

屏東縣第 66 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別： 生物科

組 別： 國中組

作品名稱： 探討食物濕度對黑水虻生長之影響

關 鍵 詞： 黑水虻幼蟲、濕度、生物轉換率

編 號： B4011

摘要

本研究以麵包為基質，分析五種水分梯度（0%–80%）對黑水虻幼蟲生長及化蛹之影響。研究發現，水分含量與幼蟲生長表現呈明顯相關。低含水率（ $\leq 40\%$ ）環境下幼蟲因脫水壓力與酶活性受限，生長趨於停滯；高含水率（60%–80%）則具優異轉化效能。數據指出，80%含水率雖能縮短化蛹前置時間，但60%組別在生物轉化率（BCR）與群體發育穩定性上更具優勢。綜合分析，60%–80%為黑水虻處理澱粉類廚餘之最佳水分值，本研究結果可作為後續大規模生物去化技術之參數參考。

壹、前言

一、研究動機

在現代都市廢棄物管理中，澱粉類廚餘（如過期麵包、烘焙殘渣）佔據了顯著比例。這類物質雖然具備高能量密度，但其物理特性如高度吸水性與結構緊密性，使得傳統的堆肥處理面臨效率低下的挑戰。黑水虻（*Hermetia illucens*）作為自然界的「分解者」，其幼蟲具備極強的有機物轉化能力，能將碳水化合物轉化為高價值的昆蟲蛋白與油脂。

然而，黑水虻幼蟲在攝食澱粉類物質時，其進食效率受到基質含水量的強烈影響。文獻指出，黑水虻幼蟲的中腸分泌多種澱粉酶（Amylase），但酶促反應必須在水溶液態下才能將複雜的澱粉分子水解為可吸收的還原糖。麵包類廚餘若過於乾燥，不僅幼蟲難以抓取攝食，更會阻礙消化過程的啟動。反之，若水分過多，則可能造成基質缺氧，導致有害細菌滋生，產生異味並降低存活率。因此，找出處理麵包類基質的最佳水分比例，是實現高效生物循環經濟的重要基礎。本研究期望透過嚴謹的數據監測，建立澱粉轉化與水分之間的量化模型，提供教育與實務界科學的參考依據。

二、研究目的

本研究計畫之具體目標包含：

- (一) 量化分析不同含水率對黑水虻幼蟲生物量（Biomass）增長速率的影響，並釐清水分不足導致的發育門檻。
- (二) 計算黑水虻處理麵包廚餘之生物質量轉化率（BCR），評估資源循環效能。

(三)追蹤高含水率環境（60% – 80%）下幼蟲進入化蛹階段的動態特徵，分析結蛹高峰與水分之因果關係。

(四)探討環境突發因子（如動物侵擾）對實驗穩定性的影響，並針對 D、E 兩組的長期穩定發育進行深入比較。

三、文獻探究

（一）黑水虻幼蟲的消化工廠：澱粉酶與水分的關係

黑水虻幼蟲的肚子分為前、中、後腸。其中，「中腸」是主要的消化與吸收工廠。當幼蟲吃到麵包時，中腸會分泌一種「澱粉酶」，它的作用就像是一把「化學剪刀」，專門把大分子的澱粉剪成一塊塊小小的麥芽糖，這樣腸壁細胞才能吸收。

文獻指出，這把「化學剪刀」需要水分作為移動的介質。在含水率高（60%-80%）的環境下，水分就像是「水滑梯」，讓澱粉酶能輕易地滑到澱粉表面進行切割。反之，在乾燥的麵包中，澱粉酶會被困住動彈不得，幼蟲即便吃了麵包也消化不了，甚至會因為身體水分被乾燥基質吸乾（滲透壓影響）而死亡。

因此，水分不只是用來喝的，更是啟動「消化剪刀」的關鍵開關。實驗中應特別觀察60%以上濕度組別的生長斜率。

（二）含水率的「黃金區間」與生存壓力

黑水虻生長有一個「黃金含水率」，大約在 60%到 80%之間。太乾（低於 45%），環境壓力會變大，水分會從幼蟲體內被吸走（滲透壓升高），幼蟲就像走在沙漠中，移動困難，長得也慢。太濕（高於 85%），麵包中間的縫隙會被填滿水，導致空氣進不去（孔隙度降低），幼蟲會因為缺氧而感到不舒服。

為了讓幼蟲長得又快又好，必須將濕度控制在 60%-80%，這也是本研究設計梯度的重要依據。

（三）麵包基質的營養轉換特性

麵包的主要成分是碳水化合物（澱粉），跟一般的豬糞、雞糞相比，蛋白質含量比較少。黑水虻有一個特點，當它吃到很多澱粉（碳源）但蛋白質（氮源）較少時，它會把多餘的能量轉換成「脂肪」存起來。這就是為什麼吃麵包長大的黑水虻通常會變得「肥滋滋」

的，油脂含量很高。

麵包裡的「麵筋（麩質蛋白）」吸水後會變得像膠水一樣黏。如果水分加得不均勻，麵包會結成一大塊硬團，幼蟲會鑽不進去也吃不到。因此，攪拌均勻與濕度控制對麵包處理系統來說非常重要。

