

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 生物科

第一名

030315

壺蜂的生殖行為—探討黃胸錐腹螺羸交尾、做巢、  
產卵、育幼的生殖過程研究

學校名稱：南投縣立宏仁國民中學

作者：  國一 劉紘睿  國一 傅聿樞  國一 鍾峻諺	指導老師：  李季篤  李宜芳
---	-----------------------------

關鍵詞：黃胸錐腹螺羸、生殖行為、衡量

# 得獎感言

## 2023年 在暴「蜂」疾雨中~爬到最高點!

頒獎的時刻終於來臨，坐在台下的我們緊張與忐忑不安，心中一直期待著司儀能唱出我們的作品編號，當台上的司儀終於念出「國中組生物科第一名是030315南投縣宏仁國中間的的霎那」，我們激動地跳了起來，大喊「水啦!」。接著立馬起身，跑飛到舞台上，享受那獲獎榮譽無價的感覺，此時此刻的情景，將永遠刻印在我的腦海中。

不經一番寒徹骨，焉得梅花撲鼻香。一年努力不懈、研究、討論、實驗、報告、書寫、練習的日子，終於要驗收了。一進到頒獎典禮的會場，我們既興奮又緊張，不僅手心微微冒汗，連手腳也無法控制的發抖。

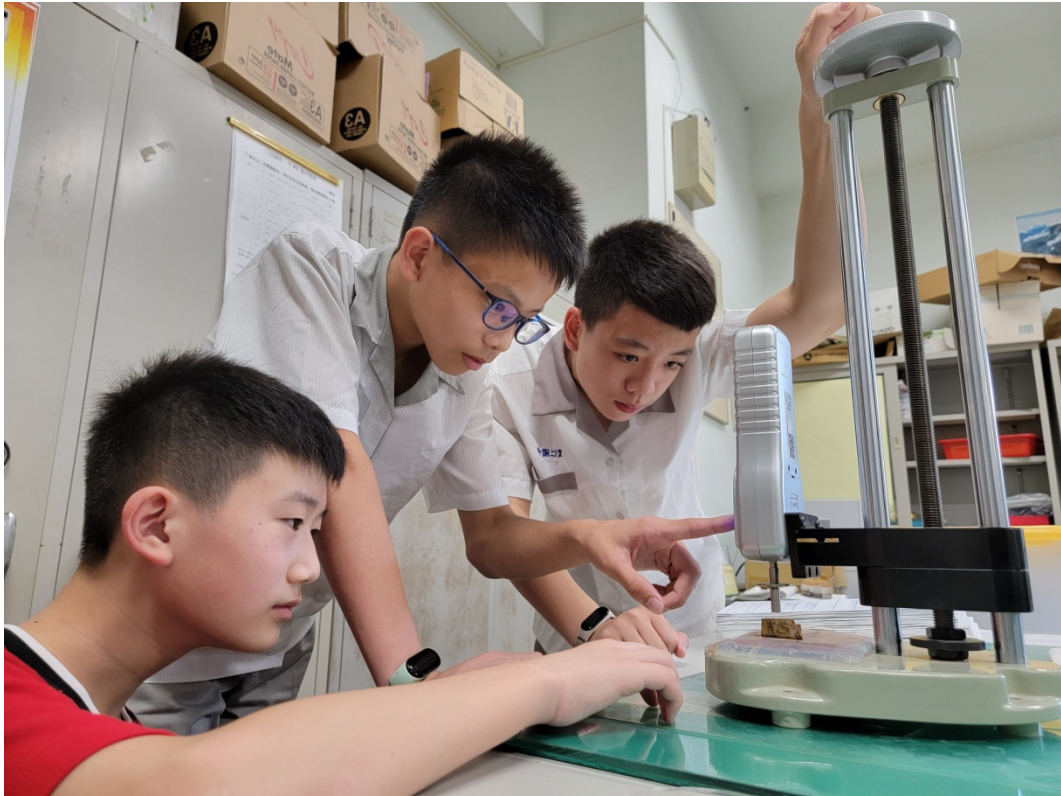
一年來，我們遇到了許多實驗結果與假設不符合的困難、常常遇到實驗的瓶頸，有時真的很辛苦，也很累，不過我們不畏艱難、不怕挫折，仍然每天寫實驗日誌，努力尋找最佳的實驗呈現方式，並隨時檢討反省哪裡還做得不夠好，好讓我們的報告可以呈現得最完美。

能獲得全國科展第一名，首先要感謝的是我們的指導老師:李季篤老師，因為有了他耐心的教導，才有了現在那麼強的我們，感謝李宜芳老師、蔡永巳老師、林偉業老師、白鈞合老師、莫雅真老師、以及李崇瑋老師，他們總是在我們實驗遇到困難時，細心地教導我們解決方法；接著要感謝一起努力、一起難過、一起歡樂的2個合作夥伴，彼此互相扶持，克服了許多的令人頭痛的困難；也要感謝默默支持我們的家人，也要感謝扶持我們課業的老師們，讓我們能夠專心一意做實驗，他們的支持，讓我們感到很溫暖，謝謝你們的幫助，讓我們能夠走到這榮譽的一步。

胡適說：「要怎麼收穫，先那麼栽。」在我們三人一起努力之下，終於走到這無比光榮的頒獎台上，感謝一路堅持不放棄的我，讓我能夠嘗到成功甜美的果實；相反的，假如我們遇到困難就放棄，那我們今天就不會如此的光榮。所以，最有希望的成功者，並不是才能出眾的人，而是那些善於利用每一時機去發掘開拓的人，只要你不屈不撓，永不放棄，成功的煙火一定會為你而綻放的!

因此，滴水穿石、有志者事竟成，就是科展送我們最珍貴的道理，2023年我

們終於在暴「蜂」疾雨中，爬到最高點！



在實驗室內，我們不斷測量壺蜂所做的巢之硬度



我們不僅獲得全國第一名，同時也獲得台灣昆蟲研究獎



得到全國第一名，為我們國中一年級留下永恆的紀錄

## 摘要

本研究探討黃胸錐腹蜾蠃(*Delta pyriforme*)交尾、做巢、產卵、育幼等生殖行為。結果一雌雄壺蜂平均性成熟為  $77\pm 10.8$ 、 $63.7\pm 5.7$  小時，交尾結合只有 11 秒。結果二壺蜂用大顎與前足以  $0.8\times 10^{-3}\text{m/s}$  速度拍打泥球，讓巢固定成型，結蜂繭後巢硬度達 4269gw。結果三受微風影響卵搖 9.3 次/s，此時卵柄的張力對卵做出 164.3nkg.m/s 衝量值，當衝量越大、卵搖晃時間越長、停下時間要越久。結果四壺蜂會依不同體型獵物，施予不同的力搬運回巢，被麻痺獵物血液流速為  $1.64\sim 1.13\text{cm/s}$ ，氣孔被打開 494%，以延長獵物壽命，有助於壺蜂幼蟲攝食，達到育幼後代的目的。

## 壹、研究動機

從小曾聽過青蛙、蟋蟀發出聲音求偶，看過螢火蟲發出螢光吸引異性來交尾，從書上也得知蝴蝶會舞動翅膀進行求偶，就是沒有看過壺蜂求偶的行為或交尾的過程。

學校有 2 棵高大的鳳凰樹，常常看到黃胸錐腹蜾蠃在這不停地來回穿梭，黃黑體色相當引人注意，我們很疑惑黃胸錐腹蜾蠃為什麼飛來這裡，目的為何？資料說，牠會利用泥土做巢、會抓獵物給幼蟲吃(文獻五)，所以牠是來抓獵物或來覓食？用泥土做的巢堅固嗎？

還有我們對於牠們的生殖行為真的很好奇？例如牠們是怎樣交尾？捕捉的獵物有多大？是如何把獵物搬到巢裡？巢內的壺蜂幼蟲又是怎麼吃獵物長大？我們想知道這些疑問，所以開始進行研究找尋答案，以了解牠們在物競天擇的世界中如何繁衍後代。



## 貳、研究目的

- 一、研究黃胸錐腹蜾蠃『成蟲交尾』的生殖行為
- 二、研究黃胸錐腹蜾蠃『做巢的環境』對後代成長的影響
- 三、研究黃胸錐腹蜾蠃『產卵行為』對卵孵化的影響
- 四、研究黃胸錐腹蜾蠃『育幼後代』的行為

## 參、研究設備及器材

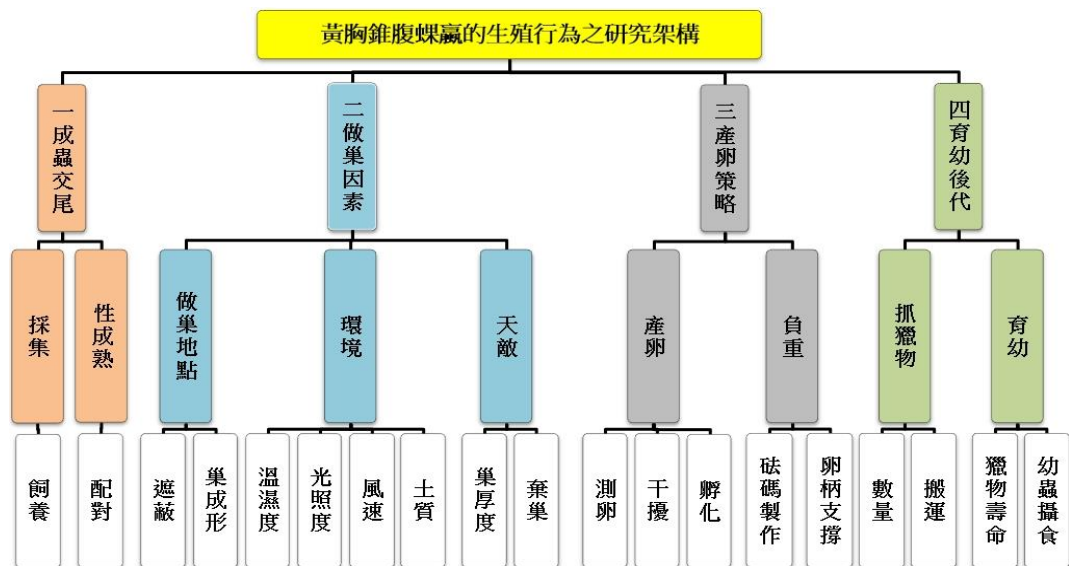
- |                          |          |        |        |
|--------------------------|----------|--------|--------|
| 1.數位相機、攝影機、手機            | 6.光譜儀    | 11.硬度計 | 16.風速計 |
| 2.電子天秤 (ATY124、SNUG-300) | 7.溫溼度計   | 12.熱熔槍 | 17.夾鏈袋 |
| 3.顯微鏡 (DinoLite2.0)      | 8.量角器    | 13.鋼刷  | 18.燈罩  |
| 4.CO <sub>2</sub> 鋼瓶     | 9.輕黏土    | 14.培養皿 | 19.釣魚線 |
| 5.蛋白質測定液                 | 10.脂肪測定液 | 15.碘液  | 20.捕蟲網 |

## 肆、文獻整理與我們的見解

作者	研究題目	前人研究的重要論點
戴東翰, 2013	土樓神秘客-泥壺蜂生態研究	<p>一、<b>築巢生態</b>：巢大多築在通風、不迎風且素色牆面上。巢穴成形之後會產下一顆卵，內約有 4~6 隻獵物，</p> <p>二、<b>繁殖生態</b>：巢雖密封起來但繁殖率偏低。</p>
吳采頤, 2018	獨行俠的神祕生活—五種獨居蜂築巢行為及成長習性之探討	<p>一、<b>築巢行為</b>：觀察 5 種不同獨居蜂，分別用土、樹脂、乾草、壁虎糞便等築 1~6 間的巢。</p> <p>二、<b>成長的習性</b>：觀察每種獨居蜂食性都不同且扮演植物傳播花粉與生物防治的角色。</p>
黃芑迎, 2017	泥壺內的秘辛~赭腰圓領蜾蠃和黃胸錐腹蜾蠃生存策略探討	<p>一、<b>型態與生殖的生存策略</b>：體型大有黑、黃、紅體色，麻醉獵物放壺內、提供幼蟲捕食。</p> <p>二、<b>築巢與護幼的生存策略</b>：巢壺狀，築於能避雨牆角或地上，並在產卵後快速封住洞口。</p>
陳抒函, 2017	麻醉大師--壺蜂麻醉獵物的策略與幼蟲捕食間關係	<p>一、<b>麻醉獵物策略</b>：雌蟲抓長 13~15mm 的獵物，將毒液注入獵物體內麻痺後再抓回竹管。</p> <p>二、<b>幼蟲捕食獵物間的關係</b>：發現幼蟲在獵物心跳停止前，幼蟲可以吃到新鮮且活的獵物。</p>
林孟寬, 2019	泥造城堡--探討黃胸泥壺蜂「銜泥建造巢室」的策略	<p>一、<b>銜泥策略</b>：壺蜂用大顎與腳做泥球，並用大顎啣泥球，找出了做泥巢的完整順序。</p> <p>二、<b>建巢策略</b>：成蟲體長越大，建造的底與壺口會越大，卵被產在巢室頂端的泥壁上。</p>

我們的見解與設計研究架構

關於壺蜂的相關研究，雖然已經有許多人發表過，但是經過文獻報告的閱讀與討論，我們有了許多的不同想法，也認為仍然還有許多研究的新方向，因此列出了幾項『**前人還沒研究過的內容**』，有壺蜂的交尾、做巢因素、產卵策略、以及育幼等四大主題，來探討黃胸錐腹蜾蠃生殖相關的行為，整篇研究的架構如下：



## 伍、研究方法

### 研究一、黃胸錐腹螺贏『成蟲交尾』的生殖行為

#### (一) 成蟲的採集、觀察與測量：

我們在學校鳳凰木與無刺麒麟花圃裡，分批採集了 13 隻雌性與 12 隻雄性，共 25 隻黃胸錐腹螺贏成蟲，先放到飼養盒內，到傍晚活動力降低時，再把牠們放到方格紙上進行體長測量與拍照、秤重，為了避免重複捕捉，用紅色顏料塗在黃色腹部體節當記號後放生。發現雌雄的外觀很相似，但仍有 1.雌蟲觸角呈棍棒狀、雄蟲觸角末端有倒鉤。2.體型上呈雌大雄小、雌重雄輕。3.雌蟲腹部寬大末節呈黃色、雄蟲腹部細窄最末端呈黑色等差異。如圖 1

