

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

國中組 生物科

030310

水啦！水中小勇士—黑水蛇在水中的適應及廚餘濾液處理應用模式之優化

學校名稱： 新北市立土城國民中學

作者：	指導老師：
國二 蔡宗諭	林子婷
國二 林育生	吳曉青
國二 蔡皓宇	

關鍵詞： 黑水蛇、適應、豆渣濾液

## 摘要

本研究探討黑水虻三至六齡幼蟲在水中的適應情形，經解剖發現可浮性黑水虻幼蟲因具有較高密度的微氣管分支更能適應水中生活但脂肪分布較少。實驗得知五到六齡幼蟲在水中一周存活率平均為 81.2%，其水中排氨含量達 0.1mg/5ml。在水中的運動表現較低，餵食熟地瓜葉比生地瓜葉增重 90%。以黑水虻處理豆渣水可減少 35.6%的二氧化碳排放量及減少豆渣濾液蛋白質含量 66.67%，黑水虻幼蟲增加 25%蛋白質含量。建議優化豆渣濾液處理應用模式如下：篩選五到六齡可浮性幼蟲投入廚餘濾液發酵槽中二次飼育，未來可製成高蛋白比的黑水虻產品；不可浮幼蟲則另外製成高脂肪比的黑水虻產品，最後經黑水虻處理的廚餘廢液進一步轉化為酵素液進行各類應用，進而推動環保及循環經濟之宗旨。

# 壹、前言

## 一、研究動機

因人口數擴增，糧食需求增加也隨之帶來廚餘過剩的問題，為解決此問題，目前台灣將黑水虻應用於廚餘處理，黑水虻效率優良更不會對人類生活環境造成疾病傳染，新竹縣雖在黑水虻處理乾廚餘具有其成效但卻指出黑水虻或高效堆肥無法處理的廚餘濾液，縣府還得再送往其他再利用機構進行厭氧發酵，額外增加約 1000 萬元的處理支出（顧展瓏、賴振元、黃心亮，2025）。目前廚餘多元在推動是我們本研究的主要動機，想進一步研究黑水虻在廚餘濾液運用的可能性，並以豆渣發酵後模擬廚餘濾液的環境，觀察其黑水虻幼蟲在濾液中適應機制，以及在此惡劣的環境中其蛋白質含量的變化。期待藉此研究，能解決目前黑水虻在廚餘處理上無法克服的困境。

## 二、研究目的

- (一) 探討黑水虻幼蟲在水中可否生存及漂浮原因
- (二) 探討黑水虻幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉與體重變化量
- (三) 黑水虻幼蟲在水中和陸地的移動方式
- (四) 黑水虻幼蟲在水中的排氮量，與可耐受的酸鹼值
- (五) 黑水虻幼蟲對自然發酵豆渣的減碳效果探討
- (六) 黑水虻幼蟲對豆渣水處理的效果探討

## 三、文獻探討

### (一) 黑水虻介紹

#### 1、基本資料 (Benier, J., 2021)

黑水虻 (*Hermetia illucens*) 又名亮斑扁角水虻，雙翅目水虻科、扁角水虻屬，為腐食性昆蟲。幼蟲以動物糞便、植物殘骸等腐爛有機物等腐植質為食。

#### 2、生長歷程 (Oliveira, F., Doelle, K., List, R., & O' Reilly, J. R., 2015)

黑水虻為完全變態昆蟲，幼蟲又可細分為六齡，剛孵化的一齡期幼蟲體長約 0.1 公分，齡期間以脫皮劃分，第六齡期幼蟲體色開始變黑、停止攝食且尋找化蛹場所，此階段也稱作預蛹期(體長約 2.5 - 2.8 公分)；蛹期約 14 天變態為成蟲，成蟲約可存活 9 天。

### 3、幼蟲身體構造 (Benier, J,2021)

黑水虻幼蟲具備三個部分：頭部(He)、三節胸腔(Th)與八節腹節(Ab)，胸腔上覆蓋著纖毛，其中以第二、三節纖毛發育更為良好，八節腹節為板狀構造，呈矩形，外部覆蓋著剛毛(Se)以協助擺動。幼蟲具備兩個主要氣孔(Sp)，分別位在第一胸節與第八腹節，這兩氣孔與較大的氣管系統相連，而第一至七體節側也有小氣孔與較小的氣管系統連接進行氣體交換。

圖 1 黑水蛇幼蟲與氣管構造圖（資料來源：Beniers, J. (2021).）

## (二) Biuret 胜肽蛋白質測定 (莊榮輝, 2005)

## 1、原理

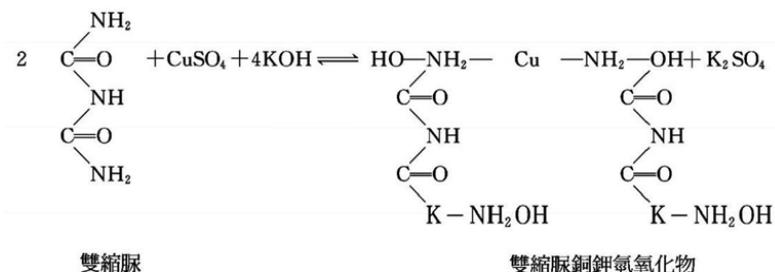
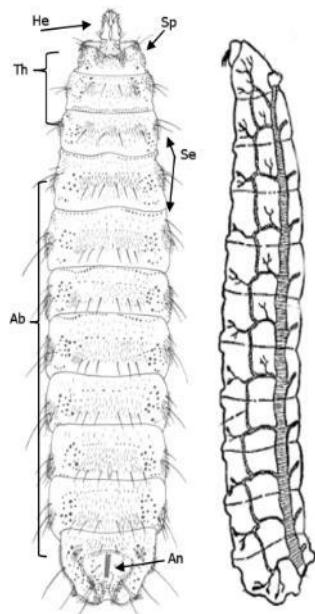


圖 2 雙縮脲化學反應式

資料來源：莊榮輝（2005）。酵素化學實驗。

含有兩個以上勝肽鍵化合物與硫酸銅鹼性溶液會產生雙縮脲反應產生紅色物質於 540nm，因原藥劑藍色，故混合成紫色物質。銅離子在鹼性溶液中，會與蛋白質勝鍵上的 carbonyl 基結合，生成紫色的複合物，於 540nm 檢測其吸光。兩個 carbonyl 與一個銅離子結合成類似 biuret 的複合體。其精確度較差(數 mg)，且會受樣本中硫酸銨及 Tris 的干擾，但準確度較高，不受蛋白質的種類影響。由 Biuret 法更發展出較靈敏的 BCA (bicinchoninic acid) 呈色劑，使精確度大大提升。

## 2、實驗方法

### (1)蛋白質檢量線製作

- a.依圖 4 等比例稀釋蛋清液各取 1 毫升加入 Biuret 試劑 3 毫升
  - b.震盪混合後，室溫下靜置
  - c.設定蛋白質吸收值 540nm 並以分光光度計檢測
  - d.帶入標準曲線換算蛋白質含量

蛋白質(mL)	生理食鹽水	蛋白質含量(mg)	Biuret試劑(mL)	540nm吸光值
0.5	9.5	0.05	3	0.0839
1.0	9.0	0.1	3	0.1282
1.5	8.5	0.15	3	0.1775
2.0	8.0	0.2	3	0.2336
樣品1毫升			3	

圖 3 蛋白質檢量線製作配方（此圖由學生繪製）

## (2)待測樣本的製備

### a.黑水虻幼蟲

(a)將 0.3g 幼蟲與 2.7g 生理食鹽水混合，稀釋 100 倍(幼蟲方法)

(b)取 1 毫升樣本液加入 Biuret 試劑 3 毫升

### b.豆渣濾液樣本的製備

(a)將 1ml 豆渣水與 1ml 生理食鹽水混合

(b)取 1 毫升樣本液加入 Biuret 試劑 3 毫升

## 四、研究限制

(一)實驗中所使用的黑水虻皆為三～六齡幼蟲。

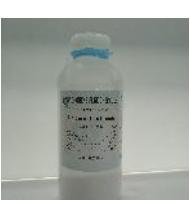
(二)實驗中所使用的水體來源都相同。

(三)實驗中所使用的黑水虻經挑選過可漂浮在水中。

## 貳、研究設備與器材

以下為研究中使用的主要儀器與材料，基本實驗器材、常見文具、手機則未列出。

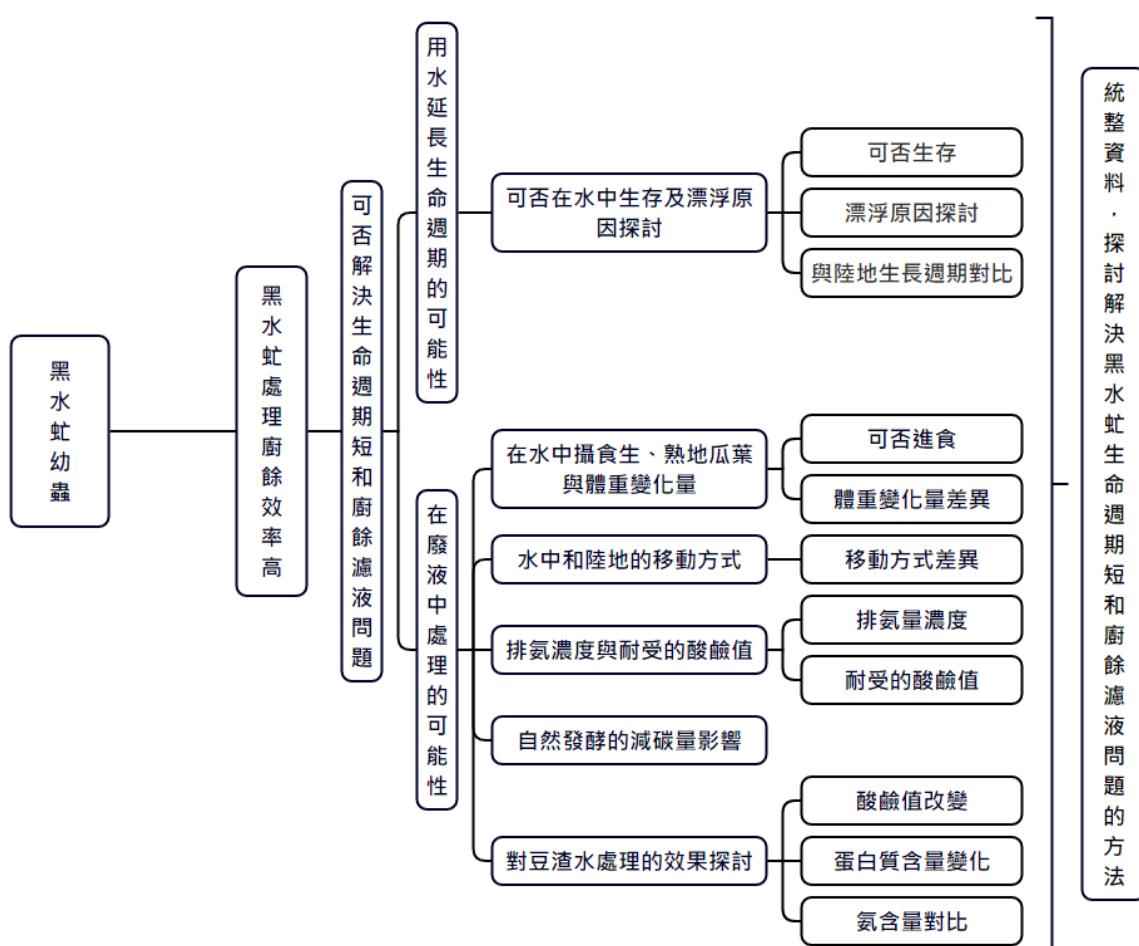
（下圖皆由學生拍攝）

總氮量 測試劑	碳酸鈣	比色皿	地瓜葉	玻璃瓶	電子秤
					

雙縮脲試劑	緩衝溶液	澄清石灰水	豆渣	蛋清	光譜儀
					

## 參、研究方法

[研究架構圖]（此圖由學生繪製）



### [實驗設計]

#### 一、探討黑水蛇幼蟲在水中可否生存及漂浮原因探討

##### 【實驗一】

1. 實驗問題：是否可在水中生存、生存多久（觀察）

2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲可否在水中生存、生存時間

3. 實驗方法：(1) 將水 150ml、秤好重量的 25 隻黑水蛇幼蟲放入未加蓋塑膠盒中，放置一週

- (2)一週後檢查生存數、重量，重複實驗三次
- (3)三次實驗結束後，繼續放置直到全部變成蛹期

### 【實驗二】

1. 實驗問題：為何可以在水中生存
2. 實驗目的：探討讓黑水蛇幼蟲可以在水中生存的原因
3. 實驗方法：
  - (1)將黑水蛇幼蟲的氣孔解剖，觀察其構造
  - (2)測量黑水蛇幼蟲的比重、密度
  - (3)根據觀察及測量結果推斷出黑水蛇幼蟲可以在水中生存的原因

### 【實驗三】

1. 實驗問題：黑水蛇在水中生存與陸地的對比
2. 實驗目的：探討陸地和水中的生存率、齡期時間對比
3. 實驗方法：
  - (1)將底沙、秤好重量的 25 隻黑水蛇幼蟲放入未加蓋塑膠盒中，放置一週
  - (2)一週後檢查生存數、重量，重複實驗三
  - (3)三次實驗結束後，繼續放置直到全部變成蛹期
  - (4)與【實驗一】比較結果



圖 4 陸地實驗樣本（此圖由學生拍攝）



圖 5 水中實驗樣本（此圖由學生拍攝）

### 【實驗四】

1. 實驗問題：排泄物是否改變 pH 值
2. 實驗目的：探討排泄物對 pH 值的影響
3. 實驗方法：將 25 隻黑水蛇、pH7 的水放入加蓋塑膠盒中中，放置一周，依照 pH 檢測筆的檢測步驟（附錄二）檢測水中的 pH 值。重複實驗三次，每次重新實驗前換水。

## 二、黑水蛇幼蟲在水中和陸地的移動方式

### 【實驗一】

1. 實驗問題：在陸地及水中的擺動方式是否有差異
2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲在陸地及水中的擺動方式是否有差異
3. 實驗方法：各放置 3 隻黑水蛇在一個裝有水的培養皿和一個未裝水的培養皿中，觀察其擺動是否有差異。

## **【實驗二】**

1. 實驗問題：在陸地的擺動方式
2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲在陸地擺動的幅度、頻率、構造、構造功能、擺動角度
3. 實驗方法：將 3 隻黑水蛇放入未裝水的培養皿中，觀察黑水蛇的擺動幅度、擺動頻率、運動構造、運動構造功能、擺動角度，並以紙張切出缺口，藉此固定黑水蛇頭部第二節，觀察其後半段身體的擺動幅度。

## **【實驗三】**

1. 實驗問題：在水中的擺動方式
2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲在水中擺動的幅度、頻率、構造、構造功能、擺動角度
3. 實驗方法：將 3 隻黑水蛇放入裝水的培養皿中，觀察黑水蛇的擺動幅度、擺動頻率、運動構造、運動構造功能。

## **【實驗四】**

1. 實驗問題：在水中及陸地的擺動方式比較並推測噴泉式進食之原因
2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲在水中及陸地的具體擺動方式比較
3. 實驗方法：根據**【實驗二】**、**【實驗三】**的結果，比較黑水蛇在水中及陸地的擺動方式（擺動幅度、擺動頻率、運動構造、運動構造功能、擺動角度）有何不同。

## **三、探討黑水蛇幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉與體重變化量**

### **【實驗一】**

1. 實驗問題：在水中可否進食生、熟廚餘與體重變化比較
2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲在水中可否進食生廚餘
3. 實驗方法：
  - (1) 將水 100ml、底沙各放入兩個塑膠盒中
  - (2) 捣碎的生地瓜葉、熟地瓜葉 25g 各放入兩個塑膠盒中
  - (3) 各放入 3g (約 75 隻) 五至六齡幼蟲，放置一週
  - (4) 一週後測量兩個塑膠盒中的幼蟲重量進行比較

## **四、黑水蛇幼蟲在水中的排氣量濃度，與可耐受的酸鹼值**

### **【實驗一】**

1. 實驗問題：在水中耐受的酸鹼值
2. 實驗目的：探討黑水蛇幼蟲在水中適宜的酸鹼值
3. 實驗方法：各放置 10 隻黑水蛇在三個裝水的培養皿中，使用 pH 值調節藥劑將三個培養皿內的 pH 值分別調節為 3、6、8，觀察黑水蛇的活動情形、存活率。