貳、研究設備與器材

一、實驗對象與材料

(一)實驗生物：選用生理狀態一致、初孵化後約 5-7 天的黑水蛇幼蟲，每組起始投放重量約為 2 公克（或約 100 隻，視分組實驗具體數據而定）。

(二)實驗基質：市售白吐司麵包。為確保實驗一致性，麵包處理方式相同，確保與幼蟲的接觸表面積一致。

(三)實驗用水：常溫自來水，用於精確調配基質含水率。

二、實驗儀器與工具

(一)精密電子秤：感量 0.01g，用於記錄各階段之蟲重、總重及麵包殘餘重。

(二)飼養容器：統一規格之長方形塑膠盒（約 30cmx20cmx10cm），盒底鋪設黑色不織布，利用熱熔膠槍固定，以模擬暗環境並防止脫逃。

(三)輔助工具：滴管（用於精確添加水量）、鑷子（用於挑選與計算蟲隻）、燒杯、塑膠箱。

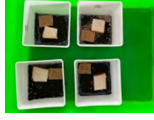
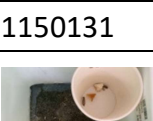
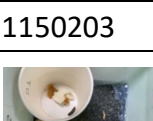
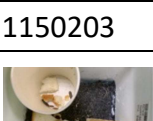
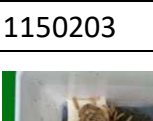
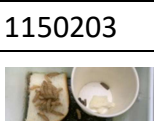
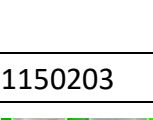
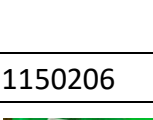
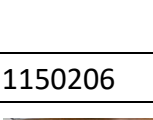
			
黑水蛇一罐	微電子秤	量杯組	飼養盒

叁、研究過程與方法

一、實驗設計與分組

表 1 為歷次實驗，每三天投放新的吐司照片，缺乏照片的部分是設置當天忘記拍照。

表 1-歷次實驗設置

				
1150108	1150111	1150113	1150116	1150116
				
1150117	1150117	1150125	1150125	1150128
				
1150128	1150131	1150131	1150131	1150131
				
1150131	1150131	1150131	1150131	1150131
				
1150131	1150203	1150203	1150203	1150203
				
1150203	1150206	1150206	1150206	1150206
			缺照片	缺照片
1150209	1150212	1150215	1150218	1150221

本研究採用單一變因實驗法，以「基質添加水量比例」為操縱變因，分為五組處理，每組設置兩個重複樣本，分別標記為 1 與 2：

表 2-分組含水率敘述

組別	操縱變因（麵包添加水比例）	定義與物理狀態描述
A 組	0%	對照組，純未加水吐司。
B 組	20%	極低水分，麵包僅表面濕潤。
C 組	40%	中低水分，麵包結構開始軟化，吸水後體積略膨脹。
D 組	60%	理想水分，基質呈濕潤鬆軟狀，無游離水分滲出。
E 組	80%	高水分，基質呈現水加太快會有溢流狀況。