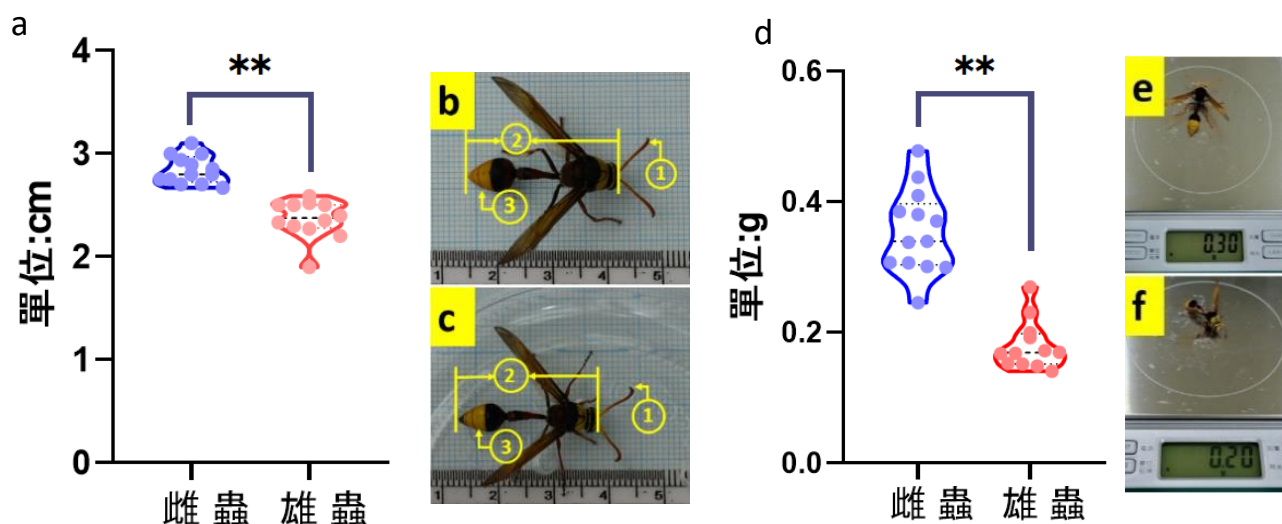


圖 1、雌雄體長與體重測量結果。

a：雌雄體長分別為  $2.84 \pm 0.14\text{cm}$ 、 $2.36 \pm 0.2\text{cm}$ 。b：雌性、c：雄性：①觸角②體長③腹部。

d：雌雄體重分別為  $0.35 \pm 0.06\text{g}$ 、 $0.18 \pm 0.04\text{g}$ 。e：雌性體重、f：雄性體重。

結果：不管體長或體重，都是雌蟲大於雄蟲， $p < **0.01$  具非常顯著的差異( $n=25$ )。

(二) 提出疑問？在多次採集成蟲與調查的過程，從來沒有看過牠們交尾的行為，因此很好奇這雌大、雄小體型明顯差異的壺蜂，是如何進行與完成交尾的行為？

(三) 提出假設：假設壺蜂交尾行為與大多數昆蟲那樣，呈現雄上雌下的姿勢，完成交尾。

(四) 動手實驗：

#### 實驗 1-1 『不曾交尾過的雌雄成蟲』樣本取得

步驟 1. 先採集卵、幼蟲或蛹體：採集 70 個土巢，把獲得的樣本放到雞蛋盒內，溫度控制在  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  的環境下飼養。

步驟 2. 性成熟個體的取樣：當蛹蛻變成蟲後，再用原來的土巢覆蓋，直到成蟲鑽出土巢，而且可以起身飛行時，即為性成熟的個體，以此取得不曾交尾過的雌雄樣本。

#### 實驗 1-2 黃胸錐腹螺贏的『交尾』實驗：

步驟 1. 『不曾交尾過』的雌雄配對：根據上述 1-1 實驗所取得的成蟲樣本，成為了壺蜂交尾的實驗。取其中雌雄 3 對，共 6 隻，隨機配對後放到  $10 \times 10\text{cm}$  透明飼養盒中進行配對，記錄雌雄交尾的過程( $n=6$ )。

## 研究二、探討黃胸錐腹蜾蠃『做巢的環境』對後代成長的影響

### (一) 觀察：

我們尋找黃胸錐腹蜾蠃的做巢地點，發現在學校的空心磚內或教室牆角、太陽能支柱凹槽、廢棄冷氣主機內以及汽車棚下汽車引擎蓋下的散熱格子裡，都有牠做巢足跡。如圖 2。



圖 2、黃胸錐腹蜾蠃做巢位置觀察的結果。

A：在空心磚內剛做好的酒壺狀土巢。B：壺蜂飛到冷氣孔主機內做巢，進出的鐵框邊還沾黏了許多泥土。C：引擎蓋下散熱格子邊也沾有泥土，而且隱約看到巢內已經有卵在裡面了。

### (二) 提出疑問？

根據觀察，獲得黃胸錐腹蜾蠃做巢位置不會固定在某一處，但共通點是能遮風蔽雨，因此我們想研究，除了共通點之外，做巢處還有何特點？以及有哪些因素會影響土巢的建造？

(三) 提出假設：我們提出黃胸錐腹蜾蠃會受到環境的因子而影響土巢的建造假設。

### (四) 動手實驗：

#### 實驗 2-1 探討壺蜂『做巢時的環境』特點

步驟 1. 先調查壺蜂什麼時間飛出來：從 111 年 9 月~11 月的週一到週五早上 08：00~17：00 之間，每 2 個小時為一個時段，共分成 5 個觀察時段。

步驟 2. 分組調查與實驗：把壺蜂覓食、做巢(包含吸水、做泥球、切成巢、產卵、巡視巢)、抓獵物等行為分成 3 組、5 個時段，調查壺蜂出現時行為的最佳時段。同時使用溫濕度計、風速計等儀器，測量壺蜂出現時的環境狀態。

#### 實驗 2-2 探討『土巢為何能成形』？

步驟 1. 壺蜂如何把『泥土』做成『泥球』的形狀：①用攝影機拍攝雌蟲利用大顎做泥球的過程、②分析大顎挖土移動的範圍與速度。

步驟 2. 壺蜂如何把『泥球』做成『土巢』的形狀：①用攝影機拍攝雌蟲把泥球塗抹做巢的過程、②分析大顎抹泥球與前足拍打泥球動作的速度。

#### 實驗 2-3 探討『做巢過程』遇『天敵』，會影響做巢嗎？

步驟 1. 根據上述土巢形成的過程，而提出三種做巢中遇天敵的行為假設。

步驟 2. 假設一、天敵出現在壺蜂『剛剛做巢』時：捕捉天敵活蒼蠅，用 CO<sub>2</sub> 短暫迷昏後，用鑷子夾住蒼蠅放在剛做的土巢壁上，測試 20 個樣本，每個樣本重複三次。

步驟 3. 假設二、天敵出現在壺蜂『把巢做成壺形』時：用 CO<sub>2</sub> 短暫迷昏蒼蠅後，再用鑷子夾住蒼蠅放在『剛成壺狀』土巢壺口上，測試 8 個樣本，每個樣本重複三次。

步驟 4. 假設三、天敵出現在壺蜂『巢已經做好』時：用 CO<sub>2</sub> 短暫迷昏蒼蠅後，再用鑷子夾住蒼蠅放在『已經做好土巢』的表面上，測試 5 個樣本，每個樣本重複三次。



### 實驗 2-4 探討『壺蜂做的巢有多堅固』？

**步驟 1. 壺蜂泥球的性質測試：**撿拾壺蜂剛丟棄的泥球，立刻用酸鹼試紙、蛋白質測定液、脂肪測定液以及碘液等，檢測壺蜂所做的泥球成分。

**步驟 2. 根據步驟 1 獲得的結果，接著進行壺蜂做的泥球與土巢的硬度實驗：**

- (1) **第一次實驗：**設計實驗組為壺蜂做的『乾、濕泥球』；對照組為鮮奶+土做成乾、濕泥球、以及用水+土做成的乾、濕泥球的硬度，(n=99)。
- (2) **第二次實驗：**實驗組為『初形成還未封口的土巢』；對照組為鮮奶+泥土捏成壺狀土巢，以及水+泥土捏成壺狀土巢，(n=40)。
- (3) **第三次實驗：**實驗組為『覆蓋完成的土巢』；對照組為鮮奶+土捏成覆蓋型土巢，以及水+土捏成覆蓋型土巢，(n=66)。
- (4) **操作方法：**以上三次實驗，都使用硬度計擠壓，直到泥球、土巢破裂停止，求實驗組與對照組硬度。

### 研究三、研究黃胸錐腹蜾蠃『產卵行為』對卵孵化的影響

#### (一) 觀察：

在進行研究 2-2 實驗的時候，曾用攝影機拍攝黃胸錐腹蜾蠃拍打泥球做巢的過程，同時也拍到雌蜂產卵行為，我們使用美工刀慢慢地刮開土巢且使用手電筒照亮觀察，發現卵被一條細絲狀的卵柄懸吊在半空中。如圖 3。



圖 3、黃胸錐腹蜾蠃常在溫度 29~30°C 間做巢與產卵過程。A、腹部彎曲進行產卵；B、打開土巢後發現 ①有一條絲狀的『卵柄』 ②橙黃色卵粒。

#### (二) 提出疑問？

前人曾研究壺蜂的卵能從巢壁往下垂降約 38%(文獻三)，『但是對於雌蜂為何會採取這種產卵方式，前人並沒有進行研究』，因此我們很好奇，卵被懸吊在半空中有什麼好處？

#### (三) 提出假設：

提出卵被懸吊的方式，能降低外界對卵的干擾，而提高卵的孵化率。

#### (四) 動手實驗：

### 實驗 3-1 研究『卵』與『卵柄』之間的相關性

**步驟 1. Image J 軟體測量：**打開巢把尺放卵旁邊，再用軟體測量卵與卵柄的長度。

**步驟 2. Dino Capture 軟體測量：**用 465x 觀察卵柄並拍照，再用軟體測量直徑。

### 實驗 3-2 研究『卵柄』的負重

步驟 1. 微量砝碼的製作：我們取下每支 0.0322g 的小鋼刷，把它剪成 3 段，每段的重量約 0.005~0.01g，對折後製作成微量砝碼。

步驟 2. 求卵柄最大與最小負重：把微量砝碼一個一個慢慢的掛到卵柄與卵之間，直到卵落下，把卵與微量砝碼拿到小數點四位的電子秤上秤重，求得卵柄最大、最小負重。

### 實驗 3-3 研究懸吊姿態的卵與『孵化率』、『剛孵化幼蟲攝食』有關？

步驟 1. 設計實驗組『卵懸吊』、對照組『卵橫躺』孵化：記錄懸吊與橫躺的卵孵化間有何不同，以 8 粒卵做實驗。

步驟 2. 設計實驗組『剛孵化懸吊』、對照組『剛孵化橫躺』攝食：記錄懸吊與橫躺的卵孵化後，攝食率的差異，以 8 粒卵做實驗。

## 研究四、黃胸錐腹蜾蠃『育幼後代』的行為

### (一) 觀察：

在進行研究三實驗的時候，我們不僅拍到壺蜂產卵，還拍到壺蜂捕抓獵物回巢的行為。我們打開土巢，看到巢內有許多隻獵物。如圖 4。



圖 4、壺蜂抓獵物回巢。A、黃胸錐腹蜾蠃捕抓獵物回巢。B、巢內有一顆卵以及多隻獵物。

(二) 提出疑問？一個巢有幾隻獵物？如何把獵物運到巢內？以及幼蟲又是如何攝食獵物？

(三) 提出假設：我們提出壺蜂抓獵物的數量應該是隨機捕抓；利用大顎、六隻胸足夾住獵物，再把獵物運回巢內；以及幼蟲用吸食的方式吃獵物等假設。

### (四) 動手實驗：

#### 實驗 4-1 研究壺蜂『捕抓獵物的數量』與『育幼後代』的關係

步驟 1. 壺蜂捕抓多少獵物到巢內：採集了 91 個土巢，其中只有 14 個土巢內有完整的卵與獵物。計算與測量 14 個巢內的獵物數量、體長、體重，並飼養到成蟲。

步驟 2. 我們感到很疑惑，為何 14 個巢內的獵物有的多、有的少？是壺蜂隨機捕捉的數量嗎？還是有另外的意義？以下實驗進行求證。

(1) 生活史記錄：記錄 14 個不同巢內後代成長過程，一直到蛻變為成蟲為止。

(2) 給巢裡面增加獵物數量：『實驗組』將巢內 3 隻獵物增加到 6 隻，『對照組』維持原

來 3 隻獵物。實驗以熟齡幼蟲為例，6 個巢 27 隻獵物進行實驗。

- (3) **減少巢內的獵物數量**：『實驗組』將巢內 6 隻獵物移走 3 隻，『對照組』維持原來 6 隻獵物。實驗以熟齡幼蟲為例，6 個巢 27 隻獵物進行實驗。

#### 實驗 4-2 研究壺蜂『搬運獵物』『育幼後代』的行為

步驟 1. 利用攝影機拍攝壺蜂搬運獵物回巢的行為，直到抓獵物結束對巢封口。再打開巢，測量裡面的獵物體長、體重、擷取影片分析壺蜂搬運獵物的方式。

步驟 2. 根據步驟 1 壺蜂捕抓到的獵物大小分類，提出壺蜂搬運獵物可能出現的三種假設。

- (1) **假設一、壺蜂捕抓『與自己體長相等、體重相等』的獵物**：假設壺蜂與獵物的平均體長、體重都為 2.8cm、0.35g。
- (2) **假設二、壺蜂捕抓『比自己體長短，體重較輕』的獵物**：假設獵物平均體長、體重固定為 1.5cm、0.1g，壺蜂平均體長為 2.8cm、平均體重 0.35g。
- (3) **假設三、壺蜂捕抓『比自己體長還長、體重較重』的獵物**：假設獵物平均體長、體重固定為 3.85cm、0.4276g，壺蜂平均體長為 2.8cm、平均體重 0.35g。
- (4) 以上三個假設的施力位置，分別在大顎施力為  $F_1$ 、第一對胸足施力為  $F_2$ 、第二對胸足施力為  $F_3$ 、第三對胸足施力為  $F_4$ ，當  $F_1+F_2+F_3+F_4$ =假設之體重，且合力為 0。
- (5) 依獵物的支點而獲得各施力臂為： $a(F_1)+b(F_2)=c(F_3)+d(F_4)$ ，且合力矩為 0。
- (6) 當施力出現不為 0 的時候，從 1111(1：1：1：1)到 9999(9：9：9：9)之間，就會出現  $9 \times 9 \times 9 \times 9$  的 6561 筆施力的可能，因此我們必須從**第(5)點**找到  $F_1 \sim F_4$  的「施力總和」與「獵物重量」相等之比例，再依獵物的實際重量帶入[體重( $\frac{F_1 \sim F_4}{F_1+F_2+F_3+F_4}$ )]比例式中，逐一獲得  $F_1 \sim F_4$  的實際施力大小。

#### 實驗 4-3 壺蜂『延長獵物壽命的方法與後代攝食的方式』

步驟 1. 記錄有無麻痺獵物體長、體重，並進行獵物可能被延長壽命的三個實驗假設。(n=8)

步驟 2. **假設一、『獵物的血液循環』**可能影響獵物壽命：進行不同溫度下，獵物血液循環的變化，以及實驗組『有被麻痺』的獵物、對照組『無麻痺』的獵物，用  $V$ (血液流速

$) = \frac{x(\text{移動距離})}{t(\text{移動秒數})}$  公式進行計算，以 12 隻獵物，在沒有進食情況下，進行實驗。

步驟 3. **假設二、『抑制獵物的蛻變成長』**可能影響獵物壽命：實驗組『被抑制成長的獵物』、對照組『沒有被抑制成長的獵物』，測量體長、體重，以 23 隻獵物進行實驗。

步驟 4. **假設三、『獵物氣孔的打開』**可能延長獵物壽命：測量被麻痺的獵物初期、後期間的氣孔的變化，以 15 隻獵物進行實驗。

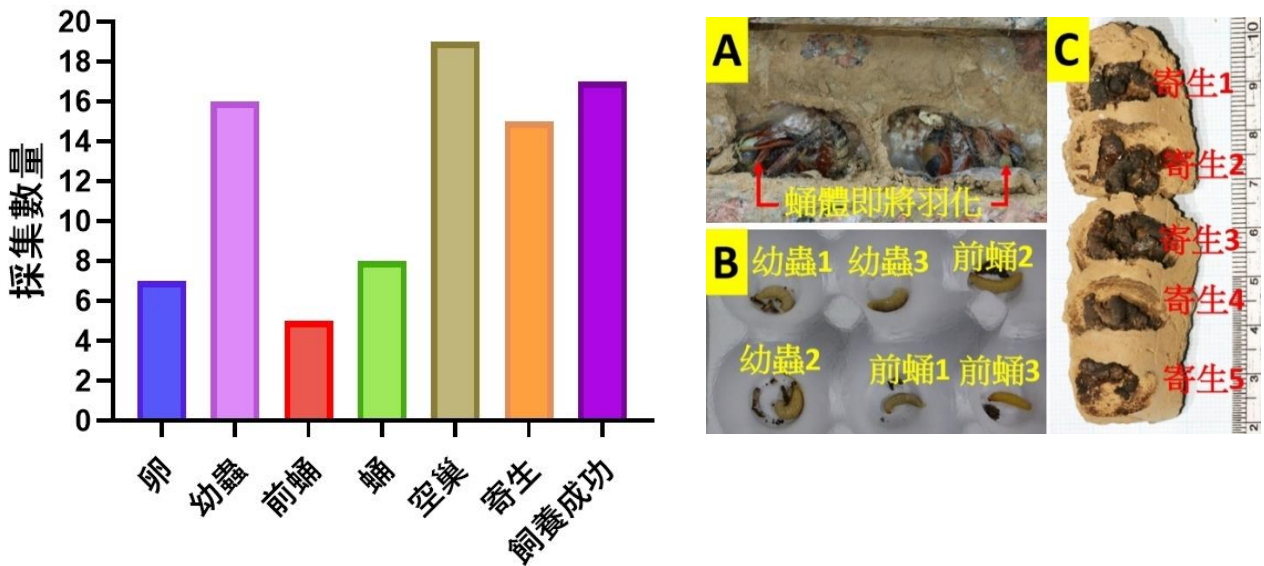
步驟 5. 壺蜂『後代攝食構造』與『獵物血液循環』之間的研究

- (1) **『後代的攝食構造』**：用顯微鏡 227x 觀察幼蟲攝食構造。
- (2) **『攝食與獵物間關係』**：不同階段的幼蟲後代攝食方法與獵物存活間的記錄。

