

中華民國第42屆中小學科學展覽會

::: 作品說明書 :::

高中-生物科

科 別：生 物 科

組 別：高 中 組

作品名稱：生態密閉系統 生物與理化因子之探討

關 鍵 詞：生態球、氣體平衡、密閉系統

編 號：040709

學校名稱：

國立屏東女子高級中學

作者姓名：

林靜英、陳瑩錡、潘佳昕、蔡妙伶

指導老師：

周麗芬



壹、摘要

生態系透過生物成分與非生物成分的交互作用，可以讓物質供需、能量流動、空間運用、代謝維持等達到相當程度的穩定性。本實驗試圖建立一個密閉微型的生態系統來探討密閉生態系統平衡及穩定的因素，以碳氫氧循環及氮循環為主軸，來著手建構密閉生態系統。首先透過調查水族生態系統來提供實驗的大致方向，進一步從數種生產者、消費者和分解者中選擇在食性上和元素循環穩定的生物種類，分別是水蘊草、黑殼蝦和硝化菌。針對生物因子分別進行水中溶氧和二氧化碳的定量分析和並作時間變化關係圖，試圖找出生物變因中能達成穩定的質量比例，其中生產者和消費者以 8:1 能呈現出最持久穩定的狀態，再加入分解者後我們對此密閉生態系統進行長時間的觀察，並針對數種理化變因作橫向分析比較，發現空氣和水比例以 1:2、光照介於 1200~2400Lux、光照 24 小時、以及加入底砂對於此密閉生態系統的穩定有所幫助。因此，依照我們自行試驗所選擇的生物種類、比例和所處理的理化因子著手製作出密閉『生態球』，雖然此微型生態系只維持了近一個月，但是讓我們對高一生態學所闡述的概念有更深層的認識。

貳、研究動機

高一學基礎生物時，曾經做過生產者和消費者碳循環的實驗，我們發現在密閉試管中的水蘊草和田螺即使在光照情形下，也很難長期存活。後來在生物課中偶然間觀賞到一部影片，內容出現幾秒鐘「生態球」的影像，那是一個完全封閉的玻璃球，裡面放置著許多生物；經老師輕描淡寫地解釋後，我們十分感興趣，隨即上網搜尋資料，對於一個密閉生態球能維持長達七、八年的生態平衡感到好奇。究竟如何在此密閉生態系中考量到生物和理化因子的穩定而做出如此美麗又充滿生命力的「微小生態系統」呢？因此，我們勇於接受挑戰，決定親手製作「生態球」，透過製作的過程更進一步深入探究和維持生態平衡有關的元素循環以及理化變因的影響。

參、文獻回顧：

一、「生態球」的起源

生態球（Ecosphere）是一細小封閉的「微型世界」，其環境可支持球內的生物生存。美國太空總署（NASA）火箭推進實驗室（Jet Propulsion Laboratory）進階生命支持計劃（Advanced Life-support Program）（參考資料：網站 9）的科學家漢生最先發現細小的鹹水蝦、藻及蝸牛可在一封閉之系統內生存一段很長時間。此實驗可為研究太空人在太空長時間生存所須之自給自足社區提供更多的資料。

二、「生態球」的原理

生態球（參考資料：網站 8）是一個密封的生態系統，就像地球一樣。生態球由透明的玻璃球體組成，內有小蝦、藻類、細菌、經過濾的海水、Gorgonia（無生命的樹枝狀物質）、小石及空氣（太空總署的設計內還有小蝸牛）。（圖片 1）生態球擁有與地球一樣的部份重要成份。生態球中的小石代表地球的土壤，有約三分之二的水及三分之一的空氣，能量來源同樣是陽光，當然還有生物：蝦、藻及細菌（圖片 2）。生態球內進行的生態循環代表著簡化了的地球生態循環系統。藻類利用光及水中的二氧化碳行光合作用，產生氧氣，也吸收水中的無機營養物作為生長所需的養料，因此藻類是系統中之生產者（producer）；小蝦呼吸耗去氧氣，放出二氧化碳，並以藻類及細菌為食物，排出廢物，故小蝦是消費者（consumer）；細菌則把小蝦之排泄物分解成無機營養物，供藻類使用，所以細菌為分解者（decomposer）。Gorgonia 及小石為微生物提供藏身處，免被小蝦所食，也為細菌提供生長地方，讓其能作分解者分解生態系統中之廢物。因此，生態球內的食物及氣體皆可以不斷的循環。生態球是密封的，因此不能加入任何食物或氣體，唯一可進入系統的是光線，整個系統的物質循環是靠光線照射而維持。小型的生態球平均壽命約 2-3 年，大的維持更久，最長可達 10 年以上。（參考資料：網站 5）

三、生態球的概念擴大運用 生物圈二號

「生物圈 2 號」是一個人工建造模擬地球生態環境的全封閉實驗所，也稱「微型地球」或「火星殖民地原型」；實驗目的是為了考察人類離升了地球是否能生存。建造在美國亞利桑那州的沙漠中，占地約 1.3 萬平方米，八層樓高的圓頂形密封鋼架結構玻璃建築物（圖片 3），在這個微型世界中，是將「生態球」的概念推廣，內有海洋、平原、沼澤、沙漠區等，是各成體系的小生態系統，科學家們原計劃讓工作人員在此密閉生態系中生活 2 年，但經歷 1 年多後，由於微生物種類和數量難以精確估算而導致失衡，「生物圈 2 號」的狀況急轉直下：氧氣含量迅速下降、二氧化氮和二氧化碳含量直線上升，危及居民健康，實驗以失敗告終。（參考資料：網站 20）

多年來，人類憧憬著衝出地球，向宇宙進軍，隨著環境的惡化，加快尋找「諾亞方舟」的步伐。我們希望能藉由這個實驗來探討在密閉生態系內如何取得物質循環上的平衡，並深入探討怎樣使生態球壽命更長。

肆、研究目的和流程

我們想藉由建構「微型生態系統」(參考資料：網站 11) 來探討密閉生態系各類因子的關係，由於生態系當中包含數種生物和理化因子，系統龐雜、變因繁多，不易針對單一變因進行操控，要著手進行實驗十分困難。於是我們除了上網、找參考書籍之外，先從現有長時間的穩定人工生態系調查起，再由氣體循環的平衡 (O_2 、 CO_2) 觀念開始，進一步研究環境變因對此生態系的影響。

實驗流程如下：

- 一、調查水族箱內生態系統之生物、理化環境
- 二、不同生物因子的測試和挑選
- 三、分解者分解效果之的定性分析
- 四、生產者、消費者、分解者氣體平衡的量化分析
- 五、測試生產者和消費者間的比例以達氣體循環平衡
- 六、三個生物因子的穩定平衡觀察
- 七、環境變因對微型生態系之的影響
- 八、生態球裝置的測試及評估

伍、研究設備及器材

一、基本儀器設備：

pH 儀 無塵無菌操作台 錐形瓶 橡皮塞 電子天秤（精確值 0.01g） 滴定管 溫度計 光度計 磁性加熱攪拌器 微量定量吸取器 高壓蒸汽滅菌壺

二、生物化學材料：

蒸餾水 0.1%BTB 指示劑 10^{-5} M NaHCO₃ 溶液

生產者：澤藻、金魚草、莫絲(購自水族館)、綠色苔狀藻類(簡稱“絲狀藻”)(採自學校水缸)、水蘊草(屏東高中活體培養中心索取)

消費者：紅球、斑馬、彩色玻璃、孔雀魚、黑殼蝦(購自水族館)

分解者：液態紅色光合菌、錠劑藍色光合菌、液態硝化菌、粉狀活菌（以下分別稱 A、B、C、D 菌）(水族館提供)

化學藥劑：硫酸亞錳、氫氧化鉀、碘化鉀、疊氮化鈉、可溶性澱粉、硫代硫酸鈉、硫酸、碘酸鉀、蛋白月東、硫酸氨、硝酸鉀、亞硝酸鈉、硝酸鹽測定試劑一套（TetraTest）、牛肉湯汁

陸、研究方法

一、水中溶氧測定方法

(一) 方法一：(此法參考書籍 2、3：水質分析及實驗)