### **【實驗二】**

1. 實驗問題：黑水虻排氨的量
2. 實驗目的：探討排泄物氮含量對黑水虻幼蟲生存的影響
3. 實驗方法：準備兩個培養皿，一個為沒有黑水虻的自來水（放置前先測氮含量），一個為有 25 隻黑水虻的自來水，各自放置一周，最後用總氮量檢測器，依照檢測步驟（附錄一），檢測水中的總氮量，並且配合溫度與 pH 檢測筆（附錄二）測量出的 pH 值，計算水中的氮含量。重複實驗三次，每次重新實驗前換水。

## 五、密閉環境下黑水虻幼蟲在水中對發酵豆渣的減緩碳排放效果

### 【實驗一】

1. 實驗問題：黑水虻對豆渣水發酵的減碳效果
2. 實驗目的：探討黑水虻幼蟲對豆渣水發酵的二氧化碳生成量影響
3. 實驗方法：
  - (1) 將水 100ml、底材 50g、發酵豆渣 25g、3g 黑水虻放入錐形瓶中(實驗組)
  - (2) 將水 100ml、底材 50g、發酵豆渣 25g 放入錐形瓶中(對照組)
  - (3) 將水 100ml、3g 黑水虻放入錐形瓶中(對照組)
  - (4) 放置一周，一周後用排水集氣法收集錐形瓶中產生的二氧化碳氣體
  - (5) 通入澄清石灰水，以分光光度計測量液體濁度
  - (6) 將碳酸鈣和澄清石灰水按下表比例調配，並以檢測結果製成檢量線
  - (7) 依檢量線計算碳酸鈣重量

碳酸鈣 (gw)	澄清石灰水 (gw)	碳酸鈣含量 (gw)	T%(500nm)
0.2	9.8	0.00002(稀釋 1000 倍)	77.00
0.4	9.6	0.00004(稀釋 1000 倍)	81.89
0.6	9.4	0.00006(稀釋 1000 倍)	86.03
0.8	9.2	0.00008(稀釋 1000 倍)	89.70
1.0	9.0	0.0001(稀釋 1000 倍)	94.36

(8)根據三組的測量結果，比較黑水虻對豆渣水發酵的減緩碳排放效果

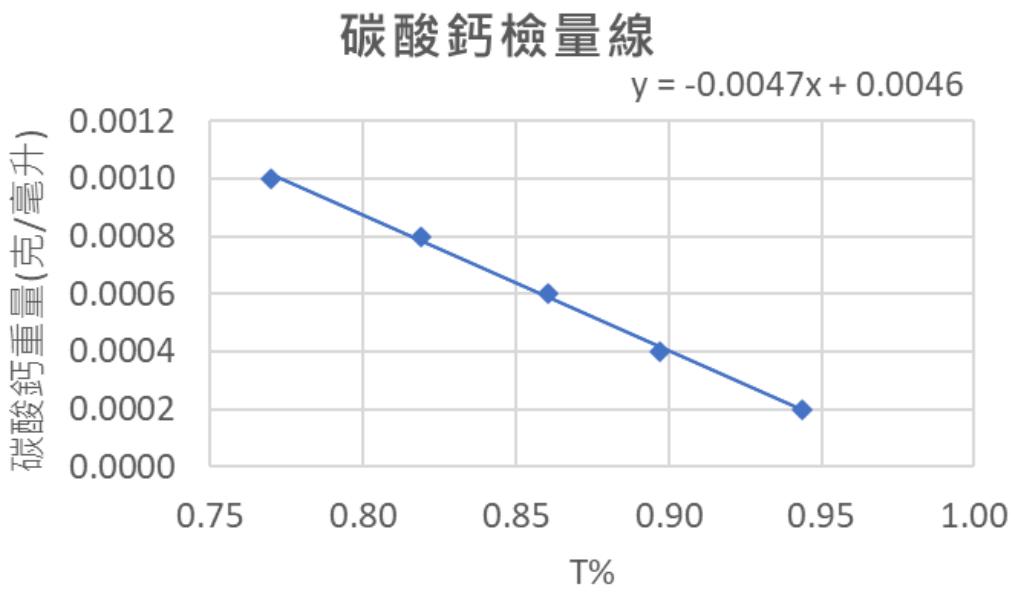


圖 6 碳酸鈣檢量線（此圖由學生繪製）

## 六、密閉環境下黑水虻幼蟲對豆渣水處理的效果探討

### 【實驗一】

1. 實驗問題：對酸鹼值的改變
2. 實驗目的：探討黑水虻的酵素液充當緩衝劑效果
3. 實驗方法：
  - (1) 將水 100ml、底材 50g、發酵豆渣 25g、3g 黑水虻放入錐形瓶中(實驗組)
  - (2) 將水 100ml、底材 50g、發酵豆渣 25g 放入錐形瓶中(對照組)
  - (3) 將水 100ml、3g 黑水虻放入錐形瓶中(對照組)
  - (4) 放置一周，一周後檢測三組溶液酸鹼值進行對比

### 【實驗二】

1. 實驗問題：黑水虻和豆渣水的蛋白質含量變化
2. 實驗目的：探討黑水虻的固碳效果
3. 實驗方法：
  - (1) 重複【實驗一】方法(1)到(3)
  - (2) 以文獻探討的蛋白質檢測改良方法製作檢量線
  - (3) 測量黑水虻和豆渣水的蛋白質含量
  - (4) 放置一周，一周後測量三組的黑水虻和豆渣水蛋白質含量進行對比

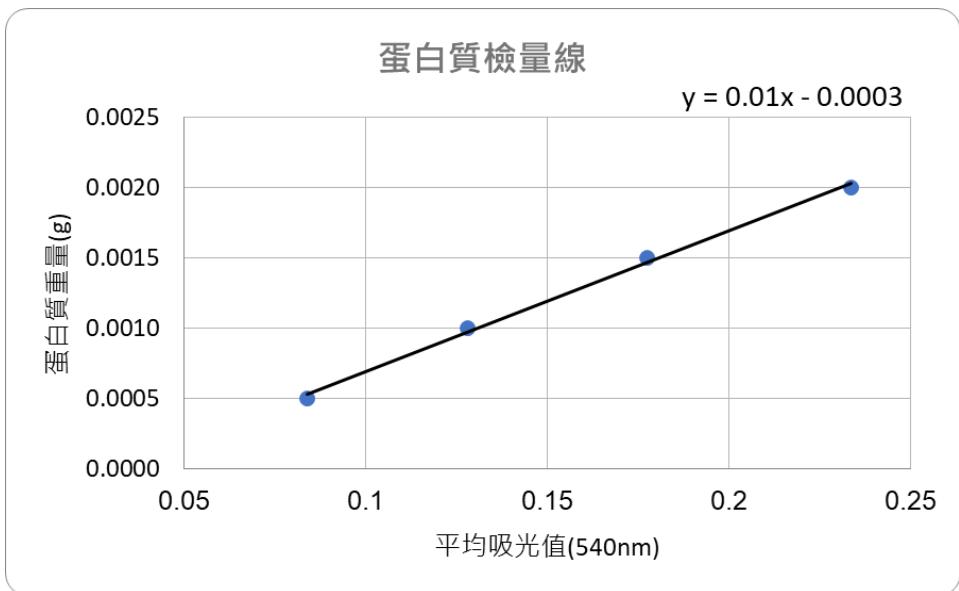


圖 7 蛋白質檢量線（此圖由學生繪製）

### 【實驗三】

1. 實驗問題：對豆渣水的氮含量改變
2. 實驗目的：探討黑水虻的氮循環
3. 實驗方法：
  - (1)重複【實驗一】方法(1)到(3)
  - (2)放置一周，一周後加入總氮量測試劑
  - (3)比較三種液體的變化

## 肆、研究結果

### 一、探討黑水虻幼蟲在水中可否生存及漂浮原因探討

(一) 是否可在水中生存、生存多久（觀察）

#### 1、實驗結果

表 1

黑水虻幼蟲在水中生存三次實驗的存活數量、平均、標準差表

黑水虻幼蟲存活數量（隻）（n=8）

第一次實驗 21.0

第二次實驗 15.0

第三次實驗 25.0

(續下頁)

平均值	20.3
標準差	5.03

2、說明：三次實驗所使用的幼蟲數量都為 25 隻，實驗用水體為自來水。從結果可得知黑水虻在水中可以生存，生存率為 81.2%。

## (二) 為何可以在水中生存

### 1、實驗結果

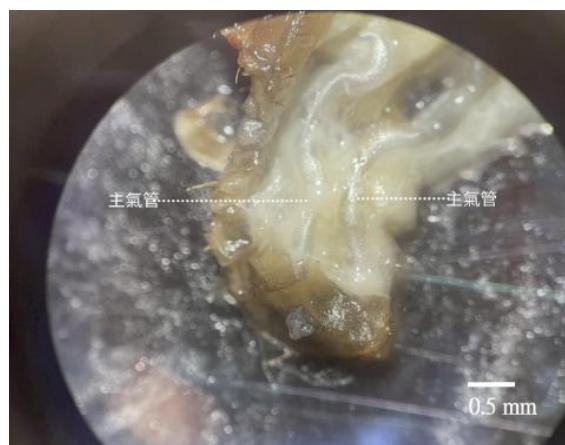


圖 8 背側主要的兩大氣管  
(此圖由學生拍攝與標示)

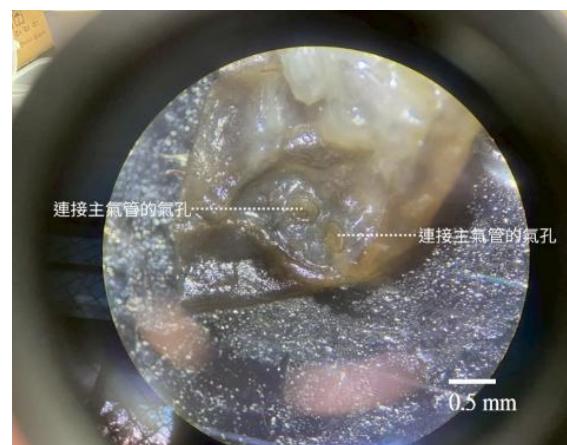


圖 9 背側連接主要氣管的兩個氣口  
(此圖由學生拍攝與標示)

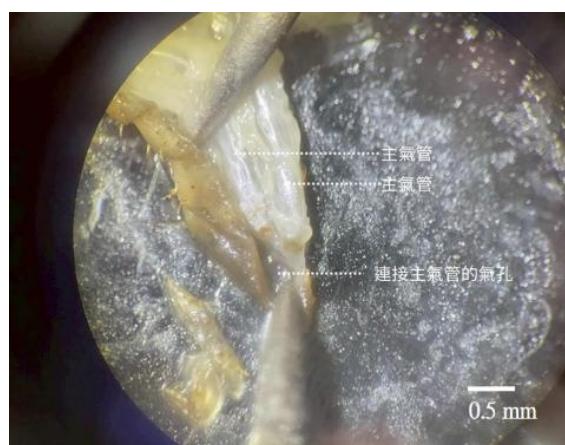


圖 10 背側主要氣管與開口的連接  
(此圖由學生拍攝與標示)

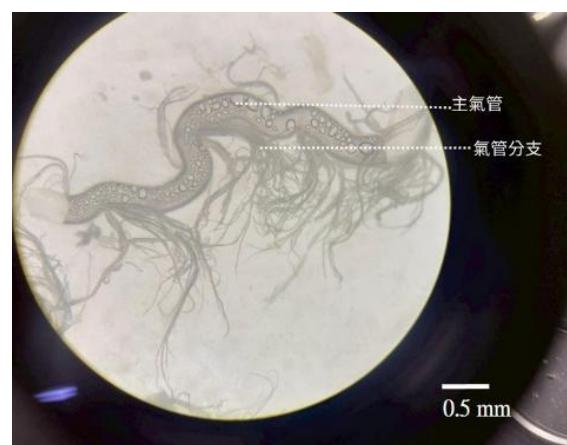


圖 11 一節節似大腸狀的氣管系統  
(此圖由學生拍攝與標示)



圖 12 初步分離的氣管系統與脂肪  
(此圖由學生拍攝與標示)



圖 13 經番紅染色後呈粉色的幾丁質結構  
(此圖由學生拍攝與標示)

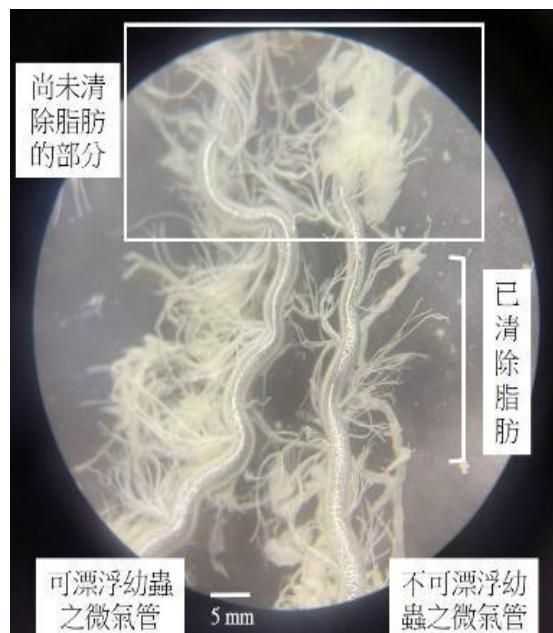


圖 14 可浮與不可浮黑水蛇之解剖後照片（皆為右側氣管）  
(此圖由學生拍攝與標示)

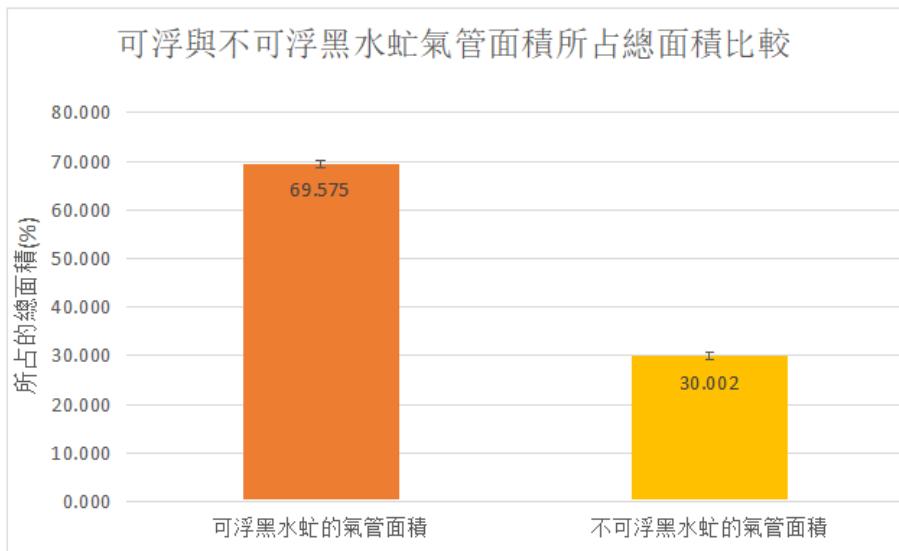


圖 15 可浮與不可浮黑水蛇氣管面積所占總面積比較

(此圖由學生繪製)

2、說明：本實驗先挑選可浮性與不可浮之三到四齡黑水蛇幼蟲及五到六齡黑水蛇幼蟲進行密度測量實驗。再進一步進行生理節剖實驗，我們採用五到六齡幼蟲，再挑選可浮與不可浮的幼蟲約 10 隻，解剖觀察並進行紀錄。

3、研究小結：根據解剖結果，發現黑水蛇的氣管主要組成為幾丁質，其形狀似大腸有一節節的連接構造，每一段會左右分叉出一根略小的支氣管，再往下逐漸分支 2~4 不等更細的支氣管，而支氣管的分布主要從頭部兩側開始，往下如胸骨向腹側包覆，開口接近腹側處，在尾部連接兩個主要氣管的開口處有似蓋狀的構造，推測有可能是用於保護氣管系統。這樣完整的氣管系統在黑水蛇置於水中時能提供浮力，像艘氣筏能漂浮在水中，而我們在黑水蛇漂浮在水中的狀態中觀察到黑水蛇會以尾部漂浮在水面，也可應證主要的兩大氣管與氣孔是在尾部。根據實驗結果，發現測量 3 至 4 歲和 5 至 6 歲的幼蟲密度皆約為 0.86(g/ml)，其密度小於水的密度，使水給予幼蟲浮力，讓幼蟲能漂浮在水面上。另外，我們同時結合解剖結果，觀察到可漂浮與不可漂浮的幼蟲身上有幾個差異，如可漂浮幼蟲的微氣管分支較多，不可漂浮幼蟲的脂肪較多，於是進一步以 imageJ 篩選確認可浮性黑水蛇幼蟲氣管系面積較不漂浮黑水蛇要重高出約 40%。