## 陸、研究結果

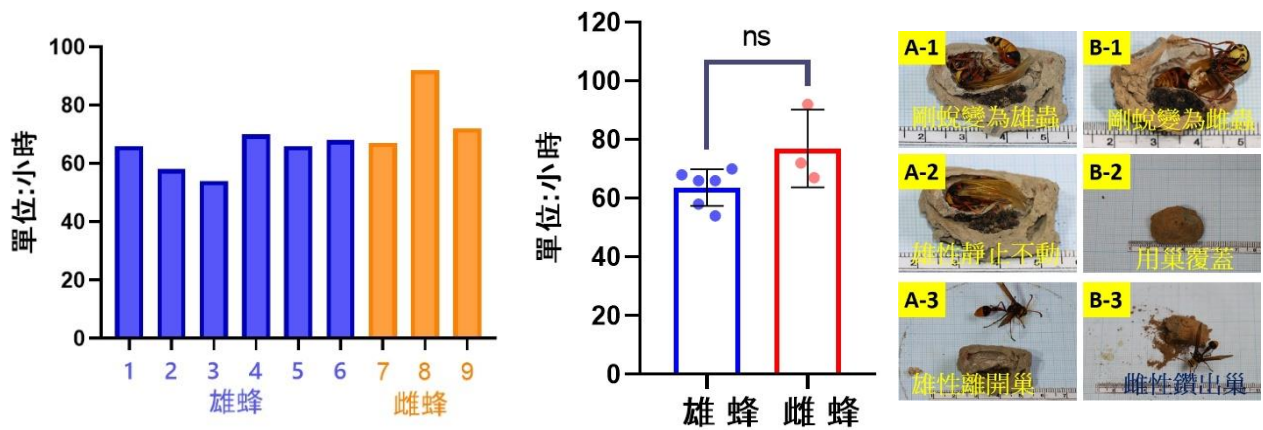
### 研究一、黃胸錐腹蜾蠃『成蟲交尾』的生殖行為之實驗結果

#### 1. 實驗 1-1-1 野外採集壺蜂的數量與飼養結果分析：



圖(5)採集到 7 粒卵、16 隻幼蟲、5 隻前蛹、8 隻蛹、19 個空巢與 15 個巢被寄生，最後飼養成功陸續蛻變成蟲，共有 17 隻。圖 A~C 分別是採集的蛹體、飼養與寄生的結果。

#### 2. 實驗 1-1-2 蛹體羽化成蟲後，性成熟平均時間與變化過程的結果與分析：



圖(6、7) 為雌雄壺蜂性成熟時間，雄壺蜂平均性成熟時間為  $63.7 \pm 5.7$  小時，而雌壺蜂平均性成熟時間則為  $77 \pm 10.8$  小時，因此雌雄蟲性成熟時間上沒有顯著性的差異。A-1~A-3 是雄蟲性成熟過程；B-1~B-3 是雌蟲性成熟過程。

#### 3. 實驗 1-2 黃胸錐腹蜾蠃『交尾』的結果分析：

依照雌雄成蟲交尾的行為過程，分析結果可將行為分成四個階段，分別是：第一階段抱接期→第二階段訊息傳遞期→第三階段摩擦求偶期→第四階段結合期。

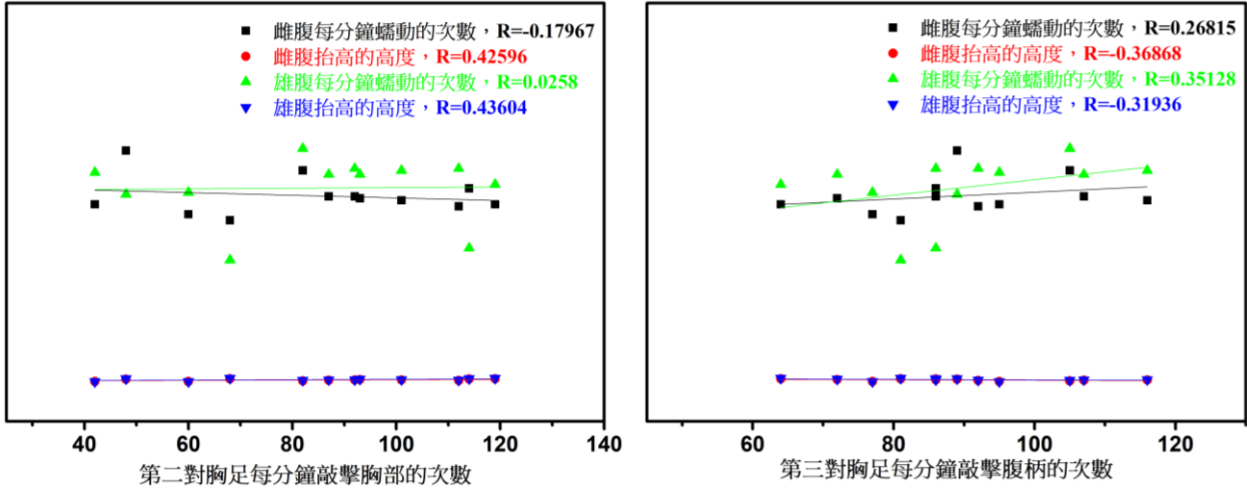
##### (1) 第一階段『抱接期』：

- ①『雄蟲做出』的動作：雌雄蟲腹部彎曲  $90^\circ \sim 360^\circ$  彎曲彼此纏繞在一起，最後雄蟲轉身跳到雌蟲身上，緊緊抱住雌蟲，身體呈 1 字型。

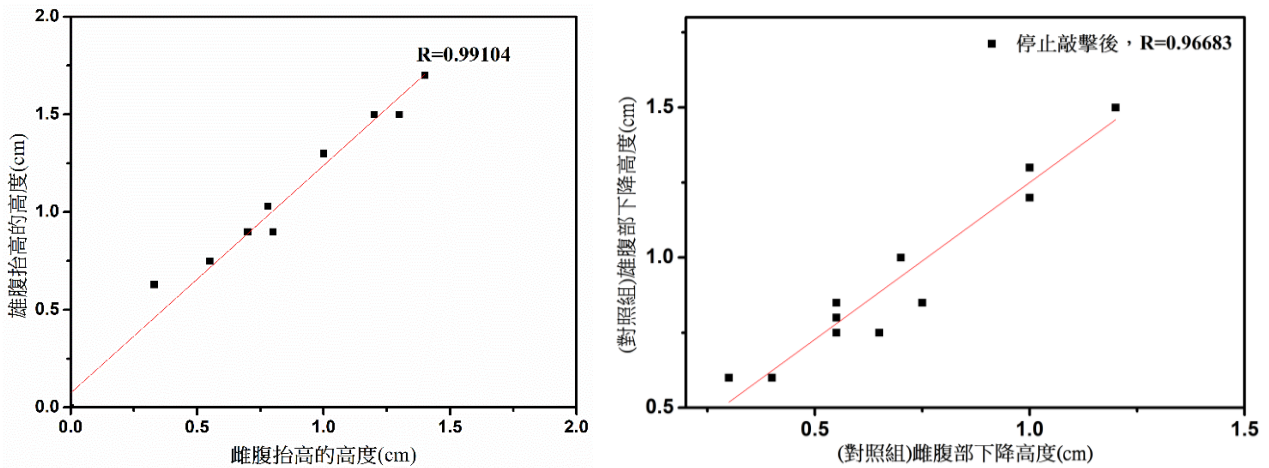
② 『雌蟲回應』的動作：雌蟲腹部也跟著雄蟲彎曲、腹柄以 360°彎曲倒躺姿態、最後雌蟲背起雄蟲重疊在一起，也呈 1 字型，並背著雄蟲四處走動。

(2) 第二階段『訊息傳遞期』：

『雌雄個體』間彼此訊息的傳遞：雄蟲利用第二、三對胸足的腿節、脛節、跗節等，緩慢輕輕地敲擊雌蟲胸部與腹柄，當雌蟲接受到雄蟲的訊息，腹部會緩慢蠕動再抬高，這時雄蟲腹部也跟著蠕動與抬高，並移到側邊，雌雄 2 者的腹部呈現 X 型交叉狀態。



圖(8、9)當雄蟲的第二、三對胸足敲擊雌蟲『胸部』與『腹柄』時，雌蟲的腹部蠕動與抬高的行為，雖然只有低度或中度相關而已，但還是能顯示『雄蟲對雌蟲的敲擊行為』，有緩慢的訊息在相互傳遞中。



圖(10、11)當雌蟲受到『敲擊』與『中斷敲擊』的訊息，雌雄蟲皆抬高或放下，兩者間具有 0.991、0.966 的高度相關性，顯示雌雄蟲都有接受到彼此的訊息。如下圖 A、B、C。

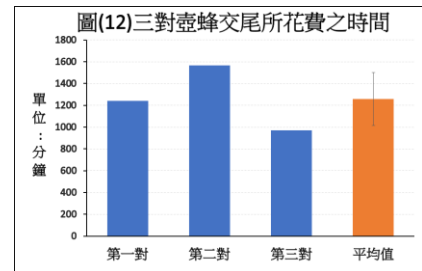
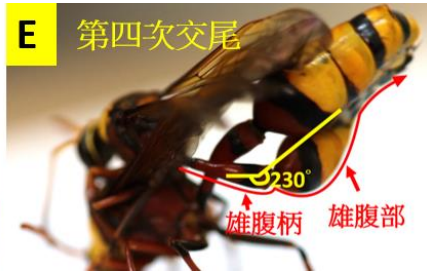


(3) 第三階段『摩擦求偶期』：

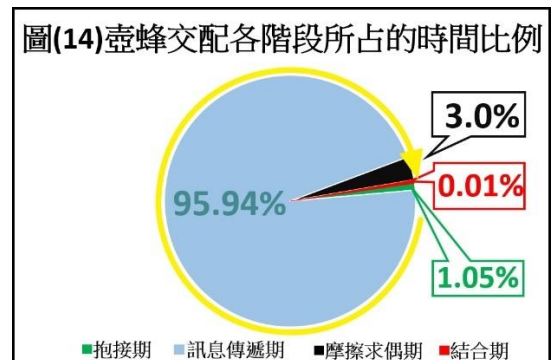
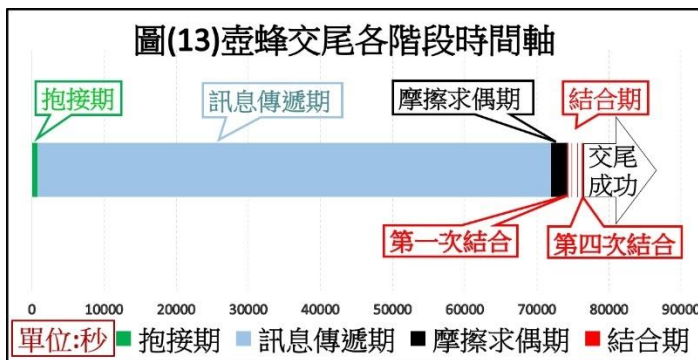
- ①『雄蟲做出』的動作：雄蟲大顎夾住雌蟲頭胸體節、觸角直立還會不時去鉤雌蟲觸角、翅膀劇烈抖動、腹部快速摩擦雌蟲腹部，左右騰空擺動 180°，跳出求偶動作圖 D。
- ②『雌蟲回應』的動作：站立低頭、腹部抬高、身體微微抖動。

(4) 第四階段『結合期』：

- ①『雄蟲做出』的動作：腹部從上往下不斷敲擊雌蟲腹背，並無預警朝雌蟲腹部由下往上頂 2、2、2、5 秒，進行四次共 11 秒腹部結合的動作。
- ②『雌蟲回應』的動作：雌蟲的腹部被雄蟲以腹部頂住高舉在 40°~50°之間，停留 5 秒結合動作，雙方腹部放下，完成交尾行為，平均花費 1259.3±242.9min，如圖 E、(12)。



(5) 四個交尾過程時間結果：

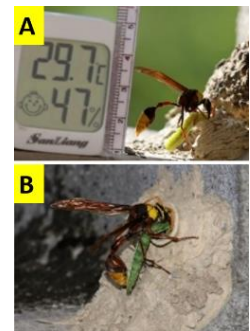
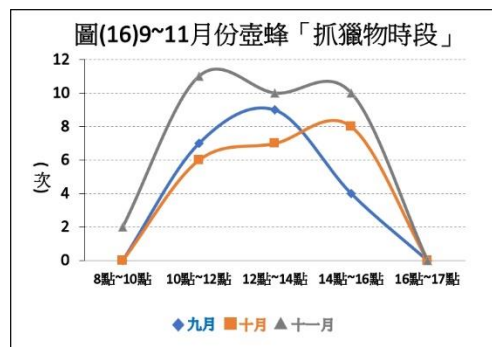
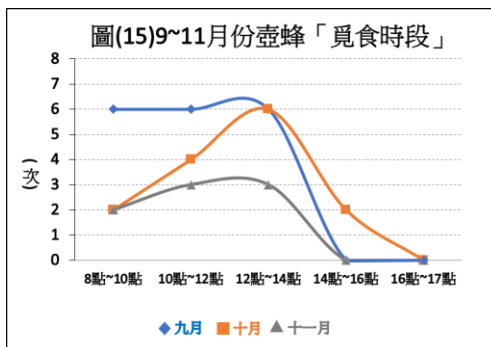


圖(13、14)壺蜂交尾過程，訊息傳遞期時間最長佔 95.94%、而結合期只佔了短短的 0.01%。

研究二、探討黃胸錐腹蜾蠃『做巢環境』對後代成長的影響之實驗結果

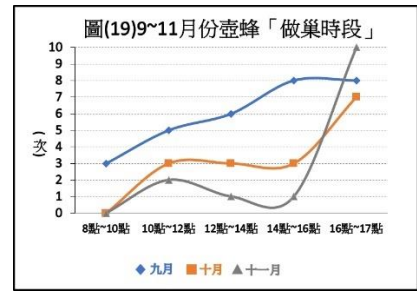
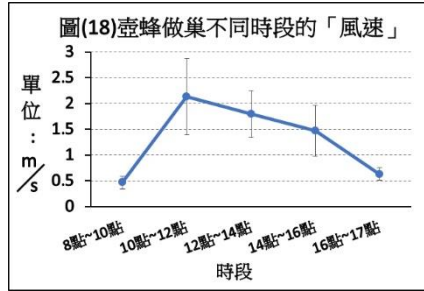
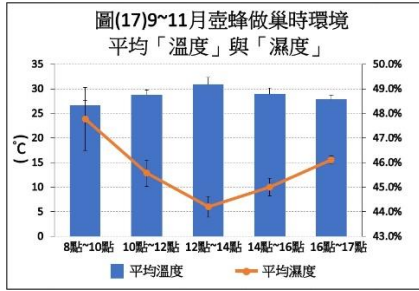
1. 實驗 2-1-1 壺蜂『做巢環境』的結果分析：

