

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生活與應用科學(三)科

第二名

033012

水草吐泡言汙~以水下聲學作為監控水質汙染的
可行性

學校名稱： 高雄市立明華國民中學

作者： 國二 王泓鈞 國一 林雋喆 國二 楊雅涵	指導老師： 吳德儀 李冠徵
---	-----------------------------

關鍵詞： 水下聲學、水質監測、水污染

摘要

本研究嘗試利用水下聲學技術，以水草冒泡的聲訊為指標，透過出泡聲音頻率高低及出泡速率快慢的改變即時掌握水質變化，期許為水污染的預警做出初步貢獻。首先，確認水草於未受污染情形下的受傷聲學表現，接著再探討農業及工業廢水等各項污染變因，如氨氮及銅離子的影響，結果顯示：水質酸化時，出泡聲音的頻率沒有變化，出泡速率則逐漸變慢，至 pH=4.5 時幾乎不出泡；輕度污染的氨氮濃度(0.5ppm)反而能促使水草出泡速率提升至 3.1 倍，但隨著濃度升高(0.8ppm)，又開始抑制出泡，當出泡速率突然降為輕度污染時的 6~7 成時，可初步判斷水質近期遭受較嚴重污染；銅離子會大幅降低出泡速率。最後，雙項污染(如氨氮+銅離子)將造成更大的影響，凸顯出銅離子對水草的傷害。

壹、動機

河川水質是否遭受污染一直以來都是備受關注的議題，而一則報導“水盒子”24 小時監控水質的新聞引起了我們的注意，報導中提及水盒子內部連接上四種感測器(pH、DO、EC 及水溫)，便可 24 小時監控並上傳水質狀況，但水質污染還有農業及工業廢水，例如：氨氮和重金屬

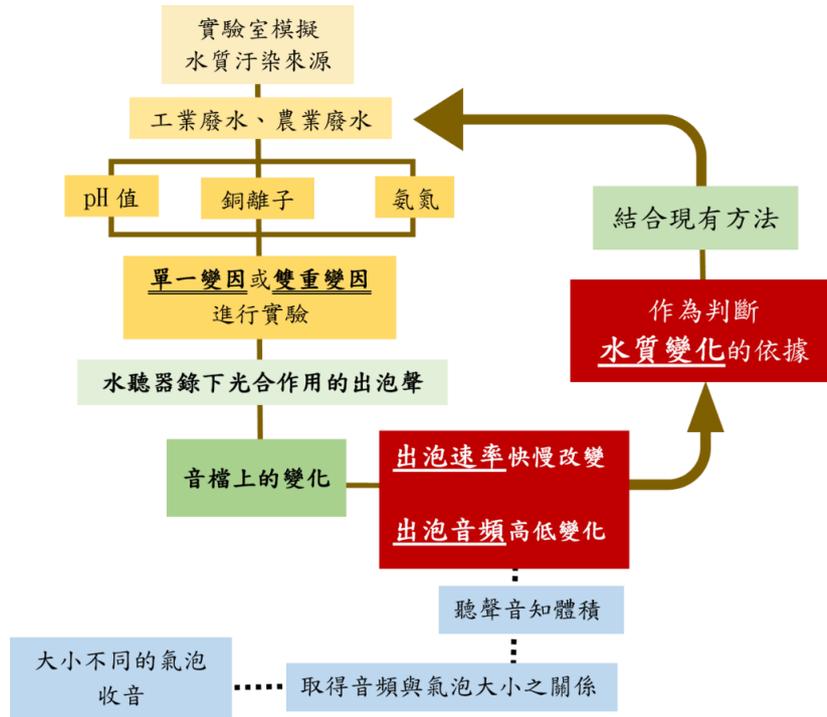


(圖 1-1)取自民視新聞台網頁

離子等，這些污染物的濃度仍須到現場採集河水後才能進行分析...，這不禁讓我們想到：我們能否藉由水下不會移動的水草來及時得知水質是否遭受污染呢？而水草會釋出甚麼訊號？如何取得？又該如何分析？一連串的疑惑等待我們動手實作找出答案，希望可以利用水草遭受污染時的水下聲學改變及時得知水質變化，作為環境監控的新利器。

貳、研究目的

一、研究架構

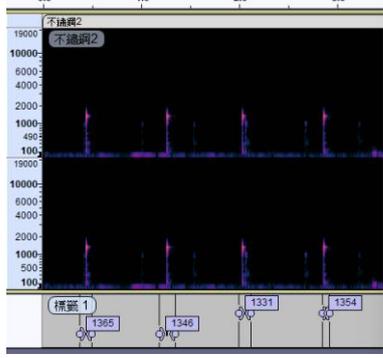
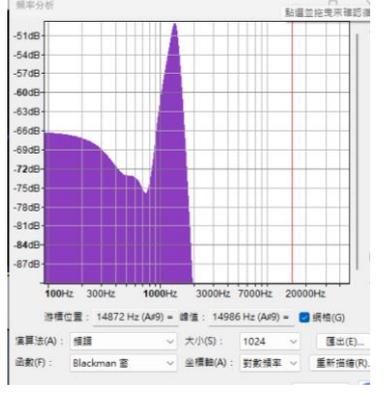


二、研究目的

- (一) 分析氣泡發聲過程的特徵頻譜
- (二) 半/無覆蓋收音方式比較
- (三) 固定水深，探討不同水溫下的氧氣出泡頻率與體積之關係
 1. 選擇出泡管材質
 2. 管口剪切方式如何影響氣泡體積
 3. 探討水溫對出泡體積的影響
 4. 氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖
- (四) 未汙染~探討水草在受傷下的氣泡表現
- (五) 汙染~探討兩種水草在不同酸鹼值下的氣泡表現
- (六) 汙染~探討水草在不同氨氮/銅離子濃度下的氣泡表現
 1. 農業~氨氮濃度的影響
 2. 工業~以銅離子濃度探討
 3. 雙項變因下的影響
- (七) 探討水溫對氧氣體積的影響

參、實驗裝置

- (一) 實驗水草：鹿角苔 7cm×7cm 以及 4cm×4cm 數片、泡泡龍數株
- (二) 實驗器材：玻璃水缸、水下麥克風(AQUARIAN H2D HYDROPHONE)、水下溫度與照度計(HOBO)、醫用級氧氣瓶、二氧化碳瓶、筆式酸鹼儀(twinno pH30)、計泡器、氣體收集器材(試管、漏斗)、加熱棒、釋放氣泡器材(塑膠管、雙通閥)
- (三) 實驗藥品：硫酸銅、氯化銨、濃硫酸
- (四) 實驗裝置：氧氣泡釋放裝置、氧氣體積測量裝置、氧氣泡釋出之聲音測量裝置。
- (五) 使用軟體：audacity、image J

		
<p>(圖 3-1)透過電磁閥結合計泡器與雙通閥，連結不同管徑之塑膠管產生不同大小的氣泡</p>	<p>(圖 3-2) 訊號在時頻圖上的呈現模式</p>	<p>(圖 3-3)選定目標訊號，透過頻譜圖分析最大音量的頻率</p>

肆、實驗設計與方法

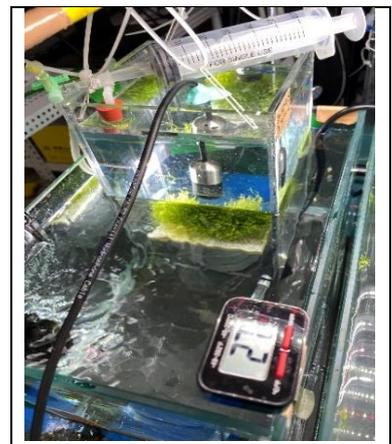
一、實驗設計

(一) 氣體釋放及收音裝置

1. 我們租用醫療級的氧氣瓶，透過電磁閥、計泡器和雙通調節閥，連結上我們修剪後的各式塑膠管，由管口進行釋放。釋放條件設定在計泡器於每秒 1 顆氣泡的情形下進行氧氣泡釋放。

2. 收音設置說明：

- (1) 出泡口收音：水下麥克風完全放入水中且位於出泡口上方約 1 公分處進行收音。



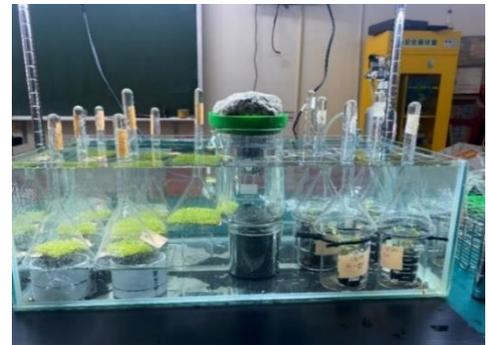
(圖 4-1)以壓克力盒罩住目標水草後進行收音

(2) 水草收音：水下麥克風穿過我們自行設計的壓克力盒進行全覆蓋或無覆蓋的收音，實驗中若有需要同步錄影，麥克風位置要在水草上方或後方避免遮擋到氣泡口，導致無法記錄下出泡情形。

(3) 戶外模擬收音：麥克風完全放入水中且位於水草上方約 2~3 公分處進行收音。

(二) 水草環境設置說明

1. 水草種類：Riccia fluitans(俗稱鹿角苔)、Arthraxon sp. "malaysia 1" (俗稱泡泡龍)
2. 水的取用：一律取用自實驗室的水，並於曝氣 1 天後取用。
3. 二氧化碳供應：利用二氧化碳氣瓶於每秒 1 顆氣泡情形下進行灌氣 20 分鐘後進行相關的實驗。
4. 光照度提供：架設燈源於實驗水缸上方 19.4 公分處，透過定時器設定 12 小時日照和 12 小時黑暗循環交替且照度維持在 6400 流明左右。



(三) 氧氣體積收集設計：

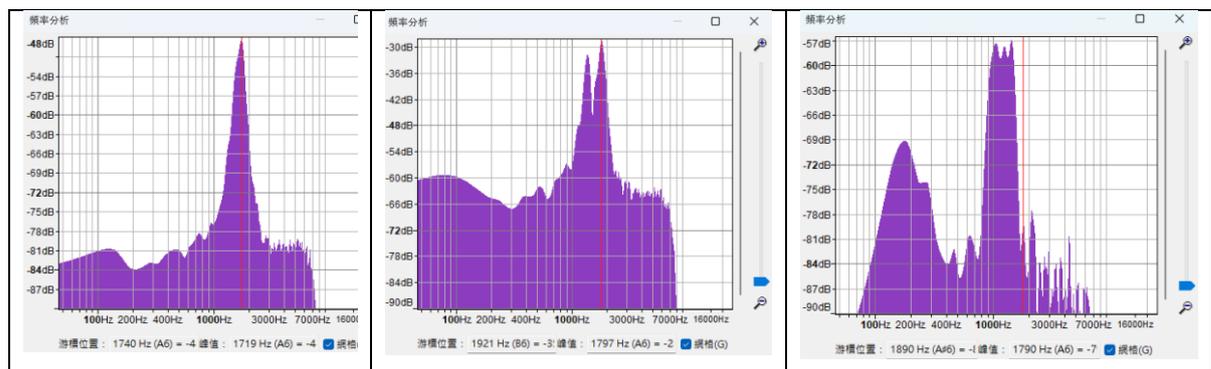
我們以漏斗和試管組合起來，以排水集氣法收集氧氣的體積。

二、分析方法

目標訊號頻率判斷

1. 若為單一峰值，直接紀錄頻率。
2. 若為分岔成兩個頻率相近的峰值，以兩個頻率的平均值表示該訊號的頻率。
3. 若為分岔成三個頻率相近的峰值，該訊號的頻率以平均值的頻率表示之。

(圖 4-2)以排水集氣法收集氧氣體積(mL/(g×hr))



(圖 4-3)此訊號的音頻紀錄為 1719Hz，音量達 -48dB

(圖 4-4)此訊號的音頻紀錄為 $\frac{1362+1797}{2} = 1579.5\text{Hz}$ ，音量達 -30dB

(圖 4-5) 此訊號的音頻高峰依序為 1051Hz、1238Hz 以及 1424Hz，取平均值紀錄為 1238Hz，音量達 -57dB

三、名詞解釋

(一)出泡聲音頻率

水草行光合作用產生的氧氣於脫離葉面時會產生聲音，且能夠被水聽器記錄下來。我們將這個聲音稱之為出泡聲，而這個聲音的高低，我們稱之為出泡聲音頻率。

(二)出泡速率

用以描述水聽器每小時記錄到的氧氣脫離聲音次數多寡，單位為顆/小時，例如在 2 天內的平均出泡速率為每小時 2 顆氣泡，便紀錄為 2 顆/小時。

(三)出泡速率的倍率

例如這 2 天的平均出泡速率為每小時 2 顆氣泡，2 天後降為每小時 1 顆氣泡，出泡速率的倍率紀錄為 0.5 倍

伍、實驗流程與方法步驟

首先，我們需要確認水聽器在水中錄到什麼聲音，是出泡時的聲音？還是出水面時的聲音呢？又或者氣泡在上升過程中也會因為形變而產生聲音？而被記錄下來的聲音該如何辨識，是我們的首要學習任務。此階段我們採取同步錄影和錄音來找到氣泡從產生到出水面的重要訊號，並確認錄音目標以及學習辨識訊號特徵。

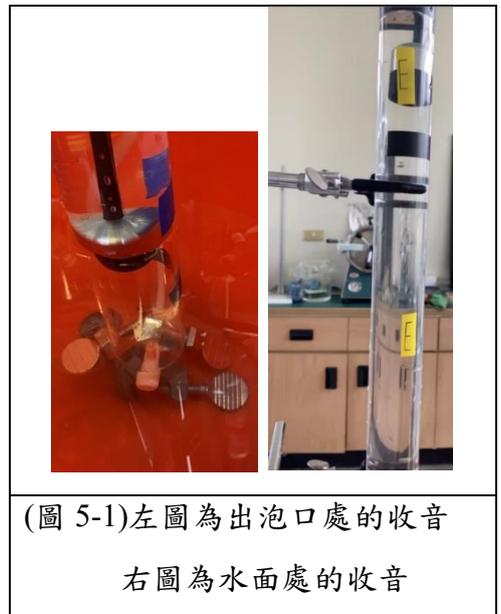
一、分析氣泡發聲過程的特徵頻譜

(一) 歸納出不同階段的聲音模式

1. 取塑膠管接上計泡器再連接至醫療用的氧氣瓶進行實驗，採取同步錄影和錄音的方式，紀錄氣泡從產生到出水面的過程。
2. 檢視錄音錄影檔案，找出不同階段聲音模式。

(二) 比較水面與水底收音的差異

1. 以 1 公尺高的壓克力管來進行實驗，先將麥克風設置於出泡口上方 1~2 公分處進行氣泡釋放過程的收音，共 5 次。
2. 再將麥克風上移置水面下 2 公分，進行水面收音，共 5 次。
3. 利用 audacity 分析音檔比較出泡口和水面收到聲音的差異性。



(圖 5-1)左圖為出泡口處的收音
右圖為水面處的收音

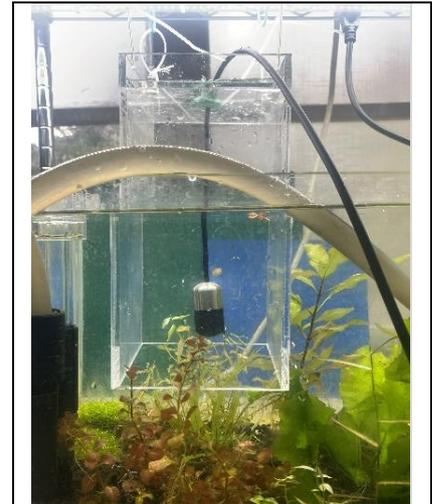
二、半/無覆蓋收音方式比較

1. 放置水下麥克風於目標水草~泡泡龍上方，進行兩天的收音。
2. 將水下麥克風穿入壓克力盒內，壓克力盒以懸吊方式放入水中，其開口位於目標水草~泡泡龍的上方，進行兩天的收音。

