中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組　生物科

最佳團隊合作獎

030317

生「蓆」感「碳」

－不同 pH 值酸化海水與石蓆交互影響之研究

學校名稱：臺中市立新光國民中學

作者：	指導老師：
國二 莊立勝 國二 甘凱仁 國二 陳昱蓁	李志堅

關鍵詞：海洋酸化、石蓆、二氧化碳

摘要

本研究實際調查中部海域沿岸大型藻類生存現況；探討以 CO_2 及硫酸、鹽酸所誘導的酸化海水對石蓴光合作用之影響；評估石蓴對酸化海水 pH 值回升的貢獻;觀測不同 CO_2 誘導的酸化海水對石蓴生存之影響。結果顯示 CO_2 誘導的海水在 pH 值 8~6 內，有助於石蓴相對產氧率之提升(最高 319%);但若酸化至 pH5 時，則明顯受到抑制(26~37%)。以硫酸、鹽酸誘導的酸化海水， 在 pH6 以下愈酸，產氧量亦隨之遞減；pH3~2 可使石蓴立即受損。石蓴可直接利用碳酸氫根作為光合作用的碳源；單純的 H^+濃度增加，並非產氧量減少的主要原因。海水過酸(pH5)會促進石蓴主動吸收 H^+。CO_2 誘導的 pH8~6 酸化海水初期可促進石蓴生長，但長期(42 天)仍使其白化萎縮;當海水酸至 pH5 時，短期內即導致石蓴白化死亡。

壹、 研究動機

國一下時生物課最後一章提到有關人類對環境的影響時，老師要我們針對大氣二氧化碳濃度升高造成的影響蒐集相關資料做成報告;大多數文獻主要集中於氣溫升高造成的溫室效應、氣候變遷、氣候極端化之報導;然而，有一篇提及「海洋酸化」的文獻吸引了我們的注意，「鹼性的海水會變酸嗎」?我們決定進一步深入探討。

貳、研究目的

蒐集文獻得知，在國外已有不少有關海洋酸化的研究,其中在 2004 年科學(Science)期刊上有一篇較為廣泛而綜合性的報告，文中指出「工業革命以來，人類排放的 CO_2 有 1/3 以上被海洋所吸收;目前正以 $1x10^6$ t/h 的速度繼續吸收」(文獻十一，2004)。CO_2 會溶入海水中形成碳酸，部分的碳酸會解離出 H^+，因而造成海水的酸化。「近百年來，海洋表層海水 pH 值平均下降了 0.1，這意味著 H^+濃度增加了 30%」(文獻三,2011)；「如今酸化的海水已開始對各地海洋生態造成不等程度的影響，首當其衝的是海洋中為數眾多的有殼動物，例如造礁珊瑚,酸化海水會腐蝕牠們的碳酸鹽外殼,導致珊瑚白化、造礁能力減弱」(文獻十，2006)。

另一方面，酸化海水對海洋中的生產者—藻類影響又是如何?就學理而言, CO_2 增加應有利於光合作用的進行,促使部分藻類的生物量增加,有些文獻稱此為「施肥效應」(文獻四，2011)。然而, CO_2 增加亦導致海水 pH 值下降,亦即越來越多的 H^+對藻類的光合作用似乎不利,這兩者的影響一正一負,綜合起來對藻類的光合作用是促進還是抑制? 長期下來對藻類的生存影響又是如何? (文獻二，2011)

此外,全球海水酸化的程度亦有差異，目前最嚴重的區塊為北大西洋(附錄圖)，以及部分工業化國家的海岸地區(文獻十一，2004)。台灣沿海地區有不少電廠及石化工業區，海水受汙染的報導時有所聞，有些電廠將燃煤產生的廢氣(含 CO_2、SO_2、、等)灌入海水中形成碳酸、亞硫酸、硫酸，再利用海水的鹼度中和其酸性，此方式稱為「排煙脫硫」法 (文獻一、五、六、八)，這對海水 pH 值、溫度、溶氧量、、等理化性質有何影響?對海水中廣佈的生產者—藻類生存影響又是如何?

有關海水酸化對藻類的影響，已有不少文獻針對單細胞藻類進行深入的探討(文獻二，2009)，而大型藻類所受影響為何，國內相關的研究似乎不多。綜觀前述汙染源主要集中在沿海潮間帶地區，而查閱文獻得知「石蓴」為台灣潮間帶地區廣泛分布的大型藻類之一(文獻七，2010)，教科書中亦有提及，因此我們決定以海水酸化對石蓴的影響為主題作進一步深入的探討。綜合上述，擬出下列六點研究目的:

一、初步探查西部潮間帶地區石蓴生存現況

(一) 台中高美濕地海域

(二)台中火力發電廠、彰濱工業區海域

(三)屏東車城海域

二、二氧化碳誘導的不同 pH 值酸化海水對石蓴光合作用產氧量之影響

三、硫酸誘導的不同 pH 值酸化海水對石蓴光合作用產氧量之影響

四、鹽酸誘導的不同 pH 值酸化海水對石蓴光合作用產氧量之影響

五、石蓴光合作用對酸化海水 pH 值回升效果之評估

六、觀測不同二氧化碳濃度誘導的酸化海水對石蓴長期生存之影響

(一) 石蓴生存型態及重量之變化

(二) 石蓴光合作用回復能力評估

參、研究設備及器材

一、研究器材:

鹽酸、硫酸、碳酸氫鈉、人工海鹽(海水素)、水草營養液、玻璃魚缸(2 尺)、電子天平、pH 計、照相機、電子溫度計、二氧化碳鋼瓶、薊頭漏斗、塑膠針筒、三路活塞、冷水循環機(MoDeL HC-150A)、植物生長箱、日光燈具、二氧化碳玻璃細化器、打氣幫浦、鹽度計、照度計(2X-101)、定時器。

二氧化碳鋼瓶

pH 計

冷水循環機

鹽度計

照度計

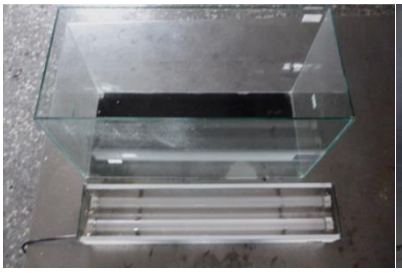
植物生長箱

三路活塞(上)、塑膠針筒

蔪頭漏斗、CO2 細化器

人工海鹽(海水素)

圖一 實驗器材



2 尺水缸、日光燈

電子目鏡

二、人工海水調製:

每 100 克的人工海鹽攪拌溶入 3 公升自來水中，依此比例調配所需海水量，每次調配以鹽度計監控鹽度約在 3.0 至 3.2%之間。

三、自製研究設備:

圖二 自製大型恆溫水浴槽
以水浴方式控制水缸中海水溫度

圖三 自製光合作用氣體收集器

1.自製大型恆溫水浴槽:

將保麗龍板平舖在地上，其上鋪以防水膠布，再將四周以塑膠箱、磚頭、鐵夾等固定圍出一 2mx6mx0.2m 大小之水槽。水槽裡加水至約三分之一高度。水槽旁裝上冷水循環機及沉水馬達以控制水槽中的水溫;最後再將四個 2 尺魚缸並排放入水槽中，以水浴方式維持水缸中的水溫(圖二)。

2.自製氣體收集器(以下簡稱收集器):

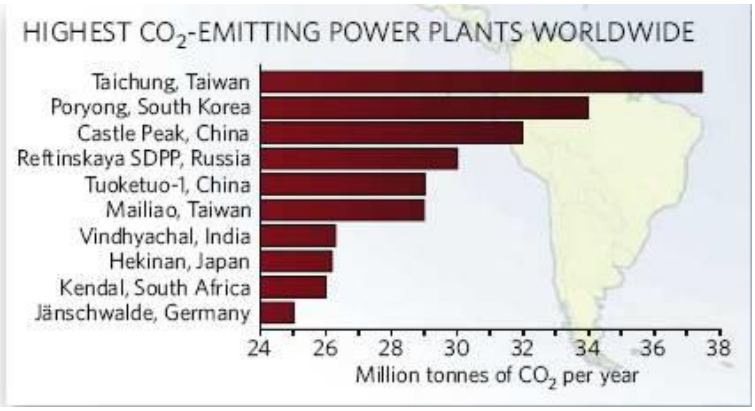
將三路活塞接在 3ml 針筒上，再把薊頭漏斗的尾端嵌上針筒尾部洞口，用止洩帶把針筒與漏斗的相接處加以綑綁固定(圖三)。

肆、研究方法、結果及討論

一、初步探查西部潮間帶地區石蓴生存現況

(一) 研究方法:

1.台灣大型工廠及工業區主要集中在西部沿海，查閱文獻得知其中台中火力發電廠及六輕麥寮電廠 CO_2 排放量曾分居全球第一及第六(圖四,文獻九)。由於我們居住在台中市，故決定前往台中火力發電廠海域附近，以觀察、拍照、記錄等方式並口訪當地居民、漁釣客，實地了解大型藻類生存情形。



圖四 全球火力電廠 CO2 排放最多前十名，台灣名列第一及第六，分別是台中火力電廠(超過 0.37 億噸)及台塑麥寮電廠(0.29 億噸)。

※ 資料來源：Nature Vol 450, November 2007

2.高美濕地屬於中南部典型的泥灘海域，亦為中部觀光勝地，假日人潮眾多，在頻繁的人為干擾下，是否有石蓴分布?分布情形又是如何?我們亦將此處列為實地探查的區域。

3.南部高屏沿海主要為珊瑚礁岩散佈的砂質海岸，我們將師長及學術單位(屏東東港生技研究中心)不定期調查所獲資料加以整理分析，進一步比較此區域大型藻類與中部是否有所不同?

4.其他區域則以廣泛蒐集相關學術研究的文獻為主，新聞時事的報導為輔，據以推測當地實際的生態樣貌。

(二)結果與討論

1.台灣的石蓴種類經學者黃淑芳調查，共分為 2 屬，12 種；從南到北廣泛分布於沿海潮間帶地區(文獻九,2010)。台中火力電廠附近海域分布情形又是如何?