硫酸亞錳水溶液加氫氧化鈉溶液時，生成氫氧化亞錳的白色沉澱。此沉澱與水中溶氧反應時，產生氫氧化錳鹽的褐色沉澱，利用此反應測量水中的溶氧。用 200ml 的廣口瓶裝滿欲分析的水樣（盡量減少氣泡之產生）。以微量吸管加入硫酸亞錳、鹼性碘化鉀、疊氮化鈉溶液各 0.5ml 於瓶底，加蓋後倒置數次使溶液混合均勻，生成黃褐色沉澱後再帶回實驗室進行溶氧滴定的定量分析。（詳細過程請參見附錄一：實驗方法 1）

(二) 方法二：(此方法由屏東科技大學水產養殖系藻類生態生理實驗室提供並協助定量)

1. 將培養過之欲測試水緩慢注入 60ml 之 BOD 瓶之底部（不可產生氣泡）
2. 加 reagent # 1 (MnCl_2) 0.5ml 及 reagent # 2 $\text{NaI} + \text{NaOH}$ 0.5ml（加時 Tip 需在水面中以避免產生氣泡）左右搖盪、混合，然後靜置一小時以上
3. 加 H_2SO_4 (28%) 1.0ml 酸化，然後用分光光度儀測定 BOD 瓶內之溶氧量（詳細過程請參見附錄一：實驗方法 2）

二、水中二氧化碳變化量測定方法（此法參考書籍 1：植物生理學實驗）

(一) 配製 10^{-2}M NaHCO_3 溶液，再稀釋至 10^{-5}M 。

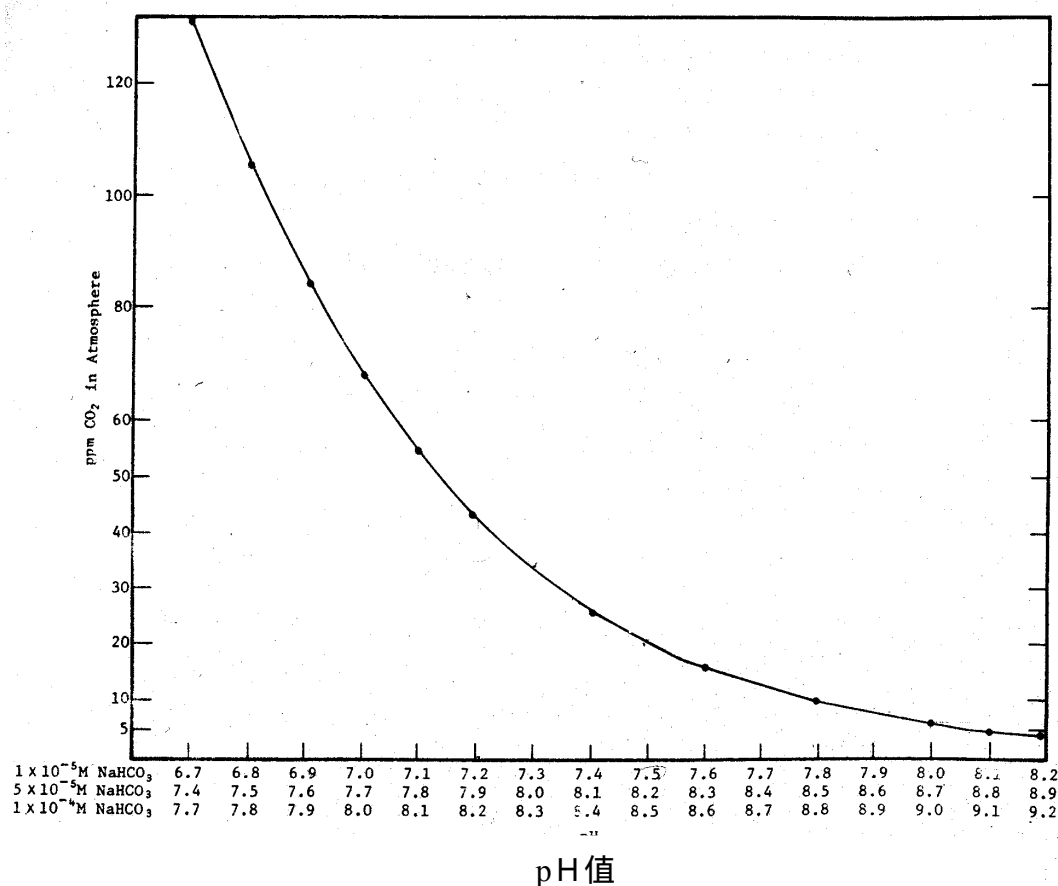
(二) 取 80c.c. 10^{-5}M NaHCO_3 溶液置入 250ml 的錐形瓶內。

(三) 將選定的植物用蒸餾水洗淨附著物並甩乾，再晾在擦手紙上以吸附多餘水分，秤重

後將之浸入 NaHCO_3 溶液中；動物則放置在蒸餾水中連燒杯一起稱重再取出使用，以避免測量重量時脫水缺氧；細菌則用微量滴管取一定量加入瓶中測量，在每個實驗中均利用 pH 儀（需先經標準液 pH4、7、10 校正）再測量反應前後之 pH 值

(四) 由於 CO_2 溶於水會解離 H^+ 離子而形成弱酸性的碳酸 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$)，根據 pH 值的改變可以算出 CO_2 產生或消耗的量，並可求出各類生物在單位時間內行光合或

呼吸作用淨反應 CO_2 的變化量。利用 NaHCO_3 溶液提供 CO_2 供植物行光合作用，在密閉系統內，由於瓶內生物行光合或呼吸作用消耗或產生 CO_2 ，使水中溶入的 CO_2 減有明顯的增減，而間接改變 pH 值。由 pH 值的變化量可求出 CO_2 的消耗或產生量。其變化關係如下圖，將測得的 pH 值利用圖形對照換算出 CO_2 濃度。



附圖：不同 pH 值的二氧化碳濃度 (ppm./體積)，在 30 1 大氣壓下 (參考書籍 1)

三、分解者氮循環的定性分析 (此法參考書籍 4：微生物實驗)

(一) 氨化作用：(蛋白質 $\rightarrow$ 聚胺 $\rightarrow$ NH_3)

本實驗以蛋白胨(peptone)牛肉湯作為有機氮受質，將培養基經高壓蒸氣滅菌後待其冷卻，再利用微量滴管加入菌液，來觀察微生物分解蛋白質產生氨的能力，將不同的分解者接種培養一個星期，取出一滴培養菌液加入奈斯勒(Nessler's reagent)，檢測顏色變化(為黃色)，同時氨的相對量可由黃色深淺而區別，如有氨存在，表示氨化作用有進行。

(二) 亞硝化作用： $\text{NH}_4^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$

本實驗以硫酸銨肉湯測試微生物氧化氨為亞硝酸鹽的能力，以特朗姆斯德夫氏劑與硫酸測試亞硝酸鹽的存在，如果呈藍黑色表示亞硝酸鹽之存在。

(三) 硝化作用： $\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$

本實驗以亞硝酸鹽肉湯可供亞硝酸再度氧化為硝酸鹽，使用自水族館購得之分析硝酸鹽的標準試劑一套，分別測定是否有硝酸鹽之存在。說明書上的方法如下：

- 1.測試前先將量杯以清水洗淨，加入 5ml 待測液
- 2.加入#1 測試液 14 滴，並緩慢地上下搖動
- 3.再加入#2 測試液 7 滴，蓋上量杯的蓋子，上下搖動約 20 秒
- 4.加入 1 小匙的測試粉末，緩慢地搖動，蓋上蓋子靜待約 10 分鐘
- 5.再加入#3 測試液 7 滴，緩慢地搖動，蓋上蓋子靜置約 10 分鐘
- 6.等量杯的測試液出現顏色變化，即可與盒子上的圖表比照硝酸鹽的含量比例

(四) 脫硝化作用： $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 \uparrow$

本實驗以硝酸鹽肉湯作為產生氮氣之受質，由於沒有賓漢試管(Durham tube)所以無法直接檢視因脫硝化作用而產生的氣泡(氮氣)，因此直接利用硝酸鹽減少之量來看脫硝化反應是否發生。

柒、研究過程及結果

一、調查各水族館的水域生態系內之生物、理化因子

由於一個生態系必須包含生物和理化因子，而會影響生態平衡系統的實驗變因相當多，對於該如何著手進行測試和評估感到相當困難，況且生態系的種類相當多，應選擇那一類作為研究對象十分不易。學校的水族箱啟發了我們靈感，水族箱是一個人工小型淡水生態系，雖不是完全密閉，但箱內生物和理化因子均能保持相當程度的平衡，的確給了我們一個可行的研究方向。