(1) 壺蜂『覓食與抓獵物』時段的結果：



圖(15、16)12~14 點為主要覓食時段，而 10~14 點為抓獵物主要時段，圖 A、B 抓獵物進巢。

(2) 壺蜂『做巢環境的溫溼度、風速』的結果：



圖(17~19)壺蜂最常在溫度  $30.9 \pm 0.16^{\circ}\text{C}$ 、濕度  $44.2 \pm 0.004\text{RH}$ 、 $1.8 \pm 0.45\text{m/s}$  的風速下做巢。

實驗結果與疑問？

上述的研究我們持續了 3 個多月，也用了許多儀器測出數據，但是並沒有特別的發現，獲得的結果，還是跟前人所研究的壺蜂喜歡在半遮蔽或牆角環境中做巢相似(林，2019；黃，2017；戴，2013)。對於這樣的結果，我們心裡充滿疑問，也不斷反覆思考，到底是什麼原因讓壺蜂喜歡在半遮蔽的地方做巢？而『不喜歡在無遮蔽的日照環境下做巢』？

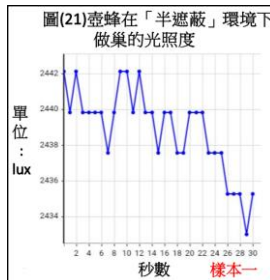
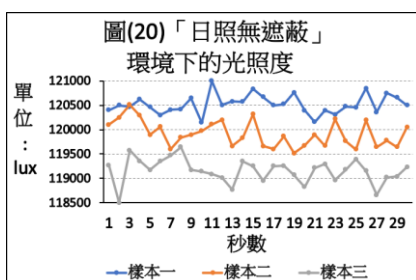
因此再次實驗，解決疑問？

提出新假設：無遮蔽的環境可能『不利於壺蜂後代的生存』？所以壺蜂不喜歡在此處做巢。

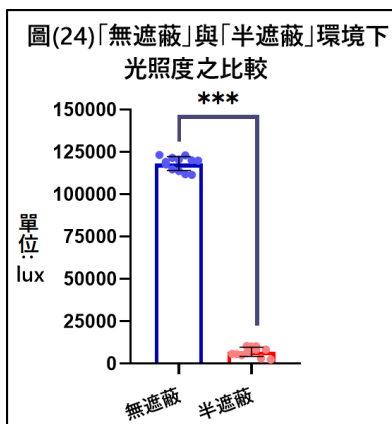
步驟 1. 無、半遮蔽巢『對獵物』的影響：做一個可以調節調  $22 \pm 1 \sim 32 \pm 1^{\circ}\text{C}$  的溫室環境，用光譜儀測量照度，取 3 隻被麻痺獵物放置在不同溫度下，記錄『獵物保存的期限』。

步驟 2. 無、半遮蔽巢『對後代』的影響：每次 5cc 的水，滴在無遮蔽與半遮蔽下的巢。

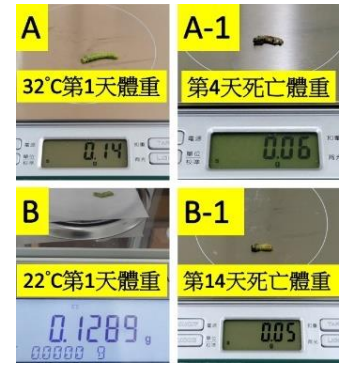
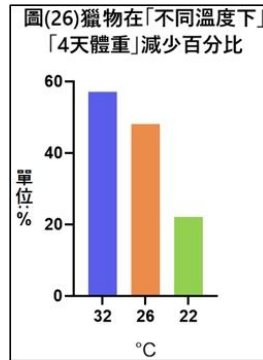
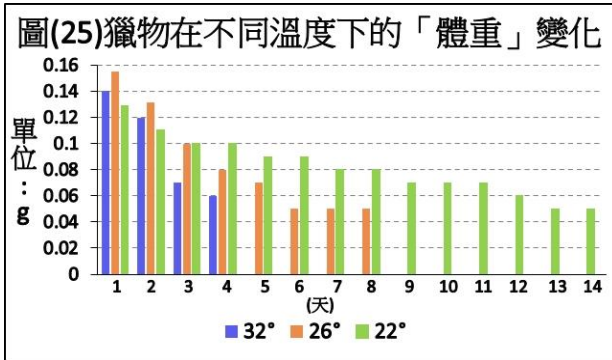
再次實驗的結果：



圖(20)無遮蔽環境下光照度範圍約從  $119642.55\text{lux} \sim 120998.63\text{lux}$ ；圖(21~23)半遮蔽環境下做巢的光照度範圍則約從  $2442.1\text{lux} \sim 5130.24\text{lux}$ ，(n=6 每個樣本重複三次實驗)

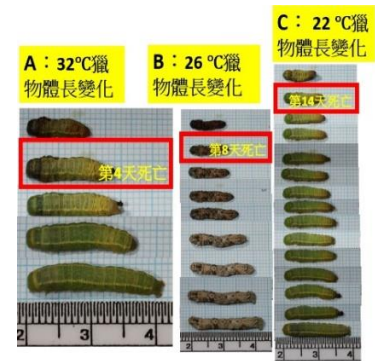
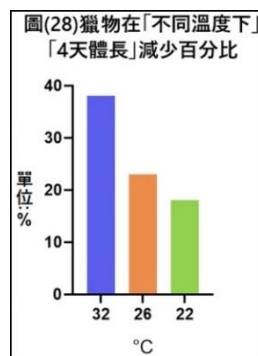
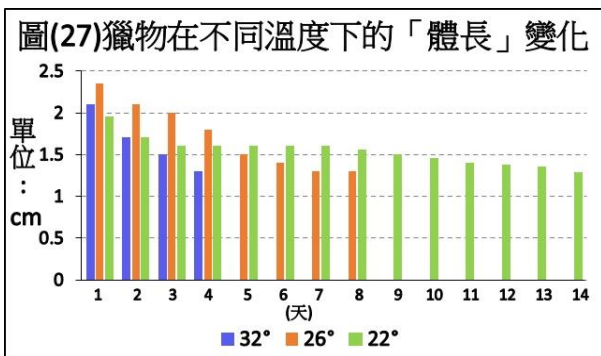


圖(24)無遮蔽與半遮蔽環境，平均光照分別約為  $118139.6 \pm 3942.5\text{lux}$  與  $3563.68 \pm 1141.6\text{lux}$ ， $p < *** 0.001$  有非常顯著的差異。圖 A~F 是在進行半遮蔽環境下，測量光照的土巢圖照。

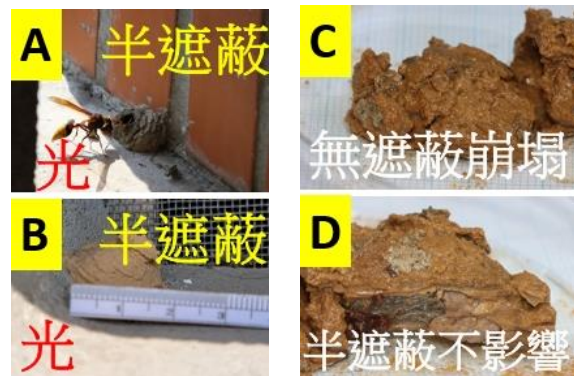
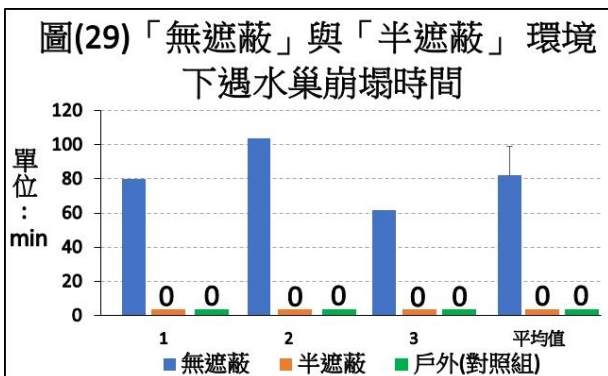


圖(25)獵物在 32°C 的環境下第 4 天就死亡，體重從 0.14g 剩下 0.06g；在 26°C 下第 8 天死亡，體重從 0.15g 剩下 0.05g；在 22°C 下第 14 天死亡，體重從 0.1289g 剩下 0.05g。

圖(26) 32°C~22°C 不同溫度下，體重分別減少 57%、48%、22%。圖 A~B-1 為體重變化量。



圖(27)獵物在 32°C 的環境下第 4 天就死亡，體長從 2.1cm 縮短成 1.3cm；在 26°C 下第 8 天死亡，體長從 2.35cm 縮短成 1.3cm；在 22°C 下第 14 天才死亡，體長從 1.95cm 縮短成 1.3 cm。圖(28) 32°C~22°C 不同溫度下，體長分別減少 38%、23%、18%。圖 A~C 為體長變化量。

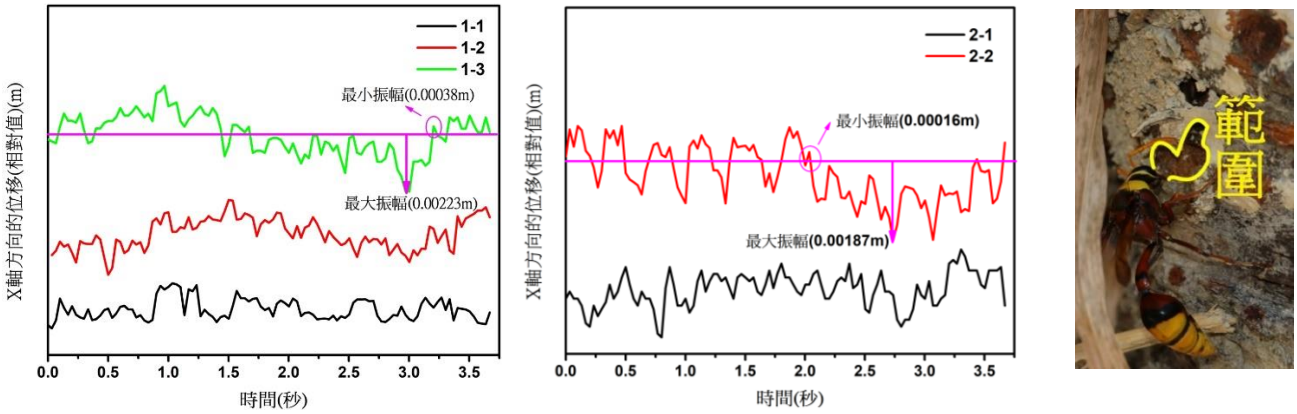


圖(29) 在無遮蔽的環境下遇水，巢平均 82±17.2min 崩塌，半遮蔽的環境，巢不會直接遇到雨水，所以不會立刻崩塌。圖 A、B 壺蜂在半遮蔽下做巢；圖 C、D 土巢崩塌的實驗結果。

**結論：**壺蜂喜歡選擇在半遮蔽的環境下做巢，原因有三：(1)半遮蔽環境平均光照在 7013.4 lux 且溫度較適宜，但在無遮蔽日照光照強平均在 118139.6 lux、溫度又高。(2)獵物在半遮蔽環境可活 8 天才死亡，但在無遮蔽環境下，獵物第 4 天即死亡，因此半遮蔽的環境，較有利獵物的保存。(3)半遮蔽下的巢不會直接遇到雨水，巢沒有立即崩塌危機，而無遮蔽下的巢一旦遇到雨水即崩塌，所以半遮蔽環境較沒有空間被破壞問題，較有利於後代的生存。

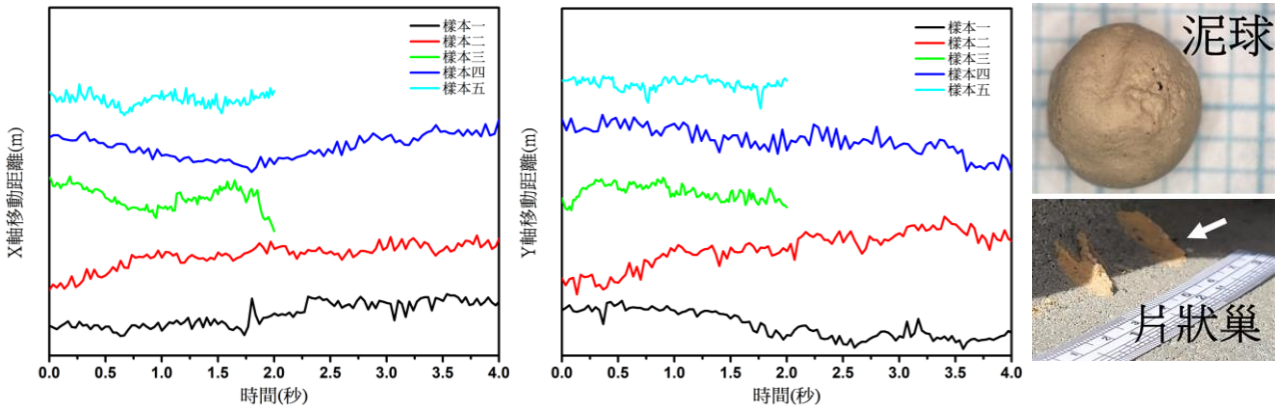


2. (1) 實驗 2-2-1 壺蜂如何把『泥土』做成『泥球』狀，的結果分析：

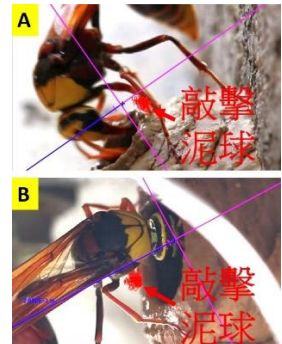
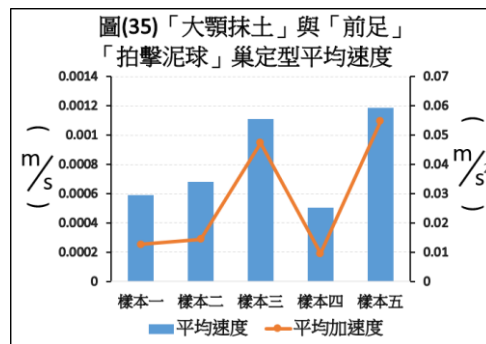


圖(30、31)當壺蜂體內口器排出水並流入土裡後，就開始進行挖土的動作，依 X 軸移動的方向位移判定，它雖然不是一個單一直線移動方向，但因為大顎挖土的範圍集中在大顎或頭部兩側附近範圍而已，所以移動震幅很小，大約只有 0.00038~0.00223m。