二、水分計算與定義方式

水分含量之調配依據「基質重量*百分比」計算。其定義基準如下：

依據吐司的重量*20%、40%、60%、80%的水量，利用滴管緩慢滴在土司的表面，讓吐司自行吸收而避免溢流。

三、實驗觀測與指標

實驗期間（115/01/13 至 02/24），每隔 3 天進行一次全面數據採集，觀測指標包含：

(一)蟲重(Larval Weight)：利用鑷子將幼蟲自基質中分離，過秤測量族群總重。

(二)蟲隻數(Survival Count)：計算存活之個體數，評估各水分環境之生存壓力。

(三)吃掉的麵包(Consumption)：麵包重量加水量(各組比例不同)減剩下麵包的重量，反映消化效率。

(四)結蛹數(Pupation Count)：記錄轉變為棕黑色、停止活動之預蛹或蛹個體。

表 3 - 黑水蛇養殖盒測量數據前狀況

			
日期:1150128	日期:1150131	日期:1150131	日期:1150206
			
日期:1150209	日期:1150212	日期:1150218	日期:1150221
			
日期:1150224			

肆、研究結果：第一階段（01/13 - 01/31）生長與轉化分析

本階段重點在於不同水分梯度對黑水虻初期成長之影響。根據數據記錄，低水分組別表現出嚴重的生存危機，而高水分組別則進入快速生長期。

表 4-紀錄幼蟲成長情況及採擷

			
日期:1150122	日期:1150128	日期:1150131	日期:1150203
			
日期:1150206	日期:1150209	日期:1150212	日期:1150215
			
日期:1150218	日期:1150221	日期:1150224	

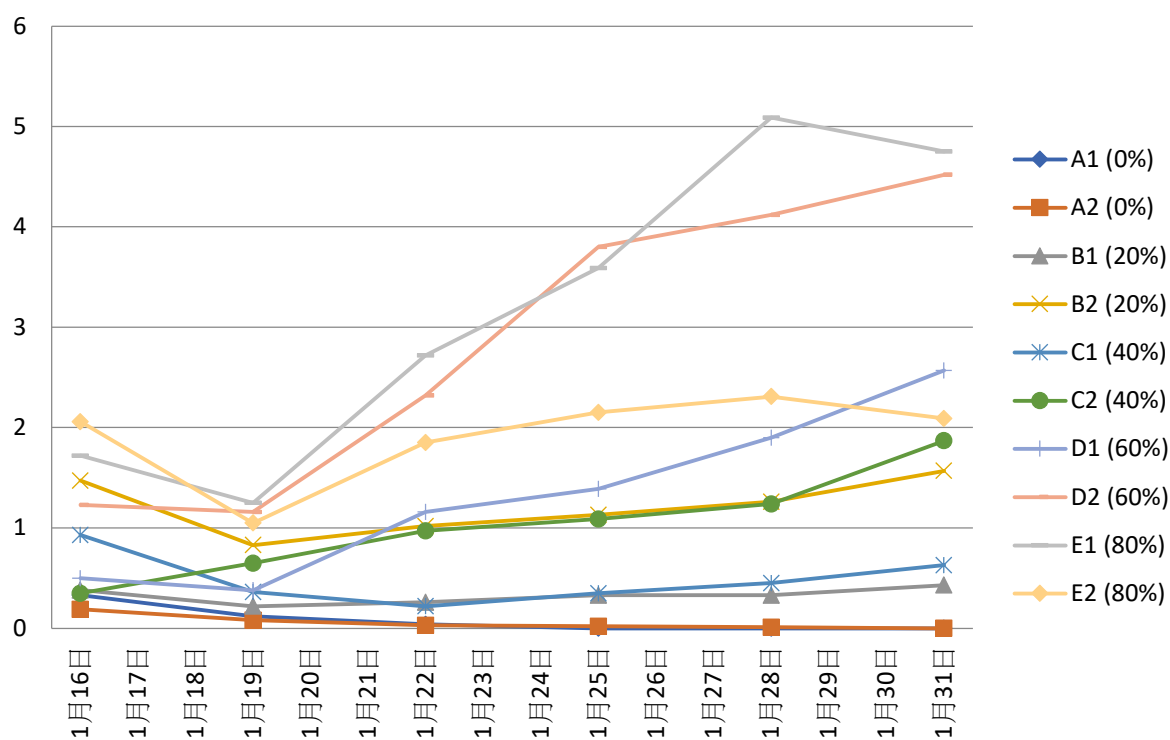
一、幼蟲生物量累積趨勢

下表詳細羅列了各組幼蟲在 15 天內的重量變化。生長速率呈現出與含水量高度正的相關性的非線性趨勢。

表 5：各組幼蟲總重量變化表 (115/01/16 - 01/31)

單位: g

日期	A1 (0%)	A2 (0%)	B1 (20%)	B2 (20%)	C1 (40%)	C2 (40%)	D1 (60%)	D2 (60%)	E1 (80%)	E2 (80%)
01/16	0.33	0.19	0.38	1.47	0.93	0.35	0.50	1.23	1.72	2.06
01/19	0.12	0.08	0.22	0.83	0.36	0.65	0.38	1.16	1.25	1.05
01/22	0.04	0.03	0.26	1.02	0.22	0.97	1.16	2.32	2.72	1.85
01/25	0.00	0.02	0.33	1.13	0.35	1.09	1.39	3.80	3.59	2.15
01/28	0.00	0.01	0.33	1.26	0.45	1.24	1.90	4.12	5.09	2.31
01/31	0.00	0.00	0.43	1.57	0.63	1.87	2.57	4.52	4.75	2.09



圖一各組幼蟲總重量變化折線圖

數據分析：

(一)A、B 組的衰退現象：A1 組在 10 天內生物量歸零，代表該環境已超過幼蟲的環境耐受極限。B 組雖然在後期有微弱的回升（B1 從 0.22g 升至 0.43g），但相對於起始量仍處於極度發育不良狀態。這說明 0%-20%的水分完全無法支撐黑水虻幼蟲對澱粉的消化需求。

(二)D、E 組的顯著成長趨勢：D2 與 E1 展現了最強的生長勢。特別是 D2 組，在 01/19 至 01/22 期間，蟲重由 1.16g 跳躍至 2.32g，生長速率呈現顯著正向趨勢。這顯示水分達到 60% 以上時，澱粉轉化機制被全面啟動。

(三)個體差異與穩定性：E1 組在 01/28 達到峰值 5.09g 後略有下降，而 D2 則穩定增長至 4.52g。這暗示極高水分（80%）可能帶來初期快速增重，但在後期的生物量維持上，60%的含水率具備更佳的代謝穩定性¹。