三、固定水深，探討不同水溫下的氧氣出泡

頻率與體積之關係

確認水聽器可收錄到氣泡在水中的出泡聲且帶有明顯特徵以供辨識之後，我們想進一步確認能否藉由聽到的頻率得知氣泡大小？在此實驗中，為了避免水深對於出泡產生影響，我們一律將水深固定於 18cm 進行實驗，並設法製造出大小不同的氣泡，嘗試得出關係圖。



(圖 5-2)採用半覆蓋方式收音

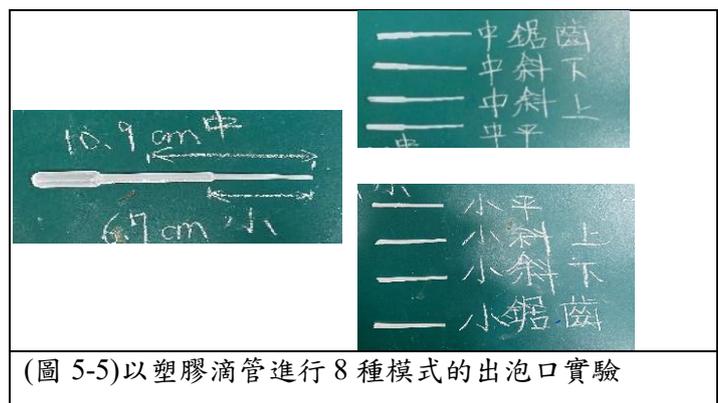
(一)選擇出泡管材質(確認以塑膠管作為出泡管的合理性)

1. 準備相同管徑的空心菜梗、塑膠管及不鏽鋼吸管。
2. 依序將三種不同材質的吸管接上氧氣瓶，調整至相同條件時進行實驗並開始錄音，至少錄下 5 個以上的氣泡連續出泡過程。
3. 利用 **audacity** 分析氣泡聲音頻率。

(二)管口剪切方式如何影響氣泡體積

在這個實驗中，我們想透過修剪管口形狀來改變釋出的氣泡大小，以釋放出各種大小的氣泡進行收音，取得出泡頻率和氣泡體積的關係。

1. 取塑膠滴管，於距離滴管開口處 6.7 公分處剪下作為出泡口



(圖 5-5)以塑膠滴管進行 8 種模式的出泡口實驗

- (小)；於 10.9 公分處剪下作為出泡口(中)，共兩種管徑。
2. 將出泡口分別剪成平口、45 度斜口和鋸齒狀，共三種出泡口。
3. 採取小平口、小斜上、小斜下、小鋸齒、中平口、中斜上、中斜下、中鋸齒，共八

種出口模式進行氧氣泡的釋放，以水下麥克風紀錄出泡聲音。

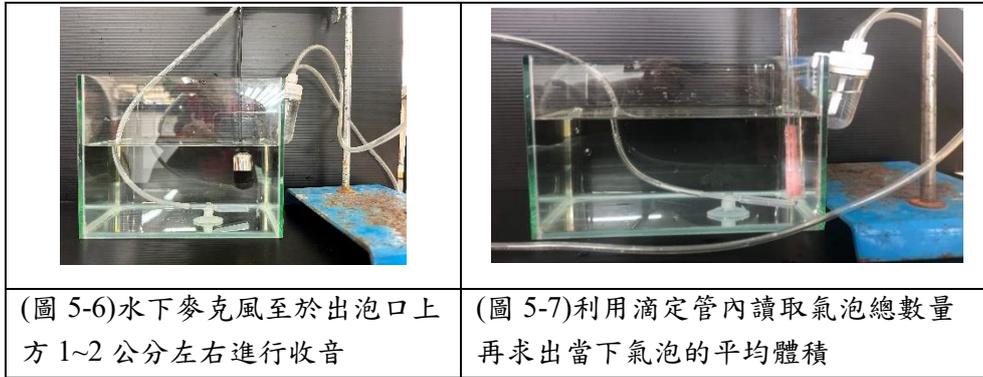
4. 透過 audacity 分析出泡頻率進行比較。

(三)水溫對出泡體積的影響

1. 固定水深為 18cm，以同一個出泡口釋出氧氣泡，於 23~32°C間取數個溫度進行氣泡體積測量，先探討溫度對氣泡體積的影響。

(四)取得氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖

1. 依序調整水溫為 22 度、25 度、28 度以及 32 度，錄下大小不同氧氣泡的出泡聲，每次的出泡聲錄製 3 個音檔，每個音檔至少存在 5 個出泡訊號。
2. 於收音後立刻利用滴定管以排水集氣法收集氣泡，求出氣泡的平均直徑。
3. 利用 audacity 分析音檔，得到每次的出泡聲音頻率並求出平均值。
4. 製作四個水溫下的氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖。



四、未污染~探討水草受傷的出泡表現

1. 利用同步錄影和錄音紀錄未修剪水草的氣泡表現。
2. 再以剪刀傷害泡泡龍水草的頂部出泡位置，也一併剪去旁邊的葉子。將修剪後的水草放入水缸中，以壓克力盒罩住水草後進行錄音，再架設攝影機進行錄影。
3. 播放影片紀錄各出泡點的出泡時間，再以 audacity 分析音檔，進行交叉比對。
4. 分析出泡聲音頻率隨時間的變化以及出泡速率隨時間的關係。

五、污染~探討兩種水草在不同酸鹼值下的氣泡表現

上個實驗中，我們記錄泡泡龍水草行光合作用後釋出氧氣的過程，其出泡聲在時頻圖上為一個明亮清晰的亮點。而其他水草也是如此嗎？因此在這個部分中，我們加入另一種水草-鹿角苔進行實驗，以了解不同的酸化程度對兩種水草的影響。

1. 兩種水草(泡泡龍和鹿角苔)至少準備 3 批，按標準操作將CO₂通入水中提供碳源。
2. 將第一批水草放入水缸中，於未加酸(對照組)的環境中以同步錄影和錄音的方式進行氣泡表現觀察，觀察時間持續兩天
3. 兩天後再次通入二氧化碳並加入硫酸於水缸中至下一個更低的酸鹼值，重複(2)。
4. 重複步驟(3)至所有酸鹼值皆實驗完成。
5. 將酸化後的水草重新放入正常水缸中，觀察修復過程。
6. 依序更換為第二、三批水草，重複步驟(1)~(4)。

六、污染~探討水草在不同氮氮/銅離子濃度下的氣泡表現

(一) 農業~以氮氮濃度探討

1. 利用氯化銨配製出含氮濃度為 0ppm(對照組)、0.5ppm、0.8ppm、1.5ppm、2.5ppm、5ppm、10ppm、20ppm、40ppm、80ppm 水溶液。
2. 先紀錄泡泡龍水草於對照組中的出泡表現，再逐漸提升水中的含氮濃度至所有濃度實驗完畢，每次實驗開始皆通入 CO₂，且每個濃度皆進行兩天。
3. 進行出泡聲音頻率和出泡速率隨濃度的變化。

(二) 工業~以銅離子濃度探討

1. 利用硫酸銅配製出含銅離子濃度為 0ppm(對照組)、0.05ppm、0.5ppm、5ppm、10ppm、20ppm、40ppm、80ppm、160ppm 的水溶液。
2. 先紀錄泡泡龍水草於對照組中的出泡表現，再逐漸提升水中的銅離子濃度至所有濃度實驗完畢，每次實驗開始前皆通入 CO₂，且每個濃度皆進行兩天。
3. 分析出泡聲音頻率和出泡速率隨濃度的變化。



(圖 5-8)紀錄不同濃度氮氮之下的出泡表現



(圖 5-9)紀錄不同濃度銅離子之下的出泡表現

(三) 雙項因素的影響

1. 微量氨氮 + 過量銅離子(小對大)

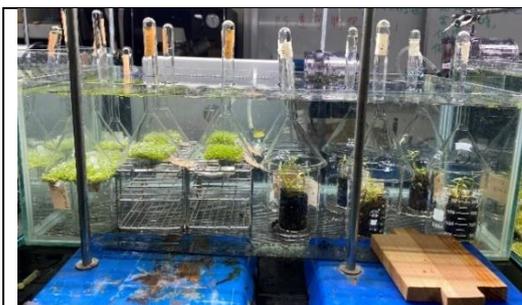
- (1) 準備含有 0.5ppm 氨氮和 5ppm 銅離子的水。
- (2) 先記錄泡泡龍水草的正常出泡情形後，在放入含有(1)的水中紀錄出泡表現。
- (3) 分析出泡聲音頻率和出泡速率的變化。

2. 過量氨氮 + 過量銅離子(大對大)

- (1) 準備含有 3.5ppm 氨氮和 80ppm 銅離子的水。
- (2) 先記錄泡泡龍水草的正常出泡情形後，在放入含有(1)的水中紀錄出泡表現。
- (3) 分析出泡聲音頻率和出泡速率的變化。

七、探討水溫對氧氣體積的影響

1. 將實驗用的水草進行瀝乾程序後秤重，進行編號和質量紀錄。
2. 維持相同照明模式，利用試管及漏斗以排水集氣法進行氧氣收集，進行水溫為 25 度、28 度及 32 度時的氧氣收集，收集時間維持兩天，且於兩天內進行數次測量。



(圖 5-3)以排水集氣法收集氧氣體積：
左方為鹿角苔，右方為泡泡龍

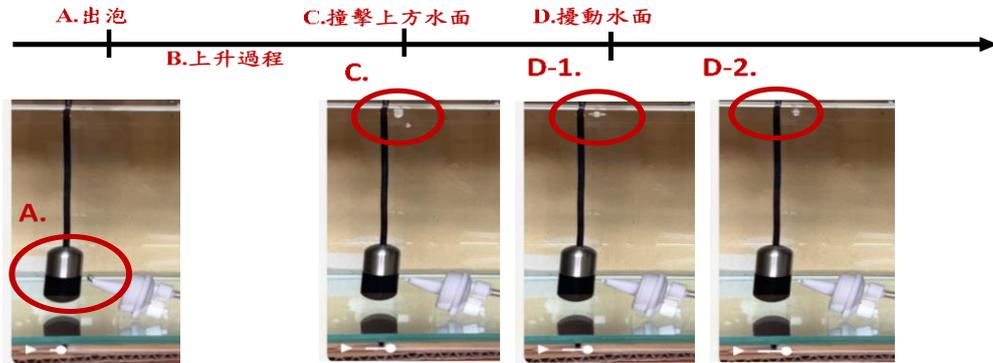


(圖 5-4)鹿角苔編號及記錄下質量

陸、實驗結果

一、分析氣泡發聲過程的特徵頻譜

(一) 慢動作錄影分析：透過慢動作錄影，可將氣泡由釋放到出水面的過程歸納成三個階段，依序為：出泡、撞擊水面以及擾動水面。



(圖 6-1)慢動作中的氣泡上升三階段：出泡-撞擊水面-擾動水面

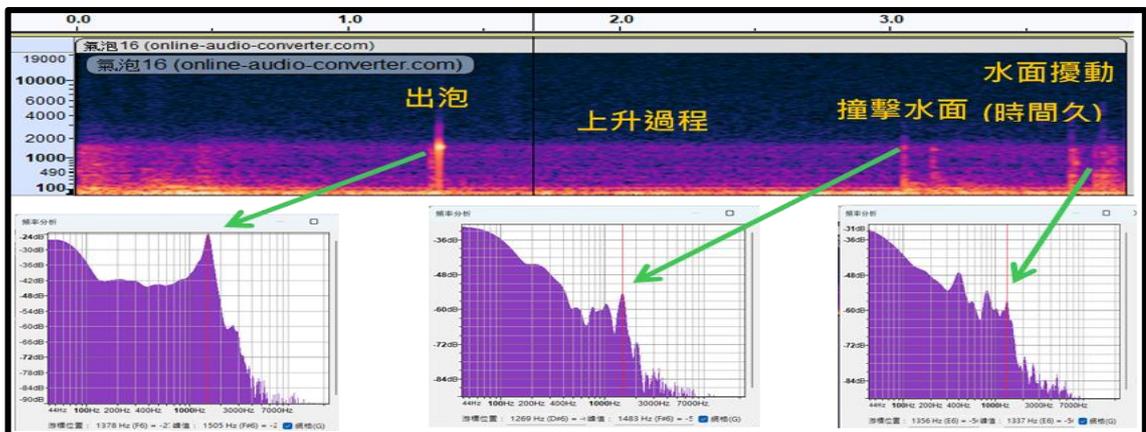
(二) 三階段的時頻圖及頻譜圖比較

1. 時頻圖：

三個階段在時頻圖上顯現不同特徵，出泡當下為帶有黃色亮點(音量最大)的直線；撞擊水面當下的訊號直線出現暗區(將出現數個峰值)且亮區頻率範圍下降；水面擾動的訊號則呈現較粗的模糊直線區塊，顯示時間持續時間拉長，而出泡到上升過程則無訊號顯示出來。

2. 頻譜圖：

出泡當下訊號呈現單一峰值；撞擊水面訊號呈現數個峰值，且最高峰頻率低於出泡時的頻率；擾動水面後的頻譜圖呈現多個峰值，且時間持續較久。

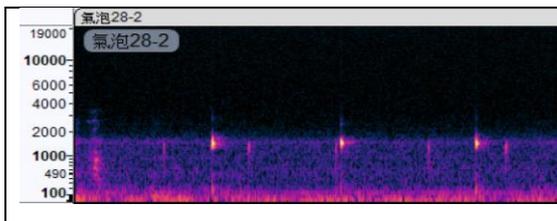


(圖 6-2)氣泡上升三階段：出泡-撞擊水面-擾動水面

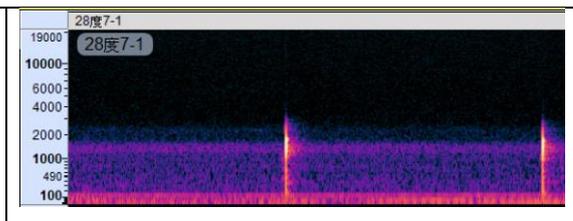
在時頻圖上的特徵以及頻譜圖的表現

(三) 水底收音(出泡口)和水面收音結果：

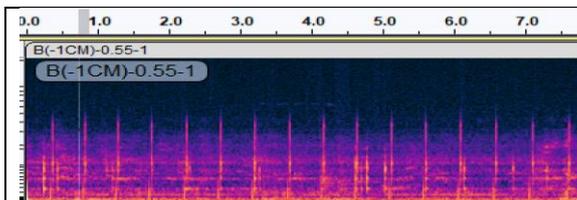
1. 水底收音呈現規律的亮線訊號，水面收音則呈現不規律的虛線訊號且亮度減弱。
2. 水底收音大多情形下可同時錄下出泡、撞擊水面以及水面擾動的完整過程，而若為氣泡縮小或是水深增加，則僅有乾淨的出泡聲音訊號而沒有水面訊號。
3. 我們多是利用上學期間的午休時間進行實驗，吵雜的環境會使得氣泡聲音的時頻圖背景呈現粉紅區塊，但不影響出泡聲的辨識度，處理時可視情況搭配噪音抑制提升訊號的辨識度。又若在假日安靜時刻進行實驗則可得到非常漂亮的時頻圖。
4. 出泡訊號為帶有明顯亮點的直線，有別於其他訊號。這個結果對於我們的幫助很大，能讓我們在龐大的數據中有所依據，能夠有效且正確地辨識出我們要的訊號-出泡聲。也確認了我們的想法：可將麥克風伸入水面之下錄取水草光合作用的出泡聲，作為健康下的平均出泡表現，並期待能透過出泡表現的變化，例如：出泡聲音頻率或是出泡的速率(每秒冒出幾顆氧氣)得知得知水質正遭受汙染。