### (三) 在水中生存與陸地的對比

#### 1、實驗結果

表 2

黑水蛇幼蟲在陸地及水面上的生存對比表

黑水蛇幼蟲在陸地及水面上的生存對比 (n=25)

	生存率 (%)	一個月後化蛹的幼蟲數
陸地	100.0	22.0
水中	81.2	1.3

2、說明：三次實驗所使用的幼蟲數量都為 25 隻，水中實驗用水體為自來水。從實驗結果可得知黑水蛇在水中生存率雖然低於陸地，但幼蟲至化蛹的齡期時間更長。

#### (四) 排泄物是否改變 pH 值

##### 1、實驗結果

表 3

含有黑水蛇排泄物的水的酸鹼值變化表

含排泄物的水的酸鹼值變化 (n=25)			
	放置前	放置後	變化
第一次實驗	7.00	7.40	0.40
第二次實驗	7.00	7.20	0.20
第三次實驗	7.00	7.20	0.20
平均	7.00	7.27	0.27

2、說明：放置水體為自來水，放置 25 隻黑水蛇幼蟲，三次實驗條件都一樣。實驗結果為 25 隻黑水蛇排泄物水放置一周平均 pH 值為 7.27。

3、研究小結：根據實驗 1 的三次結果來看，黑水蛇幼蟲能在水中生存。此外，據我們的觀察，黑水蛇幼蟲在水中可生存時間，且幼蟲基本都是浮在水面上，極少潛入水中，並無出現死亡，代表不管水多深，只要黑水蛇幼蟲可浮在水面上，若有死亡其因素應並非淹死。25 隻黑水蛇排泄物水放置一周平均 pH 值變化為 0.27，由於我們是用紗布封住容器，因此推測是排泄物導致酸鹼值有此變化。

## 二、黑水蛇幼蟲在水中和陸地的移動方式

#### (一) 在陸地及水中的擺動方式是否有差異

##### 1、實驗結果

表 4

## 黑水蛇幼蟲在陸地及水中的擺動方式

### 黑水蛇幼蟲在陸地及水中的擺動方式

陸地	以蠕動方式前行。黑水蛇身體底部具有某器官使其能夠擁有強大的附著力，讓其甚至可在 90 度直角的斜面上蠕動前行。
水中	以身體的伸縮進行在水上的擺動，極少潛入水中。

2、說明：放置水體為自來水。根據實驗結果，黑水蛇幼蟲在陸地以規律、上下波動的方式前行，在水中則因失去可支撐的地面，故上下、左右擺動的幅度變大。在最初進入水中時會呈現 U 字型做身體穩定，進行移動時的腹部尾端靠近水面，改變為幅度較大的 U 型移動，證明黑水蛇為克服不同環境差異，其擺動、移動的方式亦有調整，但仍需實驗證明有哪些差異。

#### (二) 在陸地的擺動方式

##### 1、實驗結果

表 5

#### 黑水蛇幼蟲陸地擺動幅度、擺動頻率的測量結果表

##### 陸地擺動幅度、擺動頻率、擺動角度的測量結果 (n=3)

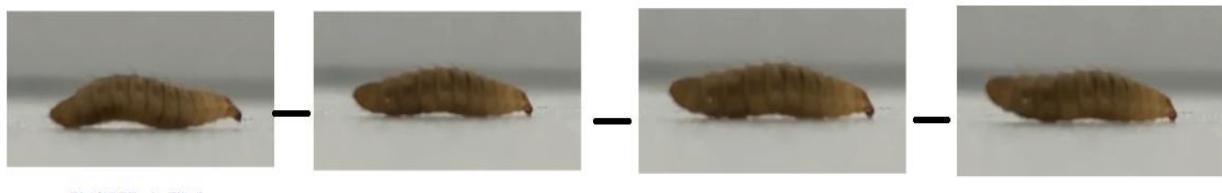
	上下擺動幅度 (cm)	上下擺動頻率 (次/秒)	擺動角度 (度)
第一次實驗	0.15	0.67	
第二次實驗	0.15	0.60	左右擺動 160
第三次實驗	0.15	0.63	上下擺動 170
平均	0.15	0.63	

表 6

#### 黑水蛇幼蟲陸地擺動構造、功能表

##### 黑水蛇幼蟲陸地擺動構造、功能

運動構造	頭部	腹部肌肉	剛毛
功能	進行探索與支點固定	帶動身體運動	增加摩擦力



腹部肌肉發力

帶動身體移動前進

帶動身體移動前進

完成一次移動

圖 16 黑水蛇幼蟲在陸地的一次擺動過程（此圖由學生繪製）

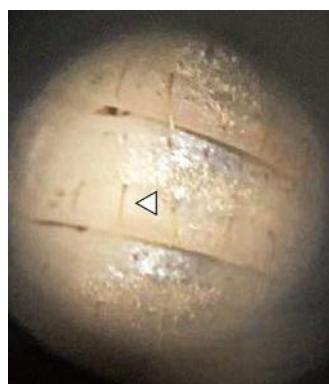


圖 17 剛毛（白色箭頭處）  
(此圖由學生拍攝)

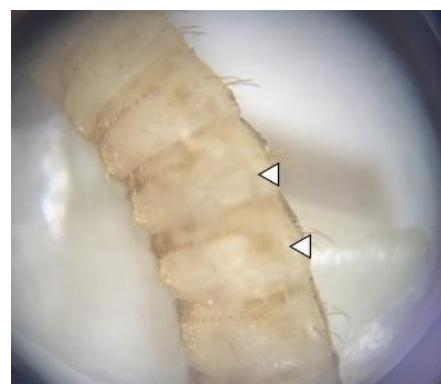


圖 18 腹部肌肉（白色箭頭處）  
(此圖由學生拍攝)

2、說明：根據實驗結果，黑水蛇幼蟲在陸地上有能施力的平面，擺動方式主要由前方的頭部進行探索與支撐，接著腹部肌肉（圖 18）發力、由後往前進行波浪式的推動，最後全身恢復平行，即完成一次擺動（如圖 16）。每次的擺動幅度約 0.15cm，完成一次波浪式推動的頻率為 0.63 次/秒，在乾燥的環境下擺動方式比較快速，若沾濕身體後將能爬行至呈垂直角度的平面，其中不同齡期的幼蟲其剛毛（圖 17）發育程度不同，齡期越大者能觀察到剛毛發育越多且完善，在爬行速度、距離可觀察到與齡期成正比。

### （三）在水面上的擺動方式

#### 1、實驗結果

表 7

黑水蛇幼蟲水面上擺動幅度、擺動頻率的測量結果

陸地擺動幅度、擺動頻率、擺動角度的測量結果 (n=3)

	擺動幅度 (cm)	擺動頻率 (次/秒)
第一次實驗	0.40	0.25
第二次實驗	0.40	0.25

（續下頁）

第三次實驗	0.50	0.29
平均	0.43	0.26

表 8

黑水蛇幼蟲水面上擺動構造、功能表

黑水蛇幼蟲水面上擺動構造、功能

運動構造	頭部	腹部肌肉	剛毛
功能	進行探索	帶動身體扭動前行	維持平衡

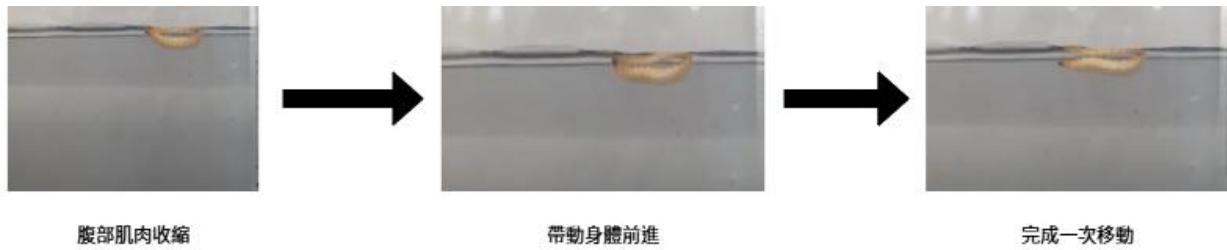


圖 19 黑水蛇幼蟲在水中的一次擺動過程（此圖由學生繪製）



圖 20 一至三齡幼蟲在水中  
(此圖由學生拍攝)



圖 21 四齡幼蟲在水中  
(此圖由學生拍攝)



圖 22 五、六齡幼蟲在水中  
(此圖由學生拍攝)

2、說明：從實驗結果得知，一至三齡幼蟲放入水中會直接沉入水底，而四齡幼蟲在水中則是載浮載沉，其中腹部尾端會特別漂浮在水面上，五至六齡幼蟲一放入水中，會發現幼蟲略在水上大幅度擺動維持身體平衡後即漂浮在水上。不同齡幼蟲會有這些差異，推測是各階段的氣管系統發展不一致，黑水蛇越成熟氣管系統發展越完善，才能漂浮在水上。

(四) 在水中及陸地的擺動方式比較

1、實驗結果

表 9

## 黑水蛇幼蟲在陸地及水面上的擺動方式比較表

### 黑水蛇幼蟲在陸地及水面上的擺動方式比較

	上下擺動幅度 (cm)	上下擺動頻率 (次/秒)	擺動角度 (度)	運動構造、功能
陸地	0.15	0.63	左右 160 前後 170	腹部肌肉帶動身體運動， 剛毛協助增加摩擦力。
水中	0.43	0.26	因水中無施力點 擺動角度不明顯	腹部肌肉帶動身體扭動前行，剛毛協助維持平衡。

2、說明：黑水蛇幼蟲在水中的擺動幅度比陸地大 ( $0.43 > 0.15$ )，擺動頻率比陸地小 ( $0.26 < 0.63$ )，運動構造相同但功能不同。根據我們觀察，一至三齡幼蟲放入水中時會有沉至水底的現象（如圖 20），四齡則會呈現半浮半沉的現象（如圖 21），且放入水中不久就會有掙扎的現象，過一陣子就會死亡，因此一至四齡幼蟲在水中無法生存。而幼蟲直到五齡才可浮在水面上（如圖 22），進而在水面上有擺動、攝食等等的行為。

3、研究小結：根據實驗 1 的結果，可得知黑水蛇幼蟲在水中的擺動方式與陸地爬行有差異。分別在實驗 2 與 3 可發現，幼蟲主要都以腹部的肌肉發力產生波浪狀蠕動爬行，但在水中的黑水蛇比較傾向前後收縮進行前進，與陸地上所呈現規律的波浪狀擺動有所不同，另外，在陸地上的黑水蛇會用頭部進行初步的探索，移動前會固定作為支點以利腹部肌肉施力前進，但在水中失去支撐力，一樣會傾向用頭探索環境，尾部則是固定在水面上進行氣體交換。同時也因為黑水蛇在水中並無支撐力，因此在陸地上出現的噴泉式進食行為並不會出現在水中，我們只能檢測物質量的變化（如蛋白質）等標準作為黑水蛇進食之依據。

### 三、探討黑水蛇幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉與體重變化量

#### （一）可否進食生、熟地瓜葉與體重變化比較

表 10

#### 攝食生、熟地瓜葉幼蟲的體重變化表

### 攝食生、熟地瓜葉幼蟲的體重變化量 (gw)

(續下頁)

	生地瓜葉 (n=75)	熟地瓜葉 (n=75)
體重變化量	0.40	3.10
體重增加率	13%	103%

2、說明：攝食生地瓜葉組的實驗中，放置自來水及 3g（約 75 隻）幼蟲，結果可得知黑水蛇在水中難處理生地瓜葉。攝食生地瓜葉組的實驗中，放置自來水及 3g（約 75 隻）幼蟲，實驗結果明顯可得知黑水蛇在水中明顯熟地瓜葉進食量多於生地瓜葉，幼蟲更容易處理熟食，且能夠在水中進食。

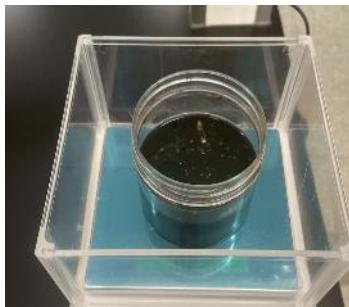


圖 23 放置一周後的攝食熟地瓜葉幼蟲實驗樣本（此圖由學生拍攝）



圖 24 攝食熟地瓜葉放置一周後的幼蟲重量（此圖由學生拍攝）

3、研究小結：綜合實驗一與二，皆放 3g（約 75 隻）黑水蛇與 25g 地瓜葉，可觀察到黑水蛇對於蒸熟的地瓜葉處理效率遠比生地瓜葉較高，整體體重增長的量約 7.75 倍。會有此現象推測是黑水蛇本身的口器較擅長處理腐質性的食物，因此攝食多、體重增長也明顯。

#### 四、黑水蛇幼蟲在水中的排氨量，與可耐受的酸鹼值

##### (一) 耐受的酸鹼值

###### 1、實驗結果

表 11

pH 值 3~8 黑水蛇幼蟲存活數、存活率表

	pH 值 3~8 黑水蛇幼蟲存活數量 (n=10)		
	pH3	pH6	pH8
存活數 (隻)	7	9	8

存活率 (%)	70%	90%	80%
---------	-----	-----	-----

2、說明：放置水體為自來水，放置 10 隻黑水蛇幼蟲。從實驗結果可得知黑水蛇在 pH3 的環境中存活率最低，最高者是 pH6 的環境中。

## (二) 黑水蛇排氨的量

### 1、實驗結果

表 12

#### 自來水本身放置一週的氨濃度

自來水	
本身的氨濃度 (ppm)	0
放置一週的氨濃度 (ppm)	0

表 13

#### 含有黑水蛇排泄物的水的氨含量、氨濃度、pH 值(開放式環境)

(n=25)	含排泄物水的氨含量 (mg)	含排泄物水的氨濃度 (ppm)	含排泄物水 pH 值
第一次實驗	0.11250	7.50	7.40
第二次實驗	0.9000	6.30	7.20
第三次實驗	0.09825	6.55	7.20
平均值	0.10022	6.78	7.27
標準差	0.00925	0.52	0.1155

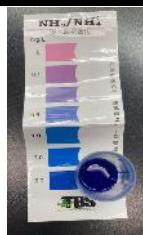


圖 25 第一次含排泄物的水的  
氨含量測量結果  
(此圖由學生拍攝)

圖 26 第二次含排泄物的水的  
氨含量測量結果  
(此圖由學生拍攝)

圖 27 第三次含排泄物的水的  
氨含量測量結果  
(此圖由學生拍攝)

2、說明：放置水體為自來水，放置 25 隻黑水蛇幼蟲。從實驗結果可得知，25 隻黑水蛇一周排氨量至少為 0.09mg/5ml，量稀少不使黑水蛇致死。

3、研究小結：黑水蛇為陸生昆蟲正常排泄以尿酸為主，本次會以氨做為檢測，是以容易讓水生生物死亡的原因—氨中毒為判別標準。實驗中發現 25 隻黑水蛇在水中的排泄的確能以氨檢測出來，推測會有此原因是水中的微生物將尿酸分解成銨根與氫氧根離子，故試劑會轉變為藍色，經計算，25 隻黑水蛇一周排氨量至少為 0.09mg/5ml，量稀少不使黑水蛇致死。

## 五、密閉環境下黑水蛇幼蟲在水中對發酵豆渣的減緩碳排放效果

### (一) 黑水蛇對豆渣自然發酵的減碳效果

#### 1、實驗結果

表 14

#### 黑水蛇對豆渣自然發酵的減緩碳排放效果

(n=75)	黑水蛇加豆渣組的重量(gw)	純豆渣濾液組的重量(gw)	純黑水蛇組的重量(gw)
第一次測量	0.00043	0.00071	0.00019
第二次測量	0.00050	0.00079	0.00020
第三次測量	0.00052	0.00077	0.00020
平均值	0.00049	0.00076	0.00020
標準差	0.00004	0.00003	0.000005