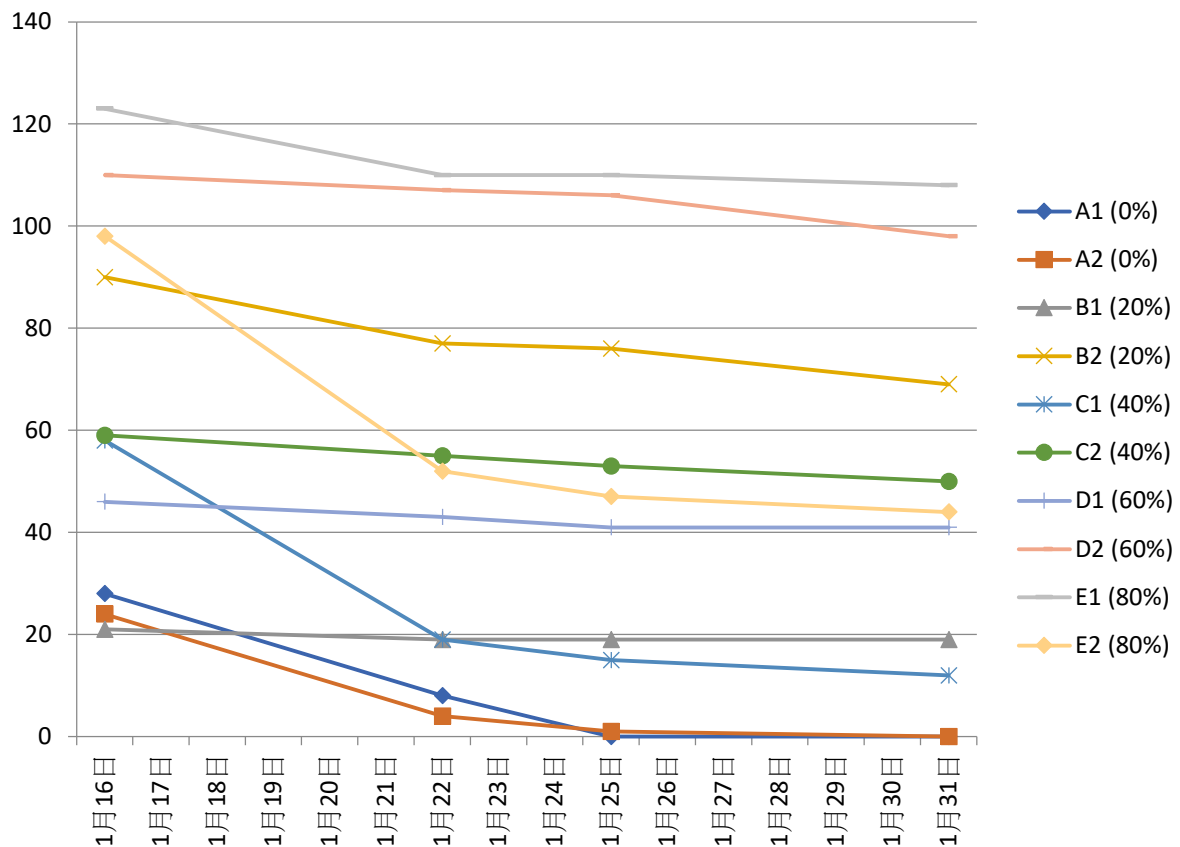
二、族群存活率分析

水分不僅影響生長速率，更直接決定生存機率，以下為各組存活數據與分析。

表 6：各組幼蟲存活隻數變化表 (115/01/16- 01/31) 單位:隻

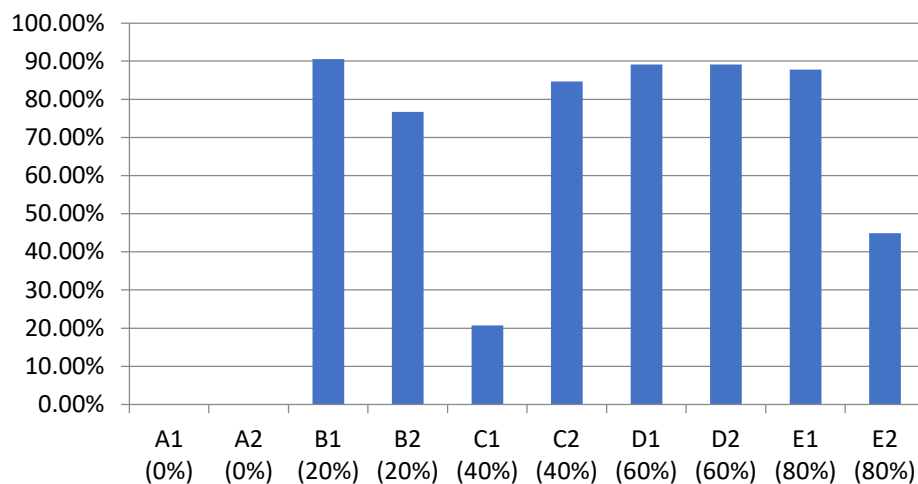
日期	A1 (0%)	A2 (0%)	B1 (20%)	B2 (20%)	C1 (40%)	C2 (40%)	D1 (60%)	D2 (60%)	E1 (80%)	E2 (80%)
01/16	28	24	21	90	58	59	46	110	123	98
01/22	8	4	19	77	19	55	43	107	110	52
01/25	0	1	19	76	15	53	41	106	110	47
01/31	0	0	19	69	12	50	41	98	108	44
01/31 存活率	0.0%	0.0%	90.5%	76.7%	20.7%	84.7%	89.1%	89.1%	87.8%	44.9%

註:存活率 (Survival Rate, SR)，計算公式：SR (%) = (01/31 存活隻數 ÷ 01/16 初始隻數) × 100%



圖二各組幼蟲存活隻數變化折線圖

1月13日~1月31日止存活率



圖三各組黑水蛇幼蟲存活率(到 1/31)

數據分析：

(一)低水分致死效應：A 組在 01/25 宣告全滅（A1 全滅，A2 剩 1 隻），存活率為 0%。這證明在類似環境中，無水分補充的乾燥澱粉食源對黑水蛇幼蟲具備致死性。