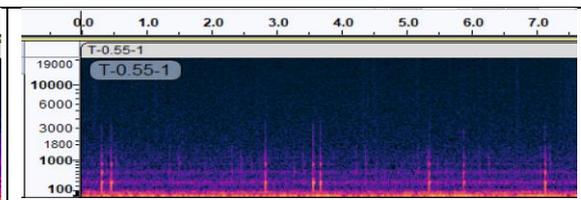
(圖 6-3)水的高度較淺時，可同時記錄到出泡、撞擊或擾動的訊號



(圖 6-4)水的深度足夠或是氣泡較小時，水底僅收到出泡音



(圖 6-5)水底收音呈現規律的明亮直線訊號



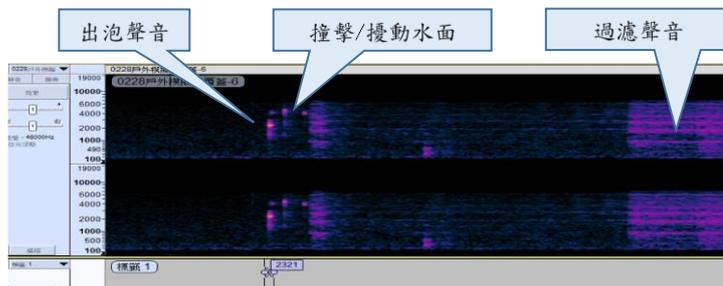
(圖 6-6)水面收音呈現不規律的虛線訊號且亮度減弱



(圖 6-7)確實安靜的環境得夠得到安靜的時頻圖，大幅增加訊號的辨識度

二、有/無覆蓋收音方式比較

- 音檔分析結果發現：無論是否進行覆蓋，均會錄下過濾的聲音，且我們關注的水草出泡聲音仍能辨識出來，如下圖中的出泡聲音頻率為 **2321Hz**。

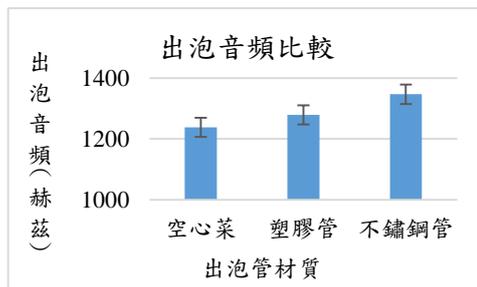


(圖 6-8)無覆蓋方式下的音檔時頻圖辨識出出泡聲音的音頻

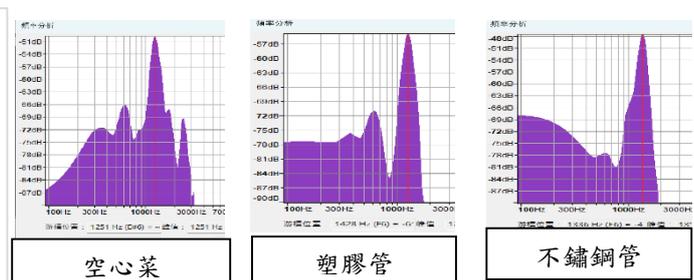
- 原先我們想要以類似遮罩的蓋子來輔助收音，但整個水體均是聲音的傳聲介質，半覆蓋方式沒有發揮出明顯的減噪效果。但我們還是發現，只要不是在活動很多的環境中，無覆蓋的直接收音還是能辨識訊號，進行分析。

三、固定水深，探討不同水溫下的氧氣出泡頻率與體積之關係

(一) 選擇出泡管材質



(圖 6-10)三種材質的出泡管於相同管徑下的出泡聲音頻率比較圖

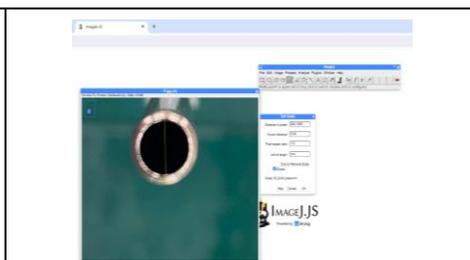


(圖 6-11)三種材質出泡聲音的頻譜圖比較

- 三種材質出泡聲音頻譜特徵相似，存在明顯的單一峰值。
- 相同管徑下，出泡聲音的音頻以空心菜梗的音頻最低且與塑膠管的出泡頻率接近，因此我們採用塑膠管進行本實驗的氣泡發聲相關實驗。

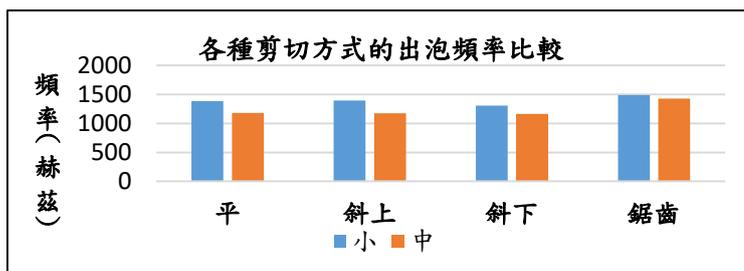


(圖 6-12)空心菜梗俯拍照片



(圖 6-13)利用 Image J 分析管徑

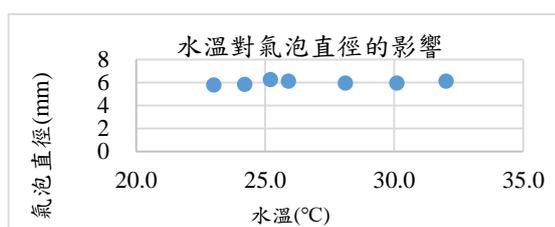
(二) 出泡管口剪切方式對氣泡體積的影響



(圖 6-14)以不同方式剪切塑膠管口的出泡聲音頻率比較

1. 相同管徑的塑膠管搭配上不同的管口剪切方式，
釋放的氣泡聲音頻率高低比較：鋸齒狀 > 平口 > 斜口，
釋放的氣泡體積大小比較：鋸齒狀 < 平口 < 斜口。
2. 管口修剪成斜口並以小斜下方式釋放氣泡，其出泡聲音頻率最低，顯示釋放的氣泡體積增加，推測原因為下方多出的接觸面延長了氣泡的停留時間，氣泡體積增加導致出泡聲音頻率下降。
3. 而修剪成鋸齒狀，出泡聲音頻率反而上升，尤以中鋸齒增加尤其明顯，推測原因應為不規則的管口不利於氣體體積累積，釋出的氣泡反而變小。
4. 根據實驗結果，**我們的塑膠管先以平口方式釋放氣泡，再修剪成斜口產生較大的氣泡，如此一來，我們便能製造出大小不同的氣泡並錄下出泡聲音，分析氣泡直徑與出泡聲音頻率的關係。**

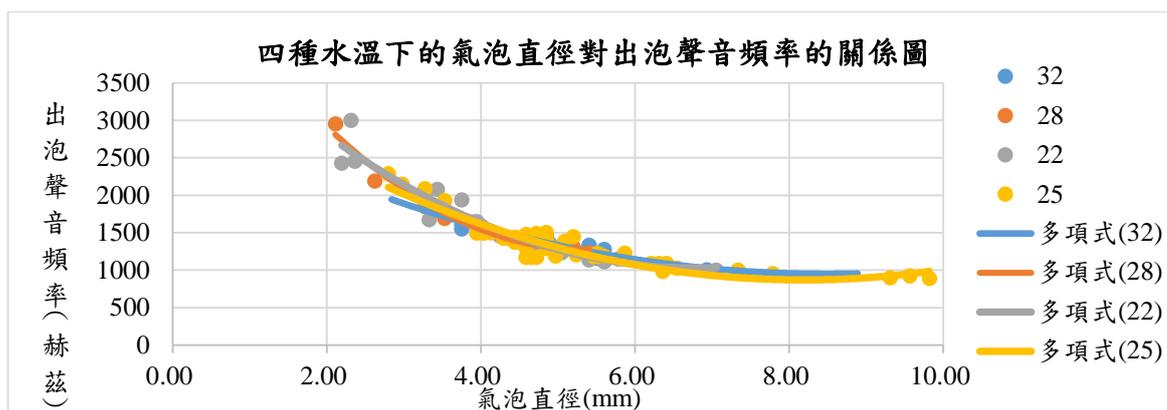
(三) 固定水深，探討水溫對出泡體積的影響



(圖 6-15) 23°C~32°C，固定水深 18cm 的氣泡直徑比較圖

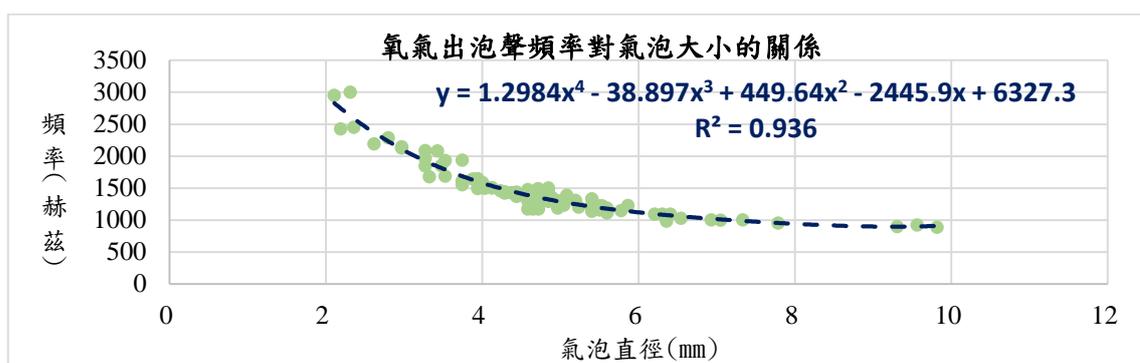
1. 透過排水集氣法，我們可以得到一個氣泡的平均體積，再將體積假設為圓球形，推算出氣泡的直徑。
2. 結果顯示，在我們的實驗條件內，**水溫在 23~32 度時，相同管徑釋放出的氣泡體積相近**，且氣泡直徑多落在 5.50mm~6.50mm，顯示此時的氣泡體積應由管口大小、形狀以及釋放時的壓力決定。

(四) 固定水深，探討氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖



(圖 6-16)四種水溫下的氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖

1. 上個實驗得知，我們實驗條件下的水溫對氣泡體積影響很小，此結果也在這個實驗中呈現出來。四個溫度的數據落點相近，其趨勢線近乎重疊，顯示出水溫的影響無顯著差異。因此，我們將所有數據視為同一溫度再次作圖，得到趨勢線如下



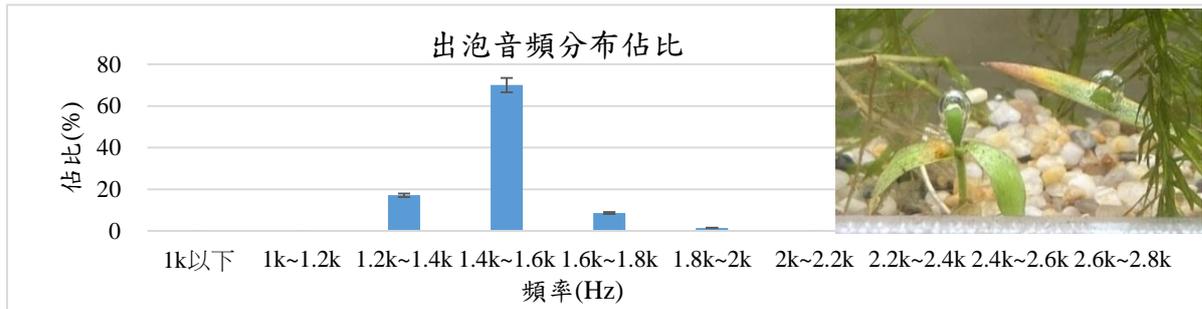
(圖 6-17)四種水溫下的頻率對體積作圖

2. 結果顯示，出泡聲音頻率隨著氣泡體積增加而下降，也就是小氣泡的釋放伴隨著高頻聲音，大氣泡則伴隨著較低頻聲音。
3. 所得趨勢線的公式為：出泡頻率 = $1.2984 \times \text{直徑}^4 - 38.897 \times \text{直徑}^3 + 449.64 \times \text{直徑}^2 - 2445.9 \times \text{直徑} + 6327.3$ ，我們將運用此趨勢線由錄到的出泡聲音頻率推估出水中氣泡的體積大小範圍。

四、未汙染~探討水草在受傷下的氣泡表現

(一)未修剪水草的出泡聲音頻率分析

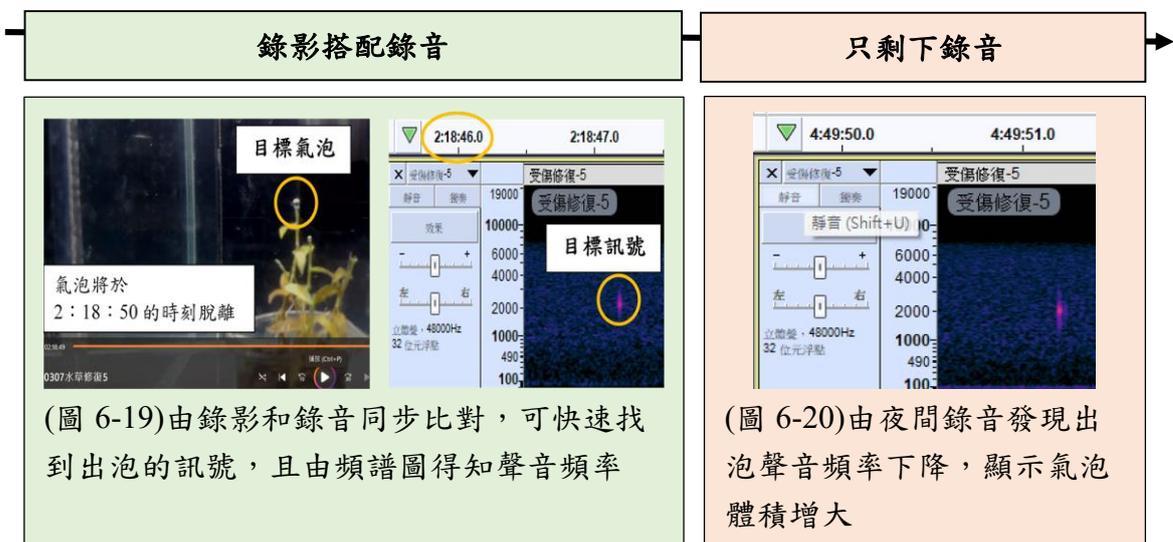
1. 觀察泡泡龍水草的出泡模式，發現存在兩種出泡模式：頂端直接釋放和葉面上釋放。
2. 分析音檔，未修剪泡泡龍(在此我們視為對照組)的出泡聲音頻率分布大多落於1200Hz~1800Hz，藉由趨勢線推出氣泡直徑落在3.82mm~5.33mm，其中又以1400Hz~1600Hz所佔最多，高達70%，其氣泡直徑為4.10mm~4.66mm。



(圖 6-18)健康泡泡龍水草的出泡聲音頻率佔比分布圖

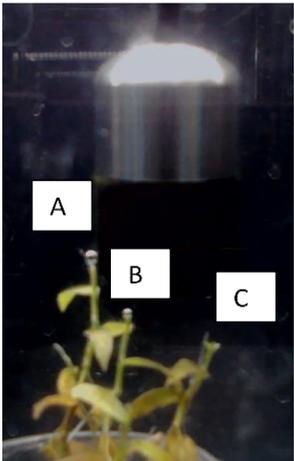
(二)受傷水草的氣泡表現

1. 在此部分中，我們以同步錄影和錄音方式進行實驗。受限於我們的錄影設備，錄影時間最多只能持續3小時，實驗過程需隨時監控確保下一支影片的錄影，而錄音則無此限制，能一直錄製下去。因此夜間的錄音對我們的實驗十分重要，這就猶如失去了視力還有聽力可以依賴呀!
2. 我們參照同步錄影和錄音檔案學習辨識出泡訊號的特徵，即便錄影已停止，仍有足夠的準確度辨識出夜間的出泡訊號，分析出泡聲音頻率和計數出泡速率，只是無法完全確認出泡的來源。