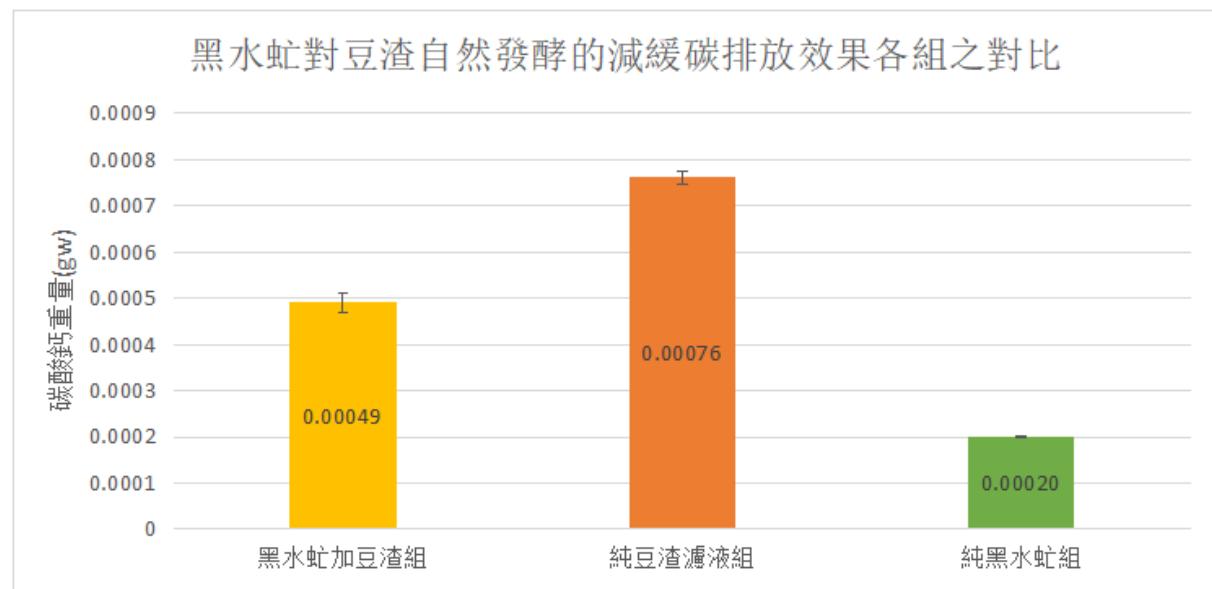


圖 28 黑水虻對豆渣自然發酵的減緩碳排放效果各組之對比（此圖由學生繪製）

2、說明：在本次實驗中，使用黑水虻來處理豆渣濾液，其中微生物作用下在相同時間內產生的二氧化碳通入澄清石灰水的二氧化碳檢驗，以純豆渣濾液組產生的總二氧化碳含量為基準值時，黑水虻加豆渣組為純豆渣濾液組的 64.28%、純黑水虻組為純豆渣濾液組的 25.92%。

3、研究小結：我們以碳酸鈣標準減量線換算出三組的碳酸鈣含量，並依以純豆渣濾液組產生的總二氧化碳含量為基準值(100%)時，黑水虻加豆渣組為純豆渣濾液組的 64.28%、純黑水虻組為純豆渣濾液組的 25.92%，在黑水虻加豆渣組和純豆渣濾液組的比較下，若使用黑水虻來處理發酵豆渣濾液可以減少約 36% 二氧化碳生成。

## 六、密閉環境下黑水虻幼蟲對豆渣水處理的效果探討

### (一) 對酸鹼值的改變

#### 1、實驗結果

表 15

### 三組液體的酸鹼值改變

(n=75)	豆渣加水 pH 值	豆渣 + 幼蟲 + 水 pH 值	幼蟲加水 pH 值
平均值	4.5	4.6	6.6

2、說明：在密閉的環境下豆渣加水組進行自然發酵中微生物會產生有機酸，有機酸溶入水中因此會導致其 pH 值為酸性的 4.5，而幼蟲加水先前做過實驗，會因為排泄物分解成氫氧根離子，但呼吸作用也會有二氧化碳產生，酸鹼中和下的 pH 值約為 6.6，而豆渣加入蟲與水的 pH 值 4.6 則接近豆渣加水的 pH 值 4.5。

## (二) 黑水虻和豆渣水的蛋白質含量變化

### 1、實驗結果

表 16

#### 兩組液體黑水虻蛋白質含量變化

(n=75)	黑水虻+水(g/ml)	豆渣+水+黑水虻(g/ml)
放置前	0.0016	0.0016
放置一周後	0.0013	0.002
含量變化率	-18.75%	25%

表 17

#### 兩組液體豆渣水蛋白質含量變化

(n=75)	豆渣加水(g/ml)	豆渣+水+黑水虻(g/ml)
放置前	0.0012	0.0012
放置一周後	0.001	0.0004
含量變化率	-16.67%	-66.67%

2、說明：實驗中純粹將黑水虻放置水中，一周後可檢測出黑水虻整體蛋白質含量減少 18.75%，而黑水虻加水與豆渣的組別中，卻可發現黑水虻整體蛋白質增加 25%（表 16），由此可推測黑水虻在加入豆渣的組別中有攝入蛋白質並成長。在豆渣水的蛋白質成分檢測上，純豆渣加水於一周後蛋白質減少約 16.67%（表 17），推測此原因是源自於豆渣與水中的微生物進行蛋白質分解，而豆渣加水與黑水虻的組別蛋白質於一周後的變化則是減少 66.67%，於前一組數據相差 50%，可呼應表 21 的結果且合理推測減少的 50% 蛋白質應該是被黑水虻與微生物分解、攝食、吸收。

## (三) 對豆渣水的氮含量改變

### 1、實驗結果

表 18

#### 三組液體氮含量改變

蟲加水	豆渣加水	豆渣加蟲加水

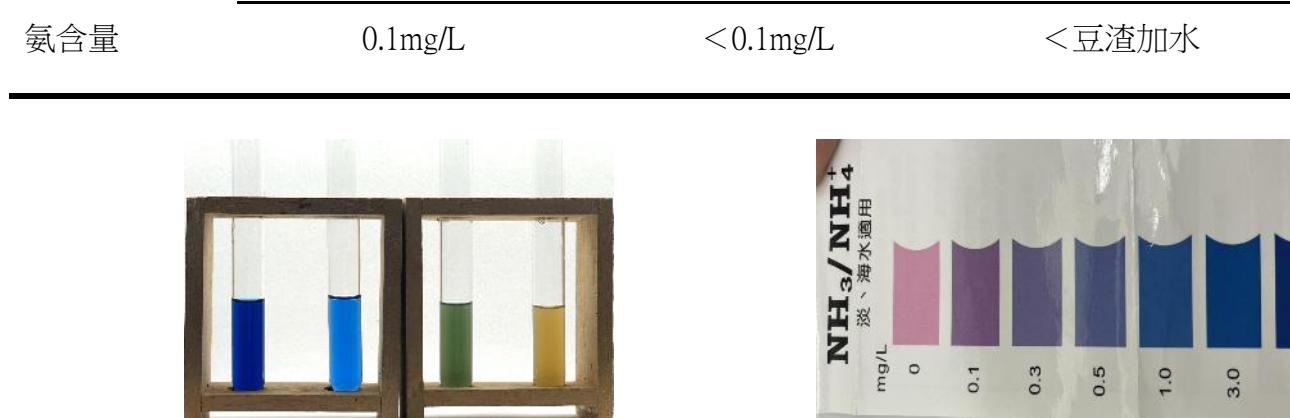


圖 29 稀釋 10 倍、100 倍的幼蟲加水組、豆渣加水組與豆渣加蟲加水組樣本氨含量檢測之比色（左至右排序）  
（此圖由學生拍攝）

圖 30 氨含量檢測之比色標準  
（此圖由學生拍攝）

2、說明：在氨含量的檢測上，可發現三組中以幼蟲加水的氨含量最高，最後則是豆渣加水與黑水蛇。

3、研究小結：目前已有實證證明，在以固體基質飼育黑水蛇以作為生物有機質的廢料清除，需控制 pH 值的區間以避免過度酸化導致抑制黑水蛇生長與微生物活性表現，也發現基質的 pH 值與二氧化碳的排放呈負相關，與氨氣排放量呈正相關，同時也觀察到 pH 的升高能加速 $\text{NH}_4^+$ 往 $\text{NH}_3^-$ 的轉換，增加氮的吸收並使黑水蛇體內的蛋白質增加（Pang, W., Hou, D., Chen, J., Nowar, E. E., Li, Z., Hu, R., ... & Wang, S., 2020）。綜合上述實驗，我們可驗證此文獻觀點，黑水蛇幼蟲放置在豆渣與水的混和液中，是能將豆渣的蛋白質分解吸收後提升自身蛋白質（表 21），而氨含量的降低證明黑水蛇的加入在控制好環境 pH 值後可加速 $\text{NH}_4^+$ 往 $\text{NH}_3^-$ 的轉換，另外產生的水則會提升 pH 值。

## 伍、討論

### 一、黑水蛇幼蟲在水中可否生存及漂浮原因

目前少有文獻探討黑水蛇在純水的環境中生存表現，但有國外文獻標示出黑水蛇身體的氣管系統的剖面構造（Benier, 2021）。在實驗中，發現有部分的幼蟲會沉下水底，其他皆漂浮在水面上，為確保黑水蛇能夠正常行使呼吸作用，因此我們皆挑選能夠漂浮在水面上的幼蟲進行實驗，但我們發現幼蟲有漂浮於水面及沉溺現象，於是我們測量幼蟲的比重、計算密度及解剖幼蟲觀察其氣管系統。根據結果，黑水蛇能在水中存活一段時間，比較幼蟲的比重及幼蟲氣管構造，發現到可浮與不可浮的幼蟲身上有幾個明顯差異，如可浮幼蟲的微氣管分支較多，不可浮幼蟲的脂肪較多，且不論齡期的幼蟲比重皆約為 0.86 (g/ml)，使水給予幼

蟲浮力，讓幼蟲能漂浮在水面上，另外我們在解剖時發現幼蟲對於酒精的耐受性比多數昆蟲還高。實驗中有出現黑水蛇死亡的現象，但死亡的幼蟲約七成是已經化蛹的，且化蛹的幼蟲皆沒有存活，且查詢文獻後發現黑水蛇在預蛹期時會去乾燥的地方化蛹，因此我們得知黑水蛇在預蛹期時必須要在離水乾燥環境才能順利化蛹。

## 二、探討黑水蛇幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉的體重變化量

過去研究多以醣類等物質作為黑水蛇的食物來源（林玄晶、潘盈郁，2019），本實驗從醣類食物發想，並從中選擇泡在水中能觀察完整構造的地瓜葉做為實驗材料。然而，因黑水蛇本身為腐質食物為主，故實驗設計中以生、熟地瓜葉做為對照，重複驗證黑水蛇在經處理過的熟地瓜葉組別中因進食而有明顯的體重增長。

## 三、黑水蛇幼蟲在水中和陸地的移動方式

過去的文獻中提及，黑水蛇體表具有纖毛、剛毛等構造，剛毛與纖毛能協助幼蟲進行爬行，黑水蛇體內以第一、八節具備大氣孔進行氣體交換（Benier, 2021）。而我們將黑水蛇幼蟲放置在水中，實驗結果中發現幼蟲在水中的擺動方式與陸地有差異。在陸地上的幼蟲主要都以腹部的肌肉發力產生波浪狀蠕動爬行，但在水中的黑水蛇比較傾向前後收縮進行前進，與陸地上所呈現規律的波浪狀擺動有所不同，另外，在陸地上的黑水蛇會用頭部進行初步的探索，移動前會固定作為支點以利腹部肌肉施力前進，但在水中失去支撐力，一樣會傾向用頭探索環境，尾部則是固定在水面上進行氣體交換，這也意味著黑水蛇在水中的活動力低於在陸地上，代謝率下降導致脂肪累積，因此體重增加。

## 四、探討黑水蛇在水中的排氨量，與可耐受的酸鹼值

在我們水中共存實驗結果中，將 25 隻黑水蛇放置水中一周，發現三次實驗的酸鹼值皆變的更鹼，推測是因幼蟲的排泄物所致，於是使用試劑測量樣本中的氨濃度變化，結果發現氨濃度平均上升 0.1ppm。陸生的黑水蛇原是以尿酸排泄，到水中卻變成氨的形式，推測是因水中微生物將尿酸分解成銨根與氫氧根離子，因此不只能以氨檢測劑測量算出一周排氨的量至少為 0.09mg，也以 pH 值上升佐證。若黑水蛇並不會因為排泄物的因素影響生存，那在更為嚴苛的酸鹼值環境中會有如何的耐受性，根據結果發現幼蟲在 pH6 的環境生存率最高，生存率最低為 pH=3 的環境。

## 五、黑水蛇幼蟲對自然發酵豆渣的減碳效果探討

先前有國內報導指出因黑水蛇口器退化，只能攝食腐質性食物，因此在提升其蛋白含量時曾以豆渣作為食物拌入廚餘餵食黑水蛇（賴郁薇，2017），以此為靈感，本實驗以豆渣作材料可先確保黑水蛇的食物來源一致，亦可觀察排碳量極少的黃豆在經過實驗後能否再將碳排量降低。在三組實驗中，黑水蛇、豆渣重量都一致，以純黑水蛇製造出來的二氧化碳含量

最多，最少是純豆渣，符合發酵作用與呼吸作用的化學反應式。另觀察到，在豆渣與黑水蛇一起放置的實驗組別中，發酵作用與呼吸作用同時進行時所產生的總二氧化碳含量遠比純豆渣、純黑水蛇兩者相加來的少，幾乎是減少一半的量，得知黑水蛇在處理發酵食物時的減碳效果顯著。會有此效果的主要原因我們推測因實驗環境並非完全控制在無氧狀態，在實驗設備中的些微氧氣一樣提供給豆渣中微生物做分解作用，或在黑水蛇的腸道內亦有厭氧細菌能在分解過程中將二氣化碳轉變為其他的養分等物質儲存，因此其二氣化碳的量大幅度減少。

## 六、黑水蛇幼蟲對豆渣水處理的效果探討

結合第五項目的，我們進一步研究黑水蛇在豆渣中的蛋白質含量變化，從中發現豆渣加水因發酵產生有機酸會導致 pH 值約 4.5，若再放黑水蛇進去並不會影響太多 pH 值的改變幅度，若將黑水蛇幼蟲放置在豆渣與水的混和液中，是能將豆渣的蛋白質分解吸收後提升自身蛋白質，但其中也有微生物在進行作用，因此蛋白質的轉換並非全然的百分百。另外，黑水蛇加入豆渣與水的混和液中反而觀察到氨含量的降低，此現象證明黑水蛇的加入在控制好環境 pH 值後可加速  $NH_4^+$  往  $NH_3$  的轉換，另外產生的水則會提升 pH 值。在未來實際應用上，應可以不斷放入可漂浮幼蟲做蛋白質分解的處理，也同時可觀察到幼蟲在豆渣水中最快可在一周內蛹化，能短時間內製成大量蛋白質含量更高的黑水蛇。

## 陸、結論

1. **黑水蛇可在水中生存：**根據本研究的結果，黑水蛇幼蟲在水中一周的存活率為 81.2%，五至六齡延長的生存時間少至一周，多至一個月。三至六齡的可浮與不可浮黑水蛇幼蟲的身體密度皆為 0.86(g/ml)。可浮的幼蟲因具有較高密度的微氣管分支更能適應水中生活但脂肪分布較少。
2. **黑水蛇可在水中攝食：**幼蟲對於蒸熟的地瓜葉處理效率遠比生地瓜葉較高，整體體重增長的量約 7.75 倍。
3. **黑水蛇在陸地與水中擺動的方式差異包含擺動上下幅度、擺動的頻率次數：**陸地上移動主要會以波狀進行移動，頭部進行探索後作為臨時支點固定，腹部肌肉發力推動身體前進，在水中的移動蛇則是傾向以腹部尾端固定在水面上，頭部探索後收縮再推擠身體往前。
4. **黑水蛇一周後在水中的排泄物使水體 pH 平均從 7 變化為 7.27：**若黑水蛇並不會因為排泄物的因素影響生存，那在更為嚴苛的酸鹼值環境中會有如何的耐受性，根據結果發現幼蟲在 pH6 的環境生存率最高，生存率最低為 pH=3 的環境。
5. **使用黑水蛇來處理發酵豆渣濾液可以減少約 36% 二氣化碳生成：**以碳酸鈣標準減量線

