨勢開始加大。
採樣時間	11:38	10:46	9:55	16:10
水溫(°C)	23	17.4	16.0	21.4
TDS (ppm)	6830	9500	9990	9990
EC (μs/cm)	42030	故障	20000	77343.75
pH	8.2	7.9	8.0	8.1
DO (ppm)	8.0	8.6	8.3	8.6
ORP (mV)	332	165	250	270
NO <sub>2</sub> (ppm)		0	0	0
NO <sub>3</sub> (ppm)		0	0	0
Fe (ppm)		0	0	1
水色目測	藍灰	灰藍色海水	灰	灰，採樣水面仍有一些浮石
環境紀錄		海面上泡泡極多，整個海岸的泡沫彷彿洗澡間，甚至會被風吹到房屋屋頂以及人的身上。天空中出現黑鷲。浮石上有很多鵝頸藤壺和其他類型小藤壺附著。	沙灘上充滿浮石	漲潮海水直接連通潮池，石槽潮池水仍布滿浮石。沙灘浮石分布沒有太大變化。但綠石槽有少部分藻類有重新長出來。





### (三) 金山中角灣



金山中角灣樣點分析數據比較表

日期	20211212	20211218	20220130	20220207
潮汐與水位概況	漲潮	漲潮	漲潮，高灘地以下全部淹沒	漲潮
天候狀況	雨，風浪大	陰，風浪大	小雨風浪大	陰
採樣時間	16:30	11:37	10:40	15:23
水溫(°C)	19	17.9	15.6	21.3
TDS (ppm)	5900	8130	9990	9990
EC (µs/cm)	21035.29	40400	33066.67	77656.25
pH	8.0	7.9	8.1	8.1
DO (ppm)	5.9	8.0	8.5	8.5
ORP (mV)	148	144	260	267
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0
NO <sub>3</sub> (ppm)	0	0	0	0
Fe (ppm)	1	0	1	0
水色目測	藍灰色	灰	灰	灰
環境紀錄	現場到處都是浮石，下撈海水採集水樣也全是滿滿的浮石。是我們在野外採樣第一次遇見浮石的日子。	沙岸階梯狀沉積地形明顯，大量浮石在海岸呈帶狀分布綿延數公里	水樣中含浮石與海砂	水樣中的沉澱物已恢復為原來海沙。附近沙灘相當不平整，而時有崩塌。浮石分布有被限縮的跡象。