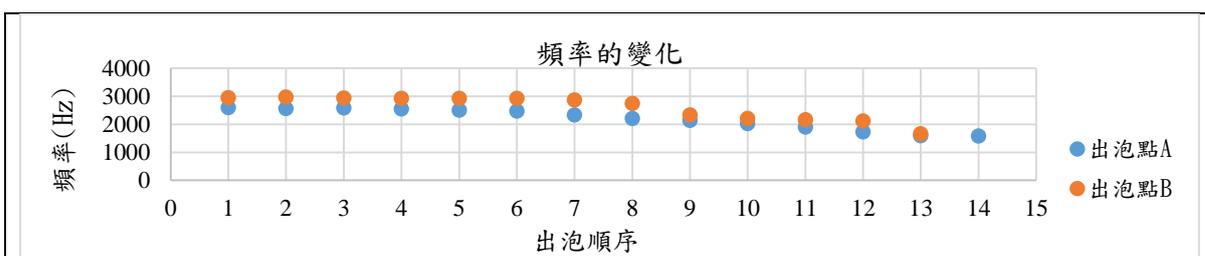
3. 實驗對象有 A、B、C 三個出泡點，下方表格中紅色且加註*號的數據即為由夜間錄音紀錄下的訊號，因為 C 都沒有出泡且有前面的出泡間隔提供參考，因此這四個數據可推論出泡來源。

(表 6-1)水草受傷後的出泡紀錄

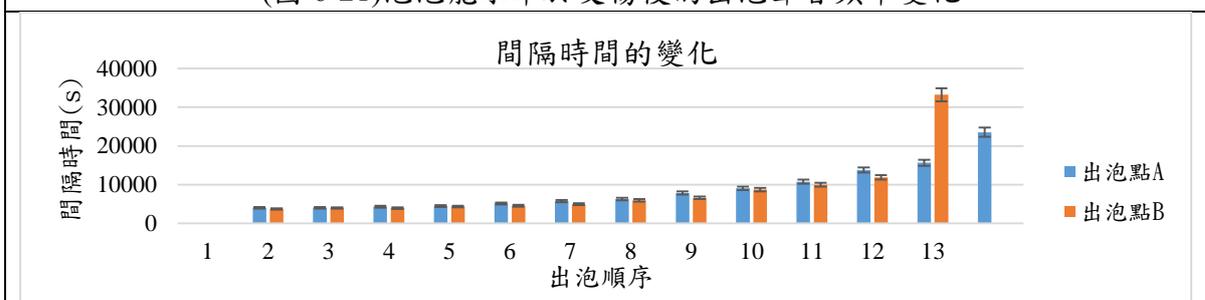
	出泡點 A			出泡點 B		
	出泡時間 (s)	間隔時間 (s)	頻率 (Hz)	出泡時間 (s)	間隔時間 (s)	頻率 (Hz)
	451		2599	2321		2956
	4464	4013	2571	6051	3730	2971
	8495	4031	2584	10020	3969	2938
	12784	4289	2559	13942	3922	2926
	17245	4461	2510	18299	4357	2927
	22348	5103	2477	22822	4523	2928
	28103	5755	2338	27753	4931	2873
	34373	6270	2211	33692	5939	2745
	42204	7831	2150	40269	6577	2333
	51264	9060	2029*	48975	8706	2217*
	62014	10750	1908*	58948	9973	2167*
	75782	13768	1730	70846	11898	2118
	91435	15653	1594	104041	33195	1669
	114961	23526	1581			

*為透過錄音記錄分析出來的數據

4. 受傷後的出泡聲音頻率及間隔時間隨時間的變化圖



(圖 6-21)泡泡龍水草於受傷後的出泡聲音頻率變化



(圖 6-22)泡泡龍水草於受傷後每次出泡的時間間隔變化

5. 結果顯示，受到機械傷害後的出泡口一開始的出泡速率快、體積小。隨著下一次的

出泡間隔時間穩定拉長，出泡頻率在 2 天內便由近 3000Hz 的頻率降至未受傷時的出泡頻率範圍 1200Hz~1800Hz 之間。

6. 藉由頻率對體積的趨勢線，可推得數據如下：

(表 6-2)受傷後的氣泡聲音頻率和推估氣泡半徑

出泡點	第 1 顆頻率(Hz)	第 1 顆半徑(mm)	最後 1 顆頻率(Hz)	最後 1 顆半徑(mm)
A	2599	2.09	1581	4.15
B	2956	1.51	1669	3.93

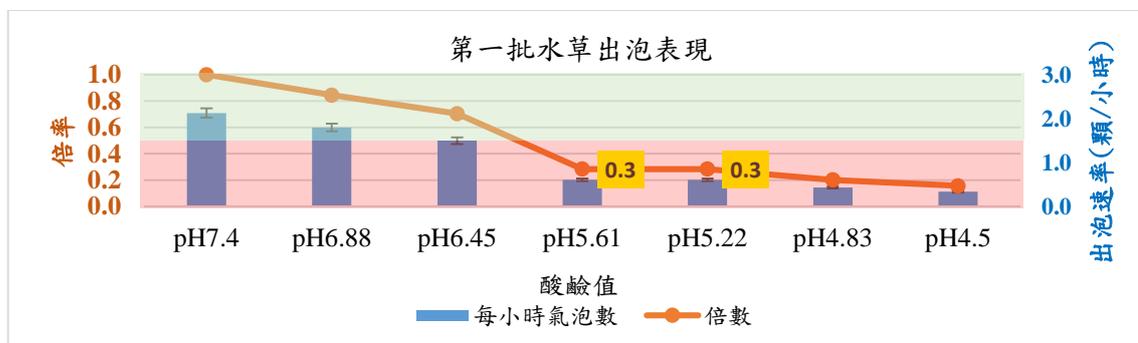
7. 受傷後的氣泡變化由出泡快、頻率高逐漸出泡慢、頻率低，推測水草在剪切的傷口處應有某些機制在發生，使得氣泡得以停留的更久，待氣泡更大一些再釋放，此部分的疑惑和實驗待以後有機會進一步研究。

8. 實驗中，我們“聽”到了受傷水草在兩天內的出泡聲音變化，這個充滿驚喜的發現為我們一開始的想法~水聽器能否作為水下生物“即時監控”的好工具~提供一些可能性。

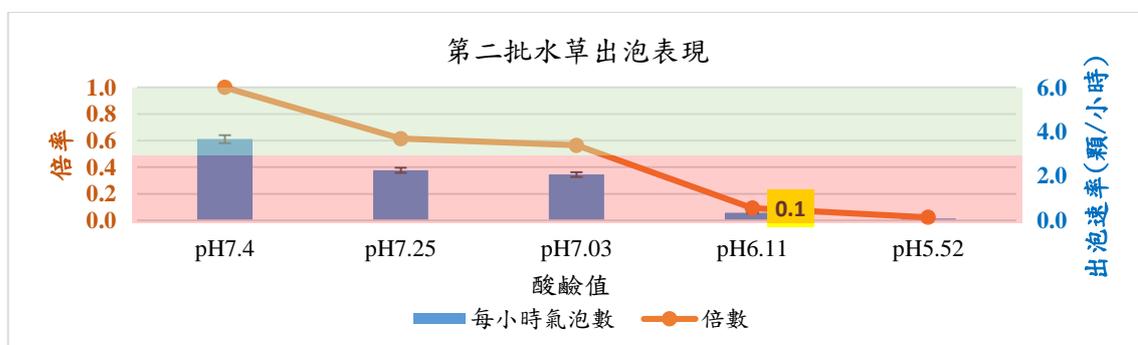
五、 汙染~探討兩種水草在不同酸鹼值下的氣泡表現

(一)泡泡龍在酸化下和脫離酸化後的氣泡表現

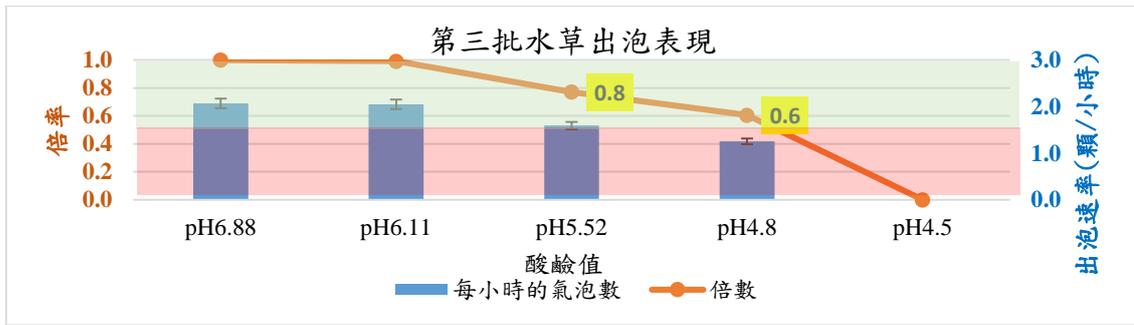
1. 泡泡龍在不同酸鹼值下的出泡速率表現：



(圖 6-23) 第一批水草隨酸鹼值的出泡表現比較圖

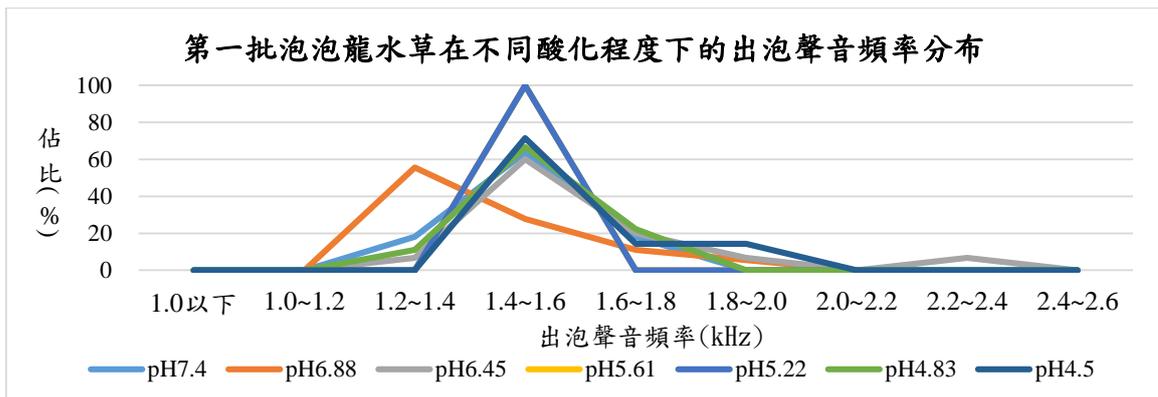


(圖 6-24) 第二批水草隨酸鹼值的出泡表現比較圖

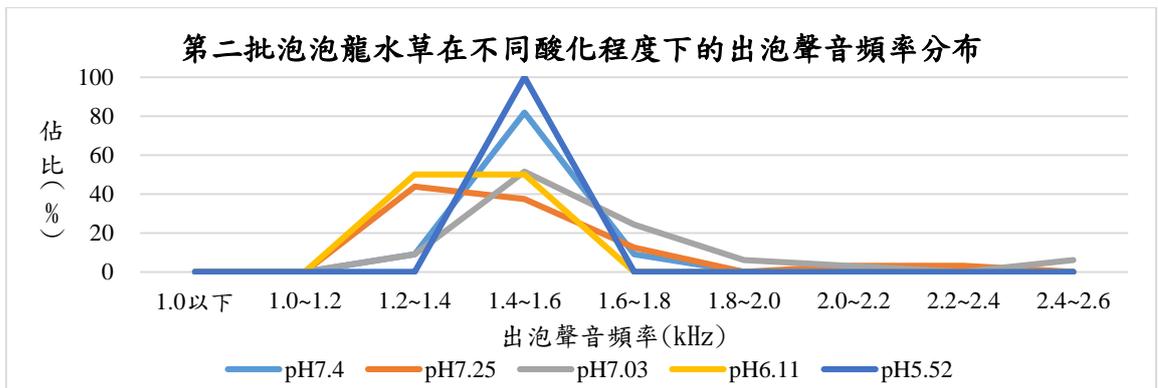


(圖 6-25)第三批水草隨酸鹼值的出泡表現比較圖

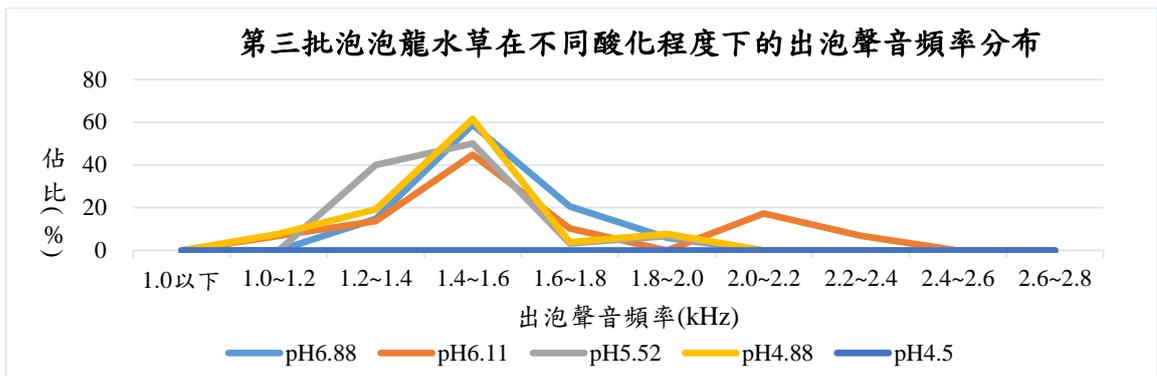
- 我們以同一批水草經歷 pH 值由 7 降至 4.5 的完整歷程後才更換成下一批，才能觀察並記錄到相同出泡點的變化。
- 每一批的出泡速率均隨著酸度增加而下降**，雖然造成每一批水草出泡停止所需的 pH 值存在個體差異，每一批水草的出泡速率減少至 5 成以下所對應的酸鹼值略有不同，但**降至 pH=4.5 時幾乎都不會再出泡了**，顯示酸度抑制水草的光合作用。
- 泡泡龍水草在不同酸鹼值下的出泡頻率分布：



(圖 6-26) 第一批泡泡龍在不同酸化程度下的出泡聲音頻率分布圖

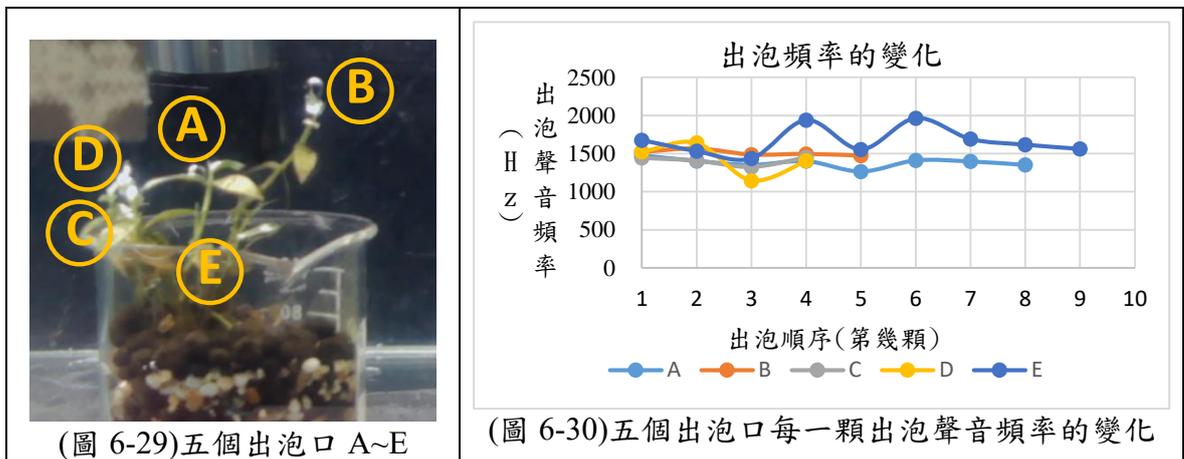


(圖 6-27) 第二批泡泡龍在不同酸化程度下的出泡聲音頻率分布圖



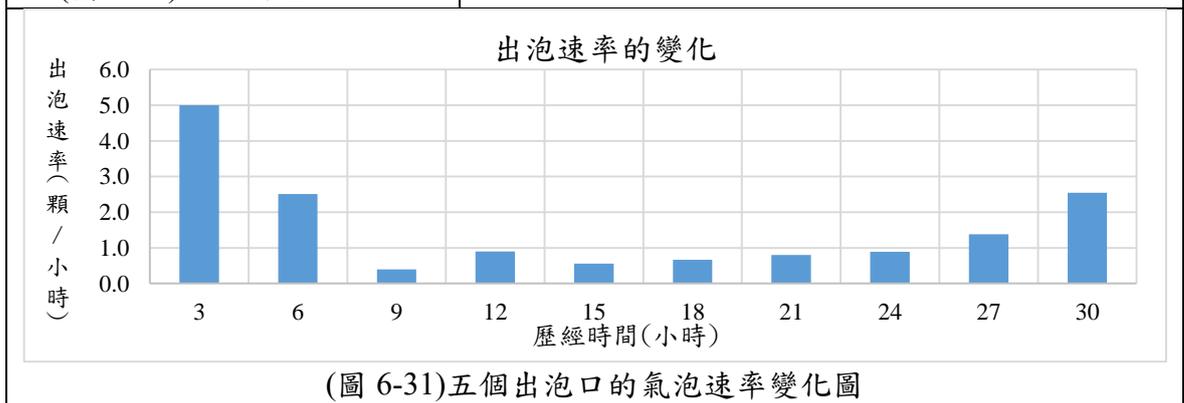
(圖 6-28) 第三批泡泡龍在不同酸化程度下的出泡聲音頻率分布圖

- 水草在酸化下的出泡聲音頻率未發生明顯變化，顯示出泡體積大小未受到影響。
- 我們結合出泡的速率和聲音頻率分布結果，可以初步得知酸化對泡泡龍的影響表現在氣泡量減少，但氣泡大小仍與原來相近。
- 泡泡龍離開酸化環境後的出泡表現五個出泡點的出泡速率變化與頻率變化