(2) 實驗 2-2-2 壺蜂如何把『泥球』做成『土巢』，的結果分析：



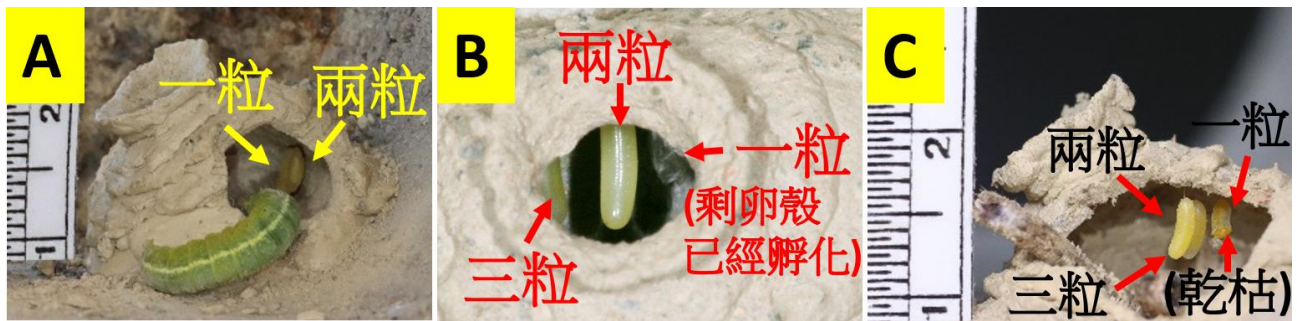
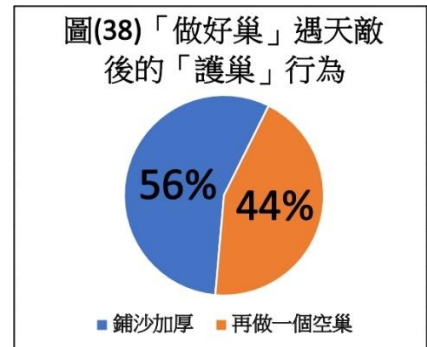
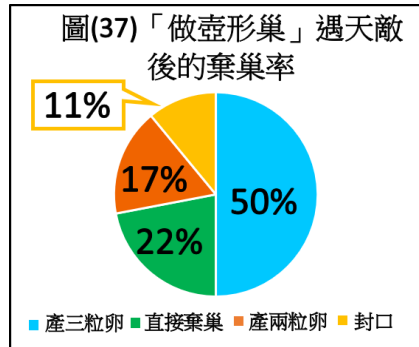
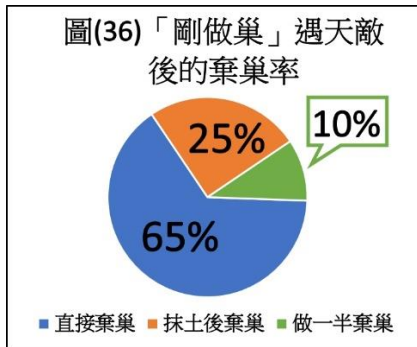
圖(32、33)大顎與前足的拍打速度很快，移動頻率震幅更小，約在 0.00023m 以下，而且多集中在泥球之上，使得橢圓泥球被快速拍打成片狀巢、再一片片慢慢疊起，最後『巢定型』成為壺狀巢室。



圖(34)大顎挖土做泥球平均速度是  $0.009 \pm 1.3 \text{ m/s}$ ，平均加速度是  $0.19 \pm 2.96 \text{ m/s}^2$ ，能使泥土變成泥球。圖(35)大顎抹土與前足拍打泥球平均速度是  $0.0008 \pm 0.0003 \text{ m/s}$ ，平均加速度是  $0.03 \pm 0.02 \text{ m/s}^2$ ，能使泥球變成土巢。圖 A、B 是大顎與前足快速拍打泥球，製作巢口的圖照。

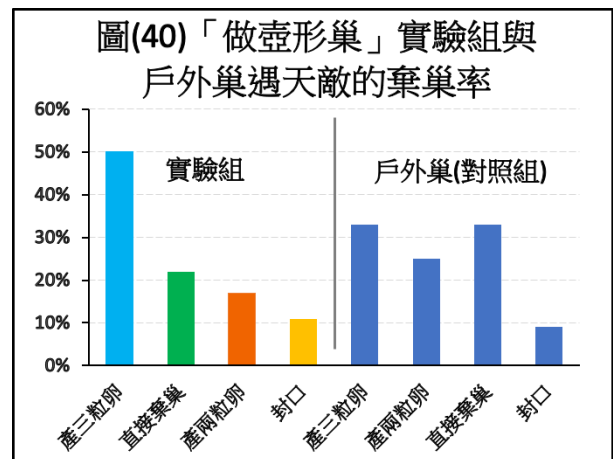
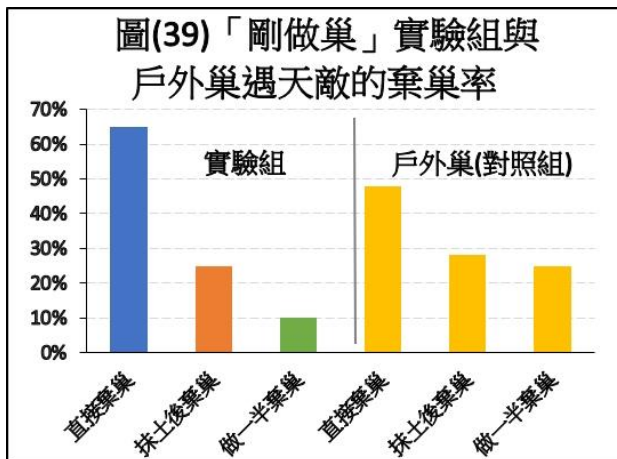
3.實驗 2-3 壺蜂做巢期間『遇到天敵』，出現的行為之實驗結果分析：

(1) 實驗 2-3-1 壺蜂『剛做巢、做成壺形巢、做好巢』遇到天敵的行為，實驗結果分析：

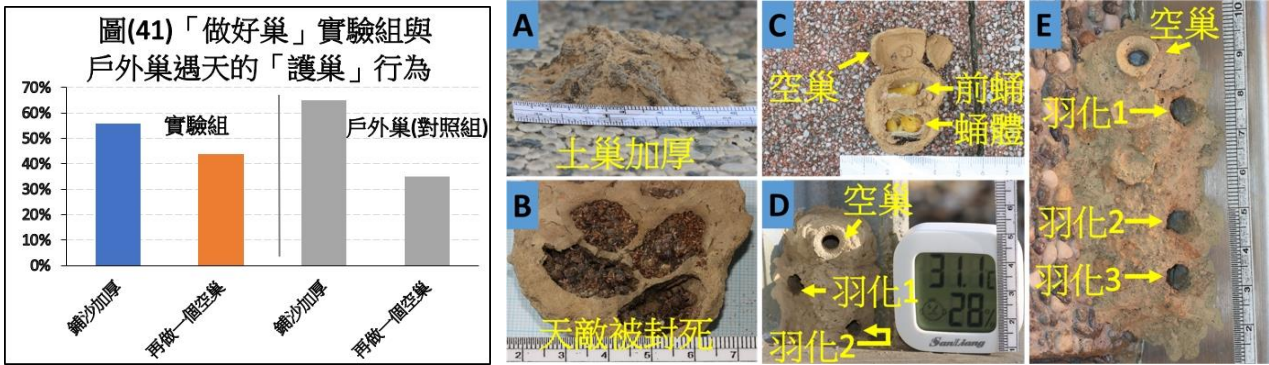


圖(36)剛做巢的壺蜂遇到天敵干擾，會做出 3 種棄巢的行為。圖(37)當壺蜂做成壺形巢時，竟有 67%會產下 2~3 粒的卵再棄巢，如下圖 A、B、C。圖(38)當巢已經做好才遇到天敵，有 56%會持續鋪沙，把巢再做厚一點或有 44%再做一個空巢偽裝，以提高後代生存機會。

(2) 實驗 2-3-2 壺蜂做巢遇到天敵，『實驗組與戶外巢』的實驗結果分析：



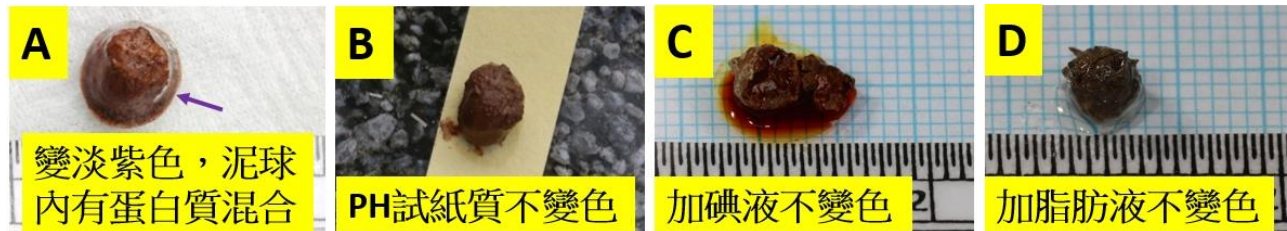
圖(39)實驗組與戶外對照組的實驗結果，棄巢率都是直接棄巢 > 抹土後棄巢 > 做一半棄巢。圖(40)實驗組與戶外對照組的實驗結果，棄巢率都是產三粒卵棄巢 > 直接棄巢 > 產兩粒卵棄巢 > 封口後棄巢。圖 A、B 天敵干擾巢穴實驗操作。圖 C~E 天敵干擾後，壺蜂做巢的結果。



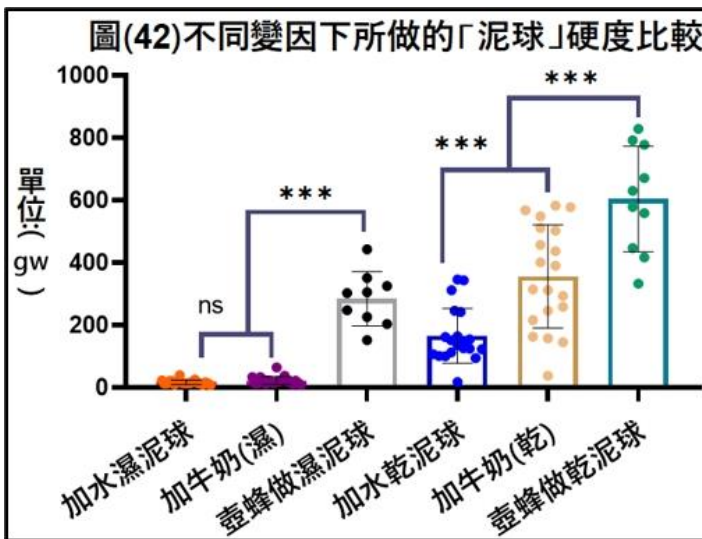
圖(41)實驗組與對照組結果相似，分別有 56%、65%會加厚土巢，企圖把天敵封死在裡面。且分別有 44%及 35%會再做一個空巢欺敵，如圖 A~E 證實土巢若有天敵入侵，壺蜂把巢加厚、或做一個假巢欺敵，讓下方巢內的後代能夠順利成長到羽化為成蟲的圖照實驗結果。

#### 4. 實驗 2-4 『壺蜂做的巢有多堅固』，實驗結果分析：

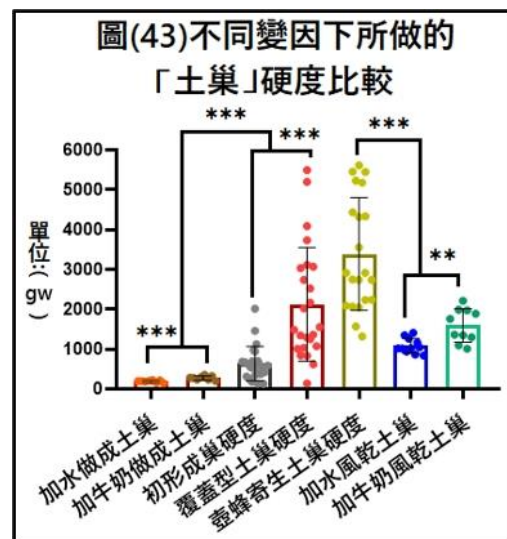
(1) 實驗 2-4-1 壺蜂泥球的初步成分測試結果，證實泥球內有微量蛋白質的存在。



(2) 實驗 2-4-2 壺蜂做的『泥球』有多硬，結果分析：

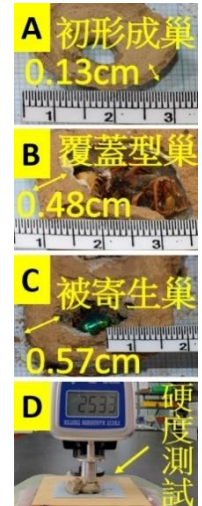
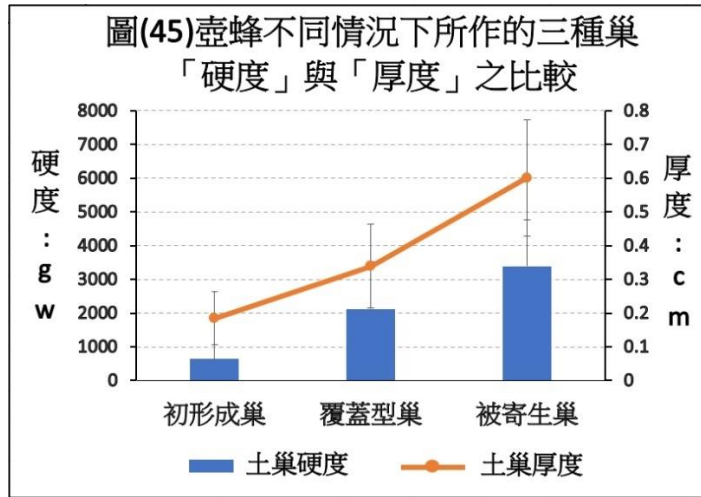
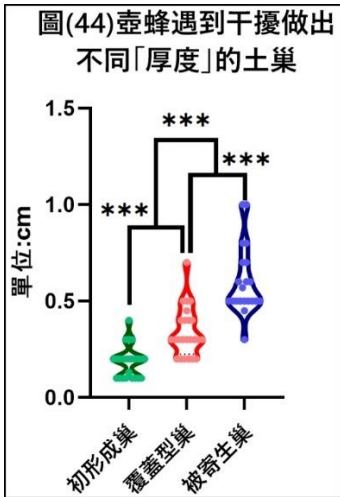


圖(42)壺蜂濕泥球平均硬度是  $284.1 \pm 8 \text{gw}$ 、壺蜂乾泥球硬度是  $603.5 \pm 160.3 \text{gw}$ 。所以不管是水或牛奶等添加物做成的泥球，變乾之後的硬度變大，而且  $p < *** 0.001$  有非常顯著的差異( $n=99$ )。



圖(43)壺蜂初形成巢硬度是  $633.5 \pm 422.5 \text{gw}$ 、覆蓋型巢硬度是  $2124 \pm 1398.6 \text{gw}$ 、被寄生巢硬度是  $3388.2 \pm 1381.8 \text{gw}$ 。所以不管是水、牛奶或壺蜂大顎吐出水等做成的土巢，一旦乾了之後巢的硬度變硬， $p < *** 0.001$  有非常顯著性的差異( $n=106$ )。

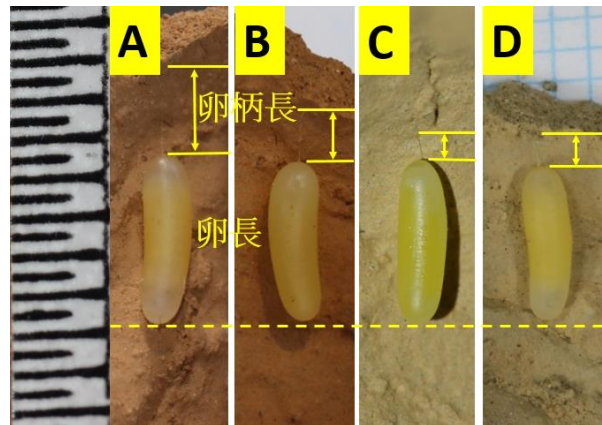
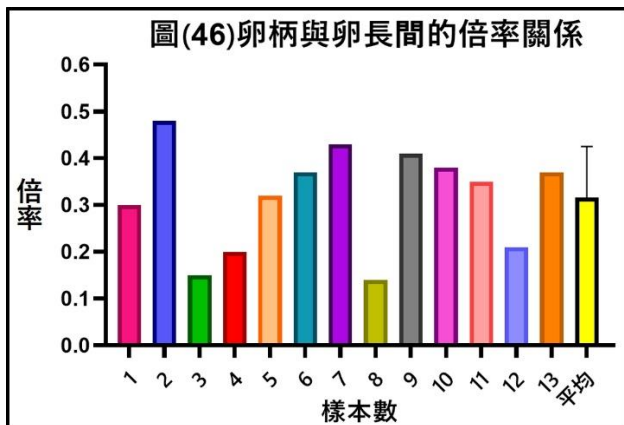
(3) 實驗 2-4-3 壺蜂做的『土巢厚度與硬度』，結果分析：