台中火力電廠排放黑煙，屢遭居民抗議

電廠冷卻水出海口及整排的消波塊

近距離觀察消波塊上並無大型藻類附於其上

汙濁的冷卻水與一般海水外觀明顯不同

彰濱工業區(線西區)海域佈滿礫石及牡蠣殼，其上並無大型藻類，且 pH 值似乎偏高

圖五 台中火力電廠及彰濱工業區(線西區)附近海域大型藻類探勘

2. 我們在台中火力發電廠冷卻水出水口、外側堤防及岸邊消波塊上仔細搜尋，皆未發現有石蓴或其他大型藻類蹤影。

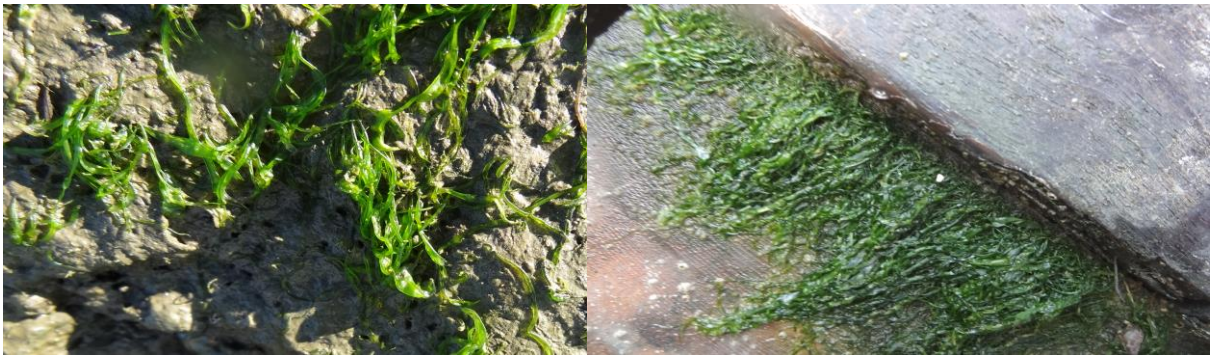
3. 彰濱工業區(線西區)海域有不少蚵架，岸邊佈滿礫石及牡蠣殼，亦未發現有大型藻類。

4. 查訪附近居民、釣客，對火力電廠排放黑煙似乎早已習以為常，並表示在星期五傍晚或大雨剛過時，放流口及附近大排水溝常會有大量不同顏色水體流出，懷疑為附近工廠趁機偷排廢水所致(附錄圖)。

高美濕地假日人潮眾多，凸出泥砂灘地的廢棄漁具附生細如絲髮的海藻，顯微鏡下觀察直徑小於 0.5mm，並非石蓴。

在漂流木上終於找到石蓴(扁石髮)；離岸較遠(約 1.5km)處亦發現有扁石髮直接附於泥灘地上生長。

濕地南側消波塊及堤岸邊坡上亦附有不少藻類



邊坡上附生的藻類主要亦為扁石髮；回程在木棧道階梯下赫然發現竟也有扁石髮。

圖六 清水高美濕地大型藻類探勘

5. 高美濕地已成為中部著名的觀光景點，在遊客活動區內極可能因人為的踩踏致使泥灘地上石蓴等大型藻類難以生存，而在離岸較遠處人跡較少處則真的發現有石蓴(扁石髮)附於泥灘地上生長，此亦間接證實了我們的想法。

6.反之，在泥灘地的凸出物上，不論是廢棄漁具、漂流木、礁石上皆可發現以扁石髮為主的大型藻類。

7.相對於台中電廠消波塊或邊坡上並無大型藻類，此處則仍有不少石蓴附生，顯見電廠水質極可能已對大型藻類生存產生負面的影響。

春季屏東車城沿海礁岩上佈滿大型藻類

長度可達 20cm 的裂片石蓴

形態似牡丹花的石蓴科藻類--牡丹菜

牡丹菜與石花菜(紅藻)交錯混生

冬季礁岩上大型藻類族群明顯變少

冬季礁岩上附生藻類主要為牡丹菜

圖七 南部屏東車城沿海潮間帶大型藻類探勘

8.圖七顯示，春季時(4 月)屏東沿海潮間帶礁岩上石蓴生長相當茂盛，由師長探勘所攜回的資料整理屬石蓴科的藻類計有:牡丹菜、裂片石蓴、菜石蓴、扁石髮等四種。
9.冬季時(12 月)師長野調發現相同棲地上大型藻類族群明顯變少，石蓴科只剩牡丹菜分布較廣，但葉狀體明顯較春季時為小。
10.綜合上述這些區域野調結果，我們發現影響石蓴分布的種類數量除了與生存環境(泥灘地、砂灘地、珊瑚礁岩、水泥消波塊、、)、季節有關之外，人為的干擾及污染皆已對其產生一定程度的影響，尤其是汙染對其生存的影響到底如何?頗值得進一步的探討。
11.我們請教了國內石蓴養殖專家蘇惠美博士(屏東東港水產試驗所)，決定以石蓴科中葉狀體較大，具經濟價值的菜石蓴及數量眾多，生長期較長的牡丹菜這兩種石蓴作為研究的對象。其中菜石蓴由蘇惠美博士提供，牡丹菜則由師長在屏東沿海海域採得。
12.參考學者黃淑芳所編纂「台灣產石蓴之分類及生態研究」(文獻九，2010)，將兩者間的差異比較羅列如表一所示。

表一 菜石蓴及牡丹菜型態特徵及生態習性之比較

俗名	菜石蓴	牡丹菜
學名	*Ulva lactuca Linnaeus*	*Ulva conglobata Kjellman*
分類	綠藻植物門(chlorophyta)、石蓴綱(Ulvophyceae)、石蓴目(Ulvales)、石蓴科(Ulvaceae)	
圖片		
型態特徵	葉狀體呈草綠色薄膜狀，由兩層細胞構成，寬約 5cm，長度可達 30cm。邊緣有缺刻或不規則開裂，但不縱裂至基部；基部由許多假根狀細胞組成盤狀附著器。	葉狀體呈草綠色、膜質稍硬，由兩層細胞構成；葉片常縱裂至基部形成如牡丹花狀之團塊，約 2~5cm；基部以盤狀附著器附於岩石上。
生態習性	生長在中、低潮帶至潮下帶二米深礁岩上；產於台灣各地海岸，繁盛期在 2~4 月，東北角全年均可見。	主要生長在上、中潮帶礁岩上；台灣產於北部、東北部、恆春半島及各離島；繁盛期在 5~6 月。

二、不同二氧化碳濃度誘導的酸化海水對石蓴光合作用產氧量之影響

海洋不斷吸收二氧化碳，適量的二氧化碳可能會促進藻類的光合作用；過量的二氧化碳則可能會使海水酸化進而抑制光合作用。因此，我們首先想探討以二氧化碳誘導的不同 pH 值酸化海水中，對石蓴光合作用產氧量的影響會是如何?

(一)方法:

1. 準備四個 2000ml 的燒杯，在裡面放置 1000ml 的海水，並打入二氧化碳調製成 pH8、pH7、pH6、pH5 的海水，其中 pH8 為對照組。

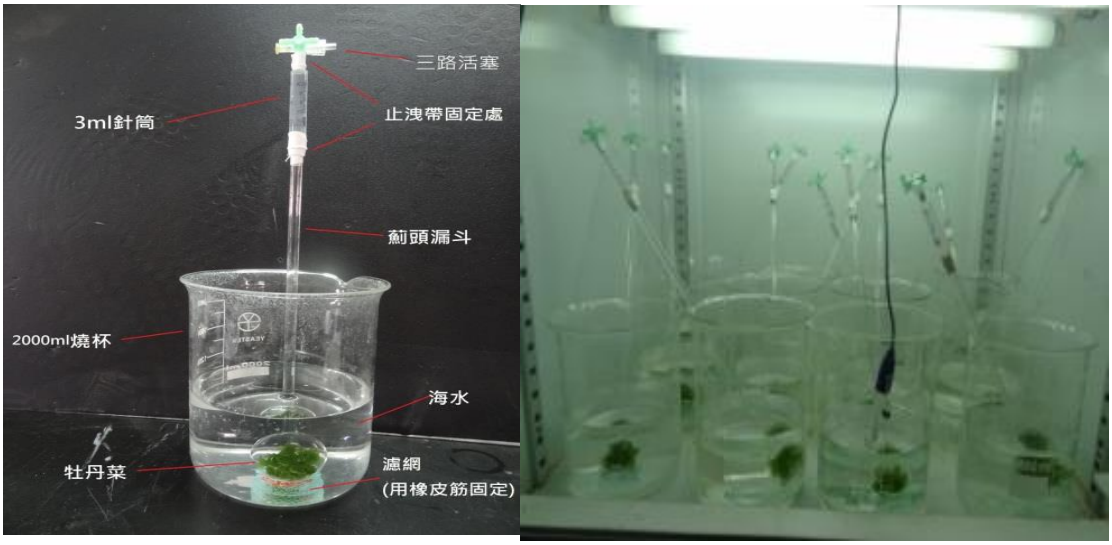
2. 在每組燒杯裡放入兩支氣體收集器，其中一支放入 1g 菜石蓴(牡丹菜)，兩支收集器皆用濾網包覆以橡皮筋固定，最後倒置收集器於海水中，並以另一針筒接上三路活塞後將收集器內氣體抽出，最後使漏斗內充滿海水。

3. 將實驗組及對照組組裝完成後，放入植物生長箱內，溫度控制在 21 度，照度約 1200Lux。

照光 24 小時後，將燒杯從生長箱中取出，把裝有藻類的收集器的氣體含量扣掉沒有藻類的收集器內氣體含量即為光合作用產氧量。

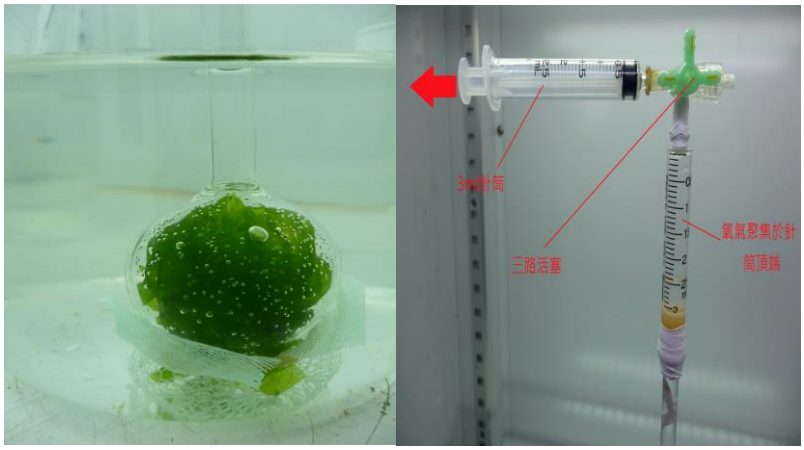
4. 將各 pH 值的產氧量除以對照組的產氧量再乘以 100%，即為「相對產氧率」。實驗重複三次求取平均值。相對產氧率=實驗組的產氧量/對照組的產氧量 x100%

以二氧化碳調製出不同 pH 值的酸化海水



氣體收集器浸入不同 pH 值酸化海水中，將實驗、對照組放入植物生長箱內

圖八　二氧化碳誘導的不同 pH 值酸化海水中，石蓴光合作用氧氣收集實驗步驟



圖九 石蓴光合作用產生的氧氣收集於針筒內，由針筒上刻度可立即讀出氧氣的體積(ml)。

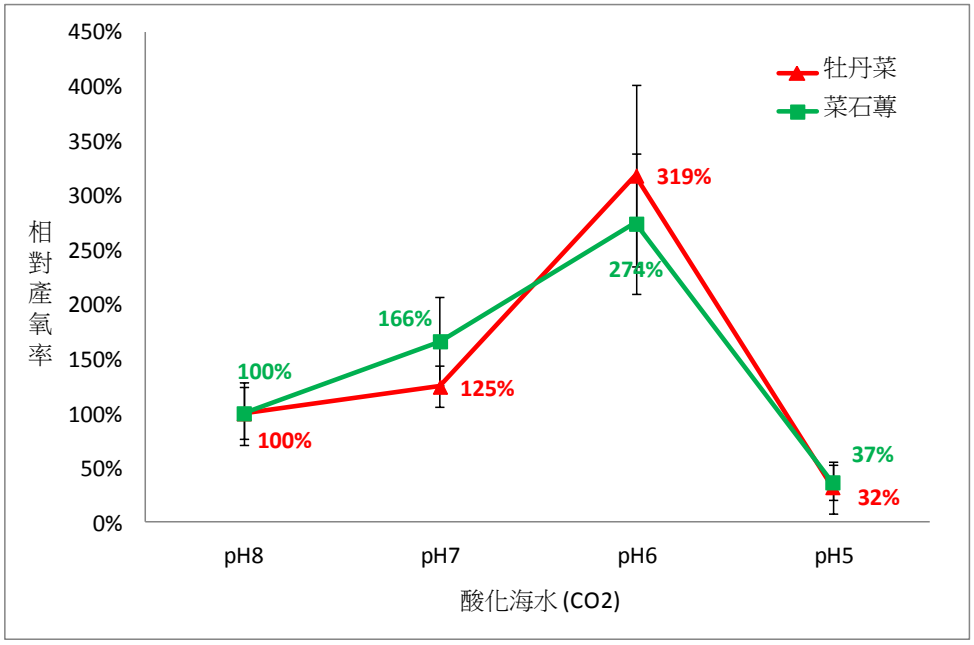
(二)結果與討論：

表二 不同CO2濃度誘導的酸化海水對牡丹菜光合作用產氧量之影響

海水	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率
pH8	1.64	1.92	2.11	1.89	100%
pH7	2.17	2.55	2.34	2.35	125%
pH6	6.75	6.20	5.12	6.02	319%
pH5	0.87	0.40	0.55	0.61	32%