於是我們第一步希望藉由調查現有長時間平衡的生態系統，來瞭解較持久穩定生態系統所需的生物和理化條件，因此我們選定位於學校附近市內的四家水族館，逐一調查各家水族館內維持最長久的水族箱。除了分別利用儀器測定箱內溫度、光度、pH 值，並詢問商家維持的時間、每天照光時數、水源種類、是否額外供給其他氣體、有無放置裝飾物品、水族箱擺設的地點、箱內水與空氣之比例及內部所放置生產者、消費者、分解者的種類，並予以拍照、紀錄，並且用集氣瓶收集水樣將水中溶氧固定，再帶回實驗室作溶氧滴定，測出水中溶氧量，茲將調查結果整理如下表 < 1 >。

表 < 1 > 各水族館維持最久的水族箱之生物、理化環境資料

水族館名稱	永信	七海	沛展	阿波羅
維持時間	兩個月	五年	三、四個月	八年以上
水溫 ()	26	夏:室溫 冬:28	26	28
pH 平均值	7.85	7.54	7.87	7.41
溶氧 (mg/l)	3.677	4.937	7.687	6.7
光照(Lux)	2560	1580	1580	1200
照光時數(hr)	8	8~10	8	10
氣體供給	CO ₂	CO ₂ 、O ₂	CO ₂	CO ₂
水 源	地 下 水	*ND	地 下 水	自 來 水
放置地點	檯 子 上	檯 子 上	檯 子 上	檯 子 上
底層物質	有機砂	細 砂	美國細砂 (酸性)	進口細砂
空氣：水比例	1：8	1：6	1：10	1：10
生 產 者	莫絲、牛毛氈	莫斯	圓藻 清藻 扭蘭 椒 草 青荷根 紅 蛋等	*甚多
消 費 者	黑 殼 蝦	孔 雀 魚	黑 殼 蝦	紅 蓮 燈
分 解 者	光合硝化菌	活菌	活菌(粉狀)	硝化菌
裝 飾 物	枯木	假水草 假動物	無	無

*ND：表示未知

*甚多：超過十幾種，因此未能一一記錄

註一：水溫方面皆無加溫器

註二：pH 值做二重覆測試，但取平均值

由上面四個水族箱的初步調查資料我們可以歸納出幾個結果：

（一）理化因子方面：

- 1.各水族箱水質都呈弱鹼性，pH 平均值約為 7.5，溫度維持在 26—28 之間，接近室溫。
- 2.光度平均維持在 1500Lux 左右，永信水族館較高，達 2560Lux。
- 3.光照時數約 8—10 小時。
- 4.氣體：額外利用 CO₂ 鋼瓶和供應設備來增加水中的 CO₂ 濃度。
- 5.水源：使用自來水（除去氯氣）、地下水（礦物質含量多）。
- 6.空間的安排：空氣和水的比例約為 1:6；有兩家高達 1:10。
- 7.溶氧量：有兩家的水族箱約 7mg/L，另外兩家較低約 4mg/L 左右。
- 8.放置地點：皆為檯面上。
- 9.底層物質多為細砂，可提供分解者－微生物增長、繁殖的空間。

（二）在生物因子選擇上：

- 1.生產者：選擇很多，每一家水族館的設計風格及生產者種類皆不同。
- 2.而消費者以體型小的黑殼蝦和小型魚類較多。
- 3.分解者：皆加入硝化菌或光合菌。

資料蒐集的過程中，給了我們設計實驗時一個參酌的方向，根據這一次的調查，我們決定用淡水水域生態系來模擬「生態球」。參照調查結果，擬定初步使用的理化因子為 1.水源：蒸餾水（避免雜菌及離子影響實驗結果） 2.溫度：室溫下（方便實驗操作和觀察） 3.光照：採用 1500lux 的光照（使環境不易因光照升高溫度而影響實驗之準確性） 4.光照時間：24 小時（方便觀察） 5.氣體提供：無（由於是密閉系統，所以不額外供應） 6.空氣與水之比例：採 1：2 的比例。最初為了減少不必要的變因干擾，並沒有放置細砂和其他裝飾物。

另外，選擇什麼生物作為實驗對象也很難，因此，我們先挑選了數種生產者、消費者和分解者先作光合和呼吸速率定量分析，希望能找出最合適的生物以用來實驗。

二、不同生物因子個別的測試和挑選

由於一個生態系牽涉的變因相當多，因此將目標先放在影響氣體平衡的關鍵因素上，因此先做生產者、消費者和分解者氣體平衡的測試。由於生產者在光照下可行光合作用，並不時地行呼吸作用；消費者則是進行呼吸作用；異營分解者亦行呼吸作用。而在生態系中，CO₂ 和 O₂ 量的多寡往往是生物存活的重要關鍵。因此我們以 CO₂ 及 O₂ 的平衡為主軸，個別測試預選的數種生物，看看那一種較適合放入生態球中。

（一）生產者單位時間 CO₂ 的消耗量和溶氧量測定

首先，我們想了解何種水草較適宜被用來當作密閉生態系的生產者，由於光合作用之進行需使用 CO₂，因此會導致 CO₂ 濃度減少，根據水族館的調查結果我們大致選定了五種水草（金魚草、水蘊草、莫絲、絲狀藻、澤藻），各稱取 1 克置於 10⁻⁵M NaHCO₃ 溶液中以提供光合作用原料 CO₂，分別測定在三小時內 28℃ 室溫下，照光 1450Lux 下測定單位時間 CO₂ 消耗量和溶氧量，利用 pH 值的改變來反應出 CO₂ 變化量（參考方法二），並設計蒸餾水和碳酸氫鈉溶液兩組對照組。結果如圖 < 1 >、< 2 > 所示。

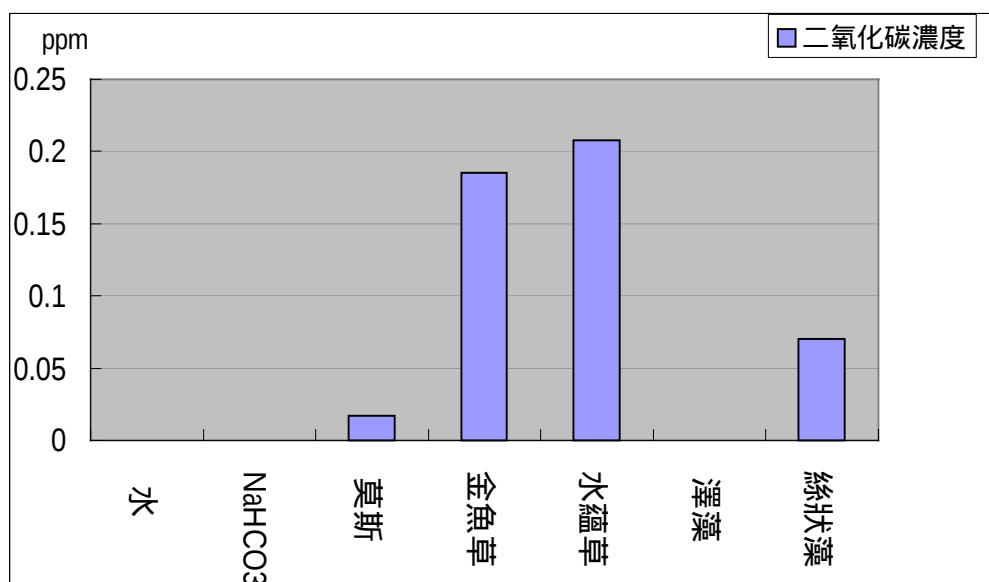


圖 < 1 > 1g 生產者光照下平均一分鐘二氧化碳消耗量

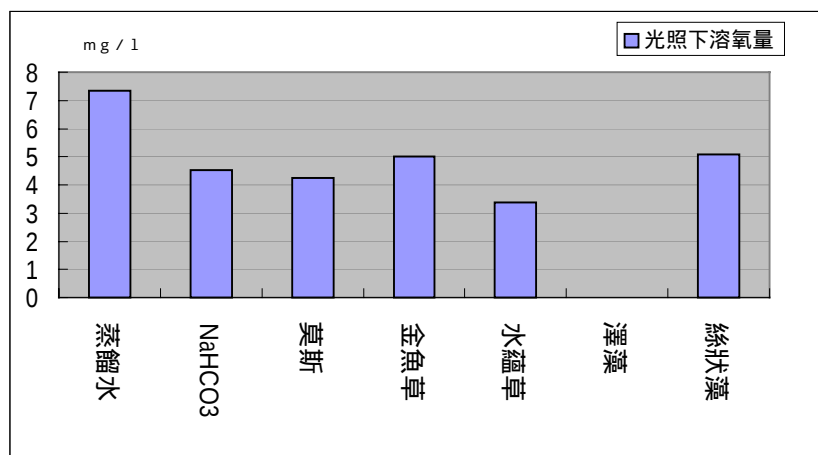


圖 < 2 > : 1g 生產者光照下溶氧量之比較

由圖 < 1 > 可明顯看出,五種水草在光照下 CO_2 消耗量分別是水蘊草 > 金魚草 > 絲狀藻 > 莫絲 > 澤藻。而對照組蒸餾水和碳酸氫鈉溶液在三小時內 CO_2 濃度均無變化,而我們希望在此密閉生態系中,生產者能有較高的光合作用速率來消耗消費者因呼吸作用所產生的 CO_2 並提供足量的 O_2 給消費者,由結果顯示出 1g 的水蘊草在單位時間內的 CO_2 消耗量最符合實驗需求,因此我們決定選用屏東高中活體培育中心所提供的水蘊草為此密閉生態系統內的生產者。