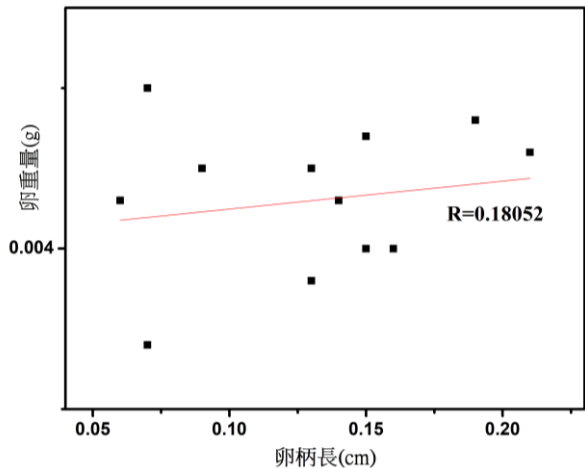
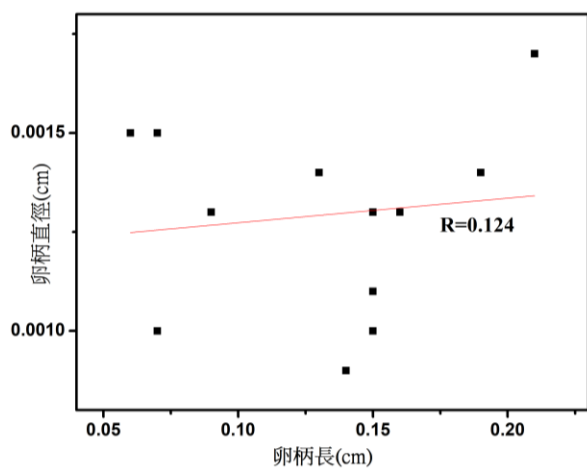
圖(44、45)初形成巢與被寄生巢的厚度與硬度分別平均為  $0.18 \pm 0.08 \text{cm}$ 、 $633.5 \pm 422.5 \text{gw}$  與  $0.6 \pm 0.17 \text{cm}$ 、 $3388.2 \pm 1381.8 \text{gw}$ 。所以做巢中的壺蜂遇到天敵的干擾，會把巢越做越厚，不同類型厚度的巢  $p < *** 0.001$  有非常顯著的差異( $n=69$ )。圖 A~D 為不同類型的巢與測試結果。

研究三、黃胸錐腹蜾蠃『產卵行為』對卵孵化的影響之實驗結果

1. 實驗 3-1 研究『卵』與『卵柄』之間的相關性，結果分析：

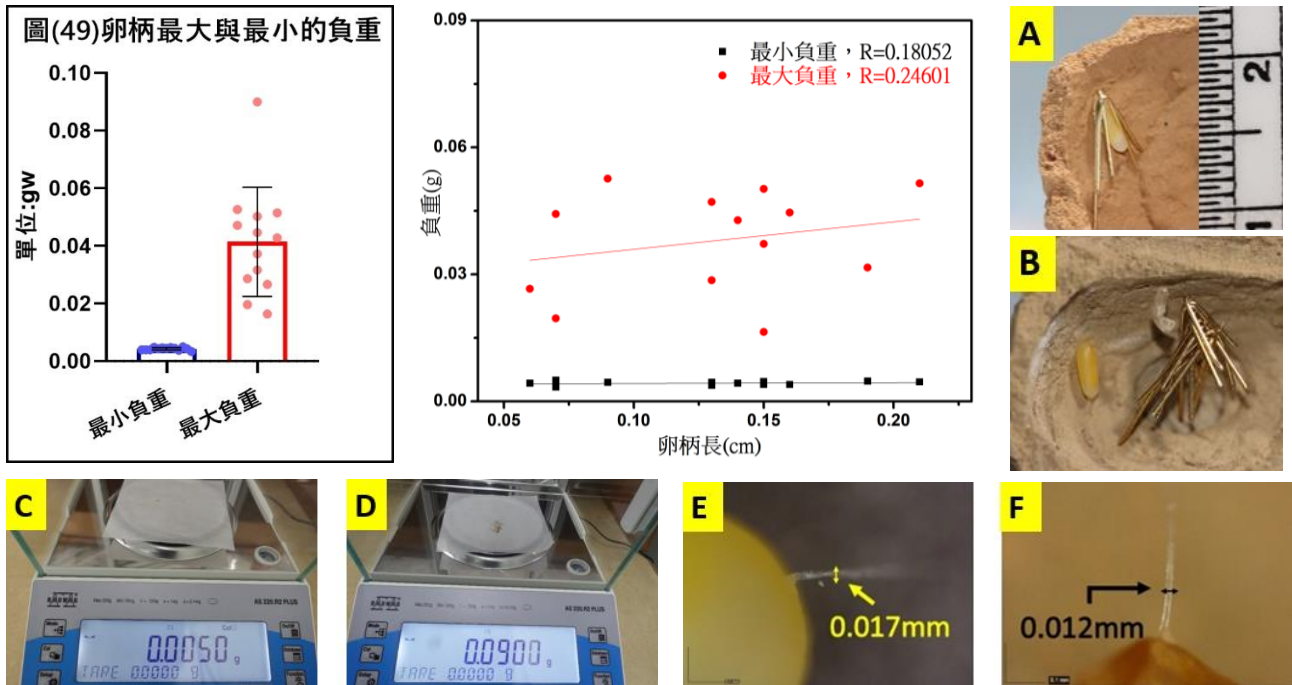


圖(46)卵柄長度平均只有卵長的  $0.32 \pm 0.11$  倍；圖 A 卵柄  $0.23 \text{cm}$ 、卵長  $0.44 \text{cm}$ ；圖 B 卵柄  $0.13 \text{cm}$ 、卵長  $0.41 \text{cm}$ ；圖 C 卵柄  $0.07 \text{cm}$ 、卵長  $0.42 \text{cm}$ ；圖 D 卵柄  $0.078 \text{cm}$ 、卵長  $0.39 \text{cm}$ 。



圖(47) 卵柄長與直徑之間 R 值為 0.12，屬低度相關，顯示並非卵柄越長，卵柄直徑越大。  
 圖(48) 卵柄長與卵重之間 R 值為 0.18，屬低度相關，顯示卵柄長與卵重之間關係不大。  
 因此判斷卵柄的長短，可能是雌蜂隨機所產下。

## 2. 實驗 3-2 研究『卵柄』的負重，結果分析：

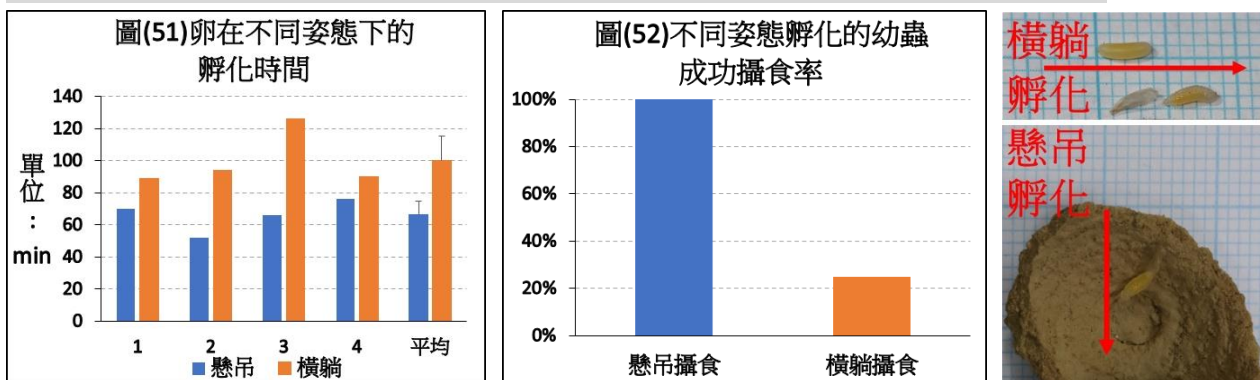


圖(49)卵柄最大平均負重是  $0.041 \pm 0.018$  gw；最小平均負重是  $0.0043 \pm 0.0004$  gw。

圖(50)卵柄長度與負重之間 R 值為 0.24，屬於低度相關。因此我們推測可能是因為卵柄沒有彈性，所以負重與長短沒有直接關係，第二次證實，卵柄的長度是雌蜂隨機所產下。

圖 A、B 卵柄負重操作過程；圖 C、D 卵柄掉落後的秤重結果；圖 E、F 卵柄直徑大小圖照。

## 3. 實驗 3-3 研究懸吊姿態的卵與『孵化率』、『剛孵化幼蟲攝食』，結果分析：



圖(51、52)卵在懸吊姿態下平均孵化時間為  $66 \pm 8.8$  min，攝食率為 100%；而橫躺下平均孵化時間為  $99.75 \pm 15.3$  min，成功攝食率只有 25%，因此懸吊姿態有助提高卵的孵化與攝食率。

實驗的結果與疑問？

上述三個實驗後，我們產生了一個疑問？因為我們看到壺蜂產卵後馬上就飛離了土巢，此時巢口還呈開著狀態，無其他防護措施，巢口在這樣大開情況下，會不會給卵帶來危險？

**再次實驗，解決疑問？**

提出新假設：卵柄能承受環境的變化，護住在巢內被懸吊的卵，使卵不易掉落而死亡。

**步驟 1. 『巢外』環境改變：**利用燈罩模擬壺蜂巢，輕黏土、釣魚線分別做成卵與卵柄。用軟風(0.3~1.5m/s)、輕風(1.6~3.3m/s)、微風(3.4~5.4m/s)、和風(5.5~7.9m/s)吹向土巢，改變環境同時記錄巢內的變化，重複進行三次實驗。

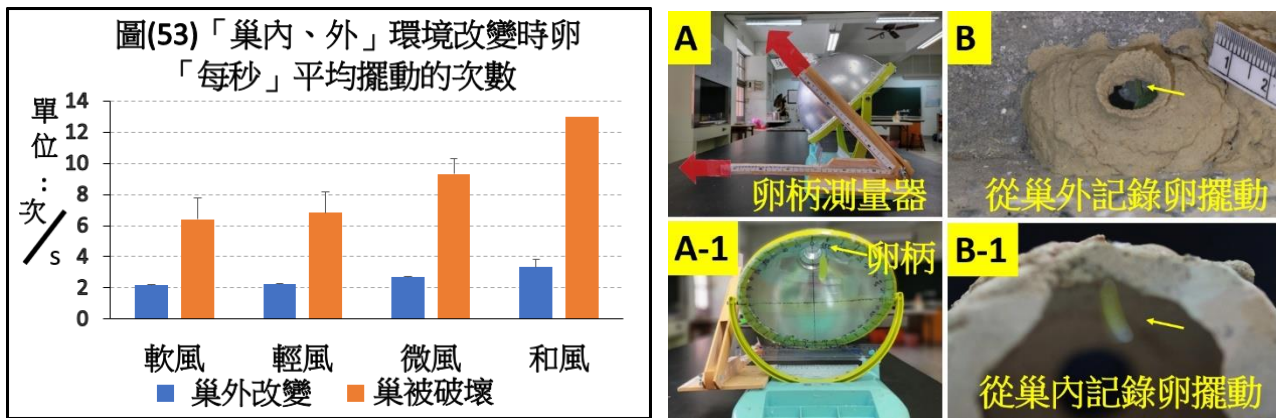
**步驟 2. 『巢內』環境改變：**當『巢被打破』後，接受不同風速，以 7 個巢被打破為實驗。

**步驟 3. 求『衝量值』：**當卵受外力影響，用  $mg \times \frac{t}{2}$  公式，求卵柄的張力對卵做的衝量值。

**步驟 4. 求『向心力』：**當卵受外力影響，帶入  $F_c = M \times \frac{V^2}{r}$  (M 質量、r 擺長、V 為速度) 公式，求卵受外力影響，卵柄拉回卵，不讓卵以直線飛離的向心力，重複進行三次實驗。

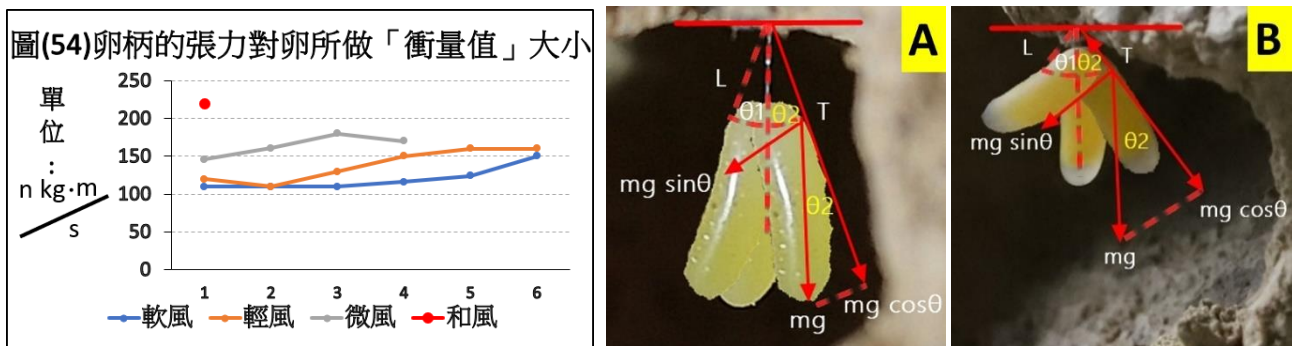
**再次實驗的結果**

**(1) 巢周邊『環境改變』後，結果分析：**



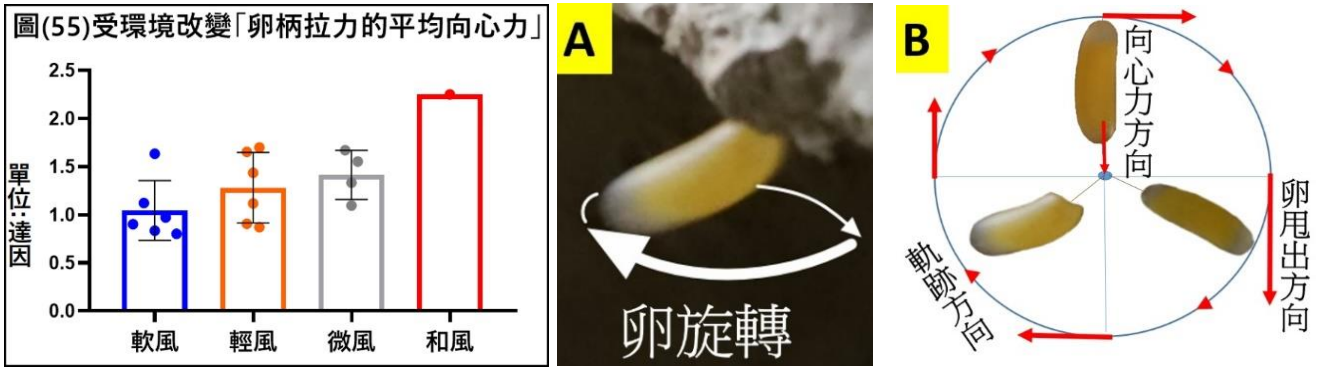
圖(53)巢被破不同的風速吹向卵，導致卵平均搖晃次數為  $6.4 \pm 1.36$  次/s~ $9.3 \pm 0.94$  次/s，卵仍然沒有掉下來，但處於 5.5~7.9m/s 的和風環境下，卵搖晃約 13 次/s 時卵柄剝落，卵掉下來了(n=7)。圖 A、A-1 設計土巢，模擬卵遇環境改變後的變化；圖 B、B-1 打開土巢進行實驗。