表三 不同CO2濃度誘導的酸化海水對菜石蓴光合作用產氧量之影響

海水	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率
pH8	1.58	1.10	1.62	1.43	100%
pH7	2.85	2.17	2.13	2.38	166%
pH6	3.62	4.67	3.51	3.93	274%
pH5	0.40	0.70	0.47	0.52	37%



圖十　不同 CO_2 濃度誘導的酸化海水中牡丹菜及菜石蓴光合作用之相對產氧

1. $6CO_2+12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6+ 6H_2O+ 6O_2$ 為光合作用總反應式；$CO_2+H_2O \leftrightarrows H_2CO_3 \leftrightarrows H^+ +HCO_3^- \leftrightarrows 2H^+ +CO_3^{2-}$ 則為二氧化碳溶在水裡所進行的相關化學反應；CO_2 為光合作用的反應物，反應物濃度升高自會促進光合作用的進行，使產氧量增加；相反地，CO_2 的升高亦會使海中的氫離子濃度升高，這些氫離子會降低海水 pH 值，進而使葉綠體內光合作用的相關酵素因酸鹼值的改變導致影響光合作用速率(文獻二,2011)。這兩種彼此相反的「正負效應」，其互相抵銷的「平衡交叉點」落在 pH 值何處呢?
2. 實驗結果發現在 pH6~8 的範圍內，隨著 CO_2 濃度升高，短期內(24hr)確實會促進石蓴光合作用的產氧量。當起始 pH 值低至 6 時，石蓴的產氧量甚至可達對照組的 3 倍左右(274~319%)。然而，當海水繼續酸至 pH=5 時，石蓴的光合作用明顯受到抑制，產氧量降至只剩約為對照組的 1/3(32~37%)。亦即酸化海水的 pH「平衡交叉點」落在 5~6 之間。
3. 我們曾試著在 pH5~6 之間多做幾點，以進一步確認其更精確的 pH 值。由於無法全天候調控海水 pH 值，當白天起始 pH 值控制在 5.0 時，放學後至隔天早上七點 pH 值約升至 5.8，故只好放棄；若能有自動控制 pH 值系統，應可找出此「平衡交叉點」之值為何。
4. 全球海洋酸化最嚴重區域在北大西洋海域(文獻十一，2004)，此處工業活動繁盛。我國則集中在西部海域，然而海水有可能低至 5 嗎?查閱六輕麥寮電廠環境影響書(文獻五,2011)得知使用「排煙脫硫」方式以海水吸收燃煤的廢氣初始 pH 值約 2~3，利用海水的鹼度循環貫流後 pH 值即約為 5.0,須藉曝氣、添加氫氧化鈉及大量的海水稀釋後方可達 pH7.6 的甲類海水排放標準。學者指出麥寮電廠常省略添加鹼液的步驟(文獻八,2007)，直接排入周圍海水中，若如此極有可能對海中的大型藻類如石

蓴等生存造成影響，長期下來是有可能對當地海洋生態造成一定程度的破壞，進而影響到當地的漁業及養殖業。

三、不同硫酸濃度誘導的酸化海水對石蓴光合作用產氧量之影響

上述電廠排煙脫硫的方式造成海水酸化原因除二氧化碳外，硫氧化物溶於水中亦會產生 H_2SO_3、H_2SO_4 等強酸，其對石蓴的影響與 CO_2 形成的碳酸有何不同?是否更加嚴重?並進一步比較兩者間的差異。

(一)方法:

1. 準備 7 個 2000ml 的燒杯，裡面放置 1000ml 的海水，使用滴管緩慢滴入 1M 的硫酸，調配出實驗所需要的 pH 值(pH8、pH7、pH6、pH5 、pH 4 、pH 3 、pH 2)，其中對照組為 pH8。
2. 每組燒杯內放置一支裝有 1g 牡丹菜(菜石蓴)的氣體收集器，用濾網包覆並以橡皮筋固定，餘實驗步驟同研究二。
3. 24 小時後測量氣體含量，實驗三重複求平均值，並計算各 pH 值的「相對產氧率」。

圖十一 以 1M 硫酸調出所需 pH 值的酸化海水

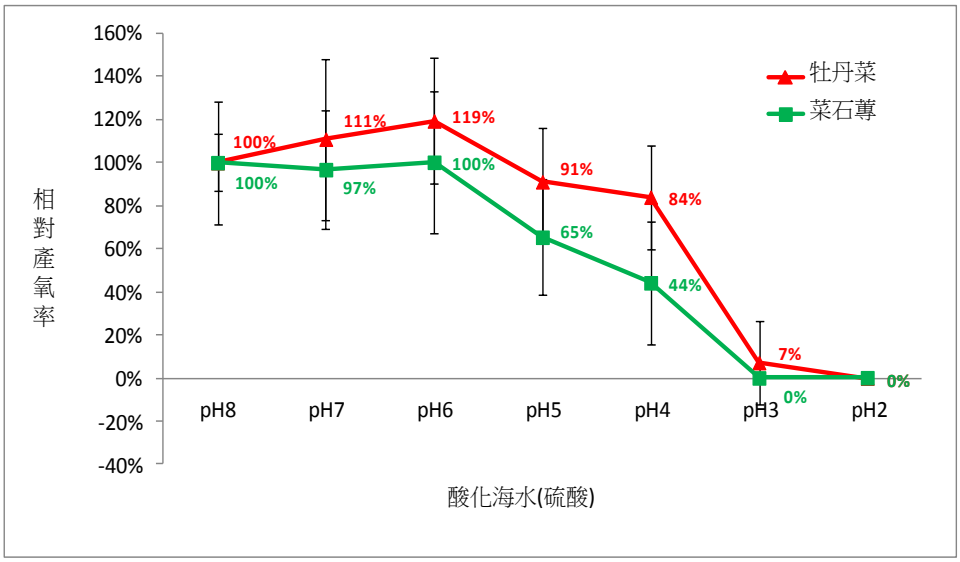
(二)結果與討論：

表 四 不同硫酸濃度誘導的酸化海水對牡丹菜光合作用產氧量之影響

海水	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率
pH8	2.14	2.39	2.34	2.29	100%
pH7	2.48	2.94	2.20	2.54	111%
pH6	2.41	2.98	2.81	2.73	119%
pH5	2.19	2.27	1.80	2.09	91%
pH4	1.89	1.70	2.18	1.92	84%
pH3	0.16	0.00	0.39	0.18	7%
pH2	0.00	0.00	0.00	0.00	0%

表五 不同硫酸濃度誘導的酸化海水對菜石蓴光合作用產氧量之影響

海水	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率
pH8	3.71	3.41	3.14	3.42	100%
pH7	3.20	3.62	3.11	3.31	97%
pH6	3.12	3.77	3.39	3.43	100%
pH5	1.93	2.36	2.42	2.24	65%
pH4	1.74	1.19	1.61	1.51	44%
pH3	0.00	0.00	0.01	0.00	0%
pH2	0.00	0.00	0.02	0.01	0%



圖十二 不同硫酸濃度誘導的酸化海水中牡丹菜及菜石蓴光合作用之相對產氧率

1.煤炭中含有硫，燃燒後會產生二氧化硫，溶於水後形成亞硫酸，充分曝氣後則形成硫酸，兩者在水中會完全解離出氫離子，皆為強酸。其化學反應式如下:

$S+O_2 \rightarrow SO_2$ ；$SO_2+H_2O \rightarrow H_2SO_3$ ； $H_2SO_3 \rightarrow 2H^+ + SO_3^{-2}$

$H_2SO_3+1/2O_2 \rightarrow H_2SO_4$ ； $H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{-2}$

2.電廠將燃煤廢氣灌入海水中，利用其鹼度中和酸性，形成硫酸鎂等鹽類但仍偏酸(pH4~6)；如前所言，須加鹼液曝氣後方可達排放標準。這種含硫酸根的酸化海水與與碳酸相較，何者對藻類影響較大?

3.在 pH8~6 範圍內，隨著酸度的增加，硫酸誘導的酸化海水對菜石蓴的相對產氧率(97~100%)並無明顯的影響；牡丹菜似有些微的增加(111~119%)，但若比較個別的數據，差異並不大。反之，此範圍內 CO_2 誘導的酸化海水因有碳源的供應，相對產氧率明顯增加，pH6 時可達近三倍(274~319%)的產氧量。

4.當 pH 小於 6 時，隨著 pH 值的降低，兩種藻類的相對產氧率亦跟著降低；pH 低至 3 以下，藻類浸入約半小時即可見白化退色現象，產氧量趨近於 0(圖十三)。

5.進一步比較兩種藻類的相對產氧率亦有不小的差距。硫酸誘導的酸化海水對菜石蓴的影響似乎較為嚴重，在 pH6~4 範圍內其相對產氧率遠低於牡丹菜，pH4 時其產氧率(44%)約只有牡丹菜的 1/2(84%)。

6. pH 值為 5 時的相對產氧率最為奇特；硫酸誘導的酸化海水中，兩種藻類仍有 91~65%的相對產氧率，但 CO_2 誘導的酸化海水卻低至只剩 37~32%。在相同的 pH 值下，為何有提供碳源的酸化海水光合作用效率反而較差?我們推測海水中的其他粒子，如 H_2CO_3、HCO_3^-、CO_3^{-2}、SO_4^{-2} 等，應亦具有某種程度的影響性。反之，單純的氫離子對藻類的光合作用影響

圖十三 硫酸誘導的 pH 值 3 之酸化海水(左)，藻類浸入約半小時即白化，右為對照組

到底如何?