由溶氧實驗的圖 < 2 > 可以看出,蒸餾水的溶氧約 7mg/l,但是加入碳酸氫鈉後則溶氧降低,是因為較高的 CO_2 分壓導致水中溶氧減少,而五種水生植物對於溶氧的影響和對照組比較除了金魚草和水蘊草略微增加外,其餘並沒有明顯的變化,推測如果進行光合作用應會導致溶氧增加,但是從數據看來卻不增反減可能的原因:

1. 10^{-5}M NaHCO_3 提供光合作用 CO_2 碳源但是濃度較低,有可能反應後即因缺乏 CO_2 原料而使它的淨反應呼吸作用大於光合作用量,導致溶氧量看不出明顯變化。
2. 在實驗過程中,處理光照均放在實驗室中的無菌操作台內照光,但是光源本身也有熱度,經溫度計測量發現溫度高到 30 ,推測如此的高溫可能會抑制光合作用而使呼吸作用的效果顯現出來,導致溶氧量變化不多。

(二) 探討各類消費者單位時間呼吸作用的 CO_2 排放量和溶氧測定

同上述的作法,我們也選定了五種體型大小相近的水生動物,秤重後,利用 pH 值改變來測定單位時間消費者呼吸作用的 CO_2 排放量以及水中溶氧量,結果如圖 < 3 > < 4 >。

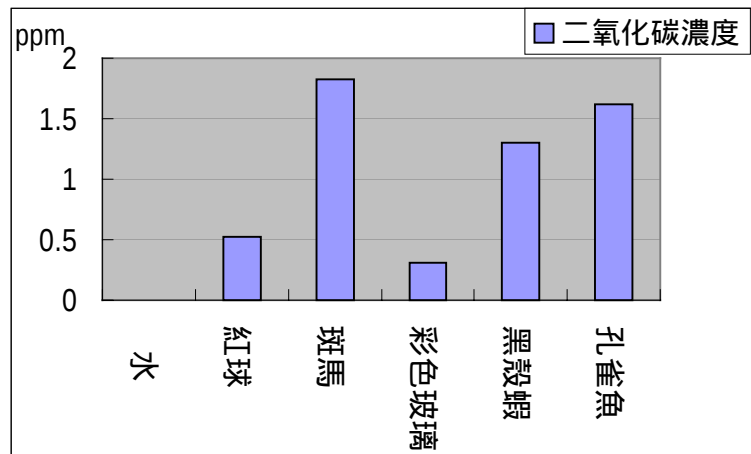


圖 < 3 > 1g 消費者一分鐘二氧化碳濃度變化量

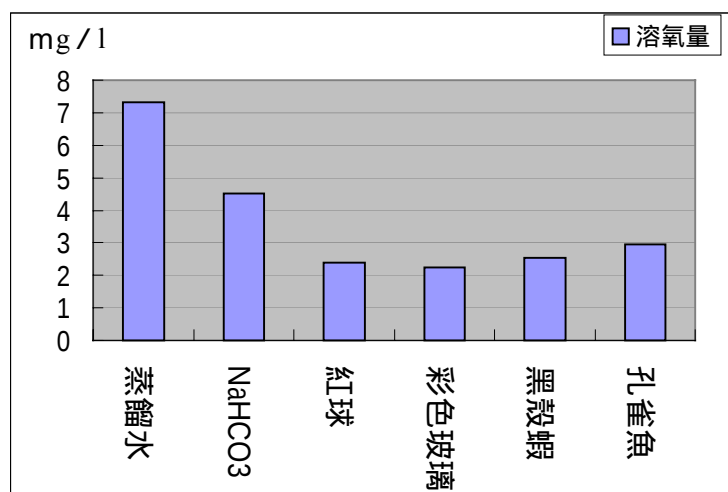


圖 < 4 > 1g 消費者一分鐘之溶氧量

從圖 < 3 > 看來，紅球、彩色玻璃和黑殼蝦的 CO_2 在單位時間內濃度變化較小，因為呼吸量太大的生物較不適合在密閉系統中長久存活。所以我們希望能找到單位時間 CO_2 產量較少的消費者，以免 CO_2 濃度過高而致死；食性也是一項重要的考量，大多數魚類都不吃水草，須額外供給食物，而黑殼蝦會攝食水草，如此才能形成一條食物鏈；此外，玻璃生態球的大小受限，因此盡可能選擇體型小的消費者，才可以放置的量較多，較不會因為加入的數量少而受到個別生命力差異影響而導致生態系難以長久維持。

在消費者實驗方面，如圖 < 4 > 可以看出一致性的讓溶氧減少，因為消費者進行的是呼吸作用，也可以看出同樣是一克的消費者，呼吸所導致溶氧的減少是相差不多的。密閉生態系統是無法有物質的進出，因此基於 CO_2 氣體平衡、食性及體型大小考量下，我們選定黑殼蝦作為實驗的消費者。

(三) 探討分解者的量和 CO₂ 氣體變化的關係

在調查水族館的過程當中，我們透過業者推薦取得四種分解者，均標榜具有分解功效，可以添加在水族箱內，來增加物質循環的速率。因此我們先測試一下這些菌對 CO₂ 氣體變化的影響，來更進一步瞭解此密閉生態系中分解者的適用性。作法如下：(括弧內的名稱是業者所提供的)

1. 將液體狀 A 菌 (紅色光合菌) 和 C 菌 (硝化菌) 混勻，取菌液 0、2、4、6、8、10ml 於試管中，再補充蒸餾水使每一根試管總體積到達 20ml。
2. 粉末狀的 B (藍色光合菌) 和 D (活菌) 先取菌粉 2.0g 溶於 60c.c. 的蒸餾水，再取菌液 0、2、4、6、8、10ml，加水使試管總體積到達 20ml。
3. 將螺旋試管密閉後放置在室溫 28℃、照光 1500Lux 反應 3 小時，測其三小時反應前後的 CO₂ 值變化量 (二重覆操作)。結果如圖 < 5 >。

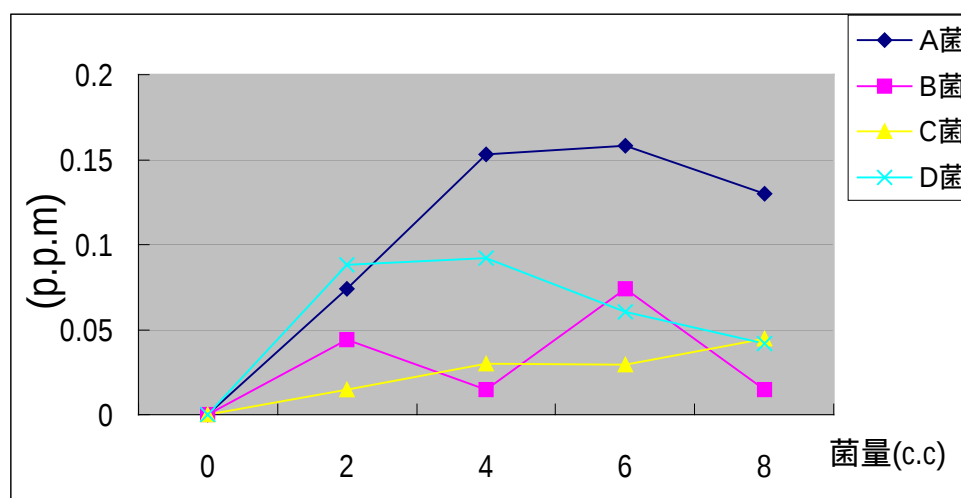


圖 < 5 > 四種分解者菌液量和 CO₂ 氣體變化關係圖

圖 < 5 > 的結果顯示，在三小時光照下，A~D 菌之 CO₂ 濃度隨著菌量的增加，呼吸作用所產生的 CO₂ 濃度增加越多；除了 B 菌較不規則外，其餘三種菌則有穩定的增減，其中以 C 菌呈線性增加關係，雖然四種菌數難以計數比較，且液態活菌和粉末態休眠菌活性亦不同，但從數據仍可看出，除 C 菌外，其餘三種菌應可以行光合作用消耗水中部分的 CO₂，推測應為光合菌；而 C 菌應為耗氧性的硝化菌。因此，我們初步挑選 C 菌，因為在增加菌量的情況對於水中 CO₂ 濃度變化幅度最小。由於我們對於業者所提供的分解者活性