(圖 6-29) 五個出泡口 A~E

(圖 6-30) 五個出泡口每一顆出泡聲音頻率的變化

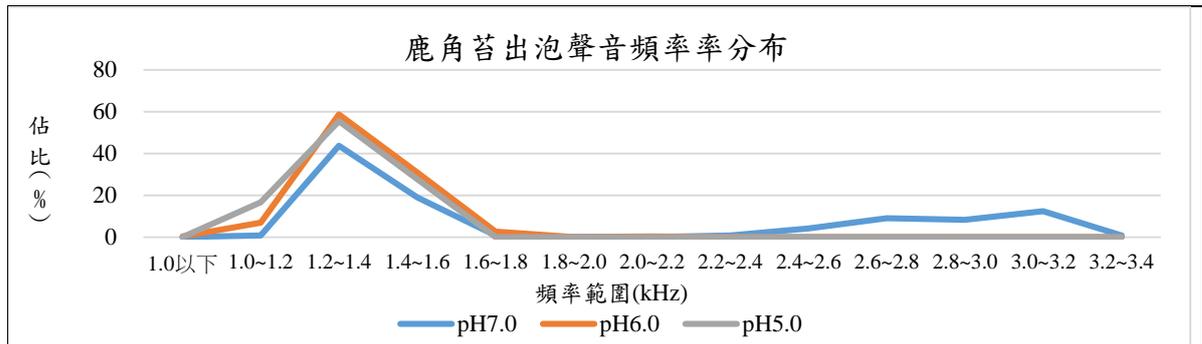


(圖 6-31) 五個出泡口的氣泡速率變化圖

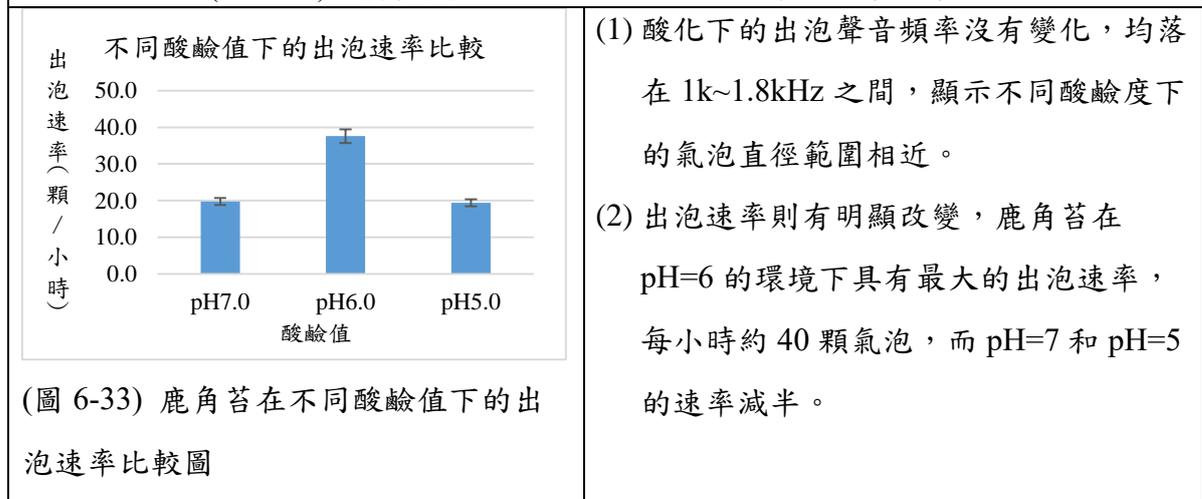
- 泡泡龍置於 pH4.5 的酸性環境中後很快進入不冒泡狀態，我們讓泡泡龍持續 2 天的不冒泡狀態再移到 pH6.8 的水缸中，觀察出泡速率和頻率的回復表現，並以每小時的氣泡數(即為出泡速率)來量化泡泡龍水草脫離酸化環境後的修復表現。
- 結果顯示，不冒泡的泡泡龍水草於 3 個小時內便能開始冒出氣泡，最初的出泡速率由快轉慢後再慢慢回升，而出泡聲音頻率則呈現高低波動現象。

(二)鹿角苔在酸化下和脫離酸化後的氣泡表現

1. 鹿角苔在不同酸鹼值下的出泡速率及頻率分布



(圖 6-32) 鹿角苔在不同酸鹼值下的出泡聲音頻率分布圖



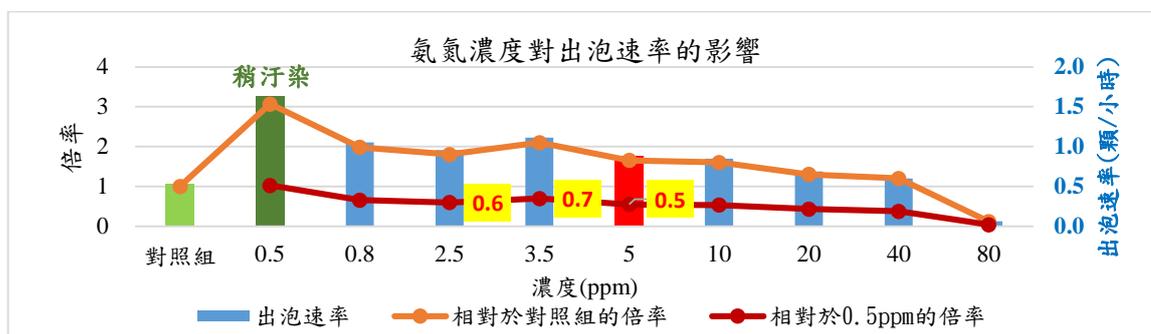
(圖 6-33) 鹿角苔在不同酸鹼值下的出泡速率比較圖

(三)結果

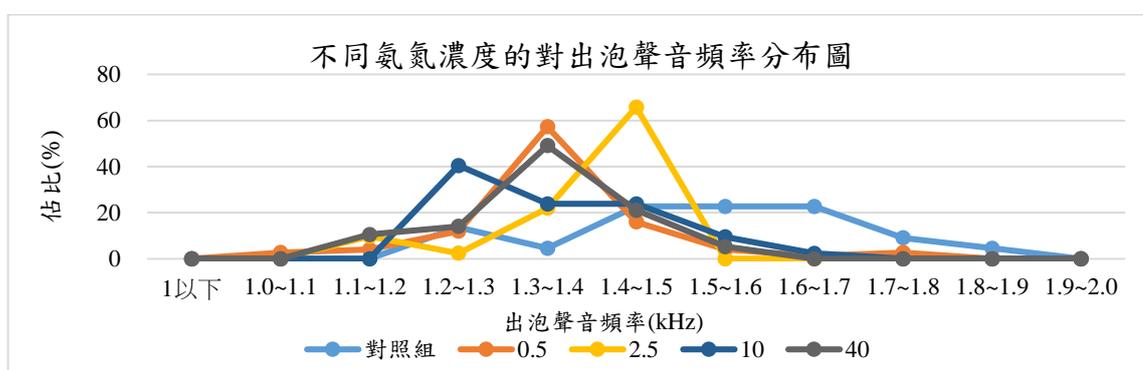
1. 由兩種水草在酸化下的表現，均得到相同的結果：酸鹼值會抑制光合作用導致出泡速率下降，甚至無法出泡，而氣泡大小則沒有變化。
2. 因為水中聲速比空氣中快很多，能將透過出泡速率的快慢改變和聲音頻率的高低變化快速地呈現出來，讓我們即時得知水質遭受酸化。

六、 汙染~探討泡泡龍水草在不同氨氮/銅離子濃度下的氣泡表現

(一) 農業~以氨氮濃度探討



(圖 6-34)不同氨氮濃度下的出泡速率以及倍率比較



(圖 6-35) 不同銅離子濃度下的出泡速率以及倍率比較

1. 我們在實驗中所選用的泡泡龍水草的出泡表現於 0.5ppm 便展現出 3 倍多的活躍表現，隨著氨氮濃度的提升，氣泡速率隨之下降，40ppm 時只有 1.2 倍的出泡表現，但仍高於對照組，最後於 80ppm 時才至幾乎不出泡的表現，而出泡聲音頻率則不受濃度影響。
2. 安全濃度的氨氮(0.5ppm 以下)反而能促進水草的出泡速率，出泡速率為對照組的 3.1 倍，這與植物對氮的需求相吻合。但隨著濃度升高，氨氮很快就會對水草造成抑制，0.5ppm~40ppm 時的出泡速率緩慢降至對照組的 1.2 倍，80ppm 時已幾乎停止出泡。這說明即使是某些營養物質，若超過生物需求的適度範圍，也會成為污染因子而產生毒害效應。
3. 水聽器設置前可先取得設置點的河川水各項數據，其中也包含氨氮濃度的數值，現假設河川水質為未(稍)受汙染等級，則我們的實驗結果與河川汙染等級分類相應照結果為：
 - (1)在排除可降解含氮廢物的微生物大量出現的情形之下，若出泡速率突然降至原來的 6~7 成時，可初步判斷水中氨氮已接近 3ppm，為中度汙染，甚至可能為嚴重汙染。

(2)若是出泡速率大幅提升，可初步判斷水中氨氮微幅增加，但仍在安全範圍內。

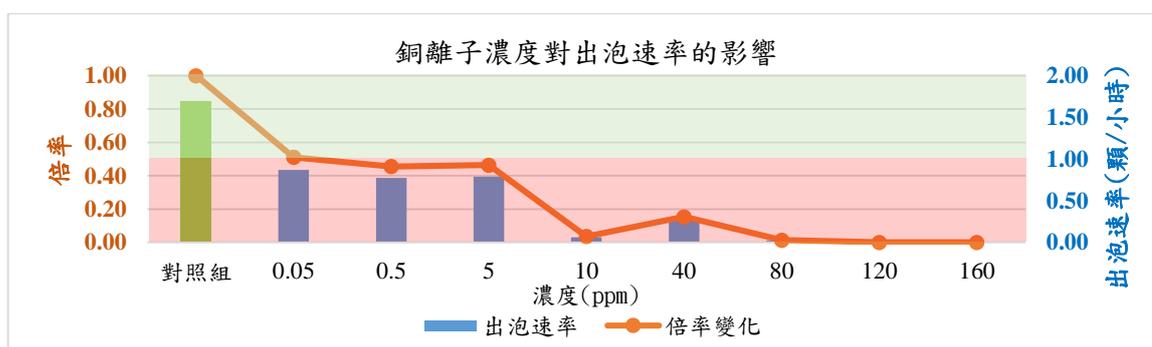
表1、河川污染等級分類表
表內積分數為DO、BOD、SS、NH₃-N點數之平均值

監測項目	未(稍)受污染	輕度污染	中度污染	嚴重污染
溶氧量(DO)mg/L	DO \geq 6.5	6.5 > DO \geq 4.6	4.5 \geq DO \geq 2.0	DO < 2.0
生化需氧量(BOD ₅)mg/L	BOD ₅ \leq 3.0	3.0 < BOD ₅ \leq 4.9	5.0 \leq BOD ₅ \leq 15.0	BOD ₅ > 15.0
懸浮固體(SS)mg/L	SS \leq 20.0	20.0 < SS \leq 49.9	50.0 \leq SS \leq 100	SS > 100
氨氮(NH ₃ -N)mg/L	NH ₃ -N \leq 0.50	0.50 < NH ₃ -N \leq 0.99	1.00 \leq NH ₃ -N \leq 3.00	NH ₃ -N > 3.00
點數	1	3	6	10
污染指數積分值(S)	S \leq 2.0	2.0 < S \leq 3.0	3.1 \leq S \leq 6.0	S > 6.0

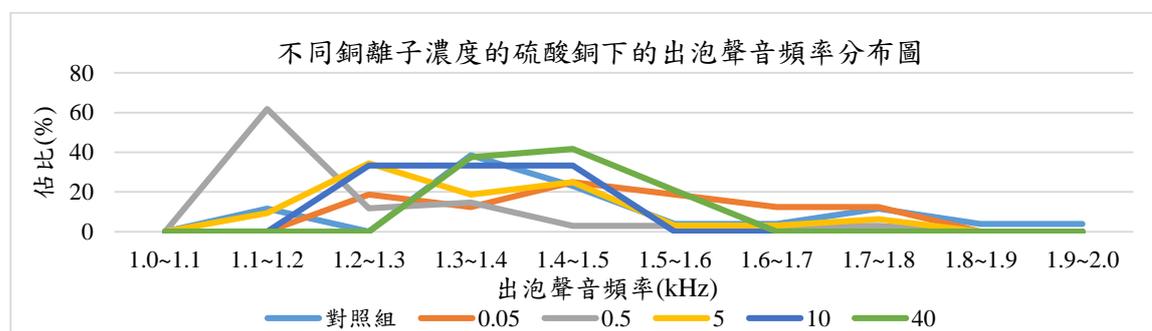
(圖 6-36) 河川汙染等級分類，取自環境部水質保護網

4. 根據實驗結果，我們可將水草在短時間內的異常表現，無論是過度活躍或是不出泡，視為警示或水下生物的求救訊號。而根據此部分實驗結果，我們有機會藉由水草的活躍出泡，甚至是”過動”表現，做出初步的判斷：水中的氨氮濃度提升，需要我們下一步的到場進行進一步的檢測