四、不同鹽酸濃度誘導的酸化海水對石蓴光合作用產氧量之影響

由於海水中有為數極多的氯離子，因此我們以微量的 1M 鹽酸(HCl)調製出不同 pH 值的酸化海水，據此進一步探討單純 H^+的增加，對石蓴光合作用的影響，並比較其與 CO_2及硫酸誘導的酸化海水間之差異。

(一)方法:

1.同研究目的三，除了將硫酸改為以鹽酸調製外，餘步驟皆相同。

(二)結果與討論:

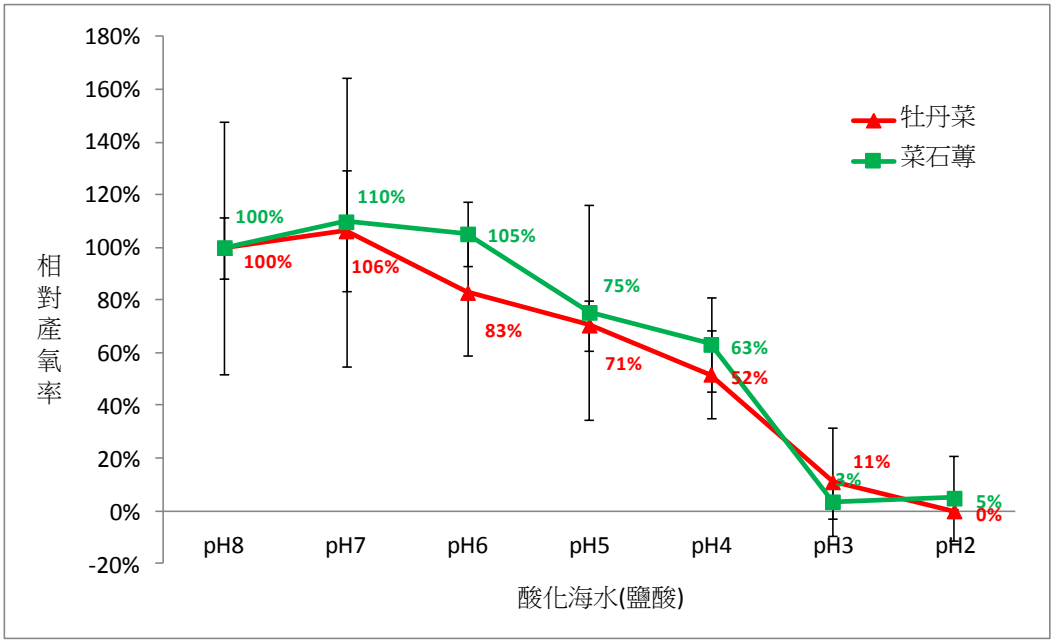
圖十四 以 1M 鹽酸調製所需 pH 值的酸化海水

表六 不同鹽酸濃度誘導的酸化海水對牡丹菜光合作用產氧量之影響

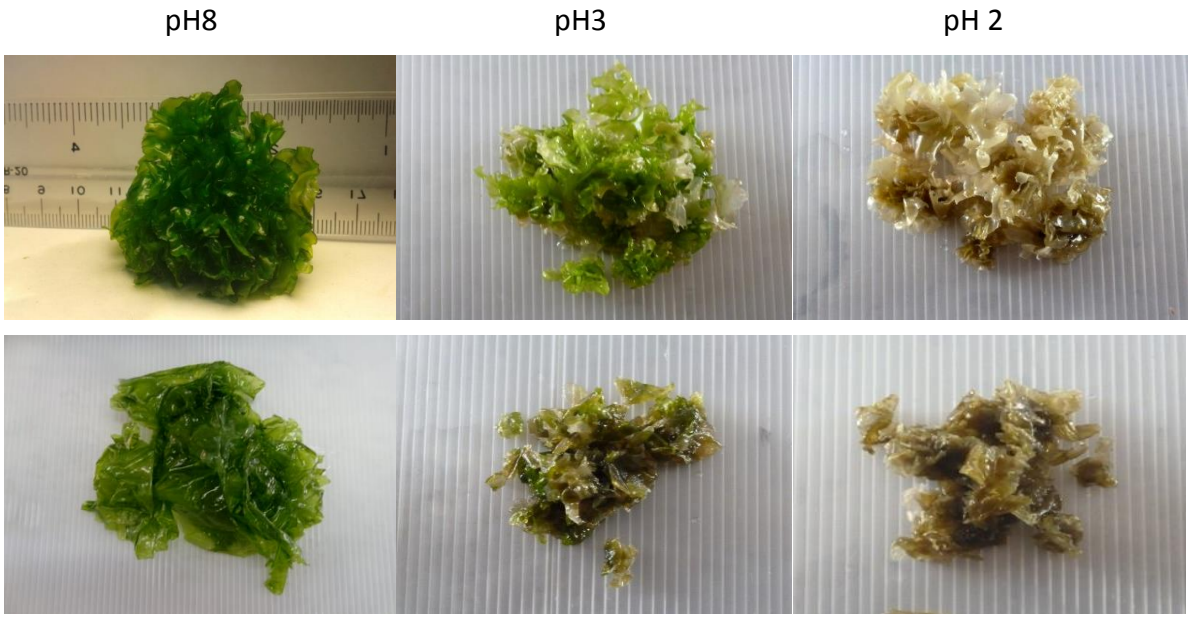
海水	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率
pH8	2.24	2.13	2.01	2.13	100%
pH7	2.24	2.50	2.04	2.26	106%
pH6	1.92	1.88	1.49	1.76	83%
pH5	1.44	1.61	1.45	1.50	71%
pH4	0.91	1.21	1.19	1.10	52%
pH3	0.02	0.41	0.32	0.25	11%
pH2	0.01	0.00	0.00	0.00	0%

表七 不同鹽酸濃度誘導的酸化海水對菜石蓴光合作用產氧量之影響

海水	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率
pH8	2.91	2.27	1.97	2.38	100%
pH7	2.13	3.21	2.51	2.62	110%
pH6	2.64	2.47	2.41	2.51	105%
pH5	1.63	1.50	2.26	1.80	75%
pH4	1.43	1.38	1.71	1.51	63%
pH3	0.01	0.11	0.13	0.08	3%
pH2	0.00	0.05	0.30	0.12	5%



圖十五 不同鹽酸濃度誘導的酸化海水中牡丹菜及菜石蓴光合作用之相對產氧率



圖十六 鹽酸誘導下的酸化海水(pH3 、pH2)，24hr 後牡丹菜(上排)及菜石蓴(下排)已有明顯受損白化的情形

1.鹽酸滴入海水中可完全解離出氫離子及氯離子，由於滴入的量極少，對原先海水中氯離子濃度影響極微，故可單純針對氫離子濃度的增加，做進一步的探討。

2.二氧化碳溶在海水裡所解離的方程式為 $CO_2+H_2O \leftrightharpoons H_2CO_3 \leftrightharpoons H^+ + HCO_3^- \leftrightharpoons 2H^+ + CO_3^{2-}$。由圖十五結果，我們推測隨著 H^+ 濃度的增加(pH8~7 範圍內)，會促進上述逆反應的進行，使海水中的 HCO_3^- 及 H_2CO_3 增加，此與二氧化碳溶在海水中的效果相似，也因此使兩種

藻類的的相對產氧率有些微幅度的提升。

3. 氫離子濃度會影響藻類光合作用等酵素的作用。在 pH7~6 時，藻類相對產氧率幾乎已無增加，且氫離子的負效應開始顯現在牡丹菜上(83%)，隨著海水愈酸(pH 值愈低)，兩種石蓴的相對產氧率亦跟著下降；當 pH 低至 3 以下時，石蓴亦呈現白化的現象，產氧量幾近於 0。

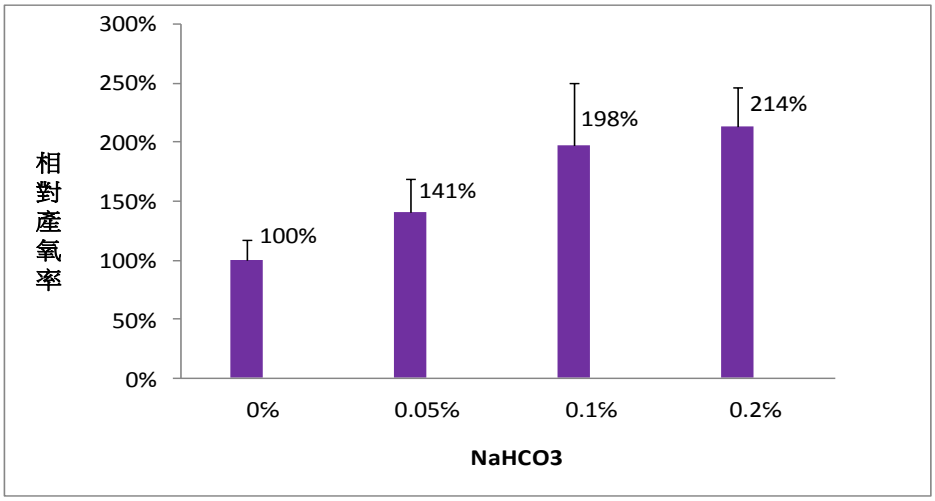
4.進一步與硫酸誘導的酸化海水比較，兩者曲線(圖十二、十五)大致上呈現相近的趨勢:在 pH8~6 的範圍內，石蓴相對產氧率有些微的增加；pH6 以下，隨著海水愈酸，相對產氧率就愈低；pH3 以下石蓴及白化趨近死亡。

5.無論是鹽酸或硫酸誘導的酸化海水，pH5 時仍有 7~8 成左右(91、65、75、71%)的相對產氧率；為何有外加碳源的 CO_2 誘導之酸化海水，相對產氧率反而大幅降低(32~37%)?我們懷疑水中過多的 CO_2 是否反而會傷害或阻礙藻類進行光合作用?其次，藻類行光合作用能利用的碳源只有 CO_2?或還有其他的形式?

6.搜尋文獻得知某些水生植物或藻類能直接吸收利用碳酸氫根離子(HCO_3^-)進行光合作用(文獻二，2011)，石蓴是否亦是如此?我們又進行了一項實驗，以碳酸氫鈉粉末調配出不同濃度的海水，測試石蓴的產氧量，結果發現在碳酸氫鈉可溶的範圍內，隨著濃度的升高，其產氧量亦隨之增加(表八，圖十七)，這證實了石蓴有直接利用 HCO_3^- 進行光合作用的能力。

表八 不同碳酸氫鈉濃度的海水對牡丹菜光合作用產氧量之影響

$NaHCO_3$	1	2	3	平均〔ml〕	相對產氧率(%)
0%	3.46	3.14	3.41	3.34	100%
0.05%	4.90	4.38	4.84	4.71	141%
0.1%	6.02	6.81	7.00	6.61	198%
0.2%	6.90	7.51	7.00	7.14	214%



圖十七 不同碳酸氫鈉濃度的海水中牡丹菜之相對產氧率

7.據此，我們提出的假設是「pH5 時海水中 HCO_3^-的濃度降低使得石蓴的產氧量下降，而過多的 CO_2阻礙了光合作用的進行，使得產氧量更為降低」。然而，實際上海水是一個含有眾多物質、相當複雜的緩衝系統，其中牽涉的反應變因相當多，對此疑問仍須有更多的研究方能釐清酸化海水與石蓴藻類之間的交互關係。

8.目前只探討酸化海水對石蓴短期內光合作用產氧量的影響；相反地，石蓴對海洋環境的影響又是如何?