仍存疑甚多，因此，接下來我們針對這些分解者作分解效果的定性分析，來瞭解這些菌的分解能力。

三、分解者分解效果的定性分析

分解者由於來源各異，因此在選擇分解者之前，我們必須先就索取來的分解者作分解效果的定性分析，以了解這些細菌真正進行氮循環的那一個步驟。我們分別用三種菌（D 菌粉量太少故不用），取 1 及 2ml 分別加入含蛋白月東、硫酸氨、亞硝酸鹽的牛肉湯液體培養基，經過一星期培養後再分別檢測其分解情形（實驗方法三），結果如表〈二〉。

表〈二〉分解者氮循環定性分析

編號	處理	氨化作用 蛋白質 $\rightarrow$ NH ₄ ⁺	亞硝化作用 NH ₄ ⁺ $\rightarrow$ NO ₂ ⁻	硝化作用 NO ₂ ⁻ $\rightarrow$ NO ₃ ⁻	脫氮作用 NO ₃ ⁻ $\rightarrow$ N ₂
A 1	負對照組（不加東西）	+	-	-	-
A 2	正對照組（加土壤 0.1g）	+	-	+	+
A 3	光合菌（A）1ml	+	-	+	-
A 4	光合菌（B）1ml	+	-	+	+
A 5	硝化菌（C）1ml	+	+	+	+
B 1	負對照組（不加東西）	+	-	*ND	*ND
B 2	正對照組（加土壤 0.2g）	+	-		
B 3	光合菌（A）2ml	+	-		
B 4	光合菌（B）2ml	+	-		
B 5	硝化菌（C）2ml	+	+		

*ND：表示未測量

由於在整個密閉生態系統中除了碳循環的氣體平衡外，氮循環也是重要的影響因素之一，因為魚類排出的氨若不能有效立即的移除，對於魚類和生態系中的生物而言，是一大致命傷。分解者的功用就在此，因此對於生態系的穩定平衡扮演極為重要的角色。雖然市售的分解者品質不一，且不只包含一種菌，因此就我們的定性分析結果，至少明顯看出 C 菌是目前最理想的分解者，因為在氮循環當中的步驟 C 菌皆有參與，推測這種菌液應該是許多氮循

環菌種的混合。此外，我們發現未加入菌液的對照組也可以檢測出銨鹽 (NH_4^+) 的存在，可能是牛肉湯原先已有腐化菌掉入而導致在未做實驗前已經部分分解為 NH_4^+ 。

在未來生態系的建構，我們經過比較分析，選定三個生態系中的生物因子，其中生產者為水蘊草，消費者為黑殼蝦，分解者為 C 菌（硝化菌）作為密閉生態系的生物組成。但究竟要放置怎樣的比例才是最佳的組合呢？接下來我們先由簡御繁，針對這三種生物先作影響氣體平衡較顯著的生產者與消費者，進行個別氣體定量分析，由 CO_2 和 O_2 測定量來找到所應使用的生物量比例。

四、生產者、消費者、分解者穩定平衡的量化分析

在實驗二和三中，我們發現在 CO_2 氣體平衡方面，同樣 1g 的生物因子，在光照下水蘊草一分鐘內消耗 CO_2 為 0.469ppm，1g 黑殼蝦產生 CO_2 為 1.3ppm，而分解者 C 菌平均 1c.c. 則是 0.074ppm 的，相較前兩者，加入微量分解者對 CO_2 的影響是微乎其微，可以忽略不計。若 24 小時光照下，則水蘊草和黑殼蝦氣體平衡的比例約為 3:1。

但是生態系統中維持生物存歿的關鍵氣體除了 CO_2 還有 O_2 ，因此，就 O_2 氣體的穩定平衡我們也嘗試尋找比例關係。由於先前溶氧滴定技術上的不熟稔而導致誤差，因此我們在屏科大藻類研究室的研究生協助之下，再一次利用分光光度計定量水蘊草的光合作用速率。我們利用光暗瓶方法，分別測定 1g 水蘊草在光照和黑暗中反應 1.5 小時的水中溶氧量，並計算出水蘊草的光合速率。數據整理如表 < 三 >。

表 < 三 > 水蘊草單位時間內之溶氧變化

起始值 (三重複)	ABS	平均值	溶氧 (μM)	溶氧平均值	
	0.481	0.483	300.3	301.8	
	0.485		303.9		
	0.482		301.2		
對照組 (1.5hr)	光照組 (二重複)	溶氧 (μM)	與溶氧起始平均值 之差 (μM)	扣除起始值 之溶氧平均 (μM)	扣除對照組 之溶氧 (μM)
		306.2	4.4	4.4	
	306.2	4.4			
	黑暗組 (二重複)	301.0	-0.8	12.85	
		328.3	26.5		
	實驗組 (1.5hr)	光照組 (三重複)	330.5	28.7	87.4
480.6			178.8		
356.5			54.7		
黑暗組 (三重複)		277.3	-24.5	-7.4	-20.25
		290.6	-11.2		
		309.3	7.5		

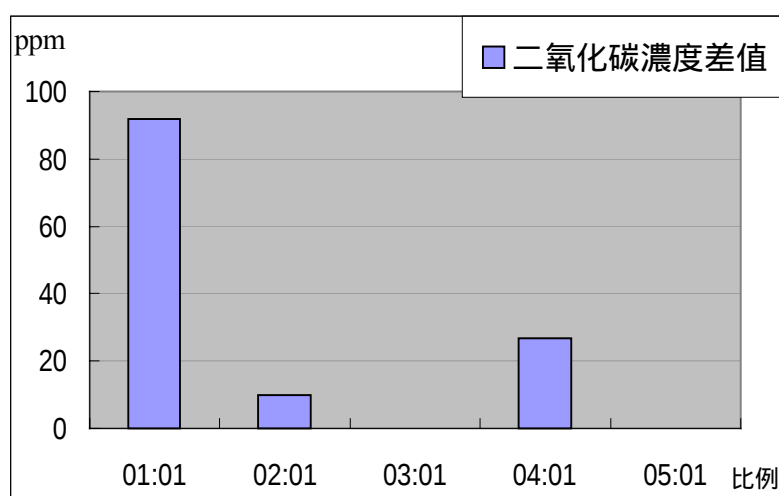
由表 < 三 > 可以得知，生產者在 1.5 小時光照後，扣除水中溶氧起始值和對照組，因光合作用增加水中溶氧約 μM (意即 3 小時溶氧增加約為 $166\mu\text{M}$)；在黑暗中則消耗水中溶氧約 $20.25 \mu\text{M}$ ，如果和先前測定反應 3 小時的黑殼蝦溶氧消耗 ($-4.796\text{mg/L} = -150\text{mg/L}$) 作比較，可以發現約 1 : 1 的比例就可以達到平衡。

由於光合作用和呼吸作用是可逆反應，在反應式中氣體 CO_2 和 O_2 的莫耳數比應為 1:1， $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ，當我們試著將水蘊草實驗結果加以分析比較，同樣時間下，我們發現 CO_2 和 O_2 的比例並非恰好 1:1，而相差甚多，除了兩種定量方法的不同外，我們發現只進行單一生物分析的結果往往會出現盲點將無法準確預測其比例，因為生物的光合甚至呼吸作用速率會受 CO_2 和 O_2 等反應物、產物的量的影響。因此，接下來，我們從 CO_2 平衡所得到 3:1 和 O_2 平衡計算得到的 1:1 比例去作延伸，並將生產者和消費者放置一起同時進