**(2) 卵柄的張力對卵所做『衝量值』大小的結果分析：**



圖(54) 軟風、輕風、微風平均衝量值為  $120 \pm 14.3$ 、 $138.3 \pm 19.5$ 、 $164.3 \pm 12.5$  nkg.m/s。因此當衝量越大，卵搖晃時間越長，要停下來時間也較長，但是當衝量值到達 220nkg.m/s，卵柄會從泥壁上剝落，卵掉下來(n=7)。圖 A、B 是軟、微風卵柄的張力對卵所做衝量值圖照。

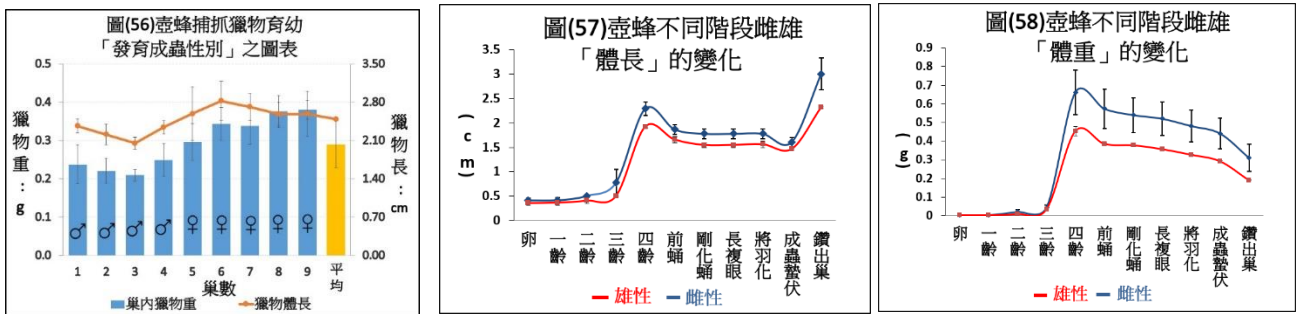
(3) 受到環境改變『卵柄拉住卵的向心力』：



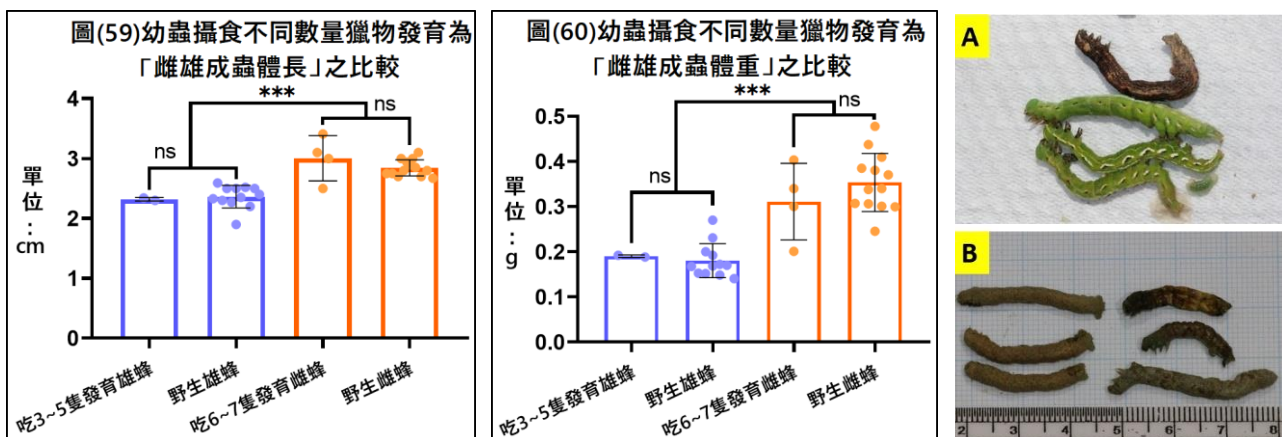
研究四、黃胸錐腹螺贏『育幼後代』的行為實驗結果

1. 實驗 4-1 壺蜂『捕抓獵物的數量』與『育幼後代』的結果分析

14 個巢中有 9 個飼養成功，並發現獵物的數量與後代雌雄性別有關，而不是隨機捕抓。



圖(56)1~4 巢內有 3~5 隻獵物，飼養後發育為雄性。5~9 巢內有 6~7 隻獵物，皆發育為雌性。圖(57、58)為雌雄個體從卵飼養到成蟲，各階段體長與體重的記錄與變化。



圖(59、60)顯示壺蜂的幼蟲在吃完 3~5 隻或 6~7 隻的獵物後，直到蛻變為雌雄性成蟲與野生的雌雄性成蟲的體長與體重都沒有顯著性差異。但是雌雄的體長與體重之間  $p < *** 0.001$  都具有非常顯著的差異(n=45)，代表壺蜂所捕抓的獵物數量、體長、體重等因素，都會影響日後後代性別的發育。

表一、「獵物數量影響壺蜂雌雄性別」實驗結果

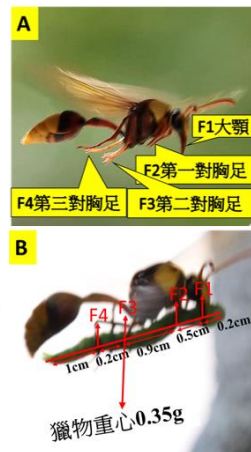
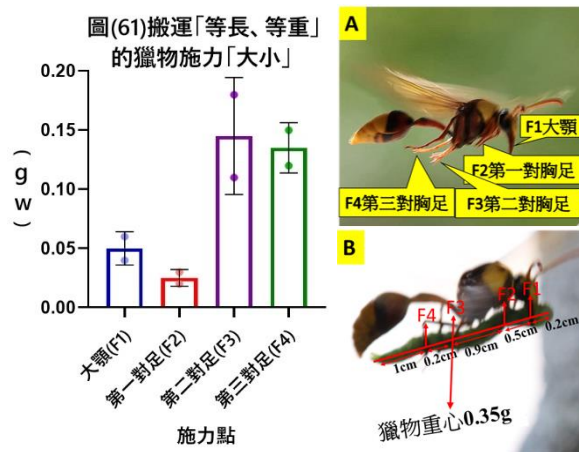
多的獵物壺蜂幼蟲並沒有再攝食，最後仍發育為雄性壺蜂。食物量不足的壺蜂幼蟲會死亡，但維持 6 隻獵物的幼蟲，仍維持發育為雌性 (n=54)。再次證實壺蜂產下卵之後，就知道未來要發育為哪一種性別的成蟲，而捕捉不同數量或大小的獵物。

	增加獵物實驗		減少獵物實驗	
	實驗組	對照組	實驗組	對照組
獵物數	3+3 隻	維持 3 隻	6-3 隻	維持 6 隻
發育性別	雄性	雄性	死亡	雌性

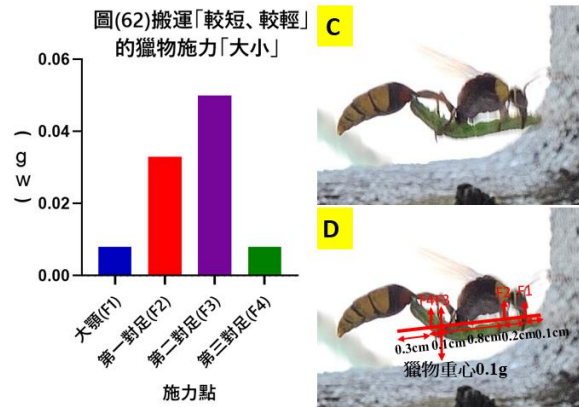


圖(A)不同階段幼蟲型態；圖(B)增加食物量；圖(C)減少食物量。

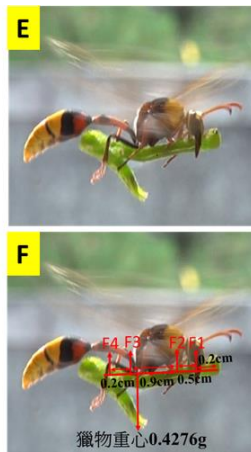
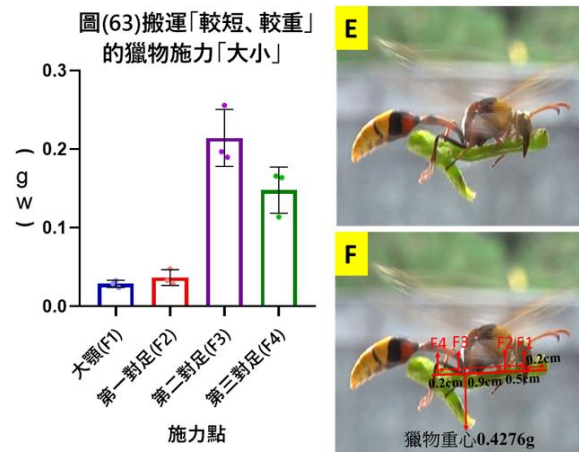
2. 實驗 4-2、壺蜂「搬運獵物」「育幼後代」的行為，結果分析：



圖(61、B)壺蜂在搬運**等長、等重**獵物時，F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>等構造上有『**2種**』施力方式，對獵物平均施力分別為 0.05±0.01gw、0.025±0.005gw、0.145±0.04gw、0.135±0.02gw，以力臂長短來判斷，**第二對胸足施力較大**。  
圖(B)此類型運送獵物方式，各施力點(獵物頭部~F<sub>1</sub>：F<sub>1</sub>~F<sub>2</sub>：F<sub>2</sub>~F<sub>3</sub>：F<sub>3</sub>~F<sub>4</sub>：F<sub>4</sub>~獵物末端)的距離比為 2：5：9：2：10。



圖(62)壺蜂在搬運**較短、較輕**獵物時，F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>等構造上只有『**1種**』施力方式，對獵物的施力為 0.008gw、0.033gw、0.05gw、0.008 gw，當四力的合力矩為零時，則以**第二對胸足施力較大**。  
圖(C)壺蜂飛行時運送較短、較輕獵物過程。  
圖(D)各施力點的距離比為 1：2：8：1：3。

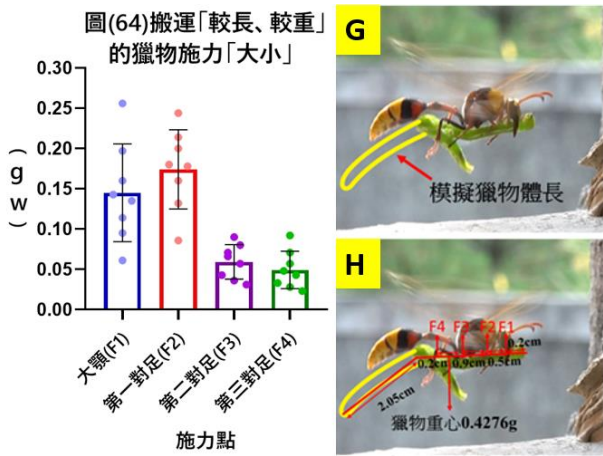


圖(63)我們當時假設壺蜂搬運**較長、較重**獵物，卻意外發現**壺蜂竟將獵物身體由後往前折彎約 1/3 長度再運送**，因此將此種搬運方式，『**重新定義搬運較短、較重**』的獵物。圖(E)當獵物從被折彎後，F<sub>1</sub>~F<sub>4</sub>等構造上有『**3種**』的施力方式，對獵物的平均施力為 0.029±0.004gw、0.037±0.008gw、0.214±0.03gw、0.148±0.02gw。**第二對胸足施力較大、大顎施力最小**。  
圖(F)各施力點的距離比為 2：5：9：2。



### 3. 如果壺蜂沒有把獵物的身體折彎，牠還能夠順利把獵物搬運回巢嗎？

- (1)我們同樣以假設三壺蜂平均長 2.8cm、重 0.35g，獵物平均長 3.85cm、重 0.4276g 為例。
- (2)提出『獵物如果沒有被折彎、壺蜂可能會出現搬運較困難的行為』實驗假設。
- (3)實驗結果如下：



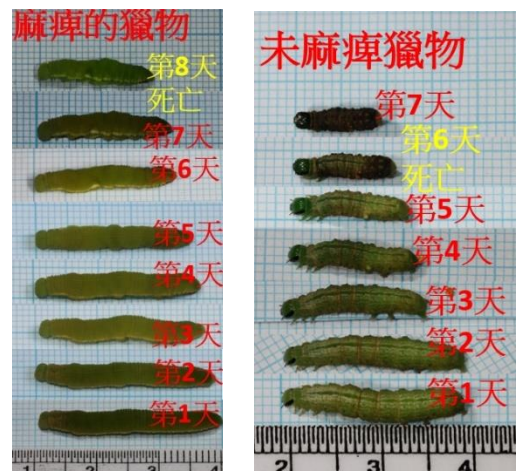
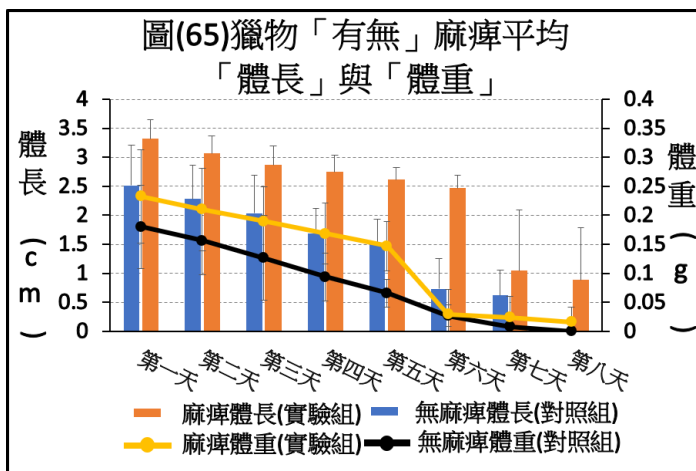
圖(64)壺蜂在搬運較長、較重獵物時， $F_1 \sim F_4$ 等構造上有『8種』施力方式，對獵物平均的施力分別為  $0.145 \pm 0.06\text{gw}$ 、 $0.174 \pm 0.05\text{gw}$ 、 $0.059 \pm 0.02\text{gw}$ 、 $0.049 \pm 0.02\text{gw}$ 。此時第一對胸足施力較大、第三對胸足施力最小。  
圖(G)模擬飛行時搬運較長、較重的獵物。  
圖(H)當搬運較長、較重的獵物時，壺蜂各施力點距離比為 4 : 10 : 18 : 4 : 41。

表二、「壺蜂搬運各種不同大小獵物的施力部位、與相關行為的結果分析」

	最大施力部位	最小施力部位	施力方式與費力否	是否利於飛行
1.運送等長、等重的獵物	第二對胸足	大顎	2種施力方式 且較不費力	利於飛行
2.運送比自己短、較輕獵物	第二對胸足	大顎	1種施力方式 且較不費力	利於飛行
3.運送比自己短、較重獵物	第二對胸足	大顎	3種施力方式 且較不費力	利於飛行
4.運送比自己長、較重獵物	第一對胸足 與大顎	第三對胸足	8種施力方式 且比較費力	不利飛行，因此壺蜂把獵物折彎 1/3，以接近第三種運送獵物方式。