五、石蓴光合作用對酸化海水 pH 值提升效果之評估

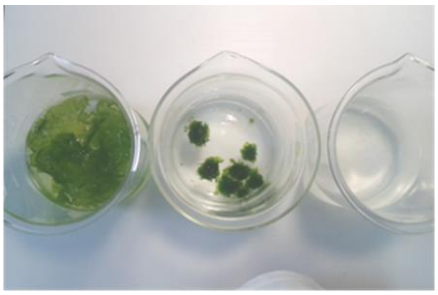
海水酸化對石蓴的光合作用造成一定程度的影響；相反地，石蓴行光合作用吸收了水中的 CO_2 等碳源，間接地是否亦能降低海水中的氫離子濃度? 降低氫離子濃度量為何？對提升海洋 pH 值有何貢獻？

(一) 石蓴長期光合作用下，對 pH5 酸化海水(CO_2誘導)中氫離子的影響

1.方法:

(1)準備兩個 2000 ml 的燒杯，先將 2000ml 的海水倒入其中一個燒杯中，以二氧化碳調配出 pH 值約 5 的酸化海水；再將其中 1000ml 海水倒入另一燒杯中，使兩杯海水的 pH 值皆相等。

(2)在其中一個燒杯中放進 3g 的牡丹菜(菜石蓴)作為實驗組，只含酸化海水的燒杯為對照組。將裝置放入植物生長箱中，溫度控制在 21 度，照度約 1200Lux。



圖十八 3g 的菜石蓴、牡丹菜置入 pH 值 5 的酸化海水中行光合作用

(3)每 24hr 後，以 pH meter 測量實驗組及對照組海水的 pH 值，再帶入公式換算出氫離子的濃度，共持續 4 天(96hr)。實驗皆三重複，以求取平均值。

2.結果與討論:

表九 牡丹菜光合作用對pH5酸化海水中氫離子濃度之影響(1st實驗)

		0hr	24hr	48hr	72hr	96hr
實驗組	pH	5.40	7.06	8.29	8.78	8.93
	〔H^+〕	3.98E-06	8.71E-08	5.13E-09	1.66E-09	1.17E-09
對照組	pH	5.40	6.84	7.66	7.96	8.07
	〔H^+〕	3.98E-06	1.45E-07	2.19E-08	1.10E-08	8.51E-09

註:實驗組內放入3g牡丹菜；對照組只有酸化海水；1.00E-07=1×10^{-7}

表十 牡丹菜光合作用對pH5酸化海水中氫離子濃度之影響(2nd實驗)

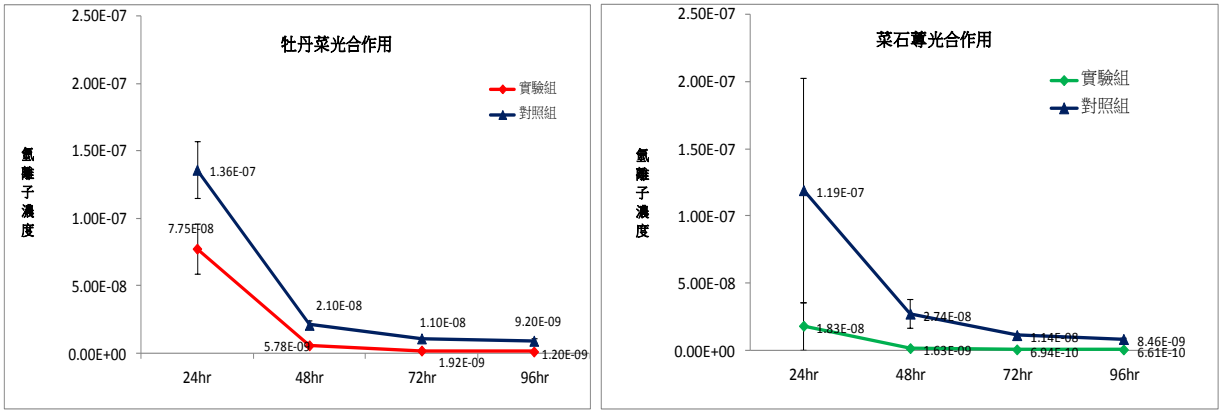
		0hr	24hr	48hr	72hr	96hr
實驗組	pH	5.42	7.05	8.20	8.72	8.97
	〔H^+〕	3.80E-06	8.91E-08	6.31E-09	1.91E-09	1.07E-09
對照組	pH	5.42	6.82	7.63	7.95	7.96
	〔H^+〕	3.80E-06	1.51E-07	2.34E-08	1.12E-08	1.10E-08

表十一 牡丹菜光合作用對pH5酸化海水中氫離子濃度之影響(3rd實驗)						
		0hr	24hr	48hr	72hr	96hr
實驗組	pH	5.48	7.25	8.23	8.66	8.87
	〔H^+〕	3.31E-06	5.62E-08	5.89E-09	2.19E-09	1.35E-09
對照組	pH	5.48	6.95	7.75	7.97	8.09
	〔H^+〕	3.31E-06	1.12E-07	1.78E-08	1.07E-08	8.13E-09

表十二 菜石蓴光合作用對pH5酸化海水中氫離子濃度之影響(1st實驗)						
		0hr	24hr	48hr	72hr	96hr
實驗組	pH	5.42	7.43	8.77	9.12	9.04
	〔H^+〕	3.80E-06	3.72E-08	1.70E-09	7.59E-10	9.12E-10
對照組	pH	5.42	6.82	7.40	7.89	8.05
	〔H^+〕	3.80E-06	1.51E-07	3.98E-08	1.29E-08	8.91E-09
註:實驗組內放入3g菜石蓴；對照組只有酸化海水						

表十三 菜石蓴光合作用對pH5酸化海水中氫離子濃度之影響(2nd實驗)						
		0hr	24hr	48hr	72hr	96hr
實驗組	pH	5.44	7.80	8.88	9.15	9.22
	〔H^+〕	3.63E-06	1.58E-08	1.32E-09	7.08E-10	6.03E-10
對照組	pH	5.44	6.74	7.67	7.96	8.06
	〔H^+〕	3.63E-06	1.82E-07	2.14E-08	1.10E-08	8.71E-09

表十四 菜石蓴光合作用對pH5酸化海水中氫離子濃度之影響(3rd實驗)						
		0hr	24hr	48hr	72hr	96hr
實驗組	pH	5.37	8.73	8.73	9.21	9.33
	〔H^+〕	4.27E-06	1.86E-09	1.86E-09	6.17E-10	4.68E-10
對照組	pH	5.37	7.61	7.68	7.99	8.11
	〔H^+〕	4.27E-06	2.45E-08	2.09E-08	1.02E-08	7.76E-09



圖十九 石蓴長期光合作用下，對 pH5 酸化海水(CO_2誘導)中氫離子濃度的影響

(1) $CO_2+H_2O \leftrightarrows H_2CO_3 \leftrightarrows H^+ + HCO_3^- \leftrightarrows 2H^+ + CO_3^{2-}$為二氧化碳溶在水裡的相關化學反應式，當石蓴行光合作用消耗反應物 CO_2 時，會促進逆反應進而使 H^+濃度降低，實驗結果(表九~十四)亦顯示有藻類的實驗組其 H^+濃度皆較對照組為低。且實驗組在第二天(48hr)時即可將 pH5 酸化海水提升至正常值(pH8)以上，而對照組 CO_2 藉自然飄散的方式約至第四天(96hr)才恢復正常，顯見海洋的生產者對海水 pH 值的穩定具有一定程度的貢獻。

(2)由圖十九可知，無論是牡丹菜或菜石蓴，實驗組與對照組在第一天(24hr) H^+濃度差距最大，因此我們進一步想問的是:扣除對照組中 CO_2 的自然飄散，由藻類光合作用降低的 H^+濃度到底有多少?除了 pH5 以外，其他 pH 值的酸化海水中，石蓴的 pH 值提升能力又是如何?

(二) 不同 pH 值酸化海水(誘導)中，石蓴光合作用對 H^+濃度降低效果之評估

1.方法:

(1) 但以 CO_2 調配出 pH8、pH7、pH6、pH5 等四種濃度的酸化海水，每種濃度各兩杯，其中一杯放入 3g 牡丹菜(菜石蓴)作為實驗組，另一杯為空白對照組。

(2) 其餘步驟同上一個實驗，照光 24hr 後，測量實驗組及對照組海水的 pH 值，再帶入公式換算出 H^+濃度，再用對照組扣減實驗組的 H^+濃度即為石蓴的 H^+濃度降低量。實驗皆重複三次求平均值。

石蓴的 H^+濃度降低量:△〔H^+〕=對照組〔H^+〕－實驗組

2.結果與討論:

表 十五 牡丹菜在不同pH值酸化海水中照光24hr後 H^+ 降低量(1st 實驗)

pH值區段	酸化海水(0hr)		對照組24hr (無 牡丹菜)		實驗組24hr (有 牡丹菜)		〔H+〕降低量
	實際pH	實際〔H^+〕	pH	〔H^+〕	pH	〔H^+〕	△〔H+〕
pH8	7.98	1.05E-08	7.98	1.05E-08	8.79	1.62E-09	8.85E-09
pH7	7.18	6.61E-08	7.95	1.12E-08	8.61	2.45E-09	8.77E-09
pH6	6.04	9.12E-07	7.5	3.16E-08	8.31	4.90E-09	2.67E-08
pH5	5.08	8.32E-06	6.78	1.66E-07	7.11	7.76E-08	8.83E-08

表十六 牡丹菜在不同pH值酸化海水中照光24hr後 H+ 降低量(2nd 實驗)

pH值區段	酸化海水(0hr)		對照組24hr (無 牡丹菜)		實驗組24hr (有 牡丹菜)		〔H+〕降低量
	實際pH	實際〔H^+〕	pH	〔H^+〕	pH	〔H^+〕	△〔H+〕
pH8	8.04	9.12E-09	8.11	7.76E-09	8.81	1.55E-09	6.21E-09
pH7	7.04	9.12E-08	7.92	1.20E-08	8.80	1.58E-09	1.04E-08
pH6	6.18	6.61E-07	7.67	2.14E-08	8.50	3.16E-09	1.82E-08
pH5	5.14	7.24E-06	6.73	1.86E-07	6.89	1.29E-07	5.74E-08

表十七 牡丹菜在不同pH值酸化海水中照光24hr後 H^+ 降低量(3rd 實驗)

pH值區段	酸化海水(0hr)		對照組24hr (無 牡丹菜)		實驗組24hr (有 牡丹菜)		〔H+〕降低量
	實際pH	實際〔H^+〕	pH	〔H^+〕	pH	〔H^+〕	△〔H+〕
pH8	8.12	7.59E-09	8.09	8.13E-09	8.54	2.88E-09	5.24E-09
pH7	6.93	1.17E-07	7.83	1.48E-08	8.41	3.89E-09	1.09E-08
pH6	6.05	8.91E-07	7.43	3.72E-08	8.19	6.46E-09	3.07E-08
pH5	5.19	6.46E-06	6.63	2.34E-07	6.93	1.17E-07	1.17E-07

表 十八 菜石蓴在不同pH值酸化海水中照光24hr後 H^+ 降低量(1st 實驗)

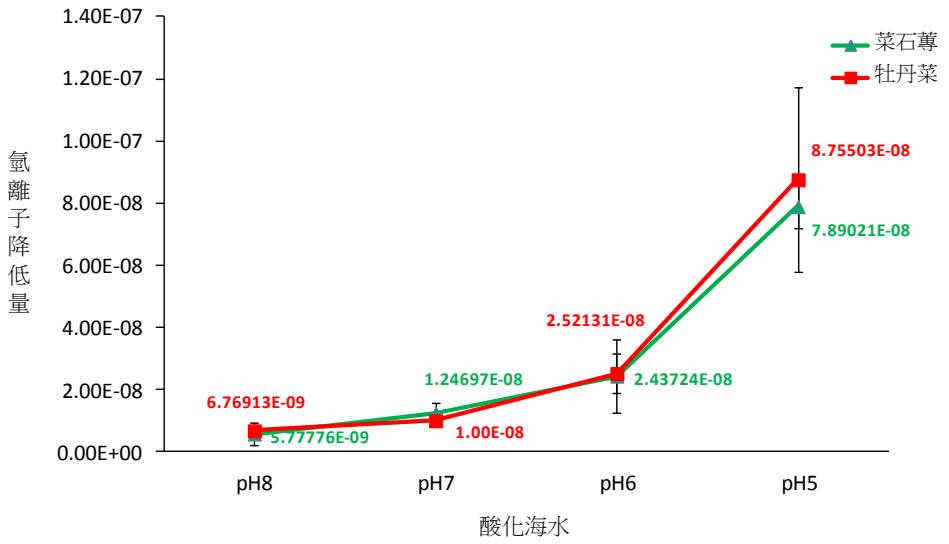
pH值區段	酸化海水(0hr)		對照組24hr (無菜石蓴)		實驗組24hr (有菜石蓴)		〔H+〕降低量
	實際pH	實際〔H^+〕	pH	〔H^+〕	pH	〔H^+〕	△〔H+〕
pH8	8.12	7.59E-09	8.16	6.92E-09	8.28	5.25E-09	1.67E-09
pH7	7.08	8.32E-08	7.42	3.80E-08	7.66	2.19E-08	1.61E-08
pH6	6.07	8.51E-07	6.71	1.95E-07	6.77	1.70E-07	2.52E-08
pH5	5.21	6.17E-06	6.03	9.33E-07	6.07	8.51E-07	8.21E-08