(二) 工業~以銅離子濃度探討



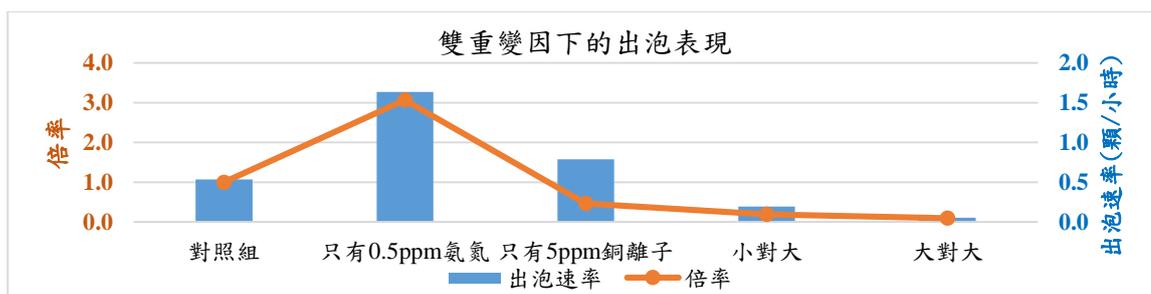
(圖 6-37) 泡泡龍水草於不同的銅離子濃度下的出泡表現比較圖



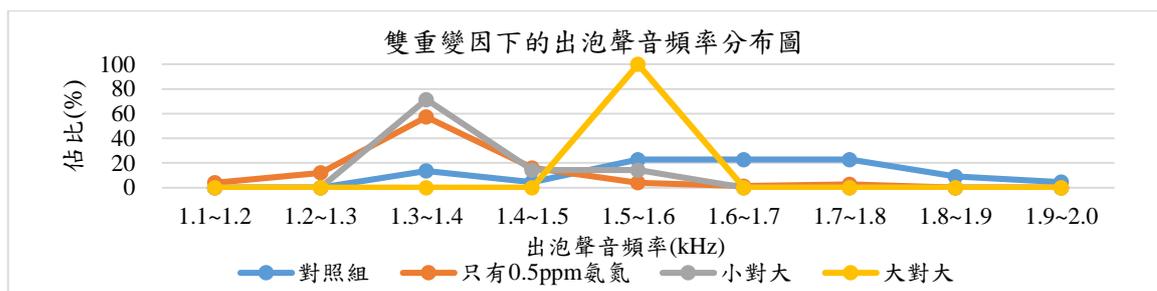
(圖 6-37) 泡泡龍水草於不同的銅離子濃度下的出泡聲音頻率分布圖

1. 結果顯示當濃度為 0.05ppm 時，兩天內表現出的出泡速率已降至對照組的 5 成左右，隨著濃度增加至 5ppm 時仍維持相近的出泡速率，而出泡聲音頻率未有明顯差異，顯示氣泡大小沒有變化，與氨氮、酸化的結果一樣。

(三) 雙項變因下的影響



(圖 6-38) 泡泡龍水草於雙重變因下的出泡表現比較圖



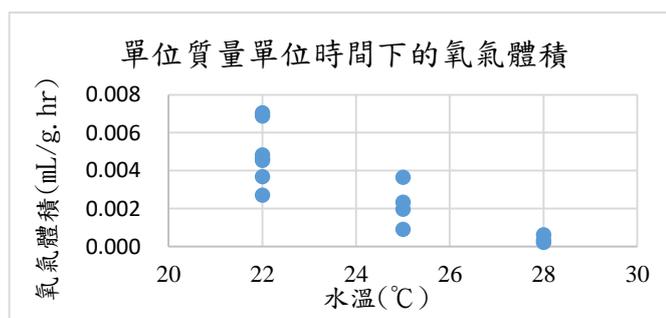
(圖 6-39) 泡泡龍水草於雙重變因下的出泡聲音頻率分布圖

1. 實際的水域會同時存在多項變因，在這個部分，我們先從兩項變因開始，進行以下兩項實驗：

(1) 小對大：安全濃度氨氮(0.5ppm) + 過量銅離子(5ppm)的結果顯示即使氨氮濃度在無害範圍，但與過量銅離子共同作用時，仍會大幅降低水草的出泡速率至對照組的2成以下，較單一變因下的銅離子(4成)來的嚴重，凸顯出銅離子對水草的危害，也暗示著不同污染物之間可能存在協同或拮抗的複雜關係，需要進一步深入研究。

(2) 大對大：當過量氨氮(3.5ppm)搭配過量銅離子(80ppm)時，如同預期的結果，出泡速率降至對照組的1成以下。

七、探討水溫對氧氣體積影響



(圖 6-40) 鹿角苔水草於不同溫度下的出泡體積作圖

1. 因為實驗中的泡泡龍出泡點不多，可收集的氧氣量太少，無法顯現出差異，故只呈現鹿角苔的氧氣體積比較。
2. 我們實驗中的鹿角苔片存在兩種規格：7cm × 7cm 以及 4cm × 4cm，因此以每公克鹿角苔在每個小時內的產氧體積進行比較。
3. 實驗結果顯示出，氧氣體積隨著溫度上升而下降。考量實驗規模不大，若大幅增加實驗樣本數量，可以獲得更多數據進行水溫對產氧量的進階討論。

柒、綜合討論

- 一、由參考文獻 5 知道：已有利用聲景監測瀕死珊瑚的實際案例，研究人員透過分析水下聲景掌握珊瑚礁的健康狀況，並及時發現問題，讓我們意識到水下聲學技術在監控水質污染方面的巨大潛力，通過收集和分析水下聲景的變化便有可能確認污染源的位置和性質，並採取適當的措施來改善水質並為水體環境做出貢獻。
- 二、水草是水域生態的基礎組成，其生理狀態可透過出泡速率反映出來，而水草的生理狀況又與水質品質密切相關。水草的出泡速率快慢會受到水草密度的影響，所以出泡速率快慢的意義不大，而是出泡速率的變化才有意義。因此，我們將**出泡速率的變化**作為判斷水質是否遭受污染的重要指標。
- 三、我們可從錄下的音檔中得到兩個重要的物理量：出泡聲音頻率以及出泡速率，綜合實驗結果顯示：
 - (一)出泡聲音頻率：只有當水草遭受機械傷害後才有增加現象，也就是出泡聲音頻率變高了，其餘水質的 pH 值、氨氮濃度以及銅離子濃度皆無明顯改變。
 - (二)出泡速率：無論是受到機械傷害或者水中的 pH 值、氨氮濃度以及銅離子濃度改變皆會造成出泡速率的改變。
 1. 機械傷害後，水草不僅出泡聲音頻率顯著變高，出泡速率也明顯提升。
 2. 氨氮濃度：無害的 0.5ppm 呈現出 3.1 倍的出泡速率，0.8ppm 隨即降至 2 倍，之後在 0.8ppm~40ppm 之間呈現 1~2 倍的倍率波動，至 80ppm 時達幾乎不出泡的狀態。
 3. pH 值或銅離子濃度的單項變因：隨著酸度加重至 pH=4.5 或銅離子濃度達 80ppm，出泡速率已達到不出泡狀態。

4. 氮氮以及銅離子的雙項變因：無害的氮氮濃度搭配過量銅離子濃度 5ppm，出泡速率降至對照組的 2 成，較單一變因的 5ppm 銅離子更為嚴重(4 成)，顯示銅離子對於水草更具殺傷力。

四、不論是 DNA 的組成或是細胞的合成都需要氮源，因此農作物才會使用氮肥，而農夫澆灌農作物時往往使用了過量的含氮肥料，這些過量的含氮物質在雨水沖洗下被帶到了河水中，會對水下植物、無脊椎動物以及脊椎動物造成什麼影響或傷害呢？在氮氮的實驗中，當水中含有 0.5ppm 氮氮時水草居然展現出相對於對照組 3.1 倍出的泡速率，此結果正與植物需要氮源的事實相符。超過 0.5ppm 後便達到河川汙染等級分類中的輕度、中度和重度汙染等級，逐漸升高的濃度導致出泡速率變慢至幾乎不出泡的狀態。

五、水汙染可能來自多種來源，包括生活廢水、農業廢水和工業廢水，且含有不同的汙染物如氮、磷、重金屬離子等。這種複雜性使得水質監測和汙染控制變得非常具有挑戰性也使得單一的水質檢測方法可能無法完全掌握汙染的全貌。所以我們提出以水下聲學方式進行常見的水質汙染因子(pH 值、氮氮、銅離子)的單一及雙項變因對水草冒泡的影響，而其他更多的單一變因、複合式變因或更多水生植物的選擇，有待一系列的研究和驗證，期待將聲學技術與化學、生物等方法相結合，以獲取更多元的水質資訊，為水汙染治理提供更有力的支撐。

六、我們作品中用來判斷水質汙染指標為出泡聲音頻率和出泡速率變化，是否得知氣泡體積大小並非必要的條件，但我們希望不用直接觀測或測量氣泡本身體積，就能夠從聽到的聲音數據得知水中氣泡的大小分布，因此花費好久的時間進行實驗三：固定水深，探討不同水溫下的氧氣出泡頻率與體積之關係，以利我們從聽覺訊號中，建構出視覺上的直觀畫面。

七、趨勢線的適用深度與此方法的可行性：

(一) 實驗三的趨勢線為出泡位置位於水下 18 公分左右時的出泡聲音頻率和氣泡直徑關係所得的結果，若水深改變將會有不同的趨勢，可於未來進行水下深度對於出泡聲音頻率影響的進階探討。

(二) 我們也嘗試從兩個物理量推論出水草當下的平均光合作用效能，透過實驗三的趨勢線可由出泡聲音頻率可知氣泡大小，也就是每顆氣泡的體積有多少，而出泡速率為每小時產出幾顆氣泡，兩者相乘的乘積，便可用來表示光合作用的效能，也就是每小時能夠產出多少體積的氧氣，作為水草生理表現的初步指標，未來有機會也可進一步探討。

八、收音結果的應用

(一) 先取得每個位置點出泡平均表現

(二) 當出泡聲音頻率上升時，可初步判斷為水草遭受啃食而受傷。

(三) 當出泡速率減慢但仍能出泡時，可初步判斷為水質遭受酸或銅離子的污染。

(四) 當出泡速率減慢且出泡速率加快時，可初步判斷為水中氮氮微幅增加，但仍在輕度污染範圍之內。

(五) 當出泡速率減慢至 2 成以下或是幾乎不出泡的狀態，可初步判斷為水質遭受嚴重污染。

(六) 接收到遭受嚴重污染的警訊後，立即啟動水質調查作業，進一步確認污染的確切原因。

九、Audacity 分析採用的單位是 dBFS，0dBFS 為其最大容許音量，我們錄到的出泡聲音音量最弱可到-86dB 左右，最強可到-30dB，其聲音功率強度超出 10 萬倍之多，故我們可以從音量的變化得知功率的改變。

十、泡泡龍水草和鹿角苔的選擇說明：

我們請教水族店的工作人員並請他們推薦新手入門等級的水草，選擇了單子葉植物~泡泡龍和苔蘚類植物~鹿角苔，其實驗中具有優缺點分述如下：

(一) 泡泡龍具有明確數量的出泡點，方便我們透過同步錄影和錄音的方式追蹤同一個出泡點的出泡聲音頻率變化以及每一次出泡的間隔時間變化，但收集到的氧氣總體積過少，短時間無法明顯分辨。

(二) 整片的鹿角苔能產生足量的氧氣泡有利於氧氣體積的收集，但無法進行單點的氣泡追蹤。

捌、結論與應用

目前的水質檢測方式以生化方法為主，生物指標為輔，在檢測數據的收集上，已有透過感測器進行收集的實際方法在運用，偵測的項目有物理性質上的溫度和濁度，化學性質上的 pH、電導率和溶解氧，而我們嘗試以水下聲學作為輔助方法，藉由常駐在水下水草的光合作用表現發生變化，主要是音頻的高低變化以及出泡速率的快慢變化，即時得知水質遭受污染的可能性，爭取時間進一步偵查並落實河川的保護。

一、水草出泡訊號辨識與分析

- (一) 在水草的選擇上，我們選擇了單子葉植物~泡泡龍和苔蘚類植物~鹿角苔，共兩種容易冒泡的水草進行實驗。
- (二) 透過同步錄音和錄影方式，將光合作用產生的氧氣由釋放到出水面的過程歸納成三個階段：出泡→撞擊水面→擾動水面，且水下的水聽器在無覆蓋的情況下也能清楚記錄下氧氣的出泡聲音。
- (三) 利用 audacity 分析出泡聲音，出泡聲在時頻圖上呈現帶有黃色亮點的紫色直線，在頻譜圖上的特徵多為單一峰值，偶爾為雙峰或三峰，皆可辨識出來。
- (四) 透過分析音檔，得到兩個重要的物理量：
 1. 出泡聲音頻率：氧氣泡脫離葉面時會發出聲音，可由音檔中分析出泡聲音頻率的高低。
 2. 出泡速率：每個變因均進行兩天的實驗，分析音檔可以計數氣泡數量並算出兩天的平均出泡速率。

二、水草於未污染下的受傷出泡表現

- (一) 為了避免水草受傷後的氣泡表現對於污染下的氣泡結果造成影響，導致誤判，因此先進行此項實驗。
- (二) 受傷前：泡泡龍水草有兩種出泡形式：頂端直接釋放和葉面上釋放，健康狀態下的出泡聲音頻率為 1200Hz~1800Hz，氣泡直徑落在 3.82mm~5.33mm；健康鹿角苔氣泡頻率為 1000Hz~1800Hz。
- (三) 受傷後：受傷的出泡口在 2 天內便有明顯變化，出泡速率由慢到快，出泡聲音由高轉低，在 2 天內便由近 3000Hz 的頻率降至未受傷時的出泡頻率範圍 1200Hz~1800Hz 之間。氣泡聲音頻率顯著偏高，偏離正常頻率，和之後的污染下出泡聲音頻率不同。

三、水質汙染變因

(一) 單一變因

1. pH 值的影響：

- (1) 酸化的實驗結果顯示，兩種水草的出泡速率隨酸化程度加劇呈現下降趨勢，甚至泡泡龍在 pH=4.5 時會停止出泡，而出泡聲音頻率則沒有明顯變化，顯示酸化導致氣泡變少但並未縮小。
- (2) 離開酸化環境，3 個小時內便會又開始快速冒泡，**出泡速率一下子來到很快，隨後降低又在緩緩上升至未加酸的表現**

2. 氮氮：

安全濃度的氮氮(0.5ppm 以下)反而能促進水草的出泡速率，出泡速率為對照組的 3.1 倍，這與植物對氮的需求相吻合。但隨著濃度升高，氮氮很快就會對水草造成抑制，0.5ppm~40ppm 時的出泡速率緩慢至對照組的 1.2 倍，於 80ppm 時幾乎停止出泡。這說明即使是某些營養物質，若超過生物需求的適度範圍，也會成為污染因子而產生毒害效應。

3. 銅離子：

結果顯示當濃度為 5ppm 時，兩天內表現出的出泡速率已降至對照組的 4 成以下，而出泡聲音頻率不受影響，顯示氣泡大小沒有變化。

(二) 雙項變因

1. **安全氮氮(0.5ppm) + 過量銅離子(5ppm)：**

結果顯示即使氮氮濃度在無害範圍，但與過量銅離子共同作用時，仍會大幅降低水草的出泡速率至對照組的 2 成以下，除了凸顯銅離子對水草的危害，也暗示著不同污染物之間可能存在協同或拮抗的複雜關係，需要進一步深入研究。

2. **過量氮氮+過量銅離子：**

當過量氮氮(3.5ppm)搭配過量銅離子(80ppm)時，如同預期的結果，出泡速率降至對照組的 1 成以下。

四、聽聲音頻率得知體積大小

- (一) 在我們的實驗條件上，以相同管口釋放氧氣泡，得到水溫對釋出的氧氣泡體積沒有影響。
- (二) 我們選用不同管徑的塑膠管，將管口修剪成平口或斜口以便改變釋放的氣泡體積，如此一來便能在在水中製造出大小不同的氣泡，分析聲音頻率和氣泡直徑的關係。

(三) 我們將泡出的氧氣泡假設為球形，取得氧氣氣泡直徑與出泡聲音頻率的關係圖，得出水深為 18cm 時的關係式為：出泡頻率 = $1.2984 \times \text{直徑}^4 - 38.897 \times \text{直徑}^3 + 449.64 \times \text{直徑}^2 - 2445.9 \times \text{直徑} + 6327.3$ ，並以此為依據由頻率推知水草冒出的氧氣泡直徑。

五、 水溫對於產生的氧氣體積實驗，得到氧氣體積產量隨著溫度上升而下降的趨勢。

六、 在音檔中辨識出泡訊號在進行分析是非常耗費時間和勞力的工作，未來可結合 AI 學習並執行，一定省時且更有效能，並把水下聲學技術與物聯網、大數據等方法結合，實現智慧化的水質監測網。

七、 可針對台灣的珍貴水草，例如：台灣萍蓬草、台灣水韭等等，取得他們的出泡聲音頻率特徵並將健康時的氣泡表現建立成資料庫，發展成為遠端系統，同時監控水質和水草狀況。