(二)水分補償效果：水分從 20%提升至 60%，存活率從 B 組的 76% 提升至 D2 組的 89% 。

由此推論，提高含水率能顯著降低發育過程中的非自然死亡風險。

(三) C1 組存活率顯著低於 C2，推測可能受到局部乾燥、基質結塊影響或其他可探討的因素。

(四)E2 組存活率 44.9%顯示濕度雖然促進生長，但可能也增加環境維護的風險。

三、食源去化效能與質量轉換率(BCR)

質量轉換率是本研究中衡量生物效能的最核心數據。我們透過比較「吃掉的麵包重」與「幼蟲淨增重」來探討生物轉化效率。「BCR (Bioconversion Rate，生物轉化率)」可代表將廢棄物轉換為蟲體蛋白質與脂肪的效率。透過計算各組之 BCR，評估不同濕度環境下黑水虻將麵包轉化為自身生物質之效率，數據區間為 01/16 至 01/31。

表 7-歷次黑水虻吃剩下麵包概況

			
日期:1150119	日期:1150122	日期:1150125	日期:1150128
			
日期:1150131	日期:1150206	日期:1150212	日期:1150215

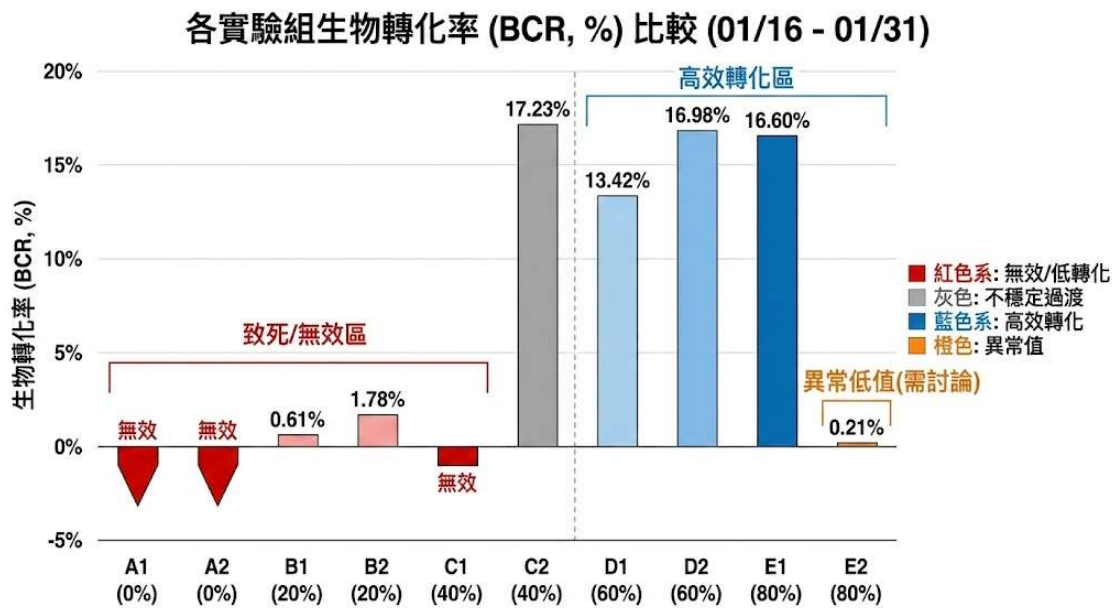
			
日期:1150218	日期:1150221	日期:1150224	

表 8：各組之麵包去化與 BCR 計算(01/16 - 01/31)

組別	濕度	初始蟲重 (g)	最終蟲重 (g)	淨增重 (g)	累積去化量 (g)	BCR (%)
A1	0%	0.33	0.00	-0.33	3.94	--
A2	0%	0.19	0.00	-0.19	3.38	--
B1	20%	0.38	0.43	+0.05	8.21	0.61%
B2	20%	1.47	1.57	+0.10	5.62	1.78%
C1	40%	0.93	0.63	-0.30	7.55	--
C2	40%	0.35	1.87	+1.52	8.82	17.23%
D1	60%	0.50	2.57	+2.07	15.42	13.42%
D2	60%	1.23	4.52	+3.29	19.37	16.98%
E1	80%	1.72	4.75	+3.03	18.25	16.60%
E2	80%	2.06	2.09	+0.03	14.59	0.21%

計算公式說明

1. 總去化量：各階段吃掉的麵包重量加總
2. 蟲體淨增重：01/31 蟲重- 01/16 蟲重
3. 生物轉化率(BCR, %)：蟲體淨增重 ÷ 總去化量 × 100%



數據分析 BCR：

- (一)D 組(60%)：重複組 D1 (13.42%)與 D2(16.98%)均展現了穩定且高效的轉化能力。
- (二)E 組(80%)：雖然 E1 展現了 16.60%的高效率，但 E2 轉化率極低(0.21%)。經觀察，E2 組在 1/22 後存活數量有明顯下降，導致整體增重受限，這暗示了過高濕度可能存在環境缺氧或腐敗菌干擾之風險。
- (三)C 組(40%)：C2 展現了驚人的 17.23%BCR，但 C1 卻是負成長。此組數據標準差較大，顯示 40%濕度屬於「不穩定過渡期」。
- (四)去化量趨勢：隨著濕度提升，總去化量呈現明顯正向相關。D1、D2 與 E1 均突破 15g 的去化量，遠高於 A、B 組。這證實水分不僅提升轉化率，更顯著增加幼蟲的食慾與處理速度。