算出碳酸鈣含量並推測總二氣化碳含量。以純豆渣濾液組為基準值，黑水蛇加豆渣組為純豆渣濾液組的 64.28%、純黑水蛇組為純豆渣濾液組的 25.92%。

6. 黑水蛇處理豆渣水會減少豆渣濾液蛋白質含量 66.67%，幼蟲則增加 25% 蛋白質含量：將幼蟲放置水中一周後整體蛋白質含量減少 18.75%，豆渣與水的混合液一周後蛋白質含量減少 16.67%。
7. **預期結果：**優化豆渣濾液處理應用模式如下圖，篩選五到六齡可浮性幼蟲投入廚餘濾液發酵槽中二次飼育，未來可製成高蛋白比的黑水蛇產品；不可浮幼蟲則另外製成高脂肪比的黑水蛇產品，最後經黑水蛇處理的廚餘廢液進一步轉化為酵素液進行各類應用，進而推動環保及循環經濟之宗旨。

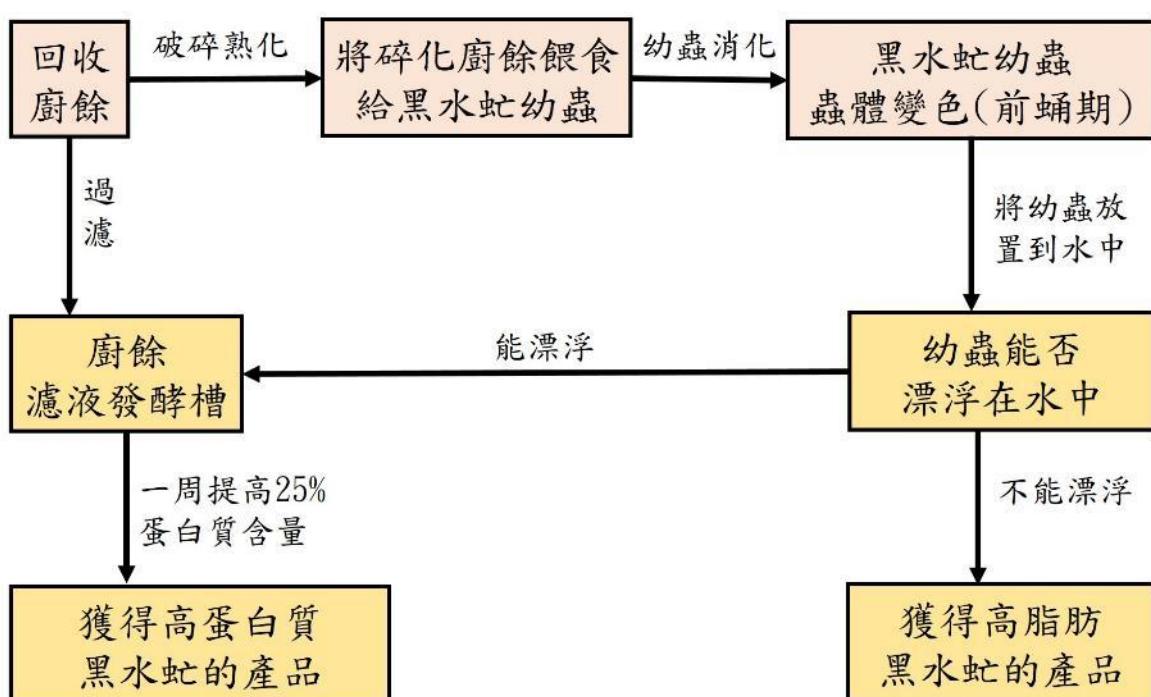


圖 31 廚餘濾液處理應用模式示意圖（此圖由學生繪製）

## 柒、未來展望

黑水蛇在廚餘減量的研究上已發展的非常成熟，我們的實驗則突破黑水蛇只能在陸地生存的侷限，探索在其他環境發展的可能性，甚至未來或許能結合於廚餘廢液的處理系統中，減少廚餘廢液的處理費用。在未來的規劃上，我們建議能先將三至六齡的黑水蛇放置在廚餘濾液中進行分離，會下沉的黑水蛇身體脂肪含量較高，可另外篩選出去製作其他用途（如製成日料或繼續解決其他腐質廚餘），會漂浮的黑水蛇則繼續留置在廚餘廢液中與微生物進行蛋白質的分解，目前的實驗結果以分光光度計確實能觀察到蛋白質被分解的濃度變化，最後經黑水蛇處理的廚餘廢液可再分析、確認成分後進一步用於植物灌溉與施肥之應用。而在後

續的研究能精進之處則包含：更精準檢測黑水虻幼蟲在陸地、水中最佳生存的環境指標，並將各實驗的幼蟲樣本數增加至 200~300 隻以減少實驗誤差，也更深入探討在潮濕環境中進食會影響的其他變因。

## 捌、參考文獻資料

- Beniers, J. (2021). Enzyme localization in the digestive tract of black soldier fly larvae, by freeze-substitution and glycol methacrylate inclusion.
- Bruno, D., Bonacci, T., Reguzzoni, M., Casartelli, M., Grimaldi, A., Tettamanti, G., & Brandmayr, P. (2020). An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*. Arthropod structure & development, 58, 100969.
- Oliveira, F., Doelle, K., List, R., & O’ Reilly, J. R. (2015). Assessment of Diptera: Stratiomyidae, genus *Hermetia illucens* (L., 1758) using electron microscopy. J. Entomol. Zool. Stud, 3(5), 147-152.
- Pang, W., Hou, D., Chen, J., Nowar, E. E., Li, Z., Hu, R., ... & Wang, S. (2020). Reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon and nitrogen conversion in food wastes by the black soldier fly. Journal of environmental management, 260, 110066.
- 林玄晶、潘盈郁（2019）。虻飛鳳舞-發「糞」向上。中華民國第 59 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 魏弘彥等人（2020）。黑金再現—黑水虻的行為探討。中華民國第 60 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 段紀義、梁世祥、周瑞興（2022）。食品廢棄物應用黑水虻處理的效益評估。工業污染防治刊物，155，37-58 頁。
- 賴郁薇。上下游（2017）。零廢棄物大突破！黑水虻分解動物糞便，又可當蛋白質飼料。
- 嘉義縣政府新聞行銷處（2018，9 月 14 日）。嘉義縣首創全國全面推動黑水虻飼養解決廚餘和農業廢棄物清理問題。
- 水的真相：TDS 與水質有何關聯？專家為你解釋水質 ppm 與飲用水的重要性！
- 澎湖監獄黑水虻對廚餘處理之碳排放量研究. 2023. PhD Thesis.
- 莊榮輝（2005）。酵素化學實驗。
- 顧展瓏、賴振元、黃心亮（2025）。黑水虻廚餘廠開工！讓廚餘變資源、走向綠色循環【獨立特派員】。

## 玖、附錄

### 附錄一：總氮量測試劑

#### 一、測試方法

1. 使用前請先清洗測試量筒，確保量筒不受上一次測試之殘留物所污染。清洗完畢後，請裝入 5ml 試水。
2. 加入 1 號試劑 5 滴並搖勻。
3. 加入 2 號試劑 5 滴並搖勻，此時會產生淡粉紅色之呈色反應。若測試海水時，可能會產生渾濁的現象，但不影響測試結果。
4. 加入 3 號試劑 5 滴並搖勻，此時粉紅色會變得更深。
5. 加入 4 號粉劑 1 小匙，輕搖使其完全溶解，然後靜置約 30~40 分鐘，再從上方或側面觀察其呈色，並與色標（圖 28)比對讀取數值。

附件：各溫度及 pH 之下氨 ( $\text{NH}_3$ ) 占總氮量之百分比對照表

pH	溫度°C								
	16	18	20	22	24	26	28	30	32
7.0	0.29	0.34	0.39	0.46	0.52	0.60	0.69	0.80	0.91
7.2	0.46	0.54	0.63	0.72	0.83	0.96	1.10	1.26	1.44
7.4	0.73	0.85	0.98	1.14	1.31	1.50	1.73	1.98	2.26
7.6	1.16	1.34	1.56	1.79	2.06	2.36	2.71	3.10	3.53
7.8	8.68	2.11	2.44	2.81	3.22	3.70	4.23	4.82	5.48
8.0	1.82	3.30	3.81	4.38	5.02	5.74	6.54	7.43	8.42
8.2	2.86	5.14	5.90	6.76	7.72	8.80	9.98	11.29	12.72
8.4	4.45	7.90	9.04	10.31	11.71	13.26	14.95	16.78	18.77

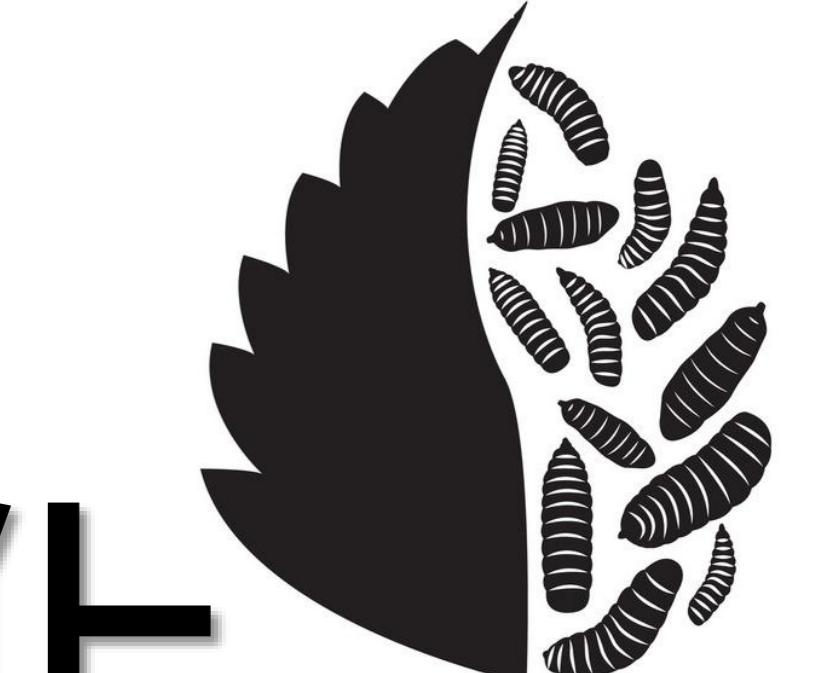
## 【評語】030310

1. 此研究跳脫既有黑水虻處理固態廚餘的框架，嘗試探討其水中適應與資源化利用，具先期探索與應用潛力，且提出分齡分用途飼育構想，符合循環經濟理念。
2. 本研究多數實驗係以自來水或豆渣水作為模擬，未來若能導入真實廚餘濾液進行驗證，將更具應用價值並提升研究的實用性與說服力。
3. 本研究已具平均與標準差等基礎統計處理，惟關鍵數據如擺動頻率與排氣量，建議加入顯著性檢定以強化說服力。行為觀察多依賴人工紀錄，若結合影像分析系統可提升精度並減與減少人為偏差。未來應擴充樣本數並強化統計分析，以提升研究可信度。
4. 研究中有許多數據仍有待進一步釐清，也有部分理論尚未有充分的證據支持。建議引用更多相關文獻，提供更充分的理論支持，增加研究的可信度。
5. 其中一個實驗非常有趣，就是進行黑水虻對於豆渣自然發酵之減緩碳排效果之比較，雖然所得成果可預期，但結合碳排是個不錯的發想方向。

作品海報



# 黑水虻在水中的適應及 廚餘濾液處理應用模式之優化



Adaptation of black soldier flies in water and optimization of application mode of food waste filtrate treatment

圖片來源:Shutterstock

# 摘要

本研究探討黑水蛇三至六齡幼蟲在水中的適應情形。經解剖發現可浮性黑水蛇幼蟲因具有較高密度的微氣管分支更能適應水中生活但脂肪分布較少，五到六齡幼蟲在水中一周存活率平均為81.2%，其水中排氮含量達0.1mg/5ml。在水中的運動表現較低，餵食熟地瓜葉比生地瓜葉增重90%。以黑水蛇處理豆渣水可減少35.6%的二氧化碳排放量及減少豆渣濾液蛋白質含量66.67%，黑水蛇幼蟲增加25%蛋白質含量。

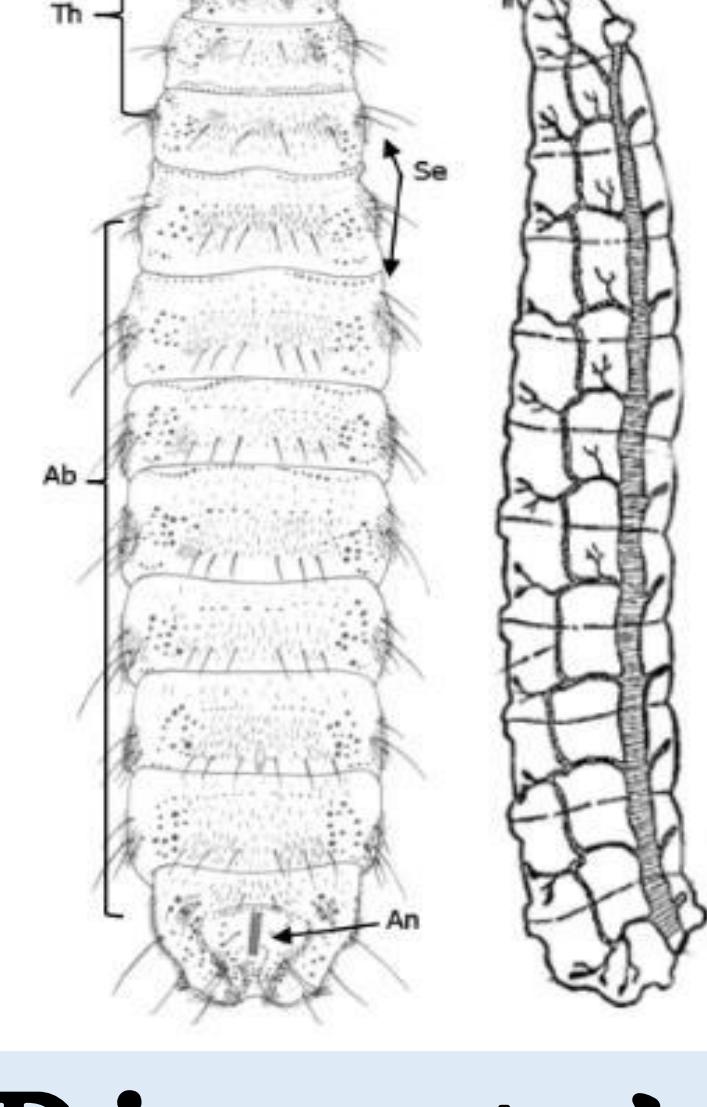
## 研究動機

黑水蛇效率優良更不會對人類生活環境造成疾病傳染，新竹縣雖在黑水蛇處理乾廚餘具有其成效但卻指出廚餘濾液得再送往其他再利用機構進行厭氧發酵，會額外增加約1000萬元的處理支出（顧展瓏、賴振元、黃心亮，2025）。故**廚餘多元處理之推動是本研究的主要動機，想進一步研究黑水蛇在廚餘濾液運用的可能性**，以豆渣發酵後模擬廚餘濾液的環境，觀察黑水蛇幼蟲在濾液中適應機制，及在如此惡劣的環境中其蛋白質含量的變化。

## 研究目的與架構

- (一) 探討黑水蛇幼蟲在水中可否生存及漂浮原因
- (二) 探討黑水蛇幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉與體重變化量
- (三) 黑水蛇幼蟲在水中和陸地的移動方式
- (四) 黑水蛇幼蟲在水中的排氮量，與可耐受的酸鹼值
- (五) 黑水蛇幼蟲對自然發酵豆渣的減碳效果探討
- (六) 黑水蛇幼蟲對豆渣水處理的效果探討