玖、 未來展望

汙染因子上，增加磷、鎳、鉛...等其他成分，水草選擇上，增加更多種類，尤其是台灣原生水草，增加單一因子和複合因子的探討，提升此方法的可行性。

壹拾、 參考資料

1. 水保科普小知識之台灣河川水質簡介。

<https://water.moenv.gov.tw/Public/CHT/Encyclopedia/tip01.aspx>

2. 放流水標準。 <https://law.moj.gov.tw/LawClass/LawAll.aspx?pcode=O0040004>

3. 河川湖泊監測頻率與先測項目。 <https://lab.ksepb.kcg.gov.tw/kaqm/tw/b0402a.aspx>

4. 林易蜀、陳俊桀、楊純明。介紹農地之重金屬汙染及其復育。

<https://scholars.tari.gov.tw/bitstream/123456789/11708/1/24-1-2.pdf>

5. 【原來「聲音」可以拯救珊瑚】也讓台灣垂死珊瑚聽聽看吧！英澳「聲音施肥」奇招吸 2 倍魚群進駐。

<https://buzzorange.com/ctiorange/2019/12/06/coral-sound-ocean-protect/>

6. 陳恩霆、王靖吟、李心懿(2012)。係『金』ㄟ 一綠水螅作為重金屬汙染生物指標之研究。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會作品。

7. 莊立勝、甘凱仁、陳昱蓁 (2014)。生「萼」感「碳」－不同 pH 值酸化海水與石萼交互影響之研究。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/030317.pdf>
 8. 范綱行、楊朝欽、王瑞芬、張絢(1091)。水蘊草生命的新動力-探討水下立體聲音響之信號對水蘊草光合作用產氧量之影響。中華民國第 30 屆中小學科學展覽會作品。
 9. 夏珮雅、鄭筠蓁、陳柏臻(2021)。聽海哭的聲音~探討影響海洋噪音的因素。中華民國第 61 屆中小學科學展覽會作品。[NPHSF2021-030507.pdf \(ntsec.gov.tw\)](https://www.ntsec.gov.tw/NPHSF2021-030507.pdf)
- 引用照片或圖片

壹拾壹、 圖片出處

1. 圖片(1-1)引用自民視新聞台網頁。溪流「水盒子」24 小時監測水質 3 年揪 11 件違規排廢水
2. 圖片(6-36)引用自環境部水質保護網資料。
https://water.moenv.gov.tw/Public/CHT/WQInfo/monitor_river.aspx
3. 其他所有照片、圖片皆由本篇作者獨立完成。

【評語】 033012

此作品以水下聲學藉由分析水草冒泡所產生之聲訊進行其特徵頻譜之分析，特別以出泡聲音頻率高低及出泡速率快慢的改變來做為探討水質汙染程度的了解，整體研究具有其創新性。研究成果建議由於已可藉由研究成果獲取評估之技術開發，且可判斷為具有科學應用影響潛力，後續可思考在學理上之水質汙染物種對於聲學方面之交互效應。此外，能多探討實際水域場域中之干擾因子之效應，方可更能確立其監控之實用性，將可為環境工程貢獻其新式監控技術。

作品簡報

水草吐泡言汙 ~ 以水下聲學



作為監控水質汙染的可能性



摘要

本研究嘗試利用水下聲學技術，以水草冒泡的聲訊為指標，透過出泡聲音頻率高低及出泡速率快慢的改變即時掌握水質變化，期許為水污染的預警做出初步貢獻。首先，確認水草於未受污染情形下的受傷聲學表現，接著再探討農業及工業廢水等各項污染變因，如氮氣及銅離子的影響，結果顯示：水質酸化時，出泡聲音的頻率沒有變化，出泡速率則逐漸變慢，至 pH=4.5 時幾乎不出泡；輕度污染的氮氣濃度(0.5ppm)反而能促使水草出泡速率提升至 3.1 倍，但隨著濃度升高(0.8ppm)，又開始抑制出泡，當出泡速率突然降為輕度污染時的 6~7 成時，可初步判斷水質近期遭受較嚴重污染；銅離子會大幅降低出泡速率。最後，雙項污染(如氮氣+銅離子)將造成更大的影響，凸顯出銅離子對水草的傷害。

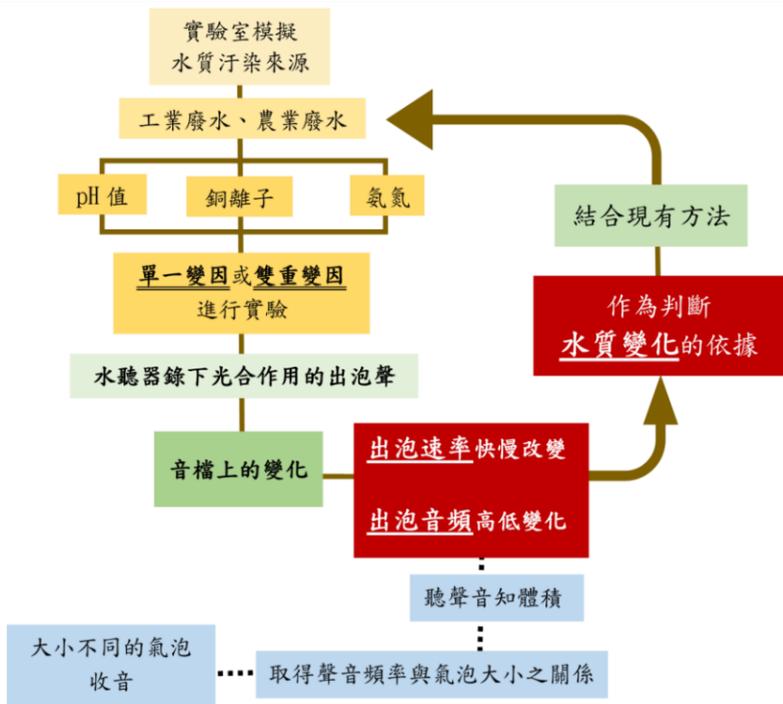
壹、研究動機

河川水質是否遭受污染一直以來都是備受關注的議題，而一則報導“水盒子”24 小時監控水質的新聞引起了我們的注意，報導中提及水盒子內部連接上四種感測器(pH、DO、EC 及水溫)，便可 24 小時監控並上傳水質狀況，但水質污染還有農業及工業廢水，例如：氮氣和重金屬離子等，這些污染物的濃度仍須到現場採集河水後才能進行分析...，這不禁讓我們想到：我們能否藉由水下不會移動的水草來及時得知水質是否遭受污染呢？而水草會釋出甚麼訊號？如何取得？又該如何分析？一連串的疑惑等待我們動手實作找出答案，希望可以利用水草遭受污染時的水下聲學改變及時得知水質變化，作為環境監控的新利器。



(圖 1-1)取自民視新聞台網頁

貳、研究流程圖與目的



- 一、分析氣泡發聲過程的特徵頻譜
- 二、半/無覆蓋收音方式比較
- 三、固定水深，探討不同水溫下的氧氣出泡聲音頻率與體積之關係
 - (一) 選擇出泡管材質
 - (二) 管口剪切方式如何影響氣泡體積
 - (三) 探討水溫對出泡體積的影響
 - (四) 氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖
- 四、未污染~探討水草在受傷下的氣泡表現
- 五、污染~探討兩種水草在不同酸鹼值下的氣泡表現
- 六、污染~探討水草在不同氮氣/銅離子濃度下的氣泡表現
 - (一) 農業~氮氣濃度的影響
 - (二) 工業~以銅離子濃度探討
 - (三) 雙項變因下的影響
- 七、探討水溫對氧氣體積的影響

參、實驗裝置與分析方法

一、實驗水草：Riccia fluitans(俗稱鹿角苔)、Arthraxon sp. "malaysia 1" (俗稱泡泡龍)

二、實驗裝置：氧氣泡釋放裝置、氧氣體積測量裝置、氧氣泡釋出之聲音測量裝置

三、使用軟體：audacity、image J

四、名詞解釋：

(一) 出泡聲音頻率：氧氣脫離葉面會發出聲音，用來描述這個出泡聲音的高低。

(二) 出泡速率：用以描述水聽器每小時記錄到的氧氣脫離聲音次數多寡，單位為顆/小時。

例如在 2 天內的平均出泡速率為每小時 2 顆氣泡，便紀錄為 2 顆/小時。

(三) 出泡速率的倍率：出泡速率由 2 顆/小時降為 1 顆/小時，則其倍率紀錄為 0.5 倍，且每一次的實驗時間持續兩天。

五、訊號處理與分析方法

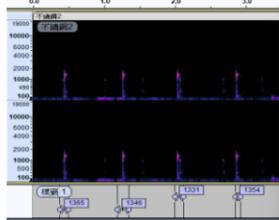


Riccia fluitans
(俗稱鹿角苔)

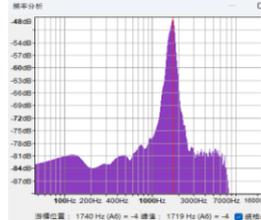
Arthraxon sp.
"malaysia 1"
(俗稱泡泡龍)



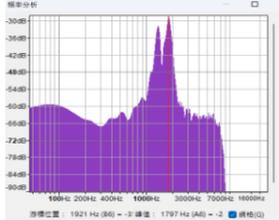
水聽器



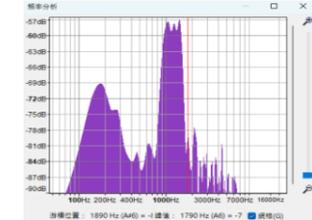
出泡聲音訊號



單峰：直接記錄



雙峰：記錄平均值



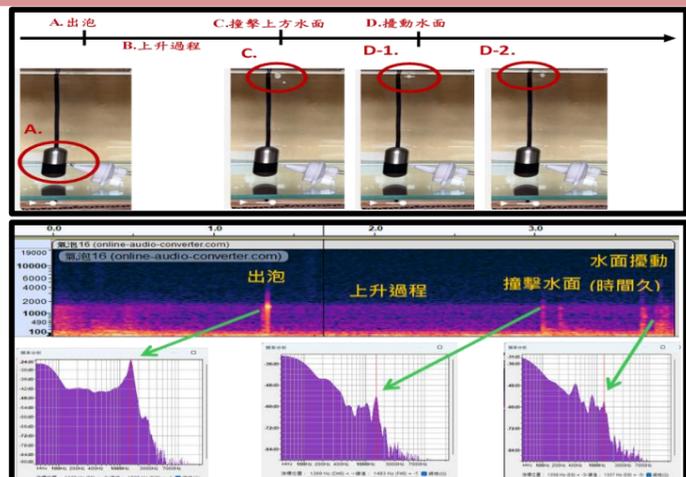
三峰：記錄平均值



收音裝置

肆、結果與討論

實驗一：分析氣泡發聲過程的特徵頻譜

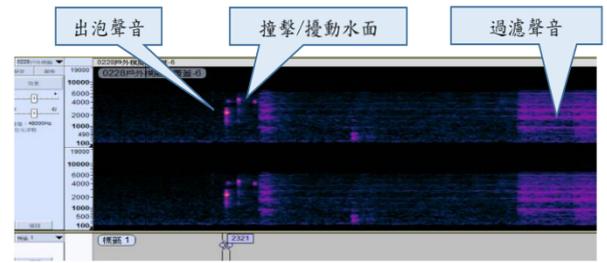


1. 透過慢動作錄影將整個過程歸納為三個階段：出泡、撞擊水面和擾動水面。
2. 時頻圖上的表現：
 - (1) 出泡當下為帶有黃色亮點(音量最大)的直線。
 - (2) 撞擊水面當下的訊號直線出現暗區且亮區頻率範圍下降。
 - (3) 水面擾動的訊號則呈現較粗的模糊直線區塊，顯示時間持續時間拉長。
3. 頻譜圖上的特徵：
 - (1) 出泡當下呈現明確的單一峰值。
 - (2) 撞擊水面當下呈現數個峰值，且最高峰頻率低於出泡時的頻率。
 - (3) 水面擾動仍呈現多個峰值，且時間持續較久。

肆、結果與討論

實驗二：有/無覆蓋收音方式比較

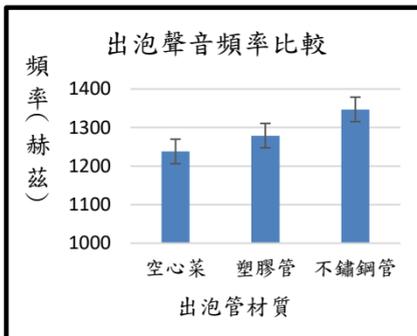
1. 無論是否進行覆蓋，均會錄下過濾的聲音，且我們關注的水草出泡聲音仍能辨識出來，如右圖中的出泡聲音頻率為 2321Hz。
2. 原先我們想要以類似遮罩的蓋子來輔助收音，但整個水體均是聲音的傳聲介質，半覆蓋方式沒有發揮出明顯的減噪效果。但我們還是發現，只要不是在活動很多的環境中，無覆蓋的直接收音還是能辨識訊號，進行分析。



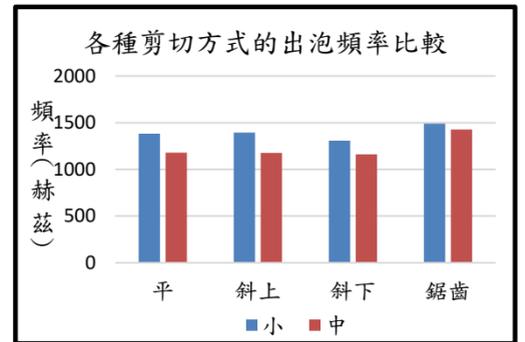
實驗三：固定水深，探討不同水溫下的氧氣出泡頻率與體積之關係

(一) 選擇出泡管材質

1. 相同管徑下，空心菜梗的音頻最低且與塑膠管的出泡頻率接近，因此我們採用塑膠管進行本實驗的氣泡發聲相關實驗。
2. 相同管徑搭配不同的管口剪切方式：
 - (1) 釋放的氣泡聲音頻率高低比較：鋸齒狀 > 平口 > 斜口。
 - (2) 釋放的氣泡體積大小比較：斜口 > 平口 > 鋸齒狀。
3. 根據實驗結果，我們的塑膠管先以平口方式釋放氣泡，再修剪成斜口產生較大的氣泡，如此一來，我們便能製造出大小不同的氣泡並錄下出泡聲音，分析氣泡直徑與出泡聲音頻率的關係。



(二) 出泡管口剪切方式對氣泡體積的影響

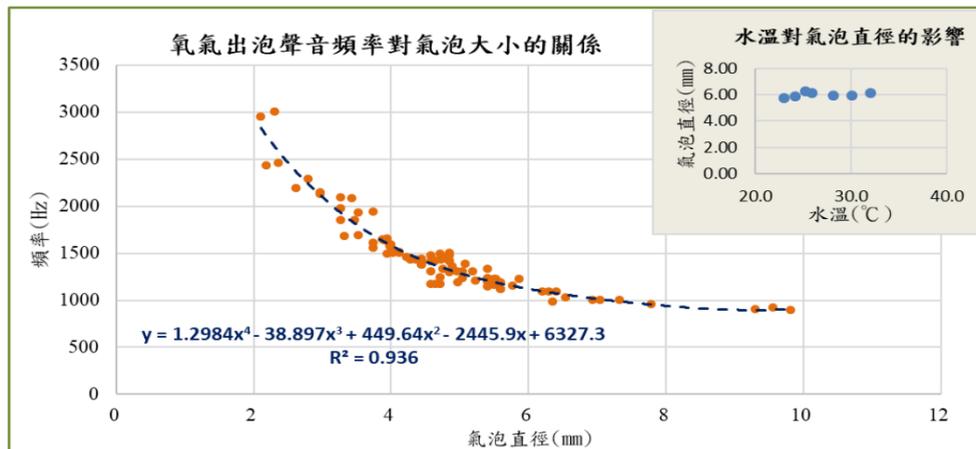


(三) 探討水溫對出泡體積的影響

1. 在我們的實驗條件內，水溫在 23~32 度時，相同管徑釋放出的氣泡體積相近，且氣泡直徑多落在 5.50mm~6.50mm，顯示此時的氣泡體積應由管口大小、形狀以及釋放時的壓力決定。
2. 我們將所有數據視為同一溫度再次作圖，得到趨勢線如下：