伍、研究結果：第二階段（02/03 - 02/24）結蛹與發育穩定性

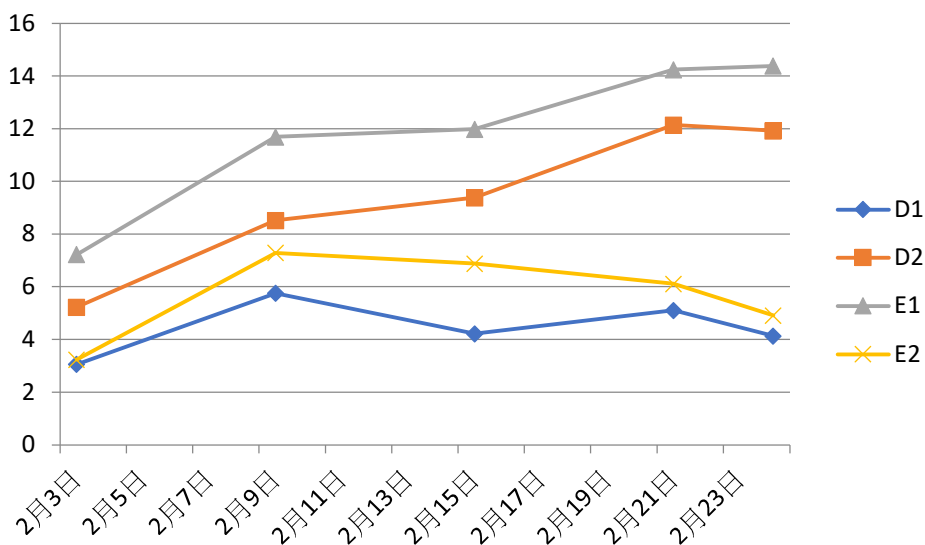
本階段實驗面臨重大轉折。02/03 觀測時發現 A1 至 C2 組遭不明動物侵擾，實驗單位全損，故後續分析聚焦於倖存的 D、E 組。

一、倖存組別生物量持續增長情況

在實驗後期，D 組與 E 組仍展現強勁的生命力。下表分析 02/03 後的體重動態。

表 9：D、E 組後期生物量變化(02/03 - 02/24) 單位: g

日期	D1	D2	E1	E2	趨勢觀察
02/03	3.06	5.23	7.23	3.24	D2, E1 大幅領先
02/09	5.76	8.52	11.70	7.29	全組別生物量倍增
02/15	4.22	9.39	11.99	6.88	D1 略有下降(化蛹影響)
02/21	5.10	12.15	14.25	6.12	E1 達到最大生物量
02/24	4.13	11.92	14.39	4.91	進入化蛹穩定期



圖五 D1-E2 幼蟲總重量變化折線圖

數據分析：

(一)E1 組的卓越表現：E1 組在 02/24 達到 14.39g 的峰值，展現了高水分環境對生物量累積的長期支撐力。相較於初期 1.72g，成長幅度高達 8.37 倍。

(二)生長速率差異：D2 組（60%）雖然起始量低於 E1，但其生長斜率與 E1 相當，最終亦能達到 11.92g 的水準。這顯示 60%與 80%含水率在長期生物量貢獻上差異較初期縮小。