## 黑水蛇介紹

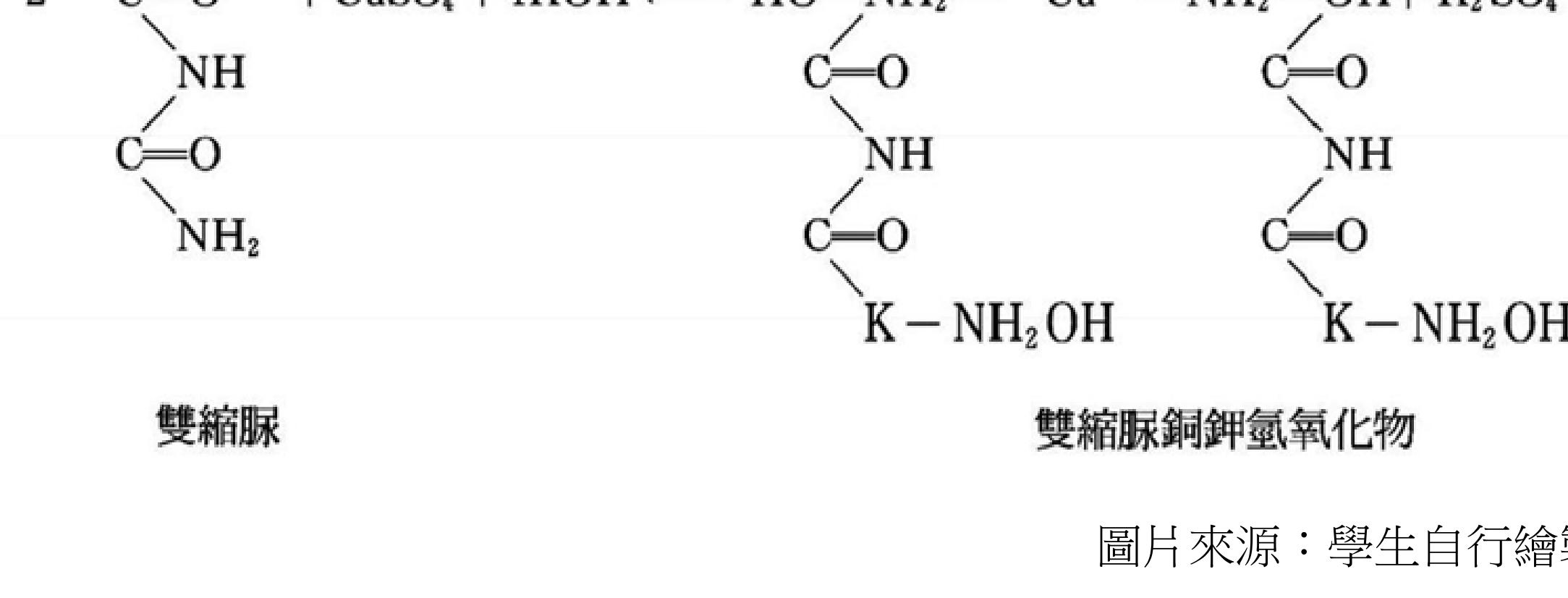


1. 幼蟲以動物糞便、植物殘骸等腐爛有機物等腐植質為食。
2. 為完全變態昆蟲，幼蟲又可細分為六齡，齡期間以脫皮劃分。
3. 六齡幼蟲體色開始變黑，進入預蛹期。
4. 適宜生長的環境：溫度在 26~30 度，基質溼度 65~75%，酸鹼度在 pH 6~7。

幼蟲胸腔上覆蓋著纖毛，腹部為板狀構造，呈矩形，外部覆蓋著剛毛協助擺動。幼蟲具備兩個主要氣孔(Sp)，分別位在第一胸節與第八腹節，這兩氣孔與較大的氣管系統相連，而第一至七體節側也有小氣孔與較小的氣管系統連接進行氣體交換。幼蟲的內角質層較大、柔軟且靈活，在幼蟲生長的過程中能擴張更多。

圖片來源：Beniers, J. (2021). Enzyme localization in the digestive tract of black soldier fly larvae, by freeze-substitution and glycol methacrylate inclusion.

## Biuret生態蛋白質測定



含有兩個以上勝肽鍵化合物與硫酸銅鹼性溶液會產生雙縮脲反應產生紅色物質於 540nm，因原藥劑藍色，故混合成紫色物質。銅離子在鹼性溶液中會與蛋白質勝鏈上的 carbonyl 基結合，生成紫色的複合物，於 540nm 檢測其吸光。

- (1) 蛋白質檢量線製作
  - a. 依圖等比例稀釋蛋清液各取 1mL 加入 Biuret 試劑 3mL
  - b. 震盪混合後，室溫下靜置
  - c. 設定蛋白質吸收值 540nm 並以分光光度計檢測
  - d. 帶入標準曲線換算蛋白質含量
- (2) 待測樣本的製備
  - a. 黑水蛇幼蟲
    - (a) 將 0.3g 幼蟲與 2.7g 生理食鹽水混合，稀釋 100 倍
    - (b) 取 1mL 樣本液加入 Biuret 試劑 3mL
  - b. 豆渣濾液樣本的製備
    - (a) 將 1mL 豆渣水與 1mL 生理食鹽水混合
    - (b) 取 1mL 樣本液加入 Biuret 試劑 3mL

## 實驗結果

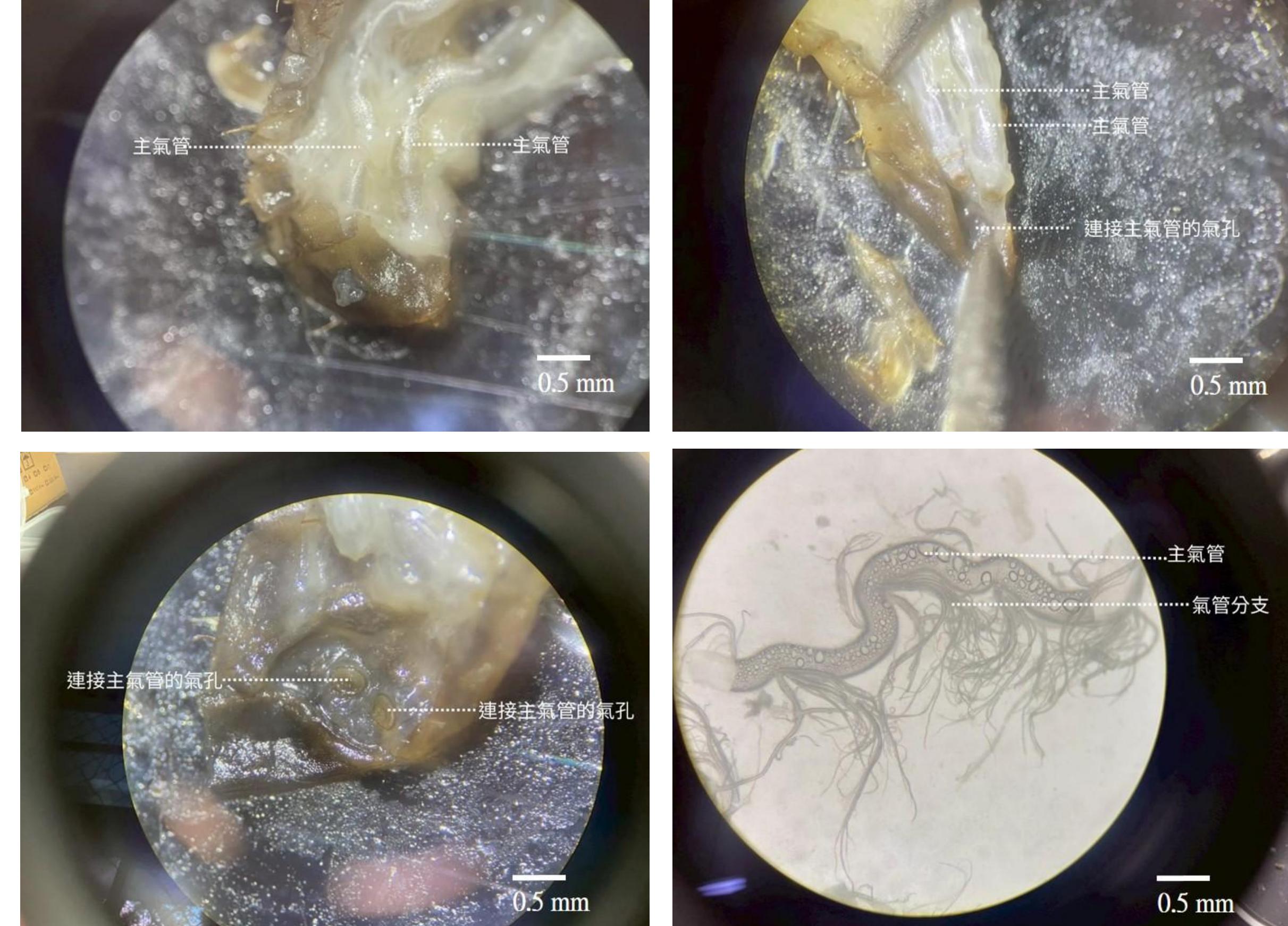
### (一) 探討黑水蛇幼蟲在水中可否生存及漂浮原因探討

(n=25) 黑水蛇幼蟲存活數量 (隻)

第一次實驗	21.0
第二次實驗	15.0
第三次實驗	25.0
平均值	20.3
標準差	5.03

實驗所用的幼蟲數量都為 25 隻，水體為自來水。

從結果可知黑水蛇在水中可生存，生存率為 81.2%。

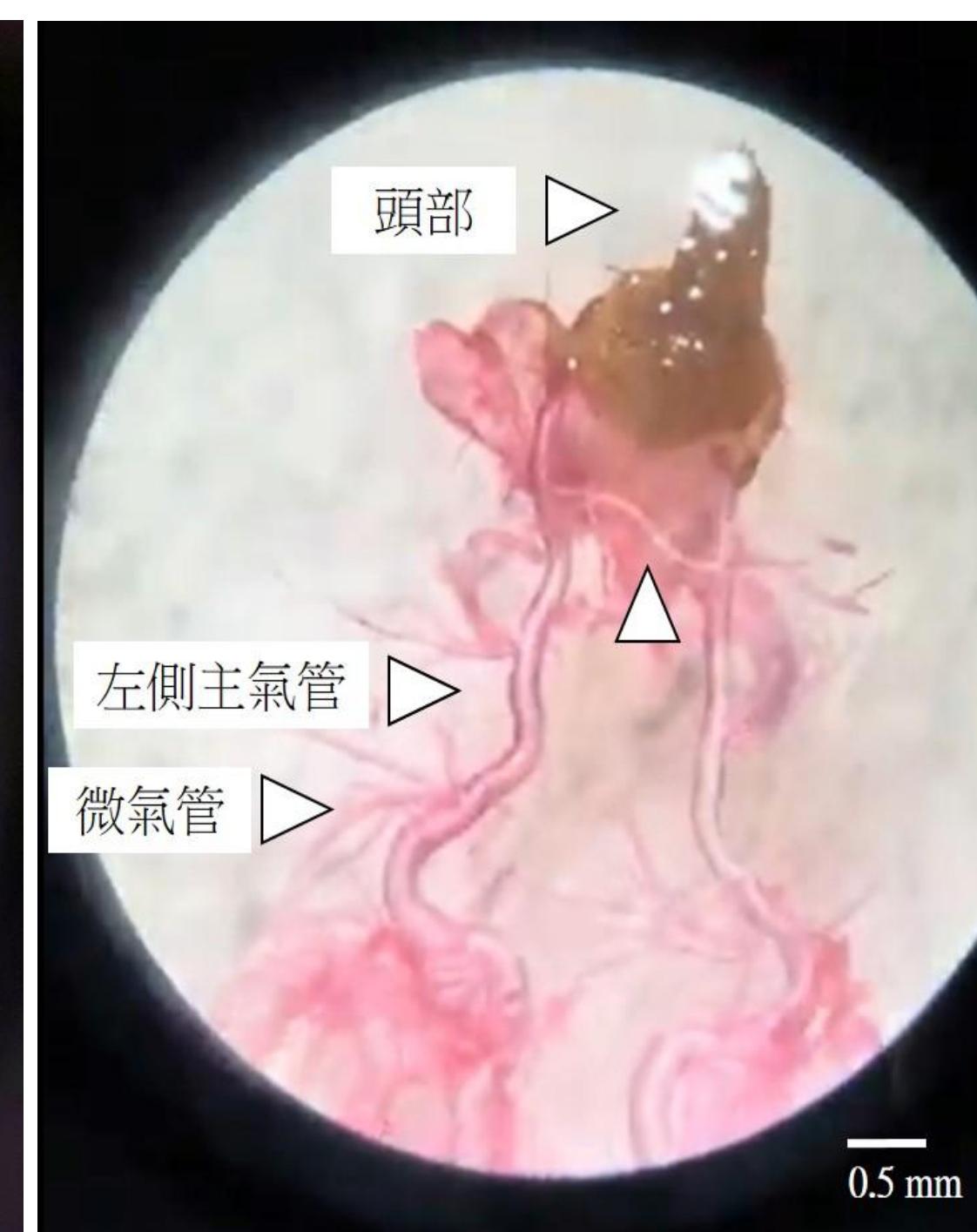
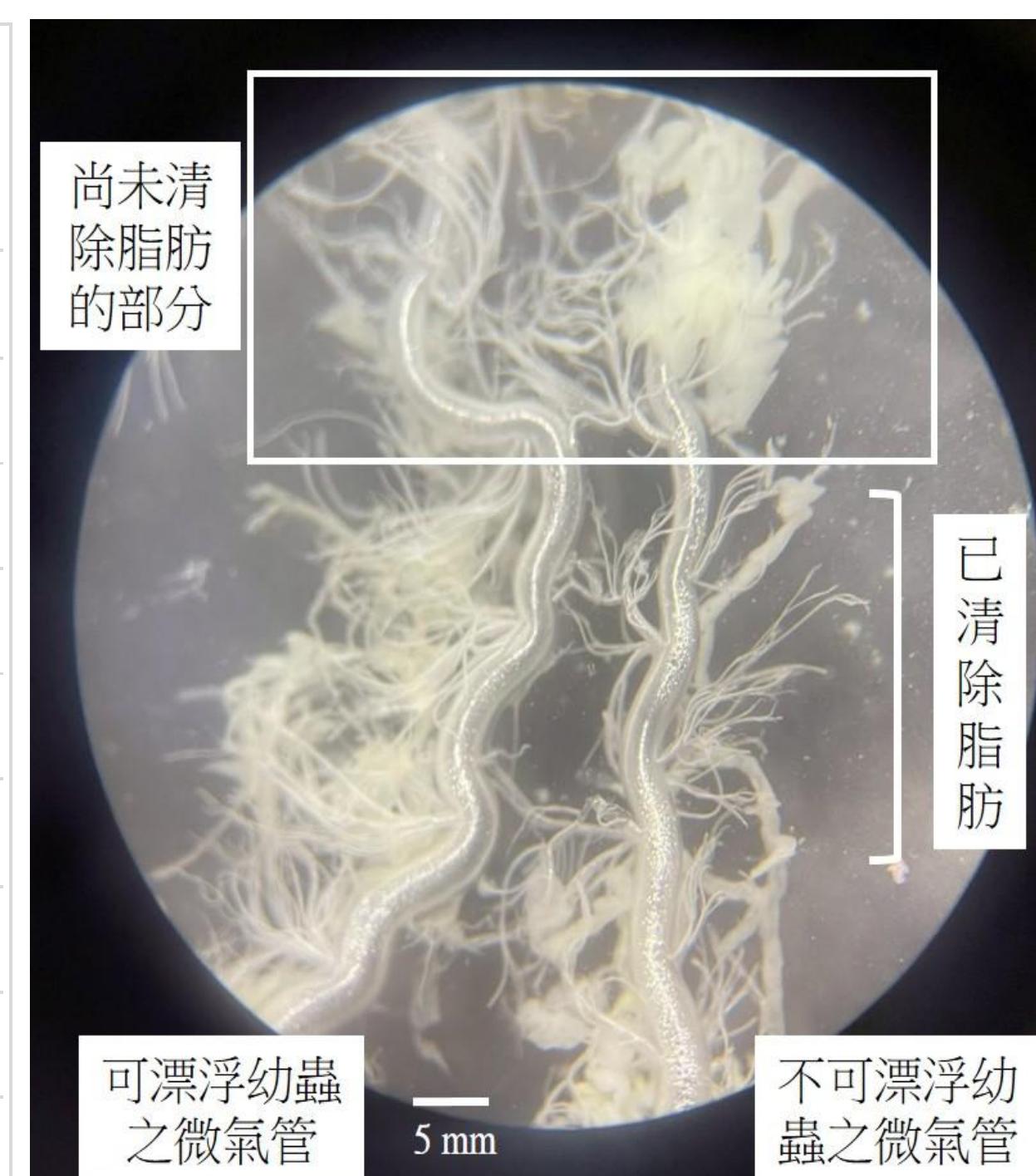
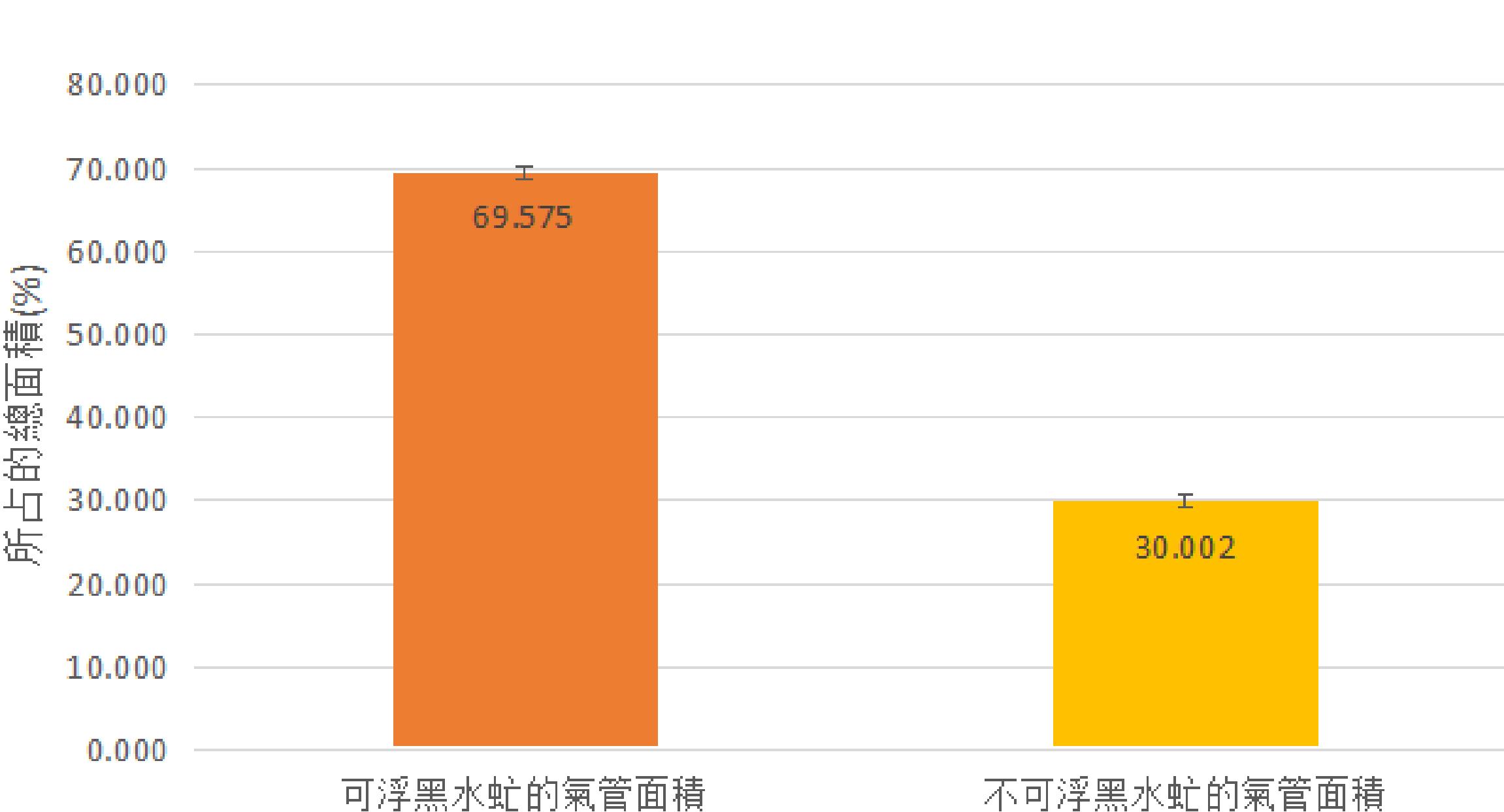