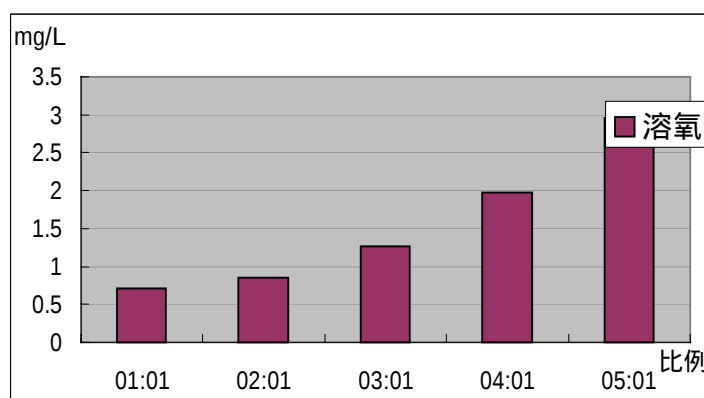
行反應，來觀測混合不同比例的平衡狀態。

五、測試生產者和消費者的比例以達到氣體循環平衡

我們先以實驗四所探討的比例再放大範圍來進行平衡測試，希望能模擬生態系內生物之間的互動關係找出生產者和消費者的生物量比例，以避免個別測試的盲點。分別測試生產者：消費者=1:1,2:1,3:1,4:1,5:1 五種生物量比例，以固定黑殼蝦 1g（約有五、六隻，量太少，會失去取樣的準確性）去改變生產者的量（由於使用 250ml 錐形瓶大小不大，若增加黑殼蝦，則水蘊草也要跟著增加量作調整，若加入的量太多會使錐形瓶無法容納），同樣地從 pH 值和溶氧的變化量找出生物量的平衡比例，結果如圖〈六〉、〈七〉所示。



圖〈六〉生產者+消費者比例之 CO₂ 變化量



圖〈七〉生產者+消費者比例之溶氧量

從圖〈六〉發現生產者和消費者在光照情形下三小時內以 3：1 比例和 5：1 比例時都沒有多餘的 CO₂ 產生或消耗，更高的比例似乎也能達到穩定狀態，和當初利用定量數據求得的比例十分吻合，在短時間內的平衡可以提供給我們長時間穩定平衡比例的線索，表示長時間處理下，應該也能趨向穩定狀態。雖然二氧化碳的結果如此，但是從圖〈七〉溶氧量的結

果來看，越高量的生產者的確有助於溶氧的提昇，看不出穩定的平衡狀態，而一般蒸餾水的溶氧較高，約可達到 7mg/L，可見 5:1 的比例在 O₂ 的平衡上仍偏低。因此，我們更進一步加入分解者並提高生產者的量並作長時間的平衡觀測。

六、三個生物因子的穩定平衡觀察

有了生產者和消費者的比例試驗後，接下來我們加入分解者進入密閉生態系中一起探討，由前面實驗得知分解者在短時間內對於 pH 值改變不大，因此，在生物量的比例，我們則重新試驗更高的三種比例分別為生產者：消費者=4:1、8:1 和 12:1，而分解者使用的量則依照業者所建議使用（瓶上所指示的數量：10 升的水加入 1ml 菌液）。由於我們對於環境變因尚未作測試分析，因此，我們決定先採用網路上（參考網站 8）所提供的處理方法：1.空氣：水= 1:2 2.照光度 1500 Lux 並採用蒸餾水作為水源及 24 小時長時間光照。

為了方便直接觀測密閉生態系的變化情形，在錐形瓶內滴入 10 滴 BTB 作為酸鹼指示劑以便偵測水中 pH 值的變化情形，在二重複試驗中，一組每天紀錄生物的存活情形，另外一組四天後先行測其酸鹼度、顏色變化、溶氧定量和並作銨離子的定性分析，希望找出三者之穩定平衡的最佳比例，結果下表〈四〉所示。

表〈四〉三者混合之各項參數的測定觀察結果

測定項目	生產者 對照組	消費者 對照組	分解者 對照組	生：消 =4：1	生：消 =8：1	生：消 =12：1
生產者（g）	4.0			2	4	6
消費者（g）		0.5		0.5	0.5	0.5
分解者（ml）			0.005	0.005	0.005	0.005
BTB 顏色變化(4 天後)	藍→藍	綠黃→黃	綠→藍	綠→藍	綠→藍	綠→黃
pH 值變化（4 天後）	1.9	0.3	0	0.1	0.1	0.2
溶氧量(mg/L)	7.80	5.34	1.149	3.69	3.69	6.46
氨之測定	無	無	無	中等量	中等量	中等量

從表〈四〉果顯示，生產者：消費者=4：1 和 8：1 在經過四天後溶氧大幅度降低，一

般對照組的溶氧約 7mg/l，只有 12:1 的比例較接近正常的溶氧值，而對於 pH 值的變化三種比例皆影響不大，可見溶氧的靈敏度相較於 pH 值定量較為高。但是在近乎理想生物量 12:1 的比例卻發現 BTB 轉為黃色，且有少許的氨被偵測到，推測可能原因是因為水蘊草由於長時間光照使得光合作用原料 CO₂ 不足導致效率降低，也有可能是因為照光過久導致水體溫度上升間接阻礙光合作用的進行，導致無法有效的進行碳氧循環來維持密閉系統的動態平衡，因此不到七天生物即全部死亡。而氨的產生，表示分解者加入的量可能太少，必須再調高比例。

七、環境變因對微型生態系的影響

我們先前的測試所採用環境中的理化因子是部分參考網路上所搜尋到太空總署先前處理情形的資料（參考網站 8），我們知道生物因子和理化因子是一個穩定的生態系所必須的，因此接下來我們對於生態球要用何種理化條件作更進一步的研究。由於實驗六數據顯示生產者：消費者=12：1 的比例似乎溶氧最高，但密閉系統很快就酸化，因此，我們選擇維持較多天的生產者：消費者=8：1 的固定比例，再逐一改變環境變因來探討理化因子對於此密閉生態系的影響。由於這種影響可能不是短時間可以看出，因此，我們採用實驗六的方法用 BTB 當作指示劑，來長時間觀測空氣和水的比例、照光光度、光照時間和底砂的有無及其比例這四種變因對密閉系統的影響，而控制的變因為：使用 10⁻⁵M NaHCO₃ 水溶液，生產者：消費者 = 8:1，空氣：水 = 1：2，1500Lux 光度照光 24 小時，未加入底砂。結果如下表〈五~八〉。

表〈五〉變因探討 A - 空氣和水的比例的影響

空氣:水	2:1	1:1	1:2
BTB顏色（7天前→後）	藍→藍	藍→綠	藍→藍
pH值變化（7天前→後）	6.8→6.9	6.8→7.2	6.9→ND

表〈六〉變因探討 B - 照光強度的影響

照光光度(Lux)	600	1200	2400
BTB顏色 (7天前→後)	藍→黃	藍→藍	藍→藍
pH值變化 (7天前→後)	6.8→6.3	7.0→6.3	6.8→8.4

* ND 表示生物存活超過七天因此未能測量

表〈七〉變因探討 C - 光照時間長短的影響

光照時數 (hr)	8	12	16
BTB顏色 (7天前→後)	藍→黃	藍→黃	藍→黃
pH值變化 (7天前→後)	6.9→6.2	6.8→6.3	7.0→6.3

表〈八〉變因探討 D - 底砂比例多寡的影響

底砂：總體積	未加	1:5	1:10
BTB顏色 (7天前→後)	藍→藍	藍→藍	藍→藍
pH值變化 (7天前→後)	7.0→6.3	7.4→9.1	7.1→ND

表〈五〉的數據看來 1:2 的比例存活約 2 星期，而且 BTB 溶液仍保持原先藍色，並未酸化成變色，是最理想的比例；和網站上所建議的比例十分吻合。而 2:1 這一瓶生物死亡但水體仍呈現中性的藍色 BTB 顏色，推測可能是受長時間照光的高溫影響導致水溫增高（因為水量較少，溫度上升較顯著）而導致生物相繼死亡，所以水體仍然呈藍色但黑殼蝦已經死亡。

表〈六〉光照強度 600Lux 處理下，不但使水質酸化變黃外，生物也全都死亡，而 1200 左右的光度雖然溶液仍保持藍色，但是 pH 值已經在下降，也不穩定，2400lux 光照下非常貼近燈源，高溫的影響是必然的，除非有比較好的空調來維持室內溫度。因此，最合宜的光度應介於 1200~2400 之間，我們必須更進一步作細部分析才能確知何種照度較適宜用來處理生態球，因此仍維持 1500Lux 的光度。