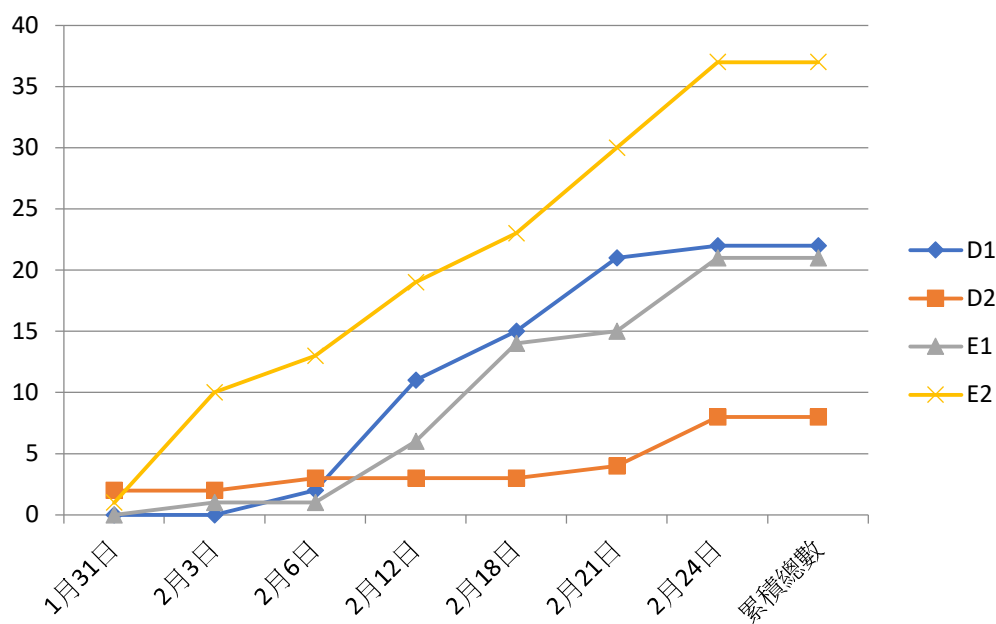
二、結蛹規律與發育進程分析

化蛹是黑水虻生活史中的關鍵轉折。本研究透過追蹤結蛹數量，分析水分對生理成熟的催化作用。

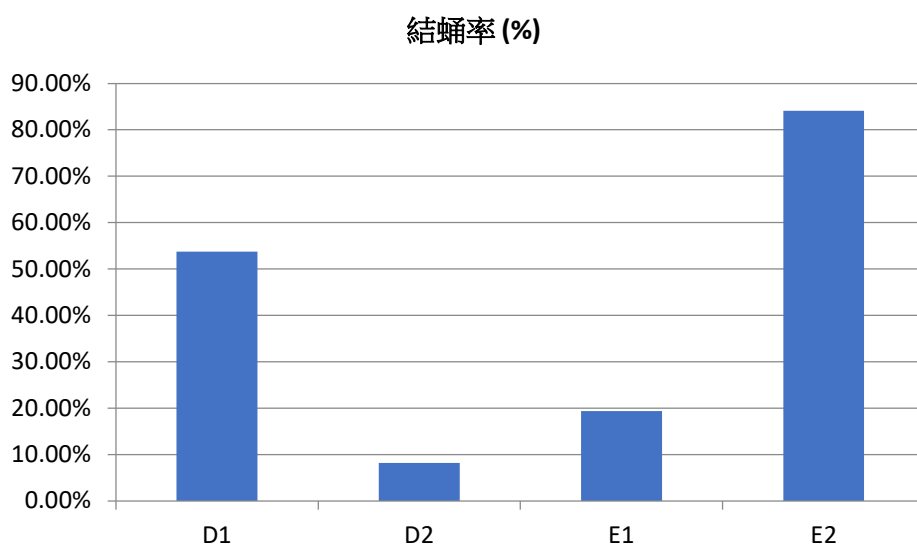
表 10：D、E 組累積結蛹相關統計表(01/31- 02/24) 單位:隻

組別	01/31	02/03	02/06	02/12	02/18	02/21	02/24	累積 結蛹	01/31 存活數	結蛹率 (%)
D1	0	0	2	11	15	21	22	22	41	53.7%
D2	2	2	3	3	3	4	8	8	98	8.2%
E1	0	1	1	6	14	15	21	21	108	19.4%
E2	1	10	13	19	23	30	37	37	44	84.1%

註:結蛹率（Pupation Rate, PR），計算公式：PR (%) = (累積結蛹 ÷ 01/31 存活數) × 100%



圖六 D、E 共四組累積結蛹統計折線圖



圖七 D、E 共四組結蛹率折線圖

數據分析：

(一)結蛹高峰期：D1 組在 02/06 至 02/12 期間展現了顯著的化蛹衝刺（9 隻），對應到該時段生物量的增長趨緩，符合生理發育規律。

(二)水分對化蛹的促進：E2 組累積化蛹 37 隻，為所有組別最高。結合其體重變化（前期增長緩慢，後期轉向發育），可推論高水分（80%）可能扮演了「催熟」的角色。在資源受限或水分過多導致環境改變時，個體可能優先選擇進入蛹期以規避風險。

(三)D2 組的發育不一致性：D2 組雖然生物量最高，但化蛹數僅 8 隻。這顯示該環境下的個體仍傾向於維持在幼蟲階段（食量大、體型肥碩），這在商業養殖（以生產幼蟲為目標）中反而是一個優勢特徵¹。

陸、討論

一、水分對澱粉降解的影響

本研究數據清楚揭示了水分含量與澱粉去化效率之間的「非線性」關係。根據生長數據分析，我們提出黑水虻處理澱粉廚餘的效率模型：低水門檻(0%-20%)：澱粉分子處於固體結晶態，澱粉酶分子難以滲透。幼蟲即便接觸到食源，也因缺乏水分而無法形成有效的消化液，導致「飢餓致死」現象。這與 A 組全滅的數據完全吻合。

有效反應區(60%-80%)：此區間內水分充足，麵包結構瓦解，酶活性達到峰值，且水分充當了營養物質向幼蟲體內轉移的媒介，支撐了 D2 與 E1 組的高 BCR 表現。

二、質量轉換率與資源回收效率的權衡

在研究邏輯中，我們必須區分「生長最快」與「效率最高」。

(一)產能視角：若以「總體產量」為目標，E1 組（80%）表現最優，提供了最高的最終生物量（14.39g）。

(二)效率視角：若以「投入產出比」為準則，D2 組（60%）在第一階段的 BCR（16.98%）高於 E1 組（16.60%）。這意味著處理澱粉類廚餘時，過量加水雖然能提升表觀進食量，但會因基質水分過高而導致代謝能損耗。因此，在實務上，60%含水率被證明是兼顧經濟效益與生物成長的最佳平衡點。

三、環境刺激與實驗損失的檢討

02/03 發生的 A1-C2 組損失事件，雖然對實驗完整性造成衝擊，但也提供了一個重要的環境生態觀察點：

(一)動物趨性：麵包類廚餘在受潮發酵後會釋放特定的有機酸與酯類氣味，這對周邊脊椎動物（如鼠類或鳥類）具有強烈吸引力。

(二)研究誠實性與排除：在科展說明書中，我們如實記錄此一損失，並轉而深化 D、E 組的長期對比。由於 D、E 組均為倖存樣本且具備獨立重複，其比較結果仍具備參考價值。