# 實驗結果

## (一) 探討黑水蛇幼蟲在水中可否生存及漂浮原因探討

圖片來源：學生自行拍攝與繪製。

可浮與不可浮黑水蛇氣管面積所占總面積比較



測量3至6齡的幼蟲密度皆約為0.86(g/ml)，小於水的密度。可漂浮幼蟲的微氣管分支較多，不可漂浮的脂肪較多，篩選確認可浮性幼蟲氣管系面積較不漂浮要重高出約40%。

### (n=25) 黑水蛇幼蟲在陸地及水面上的生存對比

	生存率 (%)	一個月後化蛹的幼蟲數
陸地	100.0	22.0
水中	81.2	1.3

三次實驗所使用的幼蟲數量都為25隻，水中實驗用水體為自來水。實驗結果可得知黑水蛇在水中生存率雖然低於陸地，但幼蟲至化蛹的齡期時間更長。

### 含排泄物的水的酸鹼值變化 (n=25)

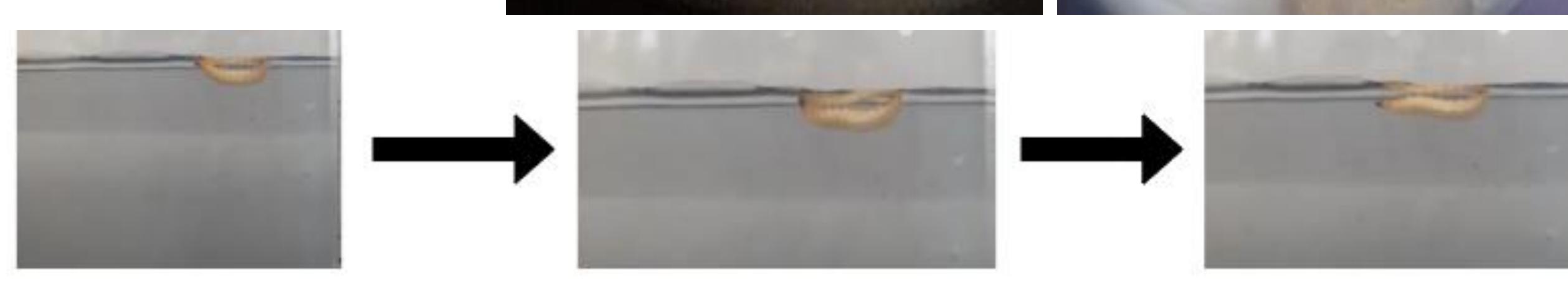
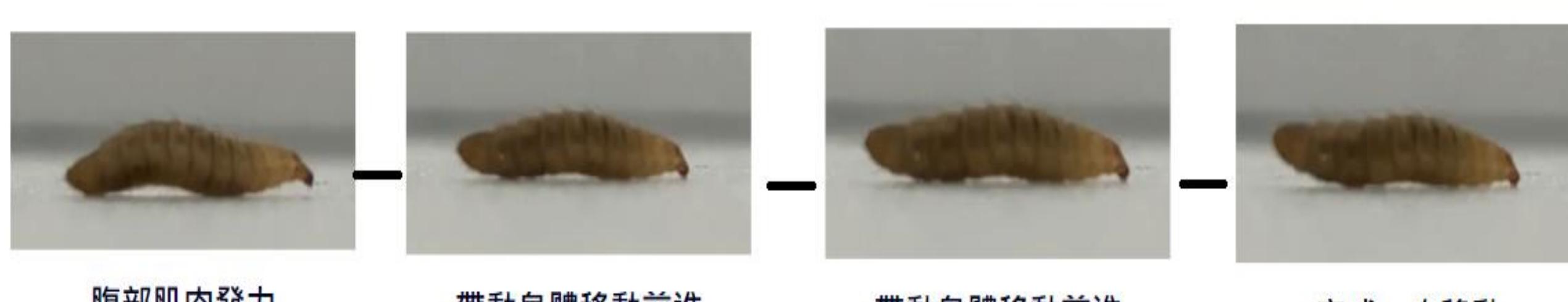
	放置前	放置後	變化
第一次實驗	7.00	7.40	0.40
第二次實驗	7.00	7.20	0.20
第三次實驗	7.00	7.20	0.20
平均	7.00	7.27	0.27

## (二) 黑水蛇幼蟲在水中和陸地的移動方式

圖片來源：學生自行拍攝與繪製。

黑水蛇幼蟲在陸地及水面上的擺動方式比較

	上下擺動幅度 (cm)	上下擺動頻率 (次/秒)	擺動角度 (度)	運動構造、功能
陸地	0.15	0.63	左右160 前後170	腹部肌肉帶動身體運動，剛毛協助增加摩擦力。
水中	0.43	0.26	因水中無施力點 擺動角度不明顯	腹部肌肉帶動身體扭動前行，剛毛協助維持平衡。



腹部肌肉發力

帶動身體移動前進

帶動身體移動前進

完成一次移動

腹部肌肉收縮

帶動身體前進

完成一次移動

## (三) 探討黑水蛇幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉與體重變化量

### (n=75) 攝食生、熟地瓜葉幼蟲的體重變化量 (gw)

	生地瓜葉	熟地瓜葉
體重變化量	0.40	3.10
體重增加率	13%	103%

皆放3g（約75隻）黑水蛇與25g地瓜葉，可觀察到黑水蛇對於蒸熟的地瓜葉處理效率遠比生地瓜葉較高，整體體重增長的量約7.75倍。會有此現象推測是黑水蛇本身的口器較擅長處理腐質性的食物，因此攝食多、體重增長也明顯。

## (四) 黑水蛇幼蟲在水中的排氮量，與可耐受的酸鹼值

### pH值3~8黑水蛇幼蟲存活數量 (n=10)

	pH3	pH6	pH8
存活數(隻)	7	9	8
存活率(%)	70%	90%	80%

實驗中發現25隻黑水蛇在水中的排泄的確能以氨檢測出來，經計算，一周排氮量至少為0.09mg/5ml，量稀少不使黑水蛇致死。

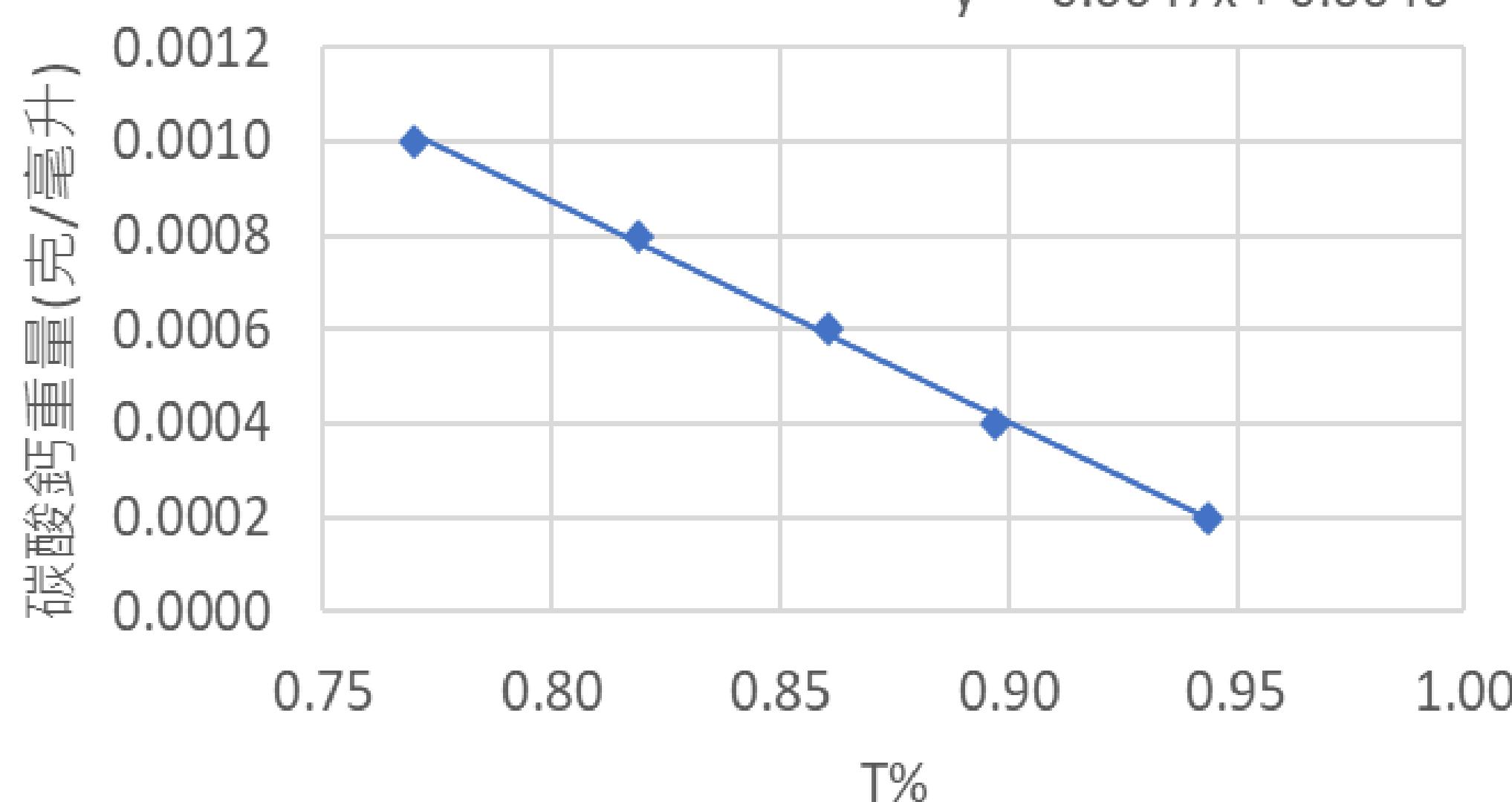
(n=25)	含排泄物水的氨含量 (mg)	含排泄物水的氨濃度 (ppm)	含排泄物水 pH值
第一次實驗	0.11250	7.50	7.40
第二次實驗	0.9000	6.30	7.20
第三次實驗	0.09825	6.55	7.20
平均值	0.10022	6.78	7.27
標準差	0.00925	0.52	0.1155

## (五) 密閉環境下黑水蛇幼蟲在水中對發酵豆渣的減緩碳排放效果

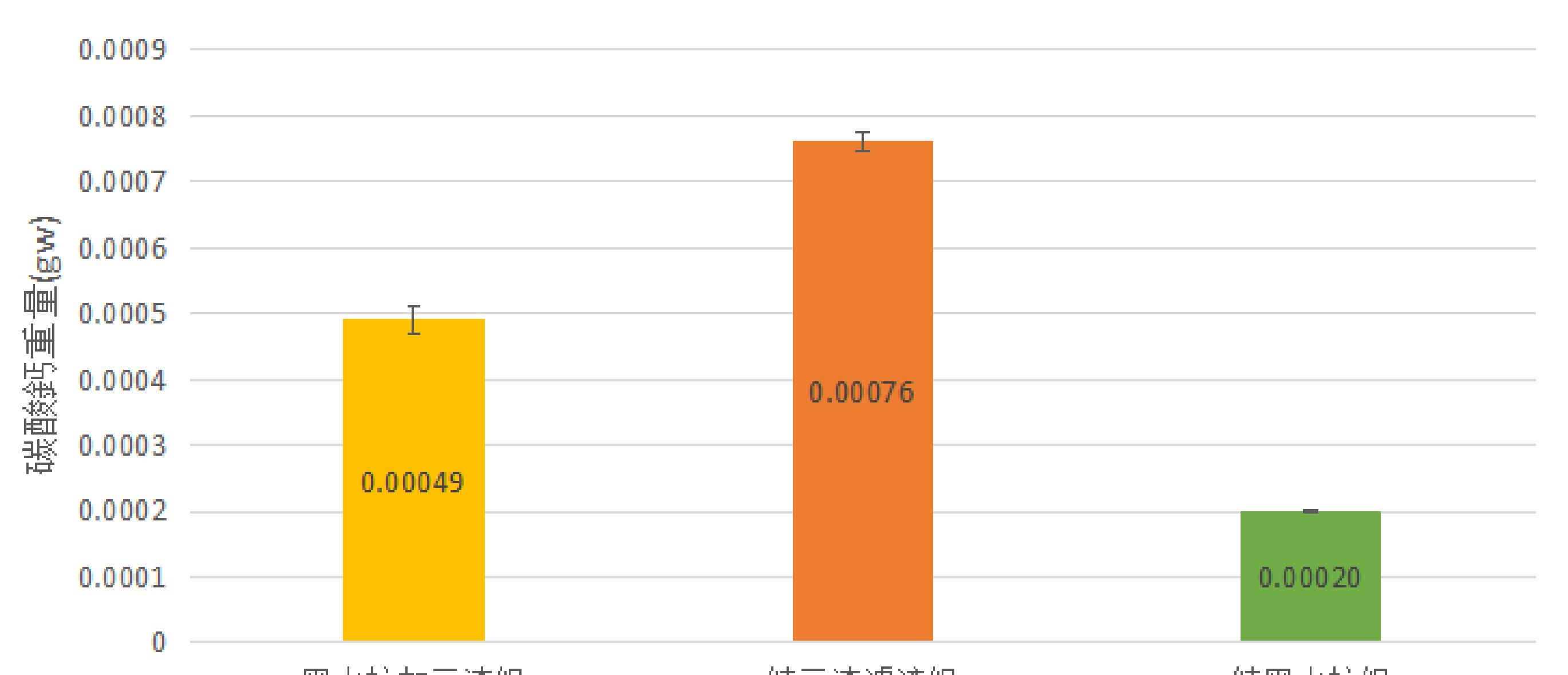
圖片來源：學生自行繪製。

碳酸鈣檢量線

$$y = -0.0047x + 0.0046$$



黑水蛇對豆渣自然發酵的減緩碳排放效果各組之對比



以碳酸鈣標準減量線換算出三組的碳酸鈣含量，並以純豆渣濾液組產生的總二氧化碳含量為基準值(100%)，黑水蛇加豆渣組為純豆渣濾液組的64.28%、純黑水蛇組為純豆渣濾液組的25.92%，在黑水蛇加豆渣組和純豆渣濾液組的比較下，若使用黑水蛇來處理發酵豆渣濾液可減少約36%二氧化碳生成。