表十九 菜石蓴在不同pH值酸化海水中照光24hr後 H^+ 降低量(2nd 實驗)

pH值區段	酸化海水(0hr)		對照組24hr (無菜石蓴)		實驗組24hr (有菜石蓴)		〔H+〕降低量
	實際pH	實際〔H^+〕	pH	〔H^+〕	pH	〔H^+〕	△〔H+〕
pH8	7.98	1.05E-08	7.95	1.12E-08	8.67	2.14E-09	9.08E-09
pH7	6.94	1.15E-07	7.9	1.26E-08	8.65	2.24E-09	1.04E-08
pH6	6.06	8.71E-07	7.81	1.55E-08	8.46	3.47E-09	1.20E-08
pH5	5.42	3.80E-06	6.87	1.35E-07	7.29	5.13E-08	8.36E-08

表二十 在不同pH值酸化海水中照光24hr後 H^+ 降低量(3rd 實驗)

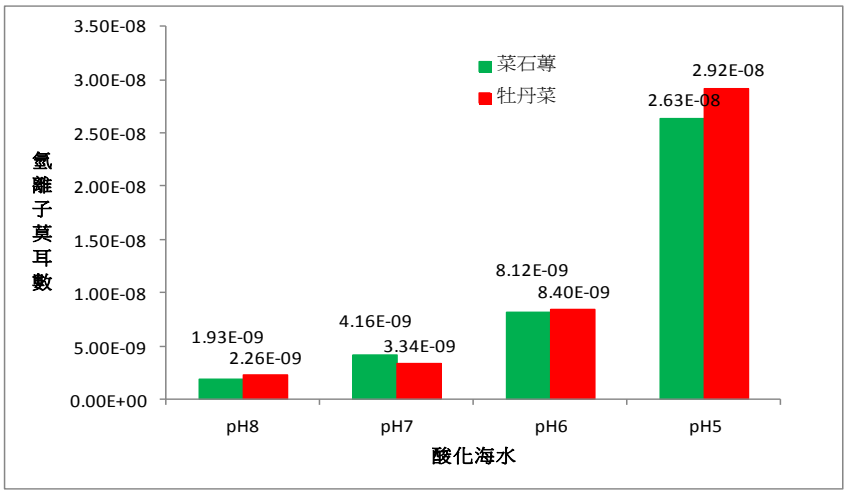
pH值區段	酸化海水(0hr)		對照組24hr (無菜石蓴)		實驗組24hr (有菜石蓴)		〔H+〕降低量
	實際pH	實際〔H^+〕	pH	〔H^+〕	pH	〔H^+〕	△〔H+〕
pH8	8.01	9.77E-09	7.98	1.05E-08	8.41	3.89E-09	6.58E-09
pH7	6.94	1.15E-07	7.81	1.55E-08	8.34	4.57E-09	1.09E-08
pH6	5.96	1.10E-06	7.34	4.57E-08	8.01	9.77E-09	3.59E-08
pH5	5.27	5.37E-06	6.79	1.62E-07	7.04	9.12E-08	7.10E-08



圖二十　牡丹菜及菜石蓴在不同 pH 值酸化海水中氫離子降低量之平均值(Δ〔H+〕)

(1)綜合表十五~二十結果可知，無論是牡丹菜或菜石蓴，在照光 24hr 後，大多可使 pH6 以上的酸化海水恢復至正常狀態(pH8 以上)；相反地，即使 pH8 的海水繼續升高，但 pH 值皆在 9 以下，這亦顯示海水具有一定緩衝溶液的功能。

(2)由圖二十的曲線顯示隨著海水愈酸，石蓴降低氫離子濃度的量亦愈多，這意謂海洋的生產者對未來日益酸化的海水扮演著更加重要的角色。我們進一步換算出 1g 石蓴在每公升不同 pH 值酸化海水中所能降低的氫離子莫耳數，如圖二十一所示。



圖二十一　每公升酸化海水中 1g 石蓴所能降低的氫離子莫耳數

(3) 圖二十一顯示 pH5 時石蓴降低的氫離子莫耳數遠高於其他 pH 值，再比較圖二十的曲線，pH6~5 的斜率明顯高於 pH8~7 或 pH7~6 之斜率，這表示 pH5 時石蓴降低氫離子的效能更為提升。然而，研究二的結果已知此時石蓴的光合作用效能(相對產氧率)大幅降低，為何降低的氫離子的效能卻反而升高?我們推測石蓴在過度酸化的海水中，可能啟

動了某種生理機制，使其具有主動吸收氫離子的能力，藉此改善周圍的環境使本身能繼續生存下去。在搜尋的文獻中，學者高坤山(文獻二，2011)亦明確指出某些藻類確實有此功能；或許我們也已間接證實牡丹菜及菜石蓴亦具有此種能力。

(4)短期而言，石蓴是有助於酸化海水 pH 值的提升，但以目前海洋環境日益惡化的趨勢來看，石蓴是否可以長期生存在酸化海水之中？這是我們下一個研究目的。

六、觀測不同二氧化碳濃度誘導的酸化海水對石蓴長期生存之影響

前面的研究重點主要針對短期內酸化海水對石蓴光合作用的影響，我們想進一步長期觀察石蓴在酸化海水中的生存情形。

(一) 石蓴生存型態及重量之變化

1.方法：

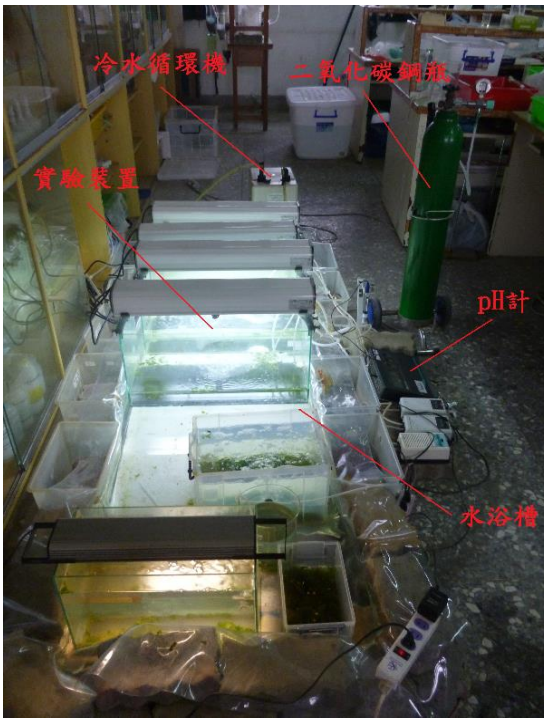
(1) 自製一 2mx6mx0.2m 大小之水槽，水槽裡加水至約三分之一高度。水槽旁裝上冷水循環機及沉水馬達以控制水槽中的水溫在 21±1℃，最後再將四個 2 尺玻璃水缸並排放入水槽中，以水浴方式維持水缸中的水溫(圖二十二，二十三)。

(2) 在每個水缸加入人工海水深 15cm(體積 22.05 公升)、置入溫度計、氣泡石、玻璃棒各一支，正上方架設一盞 60W 雙燈管日光燈，每兩個水缸共用一個打氣幫浦。最後放入鮮重量 15g 的菜石蓴。

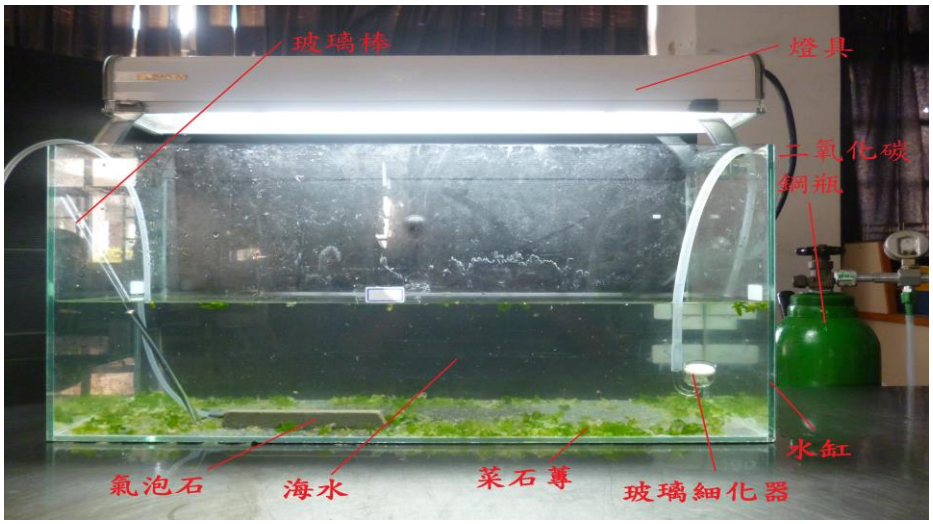
(3)以 CO2 鋼瓶、玻璃細化器調製出四缸海水起始最低 pH 值分別 8.0、7.0、6.0 及 5.0 的酸化海水，其中對照組為 8.0，其餘三組為實驗組。每日 7：30 以二氧化碳控制海水 pH 值至範圍內，下午 5：00 停止打二氧化碳；下午 6：00 定時器自動開啟打氣幫浦打入空氣，直至隔天 6：00 自動關閉(此時海水 pH 值上升皆未超過 1.0)。