表〈七〉在光照時數的處理上從 8~16 小時似乎都不盡理想，和我們先前實驗所處理的長

時間照光情形來比較此密閉系統已經酸化，無法維持其穩定性，這和文獻中（參考網站 8）所提及 6-10 小時的光照處理出入頗大，由於缺乏進一步的分析資料，因此難以看出何種光照時數最為理想，所以仍採用 24 小時照光。

表 < 八 > 有加入美國細砂的兩組不論加入的比例多寡，在一星期之後似乎對於提升水中 pH 值有明顯增加，尤其以底砂：總體積=1:10 此組而言，生活於其中的黑殼蝦存活約 3 星期。由於細砂的加入不但提供分解者棲息和繁殖的場所，對於 pH 的穩定有明顯的助益，因此，在未來我們所設計的生態球當中，我們也打算加入細砂來增加此密閉生態系的穩定與平衡。

八、生態球裝置的測試和評估

有了前面的測試分析數據，接下來，我們要將先前模擬的比例及處理狀況作實際的裝置運用，我們希望透明玻璃球的透光度能和錐形瓶相當以方便直接移轉此系統，依照此一模擬系統，我們詢問了在地的玻璃店都無法接受訂做，因此我們上網接洽到新竹地區的一家廠商，並親自前往溝通想法現場燒製空的生態球，我們曾經嘗試在現場裝置並彌封，但由於裝水的玻璃難以在高溫進行彌封，因此，我們帶回許多手工吹製而成的玻璃球，其上預留直徑約 2 公分的孔洞，我們將自行設計測試的微型水域生態系放置進入玻璃球內，並用橡皮塞進行密封，長時間的觀察記錄如表 < 九 > 所示。

表 < 九 > 密閉生態球裝置之測試及評估

形狀/半徑大小 (cm)	生產者 (g)	消費者 (g)	分解者 (ml)	死後 pH 值	觀察情況	存活時間
圓 / 10	2	0.75	0.0025	10.4	無異狀	4 天
圓 / 15	4	1.5	0.005	10.4	雜質、消費者之屍體漂浮	1 星期
圓 / 20	8	23	0.01	8.6	惡臭、不明漂浮物	3 天
橢圓	4	1.5	0.005	10.2	無異狀	二星期

*控制變因為：

- 1.水源： 10^{-5}M NaHCO_3 水溶液
- 2.空氣：水 = 1：2
- 3.美國細砂：球體積 = 1:10
- 4.光度為 1500Lux，照光 24 小時
- 5.放置於培養皿上，置於無菌操作台內照光，溫度經測量為 32.2

結果顯示橢圓形的玻璃球能夠維持最久，推測可能是因為橢圓造型橫放時受光面積較大，以同樣的光照，較不會因為上層藻類阻擋光線而導致影響光合效率。此外我們亦發現放入之生物不一定要和球體的體積成比例關係，可以都已 4：0.5：0.005 的比例放入也能存活的很好；建議生物量盡量不要太多，太多的水蘊草會影響黑殼蝦的活動而易導致死亡。一方面是外在溫度的問題，如果溫度太高，很容易使蝦子致死，由於雖然我們沒有很好的培養箱可以控溫、控濕和調節光照，因此，採用電風扇吹拂對於溫度的降低並沒有顯著的影響，這可能是生態球無法長時間維持的一個重要關鍵。

捌、討論

一、定量分析的討論

在我們的實驗中進行定量分析不論是 pH 值的變化量或是水中溶氧的測定，經過多次的失敗和不穩定性，我們歸納出幾個可能造成實驗數據不穩定的變因並提出建議：

(一) 動植物取來若未經蒸餾水浸洗過，會因為原先棲息環境所帶來的離子溶解而導致 pH 值在尚未反應即有明顯的增減

建議：動植物應先用蒸餾水潤濕過再放入待測瓶中，可以減少誤差

(二) 我們發現不同的 pH 儀器雖然經過同樣的標準液校正過，但是測出來還是有誤差。

建議：我們採用 pH4,7,10 三點標準酸鹼度校正以求準確性，並使用兩台 pH 儀同時測定，以減少實驗定量上的誤差

(三) 若用蒸餾水做為水源，我們發現起始值測得的都是偏向弱酸性，但是若使用自來水則無此現象，推測是蒸餾水因高溫蒸餾使水中原本的溶氧減少所導致，而使得溶解度較大的二氧化碳氣體自空氣中滲入水中較多，導致 pH 值測得的減低

(四) 最初我們做實驗是使用螺旋試管，由於體積小、受光照面積小，因此誤差大，後來改用錐形瓶後數據反應出真實情況，較不易受高溫變化、照光不均勻、生物受限於空間太擁擠無法自由活動、生物量無法放太多而導致生物量太少容易因個別體質和生命力的差異而死亡，因此，我們本篇的試驗均採用錐形瓶的系統以減少不必要的變因較能記錄到實際的狀況。

(五) 實驗盡量以多次重複取得平均值，我們有嘗試過，只要把生物量放大後則二重覆試驗差異即可縮小，由於受限於活體中心水蘊草供應量的限制，因此，有許多實驗無法以多次重覆或放大所使用的生物量進行試驗，再者，實驗時需考慮使用同一批水草以減少不同批水草生長狀況的差異。

(六) 生產者由於表面積的不同，光合作用原料的獲得量也不盡相同，光合作用的速率自然也不同，因此，在作生物因子挑選時，根莖類水草表面積會小於絲狀藻類；再者，顏色不同的水草所吸收光的波長也不一樣，因此，同樣的白熾燈源不見得適用於所有的水草。

- (七) 動物質量和呼吸速率雖然有關但不一定呈現線性相關，因此，在作動物比較時體型大小是需要注意的，盡可能選擇相似的體型數據才有參考的價值。
- (八) 溫度是影響光合作用速率一個重要因素，在光照情形下，的確或多或少會導致水溫上升，尤其是水量少的水體尤其明顯，往往生物並非死於二氧化碳濃度過高或氧氣不足甚至代謝廢物的累積過量，而是溫度過高致死，甚至植物行光合作用所需的酵素受高溫抑制其活性甚至遭高溫破壞，都可能導致實驗無法顯現出真實的變因影響。或許可以向水族箱設計學習，裝一套風扇系統來解決一部份水體因光照過熱問題，因為冷卻系統是無法裝置在我們這個完全密封的生態球當中。

二、生物因素選擇的探討

- (一) 在我們的密閉生態系統中，我們希望能找到生產者的單位時間 CO_2 消耗量大者，表示其光合作用效率大，才能供應給足量的氧氣給消費者進行呼吸作用之所需，而消費者選擇時也希望能挑選單位時間 CO_2 產量較少者，才比較容易維持長時間的穩定，較適合在密閉系統中長久存活。此外，在選擇生物種類時，還要考慮到食性問題，大多數魚類都不吃水草，需額外供給食物，而黑殼蝦，會食用水蘊草，由於密閉生態系統沒有物質進出，魚類呼吸量又大，需供應較多水草，因此基於價錢方面、食性考量、體積及 CO_2 和 O_2 氣體平衡下，我們選定水蘊草和黑殼蝦為初步實驗的生物考慮對象。
- (二) 在分解者方面，由於屏東市水族館甚多，我們也一一請教各個商家有關分解者的考慮，市售的光合菌由於未標示說明清楚菌種，因此，根據網路上所得到的參考資料（參考網站 13、19、22），說明光合菌在有陽光時進行光合作用，除了消耗 CO_2 以外，同時也需要氧氣作用，以維持菌體成長；在黑暗的時候，光合菌停止光合作用，但仍進行部分呼吸作用，因此仍需要氧氣。光合菌會利用氨、亞硝酸，而將之轉成硝酸鹽。而硝化菌則是在氮循環中扮演將銨鹽轉換成植物可以吸收之硝酸鹽類的角色，是屬於好氧性細菌；兩者皆有參與氮循環，但對氧氣的需求不盡相同。但是市售之菌液或菌粉一般都並非純種菌，且體積相當小，因此不但難以用學校的顯微鏡觀察測量數目和外型，也難以作定量分析，因此，我們只能針對不同的市售菌作分解效能的定性分析，但是有些菌的效果和功能測試不出，可能原因是：