# 實驗結果

## (六) 密閉環境下黑水蛇幼蟲對豆渣水處理的效果探討

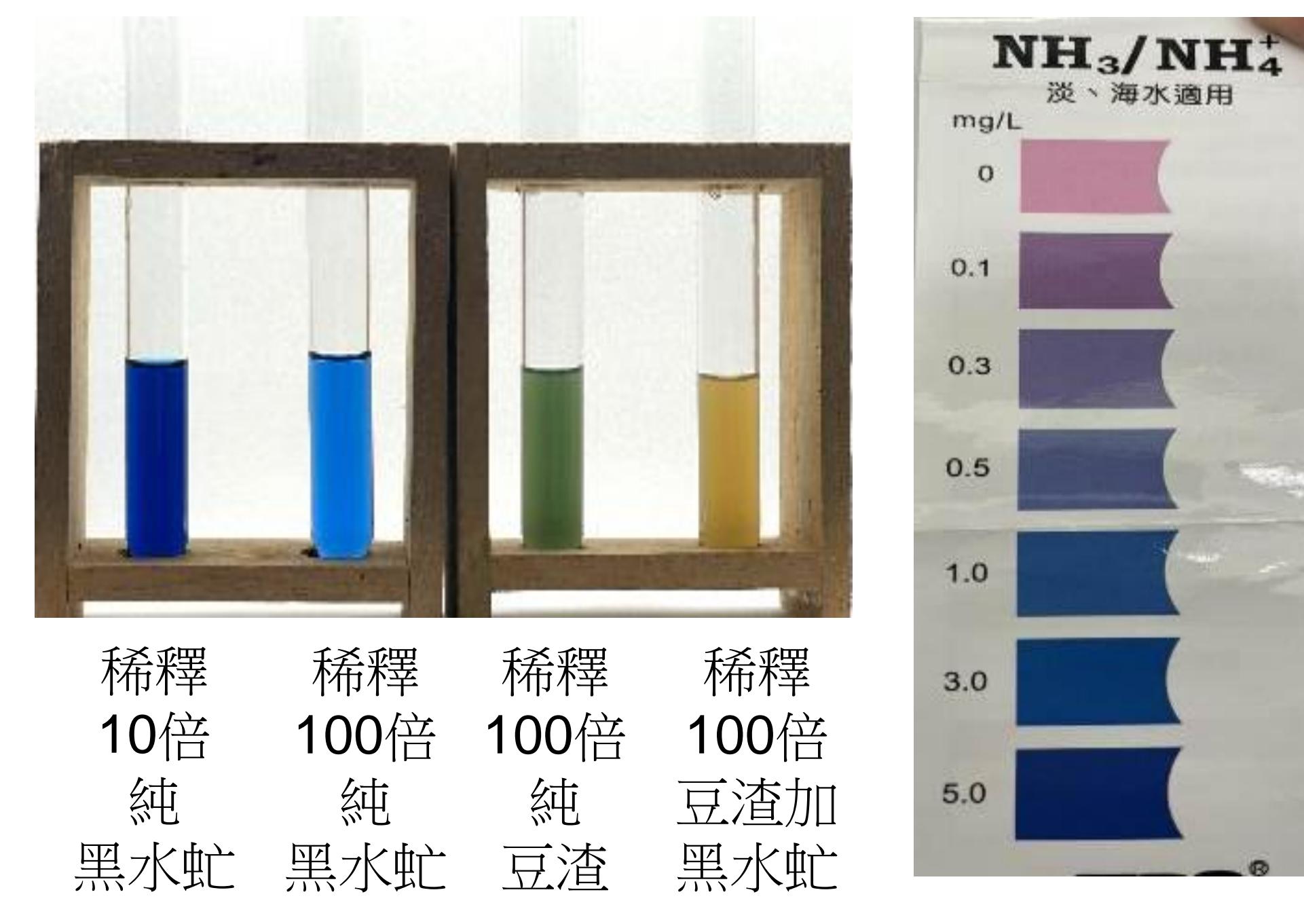
圖片來源：學生自行拍攝與繪製。

(n=75)	豆渣加水pH值	豆渣+幼蟲+水pH值	幼蟲加水pH值
平均值	4.5	4.6	6.6

(n=75)	黑水蛇+水(g/ml)	豆渣+水+黑水蛇(g/ml)
放置前	0.0016	0.0016
放置一周後	0.0013	0.002
蛋白質含量變化率	-18.75%	25%

(n=75)	豆渣加水(g/ml)	豆渣+水+黑水蛇(g/ml)
放置前	0.0012	0.0012
放置一周後	0.001	0.0004
蛋白質含量變化率	-16.67%	-66.67%

蟲加水	豆渣加水	豆渣加蟲加水
氨含量 0.1mg/L	<0.1mg/L	<豆渣加水



幼蟲放置在豆渣與水的混和液中，是能將豆渣的蛋白質分解吸收後提升自身蛋白質，而氨含量的降低證明黑水蛇的加入在控制好環境pH值後可加速NH4+往NH3-的轉換，另外產生的水則會提升pH值。

## 討論

### 一、黑水蛇幼蟲在水中可否生存及漂浮原因

黑水蛇能在水中存活一段時間，可浮幼蟲的微氣管分支較多，不可浮幼蟲的脂肪較多，且不論齡期的幼蟲比重皆約為0.86(g/ml)。實驗中有出現黑水蛇死亡的現象，但死亡的幼蟲約七成是已經化蛹的，查詢文獻後發現黑水蛇在預蛹期時會去乾燥的地方化蛹。

### 二、探討黑水蛇幼蟲在水中攝食生、熟地瓜葉的體重變化量

過去研究多以糖類等物質作為黑水蛇的食物來源（林玄晶、潘盈郁，2019），本實驗從糖類食物發想選擇泡在水中能觀察完整構造的地瓜葉做為實驗材料。因黑水蛇本身為腐質食物為主，故實驗設計中以生、熟地瓜葉做為對照，驗證黑水蛇在熟地瓜葉組別中因進食而有明顯的體重增長。

### 三、黑水蛇幼蟲在水中和陸地的移動方式

過去的文獻中提及，黑水蛇體表具有纖毛、剛毛等構造，剛毛與纖毛能協助幼蟲進行爬行，黑水蛇體內以第一、八節具備大氣孔進行氣體交換(Benier, 2021)。而我們將黑水蛇幼蟲放置在水中，實驗結果中發現幼蟲在水中的擺動方式與陸地有差異。

### 四、探討黑水蛇在水中的排氮量，與可耐受的酸鹼值

實驗結果中將25隻黑水蛇放置水中一周，發現三次實驗的酸鹼值皆變的更鹼，推測是因幼蟲的排泄物所致，使用試劑測量樣本中的氨濃度變化，結果發現氨濃度平均上升0.1ppm。幼蟲在pH6的環境生存率最高，生存率最低為pH=3的環境。

### 五、黑水蛇幼蟲對自然發酵豆渣的減碳效果探討

在三組實驗中，黑水蛇、豆渣重量都一致，以純黑水蛇製造出來的二氧化碳含量最多，最少是純豆渣，符合發酵作用與呼吸作用的化學反應式。另觀察到，在豆渣與黑水蛇一起放置的組別中二氧化碳幾乎是減少一半的量，得知黑水蛇在處理發酵食物時的減碳效果顯著。

### 六、黑水蛇幼蟲對豆渣水處理的效果探討

實驗中發現豆渣加水因發酵產生有機酸會導致pH值約4.5，若再放黑水蛇進去不影響太多pH值的改變幅度，若將黑水蛇幼蟲放置在豆渣與水的混和液中，能將豆渣的蛋白質分解吸收後提升自身蛋白質，但其中也有微生物在進行作用，因此蛋白質的轉換並非全然的百分百。

## 結論

1. **黑水蛇可在水中生存**：黑水蛇幼蟲在水中一周的存活率為81.2%，五至六齡延長的生存時間少至一周，多至一個月。三至六齡的可浮與不可浮幼蟲的身體密度皆為0.86(g/ml)。可浮幼蟲因具有較高密度的微氣管分支更能適應水中生活但脂肪分布較少。

2. **黑水蛇可在水中攝食**：幼蟲對於蒸熟的地瓜葉處理效率遠比生地瓜葉較高，整體體重增長的量約7.75倍。

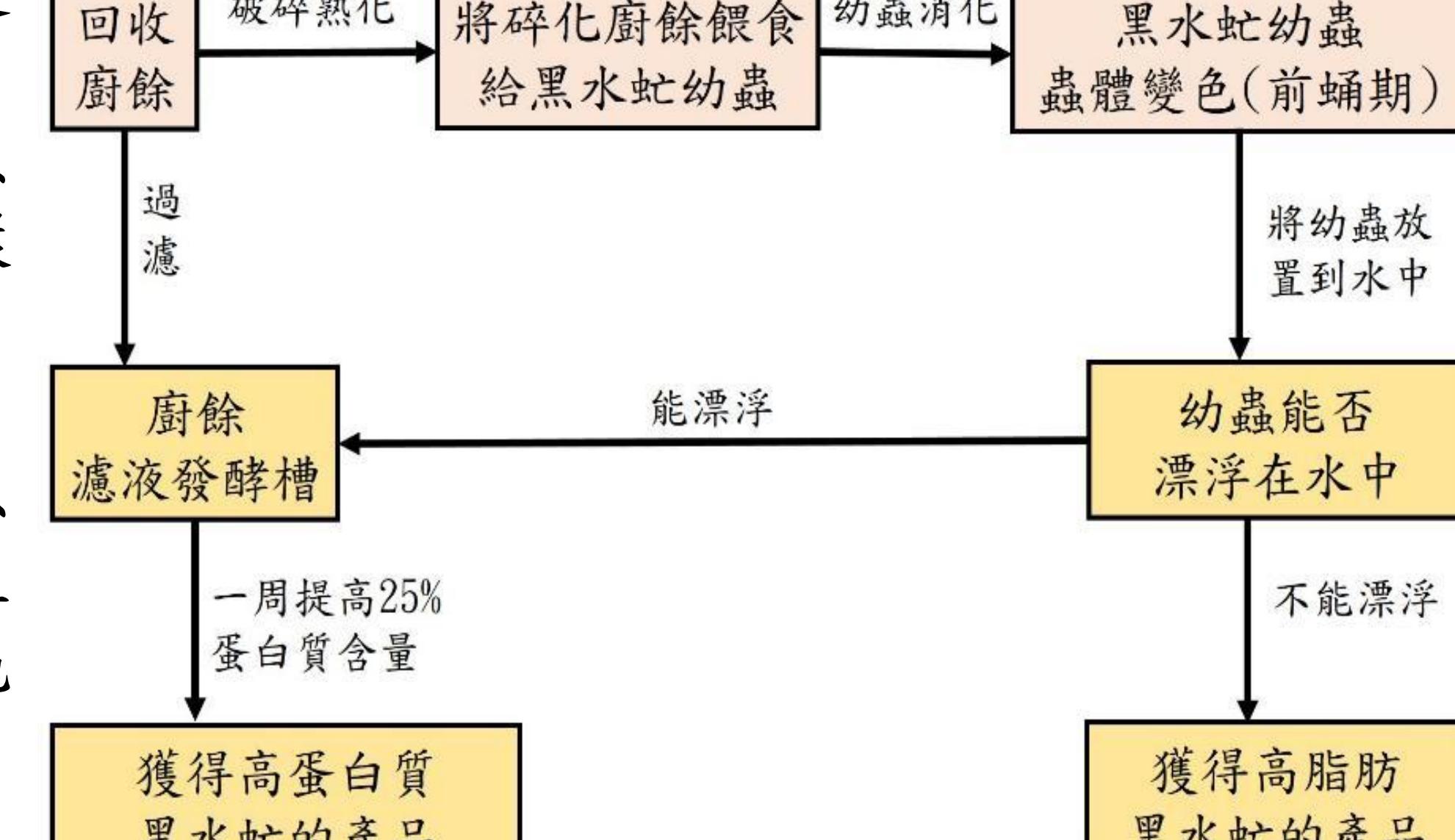
3. **黑水蛇在陸地與水中擺動的方式差異包含擺動上下幅度、擺動的頻率次數**：陸地上移動主要以波狀進行移動，頭部進行探索後作為臨時支點固定，腹部肌肉發力推動身體前進，在水中的移動蛇則是傾向以腹部尾端固定在水面上，頭部探索後收縮再推擠身體往前。

4. **黑水蛇一周後在水中的排泄物使水體pH平均從7變化為7.27**：若黑水蛇並不會因為排泄物的因素影響生存，那在更為嚴苛的酸鹼值環境中會有如何的耐受性，根據結果發現幼蟲在pH6的環境生存率最高，生存率最低為pH=3的環境。

5. **使用黑水蛇來處理發酵豆渣濾液可以減少約36%二氧化碳生成**：以碳酸鈣標準減量線算出碳酸鈣含量並推測總二氧化碳含量。以純豆渣濾液組為基準值，黑水蛇加豆渣組為純豆渣濾液組的64.28%、純黑水蛇組為純豆渣濾液組的25.92%。

6. **黑水蛇處理豆渣水會減少豆渣濾液蛋白質含量66.67%，幼蟲則增加25%蛋白質含量**：將幼蟲放置水中一周後整體蛋白質含量減少18.75%，豆渣與水的混合液一周後蛋白質含量減少16.67%。

7. **預期結果**：優化豆渣濾液處理應用模式如下圖，篩選五到六齡可浮性幼蟲投入廚餘濾液發酵槽中二次飼育，未來可製成高蛋白質的黑水蛇產品；不可浮幼蟲則另外製成高脂肪比的黑水蛇產品，最後經黑水蛇處理的廚餘廢液進一步轉化為酵素液進行各類應用，推動環保及循環經濟之宗旨。



圖片來源：學生自行繪製。

## 參考文獻

一、Beniers, J. (2021). Enzyme localization in the digestive tract of black soldier fly larvae, by freeze-substitution and glycol methacrylate inclusion.

二、Bruno, D., Bonacci, T., Reguzzoni, M., Casartelli, M., Grimaldi, A., Tettamanti, G., & Brandmayr, P. (2020). An in-depth description of head morphology and mouthparts in larvae of the black soldier fly *Hermetia illucens*. Arthropod structure & development, 58, 100969.

三、Oliveira, F., Doege, K., List, R., & O'Reilly, J. R. (2015). Assessment of Diptera: Stratiomyidae, genus *Hermetia* illucens (L., 1758) using electron microscopy. J. Entomol. Zool. Stud, 3(5), 147-152.