(4)每隔第 7、14、21 以及 42 天取出菜石蓴，以擦拭紙輕拭其上水分後，秤量其鮮重量並拍照；另取極少量藻體以顯微鏡觀察其細胞型態之變化。

圖二十二 自製大型恆溫水浴槽



圖二十三 四個水缸置入大型恆溫水浴槽中以控制水缸內水溫驗裝置

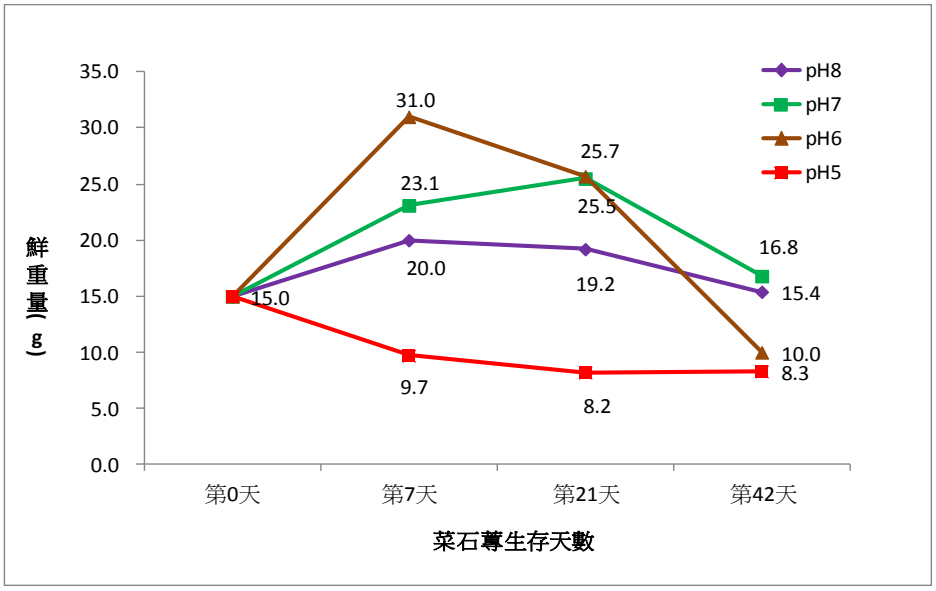


圖二十四 不同 pH 值酸化海水水缸裝置圖，每缸置入 15g 菜石蓴

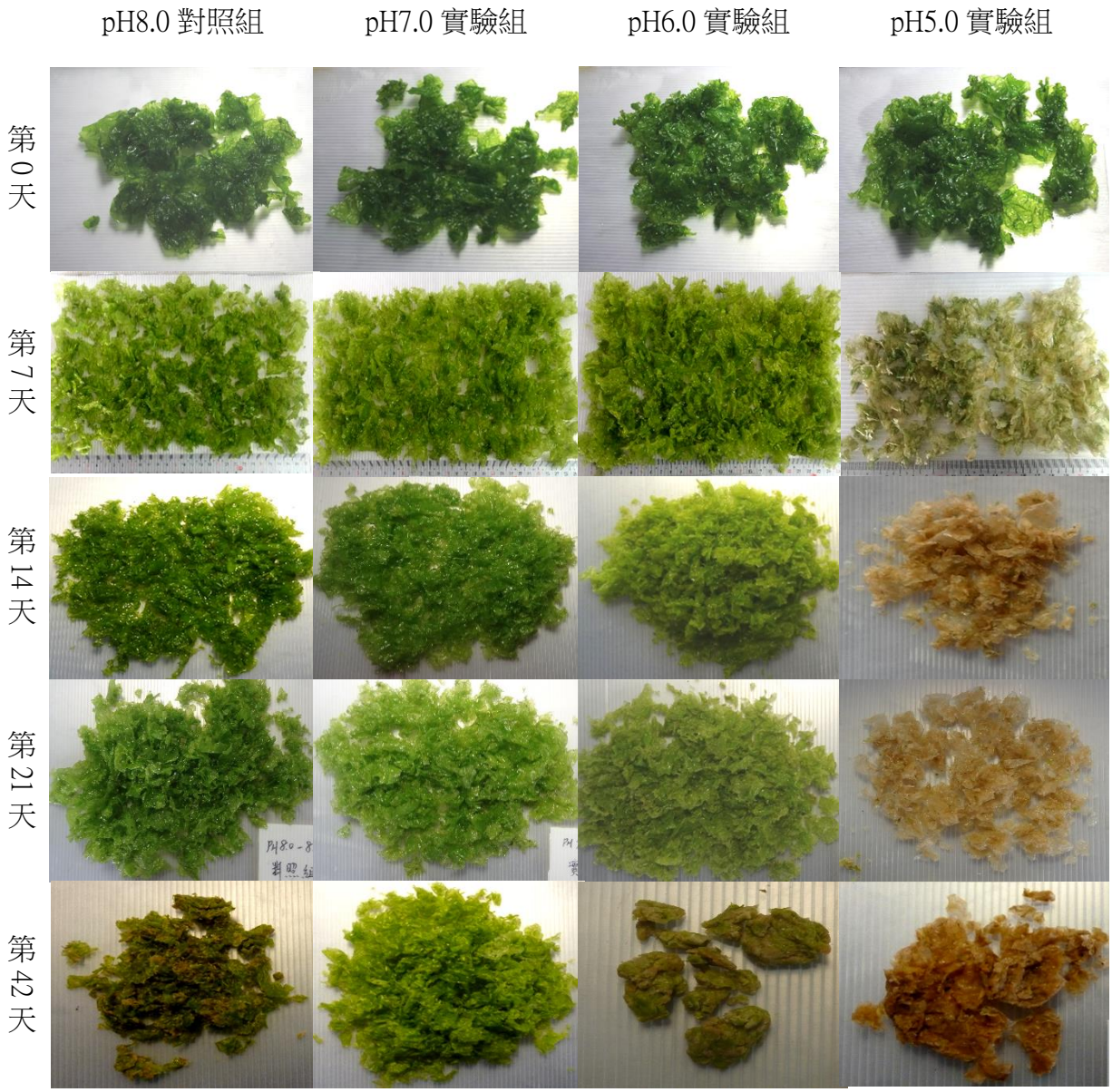
2.結果與討論:

表二十一 CO_2誘導的不同pH 值酸化海水對菜石蓴生存之影響(g)

pH 值	第0天	第7天	第21天	第42天
pH8	15.0	20.0	19.2	15.4
pH7	15.0	23.1	25.5	16.8
pH6	15.0	31.0	25.7	10.0
pH5	15.0	9.7	8.2	8.3



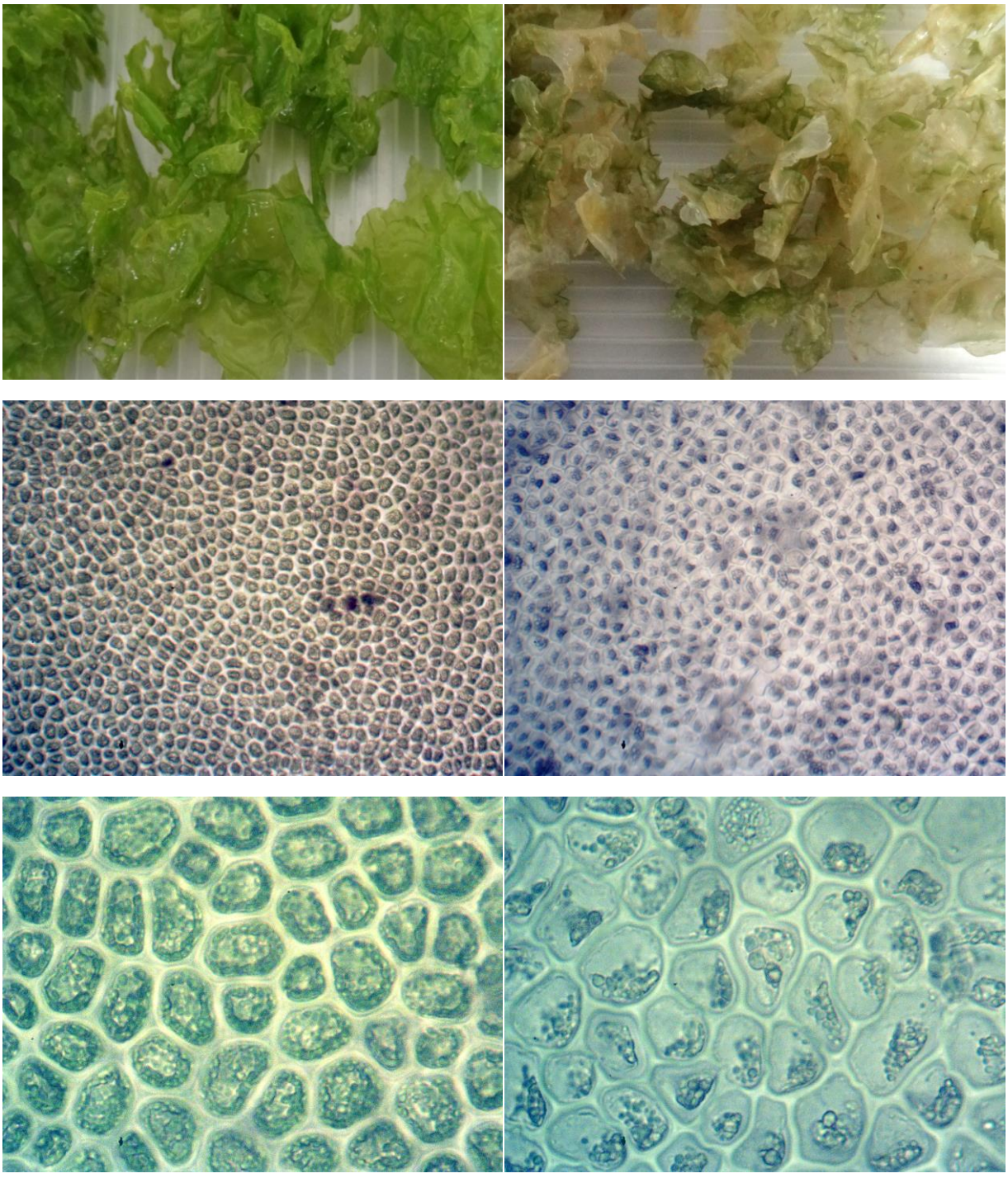
圖二十五 CO_2誘導的不同 pH 值酸化海水中菜石蓴之鮮重量



圖二十六　不同 pH 值酸化海水下菜石蓴長期之生存情形

(1)浸泡於對照組海水(pH8)中的菜石蓴,初期生長狀況良好，重量亦有增加(≒20g)；在無其他外加的碳源及養分(如微量元素)供應下，第 42 天已有部分藻體呈現黃化萎縮的現象。
(2)pH7~6 的實驗組，短期內如前述實驗結果，CO2 對海洋施肥的正效應下，隨著碳源增加，促進光合作用合成葡萄糖，藻體的質量亦隨之增加，pH6 組第七天質量甚至增加一倍(31.0g)；但隨著浸泡時間增長，酸化的負效應開始顯現，第 21 天時已有藻體部分黃白化，質量亦開始減少，至第 42 天時甚至低於對照組，藻體受損呈現黏稠的團塊狀型態。
(3)研究二的實驗已證實 pH5 的海水中，石蓴 24hr 內光合作用即受到嚴重抑制，此次實驗亦如預期浸泡第 7 天時已退色白化，質量亦大幅減少(9.7g) ，14 天以後幾乎完全白化死亡；顯示 pH5 的海水對石蓴顯然過酸，短期內即無法生存。
(4)總觀整個實驗，顯示 pH7~6 酸化海水，初期雖有助石蓴的生長，長期仍會白化，不利其生存；pH5 海水顯然過酸，短期內石蓴即死亡。

pH8 pH5



圖二十七 生存於 pH8 及 pH5 酸化海水中的菜石蓴，7 天後放大顯微照。
(上:近照；中:100X；下:400X)

(5)由圖二十七近觀比較，石蓴白化多由葉狀體邊緣開始，其細胞內葉綠體數量大幅減少、顏色變淡，且聚縮在細胞一隅；細胞體積一半以上幾呈空洞狀，推測細胞膜的選擇性通透已然受損。至於如何受損的分子機轉，仍有待進一步的研究。

(二) 石蓴光合作用回復能力評估

回顧整個研究及實際海洋的狀況，倘若石蓴受到酸化海水汙染一段時間後，再回復至正常海水中時，其光合作用等基礎能力是否受到影響? 影響程度又是如何?