- 1.菌放置過久活性減低、液態菌可能培養液養分會用完
- 2.有些標榜活菌，但是可能只是提供水中活菌的營養劑而已
- 3.有些菌在休眠狀態下被製成粉末或錠劑，必須經一段時間的活化、甦醒才能發揮分解效果（有的文章指出需要一星期），或許是如此的關係，導致有些菌的結果呈現不穩定的情形。（參考網站 13）
- 4.細菌有好氧和厭氧之別，可能在密閉生態系中的氧氣多寡導致菌活性無法正常發揮其效果，使得無法看出其分解效果

在我們的實驗中由於分解者來源不一，有的為液狀，有的則為粉狀，活性大小不同，且各菌均非純菌，難以量化分析，因此，同樣體積的 A、B、C、D 菌數也不見得相同，所以四種菌之間難以定量分析來作比較。我們也嘗試利用顯微鏡來作四種菌的鏡檢，液態的 A、C 菌勉強可以看到菌體活動，粉狀的 B、D 菌則可能由於之前休眠過久而無法短時間恢復活性，因此 B 和 D 在短時間內的實驗得出的數據呈現非線性關係是很有可能

三、密閉系統真能夠平衡嗎？

- （一）當我們試著去做生物因素的個別定量分析，再利用數學計算氣體平衡的生物量，這雖然是一個不之如何著眼實驗的開始，但是，也有可能是一個錯誤的開始，因為生物單獨存在和放置在一起時絕對不是只有量的加加減減如此單純而已，因為生物本身的生理狀況（如：光合作用呼吸作用）是時時受環境影響而不斷調整其變化量，因此，單純的以數學計算所得出來比例不見得能反應真實的情況。
- （二）在我們實驗的過程中我們發現生物的相對比例往往無法取得平衡，若看的是 CO₂ 的變化量求出的比例關係，不見得適用於氧氣的平衡關係之建立。因此，只能在一定的範圍中去尋找一個平衡點，或許在這樣的密閉微型生態系當中，由於生物因子組成簡單，歧異度甚低，可能無平衡關係可言，我們也只是盡其可能地達到一段時間穩定而已。
- （三）網路上的資料顯示，像廠商作出來這樣的生態球小的可以維持 3~5 年，大的生態球可持續到 7~8 年，而我們作出來的約維持 2 星期左右。其差異造成的可能原因為：
- 1.我們的生態球體小，新竹手工吹製技術最大的到達直徑 20 公分已經是極限，而網路上能郵購的生態球最小直徑至少 12 英吋（約 30 公分，價格為 \$ 1000），最大直徑可達

39 英吋 (約 1 公尺, 價格為 \$ 20500), 在越小的生態球生物量少, 因此較不穩定, 受光面積小, 水體溫度容易升高, 很難長時間維持。

2. 我們採用的是淡水生態系統, 而網路上的生態球資料是建構海水生態系統, 海水雖然經過過濾, 但其中礦物質含量多於淡水生態系, 可以提供植物生長所需的微量元素。

3. 在我們設計的生態球當中, 生產者是用水蘊草, 而網路上的是使用絲狀藻, 一般絲狀藻繁殖快, 容易存活, 常可以在長時間照光的水族箱發現其蹤跡; 而水蘊草較特別, 如果所攝取的 CO_2 不足時, 會改變方向吸收化合態的 CO_2 , 以引起 pH 值的急遽上升, 使水中 pH 值大於 8.5, 減少水中溶氧量而造成生態不穩。(參考網站 22)

(四) 生態系若要長時間的維持, 那球內的生物的生殖和繁衍也必須考量到繁殖速率, 如何去估算每一種單一生物的生物量增加情形來維持彼此之間的穩定與動態平衡, 這個是我們尚未考慮到的, 未來或許可以針對單一生物因子作生長曲線圖來瞭解其增殖情形, 這也是持久生態系必要的考量因素。

(五) 我們所挑選的生物因素是在生產者、消費者和分解者中各選出一種對維持較長時間的穩定有幫助的生物, 但是反觀美國太空總局所設計的生態球卻包含蝦子和螺類, 我們為了顧及定量分析上不必要的其他變因, 減少實驗的複雜度以方便進行分析, 因以我們還是只選擇各一種生物, 雖然此密閉的微型生態系歧異度相當小且不穩定, 但是, 也唯有如此, 才能由簡御繁, 從實驗的過程中發現問題所在。

玖、結論

水族調查過程中，我們找出淡水生態系統及其理化因子作為我們初步建構微型生態系的選擇，透過 CO_2 和 O_2 的測定在眾多的生物因子當中，我們選擇光合速率高的水蘊草作為生產者、呼吸作用速率低的黑殼蝦作為消費者，以及具有氮循環能力的硝化菌最為我們的生物因子，透過更進一步的定量分析我們發現生產者：消費者 = 8:1 的比例能維持較久的穩定。而理化變因方面，我們發現空氣：水 = 1：2 的比例及加入細砂能使此密閉生態系持續長達二週。最後，我們利用玻璃球製作出屬於我們自行設計並且集合生物、科學、藝術於一體的微型生態系；也成為老師最棒的生態學教學工具。甚至將來可以利用此一系統來觀測模擬地球環境變遷所帶來對生態系的衝擊和影響。

隨著地球的惡化及「生物圈 2 號」技術上或設備上失誤的失敗，反映出地球環境是在經歷了幾十億年的風風雨雨後形成的，對於這種異常可靠的結構，人們渴望窺其脈絡，而我們這個實驗即是由此為出發點，希望能就我們所學的生物學和化學知識來建構屬於我們自行設計製造的生態球，這樣人工模仿的微型生態系命運終將會和生物圈 II 號一樣慘遭失敗，畢竟這個生態系生物歧異度甚小相當不穩定，且物質循環和能量流轉不仍有多諸如磷循環和硫循環是我們未能定量到的，以及生物之間的互動關係、生物和環境之間的相互影響、生物的繁衍和族群擴張現象都是在有限設備和能力下我們難以估算和定量的。

但是從設計、建構的過程當中，我們深深感受到生態系的複雜程度遠超乎我們所想像的，有許多難以估算錯綜複雜的相互關係，尤其是分解者微生物的種類和功能有很多尚待人類發現。生態系真可謂遷一髮而動全身，往往單就一項考慮平衡關係，另一項因子或許就達不到平衡，或許在人工製造的密閉生態系中，根本沒有所謂真正的生態平衡。我們慢慢能夠明瞭嘗試以人力和物力建構一個長時間穩定的密閉生態系來說幾乎是困難重重甚是不可能辦到的，生物圈 II 號以及我們生態球的失敗再一次提醒我們「維護地球的生物多樣性」的重要，因為在生態系中每個生物都是無法取代的，我們耗費了半年多的時間來從事微型生態系的模擬研究，我們相信最大的收穫在於：明瞭生態系的龐雜和不可預測性，正因為我們對自然界的瞭解仍所知有限。

拾、參考資料

一、書籍

- 1.植物生理學實驗 王月雲 陳是瑩 童武夫 編著 /藝軒圖書出版社
- 2.水質分析及實驗 孫長榮 陳慶和 王宇傑 鄧民有 黃富昌 邱英嘉 編著 / 文京圖書出版社
- 3.鄉土環境調察研究面觀 魏明通 著 /台灣書局
- 4.微生物實驗 陳吉平 唐坤元 編著/ 睿煜出版社
- 5.普通生態學 孫儒泳 李博 諸葛陽 尚玉昌 編著 / 藝軒圖書出版社
- 6.生生不息 - 文明與生物圈 作者 Vaclav Smil 董生 賴俊祥 編譯 /遠哲科學教育基金會
- 7.美麗的水草之培育方法 Gerhard Brummer/Peter Beck 著
- 8.高一基礎生物 施河 / 王家出版社
- 9.熱帶魚百科：飼育、養殖、病害 林志修 編譯 / 王家出版社
- 10.養魚入門 廖山俠 編譯 / 暖流出版社
- 11.熱帶魚與水族箱 張孝友 著 / 華聯出版社

二、網站

- 1.熱帶魚之家 <http://tfish.hk.st/>
- 2.製造海洋 - 海水族箱 <http://tknet.tku.edu.tw/~u7051103/>
- 3.得綠爾生態創作網 www.deluer.com
- 4.蔡裕田水族景觀設計 <http://www2.seeder.net.tw/tut/>
5. Ecosphere Associates Inc. <http://www.eco-sphere.com>
- 6.老鼠魚的窩 <http://yamtopia.com.tw/user/bdupla/index.htm/>
- 7.小魚兒工作室