### (四) 淡水河河口

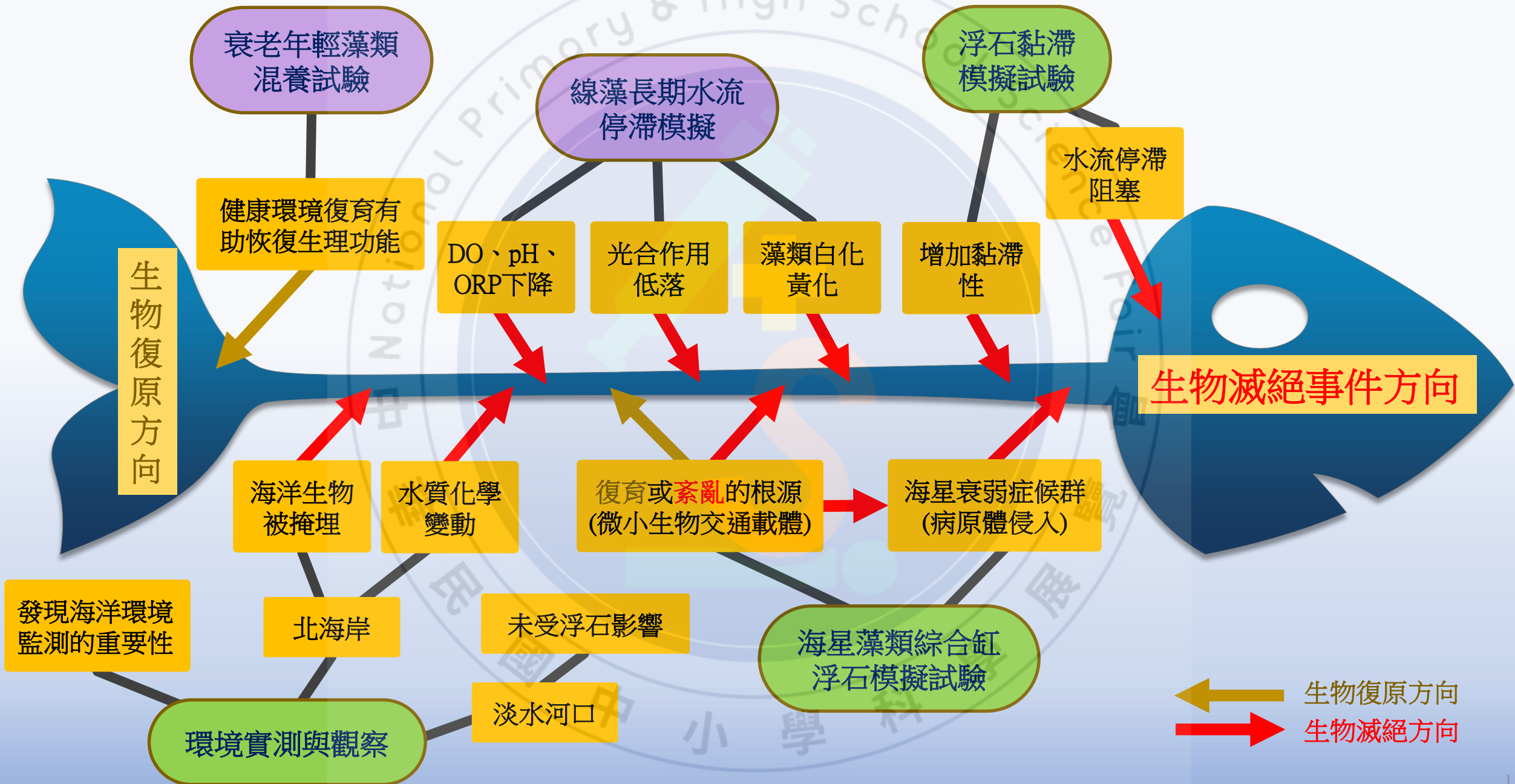


淡水河河口樣點分析數據比較表

採樣點	八里龍形	八里龍形	八里龍形	八里渡船頭	關渡中港河碼頭	淡水金色水岸船區
採樣日期	20211027	20211222	20220130	20220130	20220130	20220130
採樣時間	12:38	12:30	15:35	14:40	17:53	16:44
潮汐	稍退	漲潮	漲潮	稍退	退潮	退潮
天候狀況	大晴天	陰小雨起霧	小雨風浪大	大雨	陰	小雨起霧
水溫(°C)	26.5	19.4	13.3	13.3	13.7	13.5
TDS (ppm)	8310	9990	4180	9990	1030	6400
EC (µs/cm)	4180	39950	4290	16083.33	620	8938.79
pH	8.2	8.0	7.5	7.8	7.8	7.4
DO (ppm)	6.7	6.6	5.9	6.3	5.0	5.8
ORP (mV)	138	158	293	256	278	249
Fe (ppm)		0	2	0	2	2
水色目測	灰	灰色混濁	灰	棕色混濁	灰	灰



# 討論





## 加強海洋生態監測的重要性

應持續監測生態環境的脈動



## 白堊紀滅絕從基底生物開始

基底的生物族群開始崩盤，最後影響大型生物



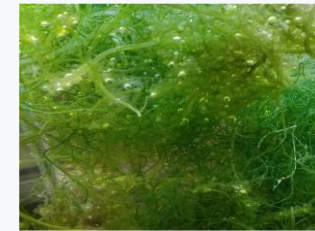
## 火山浮石帶來多項衝擊

海岸掩埋、黏滯性、夾帶物質與水流停滯等生態重大衝擊



## 藻類的關鍵角色

產氧與氣候調節的關鍵作用  
生產者之一



## 海水停滯將損害藻類功能

光合作用衰退、代謝廢物毒害、老化壞死



## 環境復原對衰弱藻類很重要

環境恢復有機會讓部分生理機能復原



### 參考文獻資料

1. 陸鹿、嚴立龍、李秋環、曾璐、金鑫、張玉修、侯泉林、張開均(2016)。洋底高原及其對地球系統意義研究綜述。岩石學報 32, 6, 1851-1876。取自<https://is.gd/ogE0qI>
2. 廖羿雯、柯金源(2021年12月27日)。火山浮石漂流記。公視我們的島。取自<https://ourisland.pts.org.tw/content/8769>
3. 盧佳秀(2018)。誰「砂」了藻礁?—埋砂對藻礁生態的影響。中華民國第58屆中小學科學展覽會。
4. 謝介士、葉瑾瑜、陳紫瑛(民99年12月)。生物作用對水中pH值及鹼度之影響。水試專訊, 32, 44。取自<https://reurl.cc/DvA64e>
5. 瀝青滴漏實驗。(2022, January 12). In Wikipedia, the free encyclopedia. Retrieved February 6, 2022, from <https://is.gd/PAwDWD>
6. Aquino, C. A., Besemer, R. M., DeRito, C. M., Kocian, J., Porter, I. R., Raimondi, P. T., Rede, J. E., Schiebelhut, L. M., Sparks, J. P., Wares, J. P. and Hewson, I. (2021). Evidence That Microorganisms at the Animal-Water Interface Drive Sea Star Wasting Disease. *Front. Microbiol.* 11, 1-19. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.610009>
7. Brasier, M. D., Matthewman, R., McMahon, S. and Wacey, D. (2011). Pumice as a Remarkable Substrate for the Origin of Life. *Astrobiology* 11, 7, 725-735. Retrieved from <http://doi.org/10.1089/ast.2010.0546>
8. Linnert, C., Mutterlose, J., Erbacher, J. (2010). Calcareous nanofossils of the Cenomanian/Turonian boundary interval from the Boreal Realm (Wunstorf, northwest Germany). *Marine Micropaleontology* 74, 1-2, 38-58. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377839809001285?via%3Dihub>