四、黑水虻腸道微生物與水分的協同作用

高含水率環境會顯著改變基質與腸道的微生物多樣性。文獻指出，高水分（80%）易利於乳酸桿菌與芽孢桿菌的生長。這些微生物能輔助黑水虻進行初步的纖維素與複合澱粉分解，

這也解釋了 E1 組為何能長期維持高消耗率。然而，微生物也會消耗一部分易利用醣類，這可能是 E 組 BCR 略低於 D2 組的次要原因。

柒、結論

一、研究結論

(一)水分是澱粉去化的關鍵因素：黑水虻幼蟲對乾燥麵包的利用率極低，含水率必須達到 60% 以上才能確保正常的生理發育與生物量累積。低於 40% 的含水率會顯著提高幼蟲死亡率，且可能導致族群全滅。

(二)60% 含水率為最佳轉化比例：數據證明，含水率 60% (D2 組) 在生物質量轉化率 (BCR, 16.98%) 上表現最佳。該比例能兼顧澱粉的酶解效率與族群的發育穩定性，是處理麵包類廢棄物的理想參數。

(三)發育節奏受水分調控：高水分 (80%) 組別展現出較早的化蛹傾向與較高的結蛹總數。這暗示水分可能影響黑水虻幼蟲進入預蛹期的內分泌門檻。對於需要快速完成生活史的應用場景，80% 含水率具備其優勢。

(四)生物量累積潛力：澱粉類基質具備支撐高倍率成長的潛力。在本研究中，適宜水分組別的幼蟲在 40 天內生物量增長超過 8 倍，顯示其作為蛋白質回收媒介的高度可行性。

二、研究建議

基於上述發現，針對教務主任或研究計畫主持人，提出以下科學建議：

(一)標準化廚餘預處理流程：在推廣校園或區域型黑水虻廚餘系統時，針對麵包、米飯類澱粉殘渣，應建立「加水稱重」機制。建議比例為麵包:水 = 1:0.6-0.8，以確保混合後的基質含水率穩定。

(二)優化飼養環境監控：由於澱粉基質發酵產熱顯著，特別是在高溫地區，建議強化通氣。由 D 組數據可知，維持適度乾燥的表層有利於幼蟲集群活動。後續實驗可嘗試導入自動補水滴灌系統，維持基質含水率不因蒸散而降至 40% 以下。

(三)風險管理策略：實驗過程中發生的動物侵擾提醒我們，澱粉基質的「適口性」不分物種。在設計量產設備時，必須採用細目堅固的防護網進行封閉式管理，這不僅能防止外來捕食者，

亦能防止黑水虻成蟲羽化後逃逸。

(四)轉化產品之深化應用：考量到澱粉轉化後幼蟲脂肪含量可能較高，後續可針對 D 組與 E 組之幼蟲進行脂肪酸組成分析。作為高品質飼料或其他原料使用，增加計畫的附加價值。

三、後續研究展望

本研究已初步釐清水分與澱粉轉化之關係，未來可進一步探討：

(一)澱粉降解酶活性的時空分布：透過生化檢測技術，測量不同生長階段幼蟲體內澱粉酶活性的變動規律，從分子層次驗證水分閾值。

(二)共生菌群的調節作用：探討在 60%含水率下添加特定菌種，是否能進一步提升麵包纖維部分的降解效率。

(三)循環農業集成：將黑水虻處理後的殘留物（蟲糞）應用於校園菜園，驗證其作為澱粉來源肥料的速效性與長效性，完成完整的循環體系鏈結。

捌、文獻參考

一、圖書專著類

(一)翰林出版公司 (2024)。《國民中學自然科學自然七年級下冊教科書》。台北：翰林出版。

研究關聯：參考第五章「生態系」中關於「分解者」的角色定義，協助建立能量流動與物質循環之理論框架。

(二)南一書局企業股份有限公司 (2024)。《國民中學自然科學自然七年級下冊教科書》。台南：南一書局。

研究關聯：參考第五章「生態系的組成」中有關水分等非生物因子對生物生存與分佈之影響論述。

二、期刊論文與學術研究類

(一)梁雅雯、林哲緯 (2020)。〈環境因子對黑水虻幼蟲攝食與生物質轉換效率之影響〉。國立屏東科技大學研究彙報。

(二)國立中興大學昆蟲學系(2022)。〈不同含水率對黑水虻幼蟲腸道消化酶活性之影響分析〉。內部學術資料/專題研究。

(三)林玄晶、潘盈郁中華民國第 59 屆中小學科學展覽會優良作品(2019)。〈虻飛鳳舞-發「糞」向上〉。

(四)國立臺灣大學生物資源暨農學院 (2021)。〈有機資源循環利用技術：以黑水虻去化澱粉類廚餘為例〉。研究計畫成果報告。

三、政府報告、專業報導與網路資源類

(一)行政院農業部畜產試驗所 (2021)。〈黑水虻應用於有機廢棄物資源化處理手冊〉。台北：農業部。

(二)新北市政府環境保護局 (2024)。〈廚餘循環再利用示範計畫：黑水虻飼養技術指南〉。