1.方法:

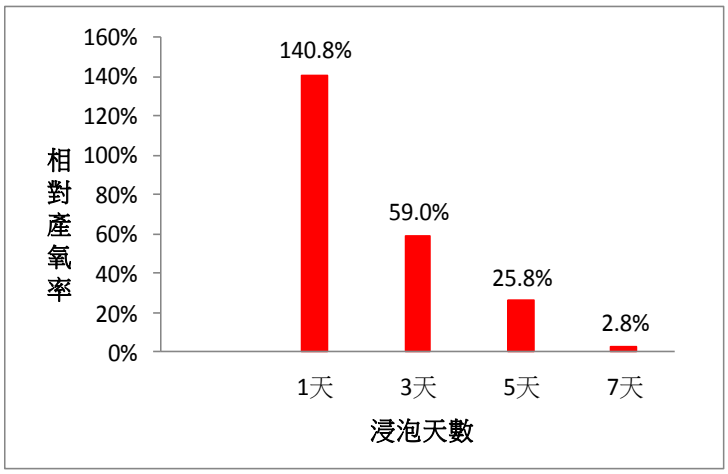
(1)將菜石蓴分別浸於 pH5 (實驗組)及 pH8(對照組)的海水中，置於植物生長箱內 24hr 光照；每隔 1、3、5、7 天時各取 1g 放入氣體收集器內再分別改浸入另一 pH8 正常海水(1000ml)燒杯中。

(2) 24hr 後分別測量其產氧量，再計算出「相對產氧率」。

2.結果與討論 ：

表二十二 菜石蓴浸泡在CO_2誘導的pH5酸化海水中不同天數後對光合作用之影響

浸泡天數	pH5海水(實驗組)				pH8海水(對照組)				相對產氧率
	1	2	3	平均〔ml〕	1	2	3	平均〔ml〕	
1天	3.00	4.1	3.11	3.40	2.70	2.41	2.14	2.42	140.8%
3天	1.47	1.73	1.39	1.53	2.91	2.86	2.01	2.59	59.0%
5天	0.31	0.00	1.42	0.58	2.67	2.00	2.03	2.23	25.8%
7天	0.00	0.10	0.00	0.03	1.61	1.02	0.90	1.18	2.8%



圖二十八 菜石蓴浸泡在 CO_2 誘導的 pH5 酸化海水中不同天數後 24hr 之相對產氧率

(1)由表二十二數據顯示，1 天後 24hr 產氧量竟大幅增加，與對照組相比其相對產氧率達 140.8%。推測可能藻體細胞在 pH5 酸化海水中吸收了大量的 CO_2，故回至正常海水時光合作用產氧量即大幅增加。這亦表示菜石蓴浸泡在 pH5 酸化海水中 1 天內尚未受到嚴重的傷害。

(2)由圖二十八推知，3 天後菜石蓴光合作用能力已然受損(59%)，第 5 天時只剩 25.8%，其中一組甚至無氧氣產生；第 7 天時藻體嚴重受損，已無氧氣產生。

(3)綜言之，石蓴浸泡在 CO_2 誘導的 pH5 酸化海水中兩天內光合作用能力尚可恢復，超過三天即有明顯傷害。

伍、結論

一、中部沿海(火力電廠、彰濱工業區、高美濕地)潮間帶地區，人為汙染或活動頻繁處，春季時大型藻類仍然稀少；南部屏東車城一帶海域，石蓴生長種類數量繁多。

二、隨著酸化海水 CO_2 濃度的升高，在 pH8~6 的範圍內，短期(24hr)有助於牡丹菜及菜石蓴光合作用產氧量之提升。

三、當 CO_2 濃度過高，使海水酸化至 pH5 時，會明顯抑制石蓴光合作用之產氧量。

四、以硫酸或鹽酸誘導的酸化海水，在 pH8~6 間可些微促進光合作用；pH6 以下隨海水愈酸，光合作用抑制愈明顯；酸至 pH3~2 時，石蓴 24hr 後即明顯受損。

五、CO_2 誘導的 pH5 酸化海水，對石蓴的傷害較硫酸或鹽酸更為嚴重。

六、單純的 H^+濃度增加，並非 CO_2 誘導的酸化海水中石蓴產氧量減少的主要原因 ; H_2CO_3、HCO_3^-、CO_3^{-2} 等離子亦對光合作用有一定程度的負面影響。

七、石蓴可直接利用海水中的 HCO_3^-作為碳源，行光合作用產生氧氣。

八、過酸的海水(pH5)，會促進牡丹菜及菜石蓴主動吸收 H^+ ，短期內藉以緩衝海水 pH 值的變化。

九、CO_2 誘導的酸化海水在 pH8~6 時，初期可促進石蓴快速生長，但長期(42 天)仍使其逐漸白化萎縮;當海水酸至 pH5 時，短期內(7 天後)即導致石蓴白化死亡。

十、石蓴浸泡在 CO_2 誘導的 pH5 酸化海水中兩天內光合作用能力尚可恢復，超過三天即有明顯傷害。

十一、我們的研究與實際的海洋現況仍有不小的差距，但部分的研究事實卻令人擔心；人類應盡速減少 CO_2 的排放量，否則日趨酸化的海水對石蓴等海中大型藻類的生存將產生極為不利的影響 ； 當海洋森林消失時，將是一場生態大災難!

陸、誌謝

特別感謝屏東東港水產試驗所生技研究中心蘇惠美博士提供菜石蓴鮮重量 4kg 進行相關研究 ，並指導石蓴養殖方法。

柒、參考文獻

一、王秉凡(2008 年)。六輕工業區前後期對雲林海域的影響分析評估。雲林科技大學環境與安全工程系碩士班論文。

二、高坤山(2011 年 3 月)。海洋酸化正負效應:藻類的生理學響應。第 50 卷，第 2 期。中國廈門大學學報(自然科學版)。

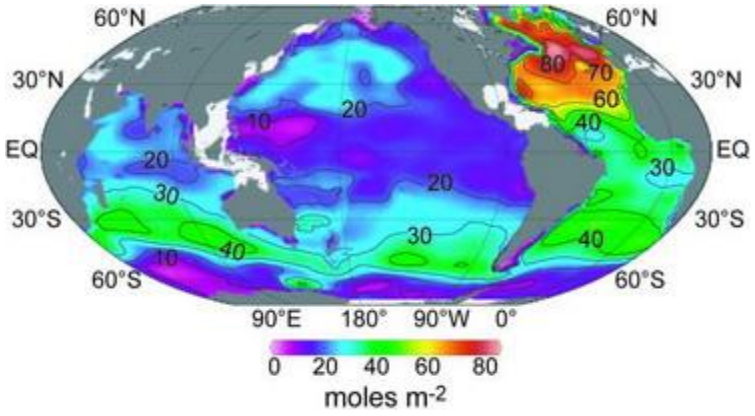
三、伊莉莎白.柯爾伯特(ELIZABETH KOLBERT)(2011 年 4 月)。酸化的海洋。國家地理雜誌第 124 期。

四、唐尼(Scott C. Doney)(2011 年)，林筱雯譯。變遷中的環境-海水酸化的危機。科學人雜誌，第 78～86 頁。遠流文化。

五、麥寮汽電股份有限公司(2011 年 5 月)。麥寮發電廠六輕四期擴建計畫環境影響說明書-第二次變更內容(增設曝氣池)。

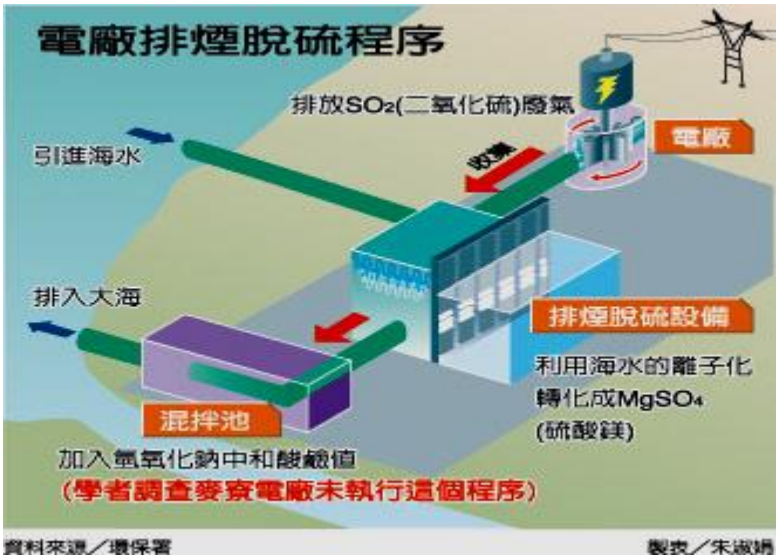
六、陳銘宗(2008 年)。海水煙氣脫硫吸收效率研究。第 86 頁。屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文。
七、黃淑芳(2010 年 3 月 18 日)。台灣產石蓴之分類及生態研究。國立台灣博物館 98 年度研究成果報告書。
八、朱淑娟(2007 年 11 月 14 日)。台塑麥寮電廠水域酸化中。聯合報。取自: http://www.wretch.cc/biog/tepu/10465481
九、台灣 CO2 排放站上舞台，台中、麥寮電廠名列十大(2007 年 11 月 16 日)。(2007 年 11 月 16 日)環境資訊中心。取自: http://e-info.org.tw/node/28254
十、劉惠雅、林吟臻(2006 年)。海洋酸化的危機。取自： http://microbiology.scu.edu.tw/technews/viewtopic.asp?id=118
十一、Christopher L. Sabine 。The Oceanic Sink for Anthropogenic CO2。Science 16 July 2004: Vol. 305 no. 5682 pp. 367-371

附錄



圖一 全球海洋酸化情形，最嚴重地區為北大西洋海域。
取自: Science Vol. 305，16 July 2004

圖二 疑趁大雨偷排廢水，台中電廠附近安良港大排染紅
(取自：自由時報 2009/6/14)



圖三 台朔麥寮電廠排脫硫程序(取自:聯合報朱淑娟)

表一 中部海域沿岸水質調查				
	彰化縣伸港鄉海濱	彰濱工業區線西區海濱	清水高美濕地	火力電廠冷卻水出水口
氣溫(℃)	35.7	33.3	29.1	31.1
水溫(℃)	32.7	29.3	32.9	34.3
鹽度(%)	0.1	3.0	1.4	-
pH 值	8.52	8.26	7.87	8.3

【評語】030317

1. 為了環境努力的小鬥士，加油！

2. 作品的寫法建議參考以往作品，你們作品的研究目的第一節像在寫文獻探討，不是很恰當，另外，文獻引用格式請參考 APA 格式。

3. 海水鹽度單位請用常用的單位表示，非用％。

4. 建議使用天然海水進行實驗。

5. P.7 提及「相對於台中電廠消波塊或邊坡上並無大型藻類，此處則仍有不少石蓴附生，顯見電廠水質極可能已對大型藻類生存產生負面的影響。」，建議要有足夠證據，才做如此的敘述。

6. 學名中命名者不用斜體字，如：Ulva lactuca Linnaeus

7. 建議查詢文獻以調整不同 pH 值的海水(pH=8, 7, 6, 5, 4, 3, 2)，使其維持穩定的不同 pH 值海水？

8. 圖九氣體收集器中海藻擁擠程度，是否影響海藻光合作用產生氧氣的量？

9. 圖、表如果是呈現相同的結果，建議不要重複呈現，擇一呈現即可。

10. 建議圖二十改用長條圖呈現為宜。

11. 建議如果實驗有重複數，請在圖中要標示標準差。

12. 作品中建議做簡單統計分析，檢定是否達顯著差異。

13. 建議文字描述要清楚及精準，例如「圖二十七生存於 pH8 及 pH5 酸化海水中的菜石蓴，7 天後放大顯微照」？