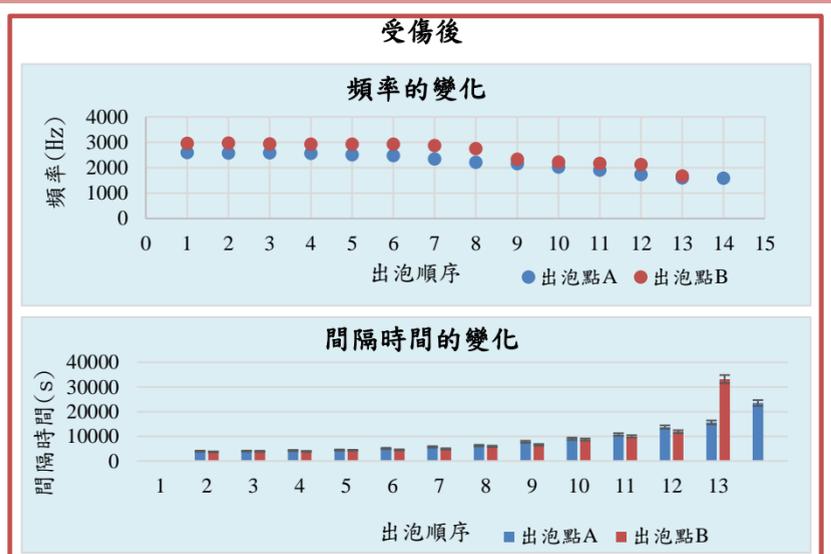
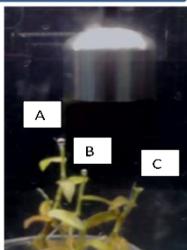
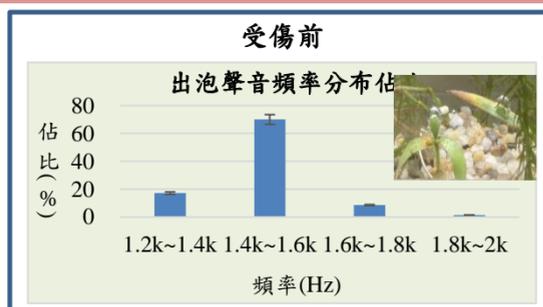
$$\text{出泡頻率} = 1.2984 \times \text{直徑}^4 - 38.897 \times \text{直徑}^3 + 449.64 \times \text{直徑}^2 - 2445.9 \times \text{直徑} + 6327.3$$
我們將運用此趨勢線由錄到的出泡聲音頻率推估出水中氣泡的體積大小範圍
3. 結果顯示，出泡聲音頻率隨著氣泡體積增加而下降，也就是小氣泡的釋放伴隨著高頻聲音，大氣泡則伴隨著較低頻聲音。

(四) 探討氣泡直徑對出泡聲音頻率的關係圖



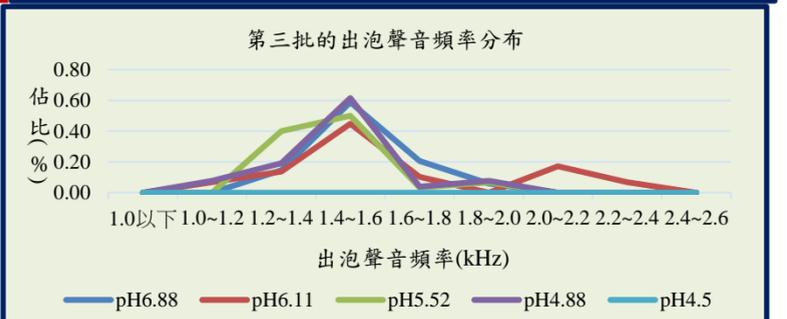
實驗四：未汙染~探討泡泡龍水草在受傷下的氣泡表現

1. 泡泡龍水草有兩種出泡模式：頂端直接釋放和葉面上釋放。
2. 未修剪水草的出泡聲音頻率分布多落於 1200Hz~1800Hz，氣泡直徑為 3.82mm~5.33mm，且 1400Hz~1600Hz 佔比達 70%，其氣泡直徑 4.10mm~4.66mm。
3. 受傷後的出泡口一開始的出泡速率快、體積小。隨著下一次的出泡間隔時間穩定拉長，出泡頻率在 2 天內便由近 3000Hz 的頻率降至未受傷時的出泡頻率範圍 1200Hz~1800Hz 之間。



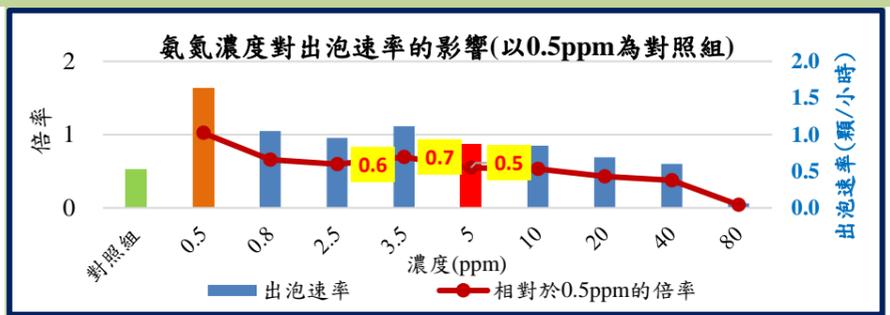
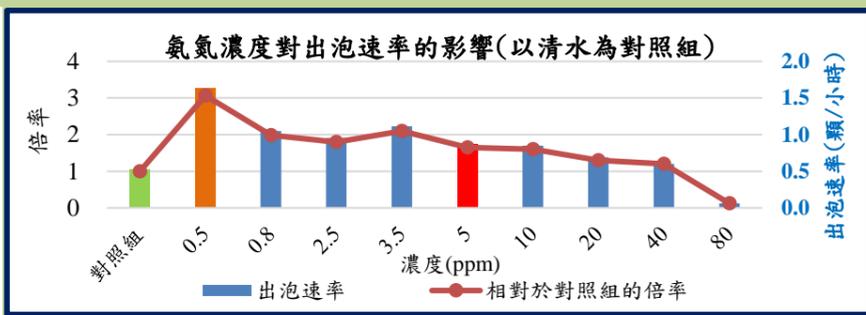
實驗五：汙染~探討兩種水草在不同酸鹼值下的氣泡表現

1. 我們以同一批水草經歷完整酸化歷程後才更換成下一批，以觀察出連續的變化。
2. 酸化的實驗結果顯示，兩種水草的出泡速率及倍率隨酸化程度加劇呈現下降趨勢，甚至泡泡龍在 pH=4.5 時會停止出泡，而出泡聲音頻率則沒有明顯變化，顯示酸化導致氣泡變少但並未縮小。
3. 離開酸化環境，3 個小時內便會又開始快速冒泡，出泡速率一下子來到很快，隨後降低又再緩緩上升至未加酸的表現。



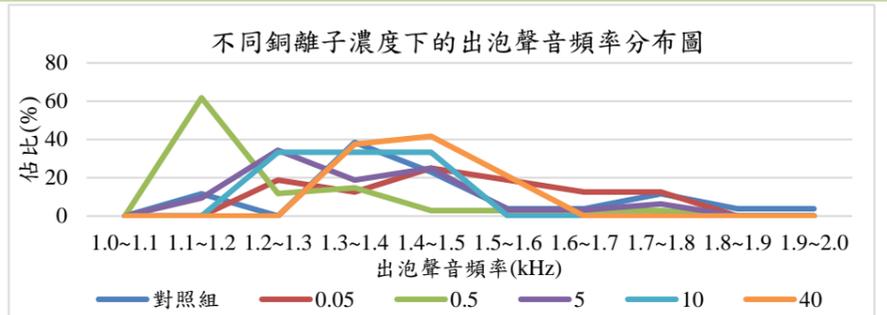
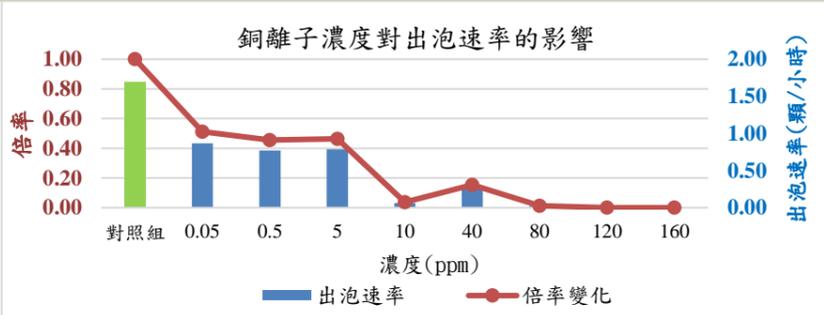
實驗六：汙染~探討泡泡龍水草在不同氨氮/銅離子濃度下的氣泡表現

(一) 農業~以氨氮濃度探討



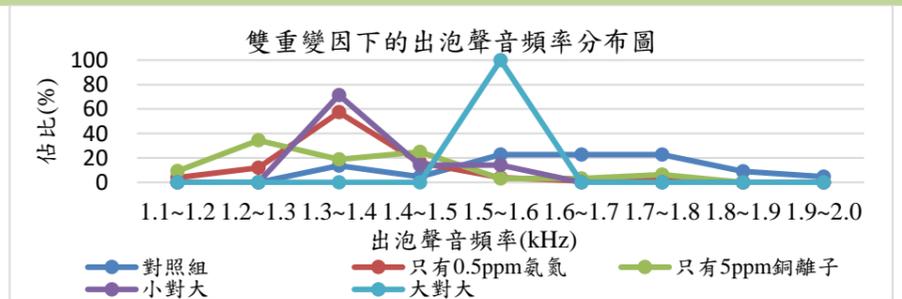
- 安全濃度的氨氮(0.5ppm 以下)反而能促進水草的出泡速率，為對照組的 3.1 倍，這與植物對氮的需求相吻合。但隨著濃度升高，氨氮很快就會對水草造成抑制，0.5ppm~40ppm 時的出泡速率緩慢降至對照組的 1.2 倍，80ppm 時已幾乎停止出泡，而出泡聲音頻率則不受濃度影響。這說明即使是某些營養物質，若超過生物需求的適度範圍，也會成為汙染因子而產生毒害效應。
- 在河川水質為未(稍)受汙染的情形下，若是出泡速率大幅提升，可初步判斷水中氨氮微幅增加，但仍在安全範圍內，又若是出泡速率突然降至原來的 6~7 成時，可初步判斷水中氨氮達中度以上汙染，甚至可能為嚴重汙染。
- 根據實驗結果，我們可將水草在短時間內的異常表現，無論是過度活躍或是不出泡，視為警示或水下生物的求救訊號。

(二) 工業~以銅離子濃度探討



- 結果顯示當濃度為 0.05ppm 時，兩天內表現出的出泡速率已降至對照組的 5 成左右，隨著濃度增加至 5ppm 時仍維持相近的出泡速率，而出泡聲音頻率未有明顯差異，顯示氣泡大小沒有變化，與氨氮、酸化的結果一樣。

(三) 雙項變因下的影響



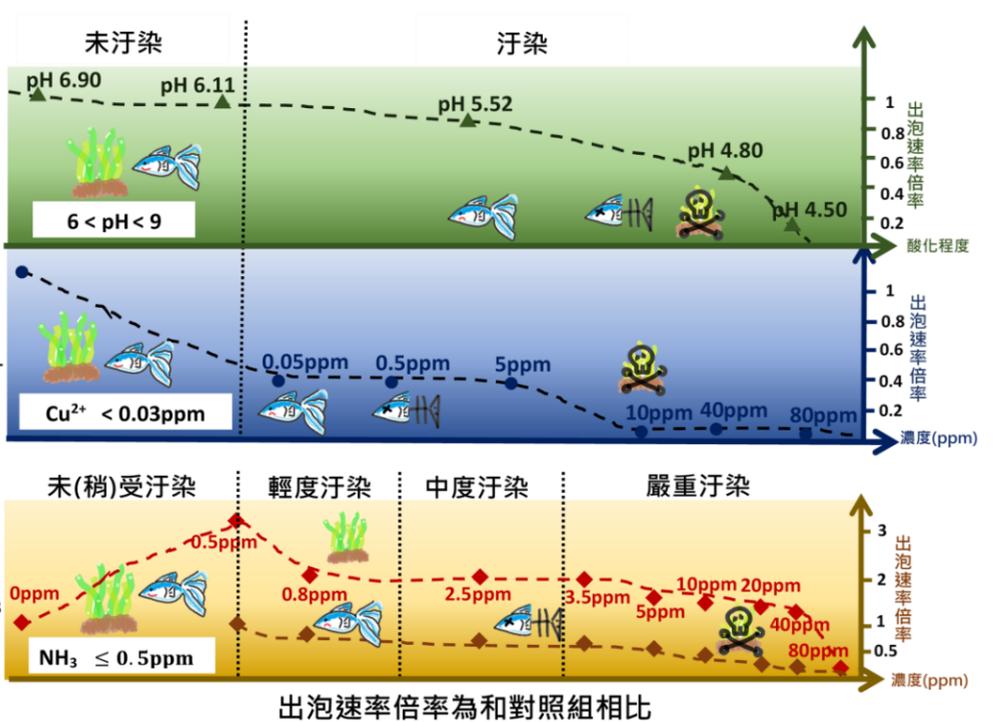
- 小對大：無害的氨氮濃度搭配過量銅離子濃度 5ppm，出泡速率降至對照組的 2 成，較單一變因的 5ppm 銅離子(4 成)更為嚴重，顯示銅離子對於水草更具殺傷力。也暗示著不同汙染物之間可能存在協同或拮抗的複雜關係，需要進一步深入研究。
- 大對大：當過量氨氮(3.5ppm)搭配過量銅離子(80ppm)時，如同預期的結果，出泡速率降至對照組的 1 成以下。

伍、結論

目前的水質檢測方式以生化方法為主，生物指標為輔，而我們嘗試以水下聲學作為輔助方法，藉由常駐在水下水草的光合作用表現發生變化，主要是音頻的高低變化以及出泡速率的倍率變化，即時得知水質遭受汙染的可能性，並落實河川的保護。

- 透過同步錄音和錄影方式，將光合作用產生的氧氣由釋放到出水面的過程歸納成三個階段：出泡→撞擊水面→擾動水面。
- 分析音檔得到兩個重要的物理量：出泡聲音頻率以及出泡速率。
- 未汙染水域的水草受傷後的出泡聲音頻率明顯升高，2 天內由 3000Hz 降至未受傷時的 1200Hz~1800Hz 範圍，和汙染下的出泡聲音頻率不同。

- 雙項變因結果顯示：即使氨氮濃度在無害範圍，但與過量銅離子共同作用時，仍會大幅降低水草的出泡速率至對照組的 2 成以下，除了凸顯銅離子對水草的危害，也暗示著不同汙染物之間可能存在協同或拮抗的複雜關係，需要進一步深入研究。



陸、應用與未來展望

汙染因子上，增加磷、鎳、鉛...等其他成分，水草選擇上，增加更多種類，尤其是台灣原生水草，增加單一因子和複合因子的探討，並結合物聯網以及 AI 來提升此方法的可行性。

柒、參考文獻與圖片出處來源說明

- 莊立勝、甘凱仁、陳昱蓁 (2014)。生「蓴」感「碳」—不同 pH 值酸化海水與石蓴交互影響之研究。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會作品。<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/54/pdf/030317.pdf>
- 林易蜀、陳俊桀、楊純明。介紹農地之重金屬汙染及其復育。<https://scholars.tari.gov.tw/bitstream/123456789/11708/1/24-1-2.pdf>
- 圖片(1-1)引用自民視新聞台網頁。溪流「水盒子」24 小時監測水質 3 年揪 11 件違規排廢水，其他所有照片、圖片皆由本篇作者獨立完成。