### 實驗 4-3 壺蜂『延長獵物壽命的方法與後代攝食的方式』的結果

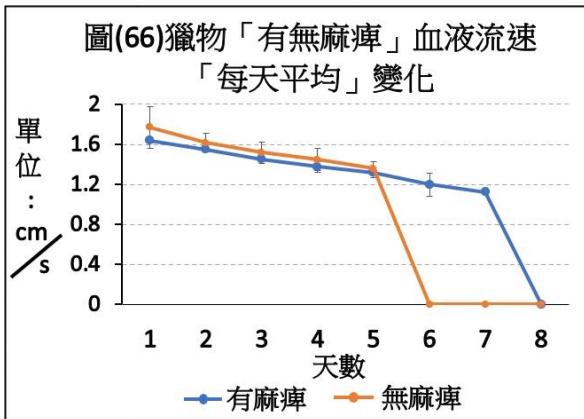
(1) 實驗 4-3-1 獵物被壺蜂麻痺之後『身體的變化』，結果分析：



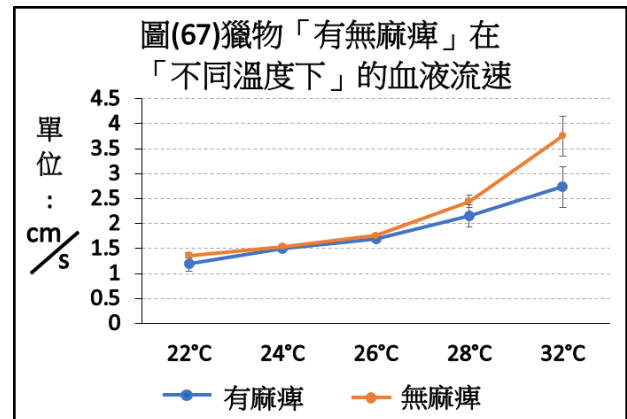
圖(65)被麻痺獵物的體長、體重分別  $3.32 \pm 0.34\text{cm}$ 、 $0.23 \pm 0.08\text{g}$  到第 8 天變成  $0.88 \pm 0.9\text{cm}$ 、 $0.02 \pm 0.03\text{g}$ ；無麻痺獵物平均體長、體重分別為  $2.5 \pm 0.7\text{cm}$ 、 $0.18 \pm 0.07\text{g}$  第 6 天獵物死亡。

證實被麻痺的獵物體長、體重緩慢遞減，卻也延長了死亡的時間(n=8)。

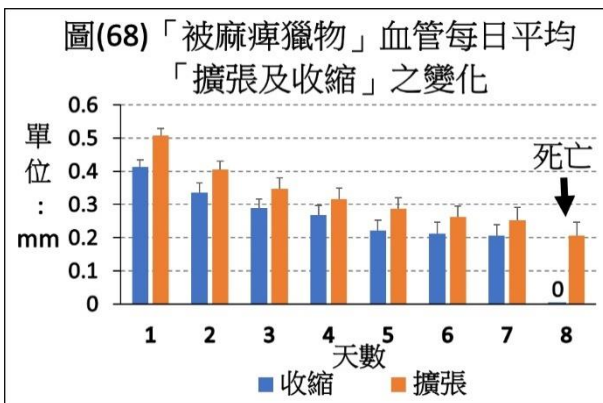
**(2) 實驗 4-3-2 獵物在不同溫度下血液循環與血管之間的變化，結果分析：**



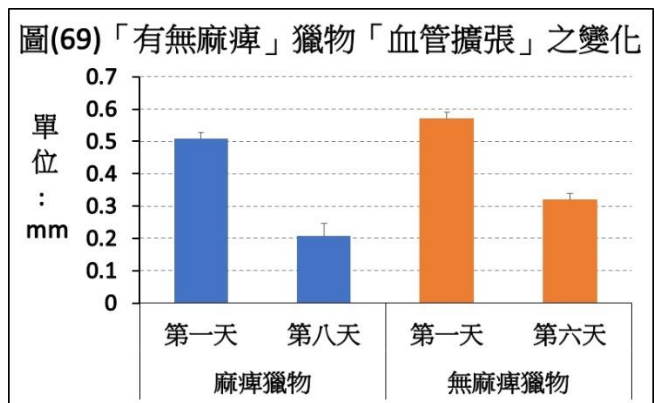
圖(66)被麻痺獵物在  $26\pm 1^{\circ}\text{C}$  下，第 1~7 天血液平均速率  $1.64\pm 0.03\sim 1.13\pm 0.02\text{cm/s}$ ，第八天獵物死亡；未麻痺獵物第 1~5 天血液平均速率  $1.77\pm 0.21\sim 1.36\pm 0.06\text{cm/s}$ ，第六天死亡，(n=8)。



圖(67)被麻痺獵物  $22^{\circ}\text{C}$  血液流速  $1.2\pm 0.16\text{cm/s}$ ，而在  $32^{\circ}\text{C}$  血液流速為  $2.7\pm 0.41\text{cm/s}$ 。無麻痺獵物則是  $1.36\pm 0.05\sim 3.75\pm 0.4\text{cm/s}$ ，因此溫度越高不管獵物有無被麻痺，血液流速皆越來越快，(n=6)。



圖(68)獵物血管平均第一天收縮與擴張分別為  $0.41\pm 0.02\text{mm}$ 、 $0.51\pm 0.02\text{mm}$ ，第八天獵物死亡血管平均固定  $0.21\pm 0.04\text{mm}$ ，(n=8)。

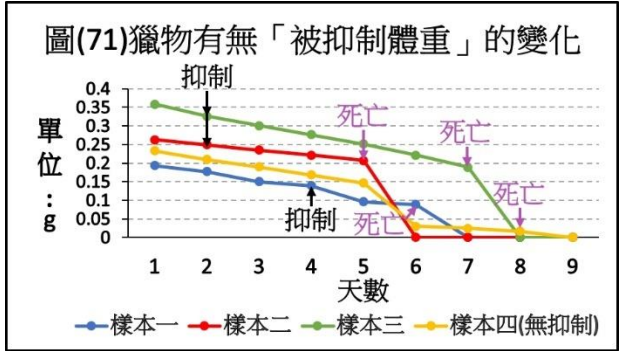
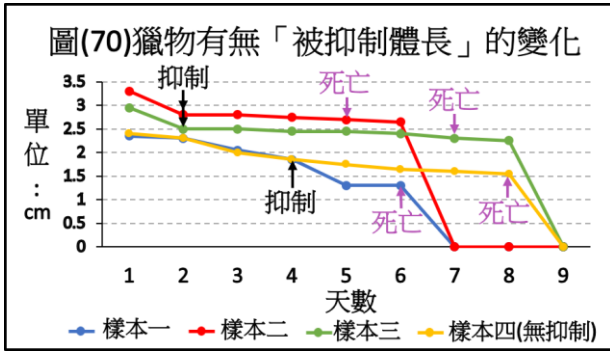


圖(69)麻痺獵物第一、八天血管分別擴張  $0.51\pm 0.02\text{mm}$ 、 $0.21\pm 0.04\text{mm}$ ；無麻痺獵物第一、六天血管分別擴張  $0.5705\pm 0.02\text{mm}$  與  $0.319\pm 0.02\text{mm}$ ，(n=8)。

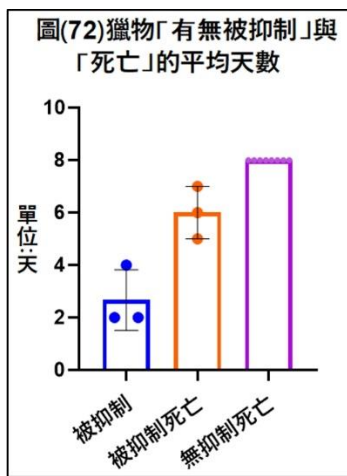


圖 A 血液流出背血管；A-1 血液流入背血管；A-2 到了第八天獵物死亡，血液停止流動。

(3) 實驗 4-3-3 獵物在『被麻痺後』『抑制成長』的變化，結果分析：

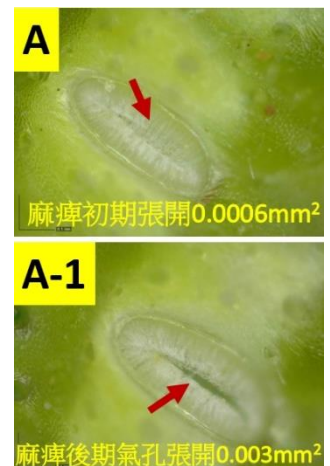
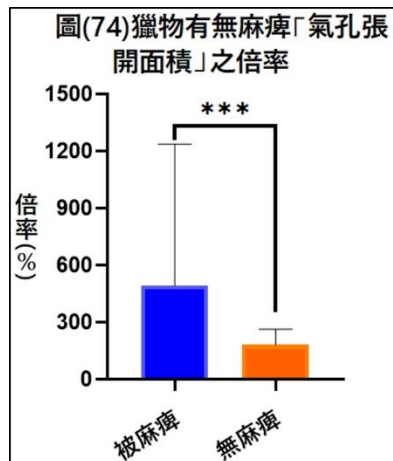
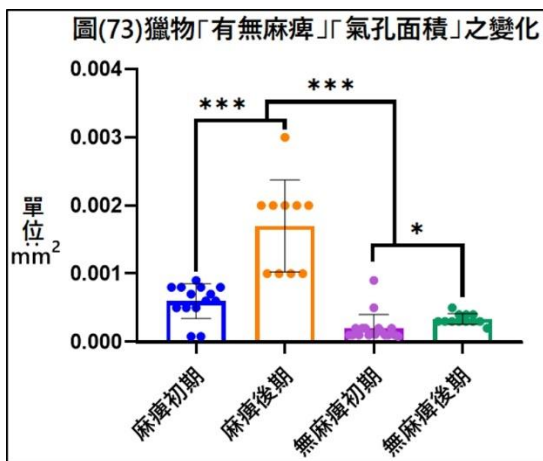


圖(70、71)樣本一在第4天發生抑制現象，第6天死亡。樣本二、三在第2天發生抑制，分別在第5天與第7天死亡。證實獵物被抑制生長後，仍然可延長幼蟲的型態3~5天(沒有蛻變成蛹體或是熟齡幼蟲)，最後死亡時間接近對照組的第8天死亡時間，因此壺蜂後代仍然可以吃到新鮮的獵物(n=4)。



圖(72)獵物平均被麻痺  $3 \pm 1$  天後出現被抑制現象，平均第  $6 \pm 1$  天死亡；被麻痺而無抑制的獵物在第8天死亡(n=14)。圖A~C為獵物『受到抑制前後』與『蛻變失敗』的圖照結果記錄。

(4) 實驗 4-3-4 獵物有無麻痺『氣孔開閉的變化』，結果分析：



圖(73、74)獵物麻痺後，氣孔張開面積  $0.0006 \pm 0.00025 \text{mm}^2 \sim 0.0017 \pm 0.00064 \text{mm}^2$ ，無麻痺是  $0.00018 \pm 0.00019 \text{mm}^2 \sim 0.0003 \pm 0.00007 \text{mm}^2$ ；被麻痺初期~後期氣孔張開  $494 \pm 704.2\%$ ，無麻痺是  $182 \pm 76.7\%$ ，有無麻痺氣孔前後張開面積  $p < *** 0.001$  有非常顯著差異。

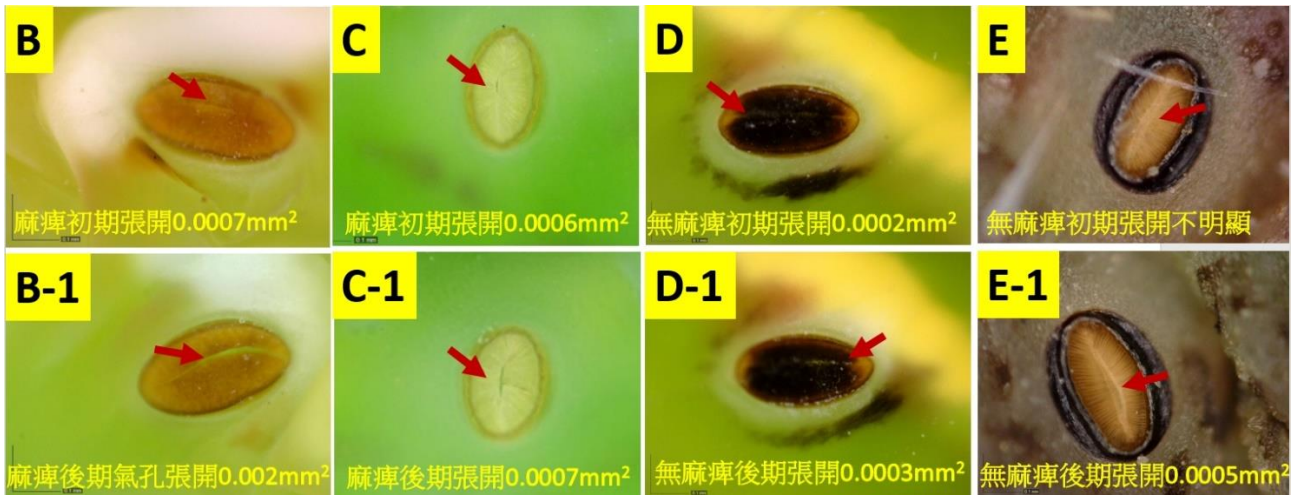


圖 A~E-1 分別是麻痺與無麻痺初期~後期之間，氣孔開閉面積的差異顯微圖照結果。

(5) 實驗 4-3-5 壺蜂『後代攝食構造』與『獵物血液循環』之間的關係，的結果分析：

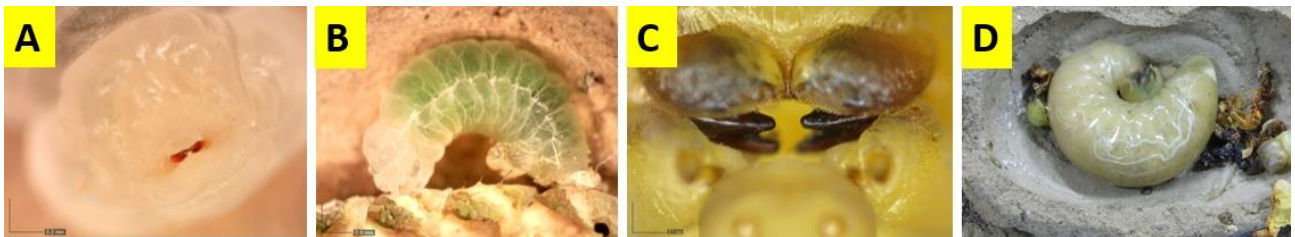
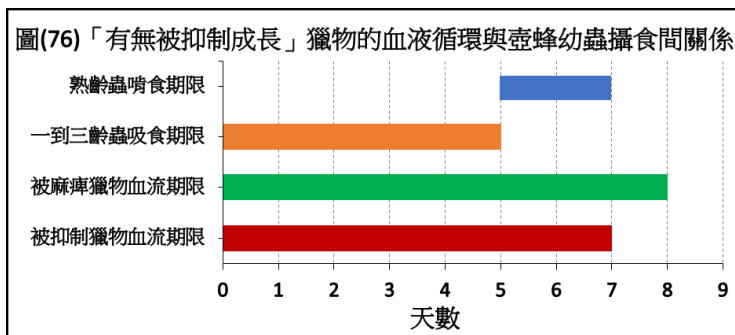
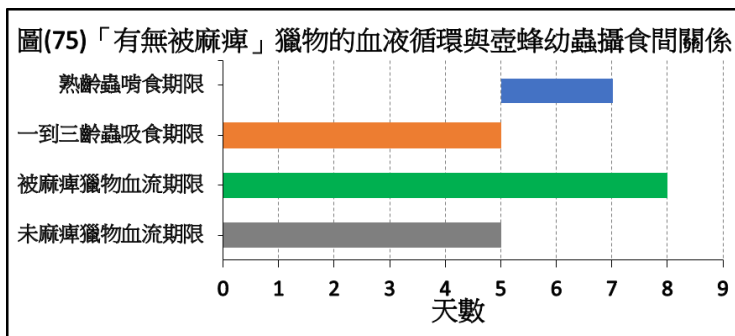


圖 A 紅色的小 y 形狀，為 1~3 齡幼蟲的大顎；圖 B 是 2 齡幼蟲『吸食獵物血液』；圖 C 熟齡幼蟲的大顎蛻變成黑色大剪刀形態；圖 D 熟齡幼蟲攝食方法，連獵物身體『全部啃食掉』。



圖(75)被麻痺獵物血液流至 8 天，壺蜂幼蟲成長期為 7 天，所以不管何種階段幼蟲，皆可以吃到新鮮獵物。圖(76)被抑制的獵物血流至 7 天，所以即使被抑制，幼蟲仍可吸食到血液。

## 柒、問題與討論

### 一、關於研究一黃胸錐腹蜾蠃『成蟲交尾』生殖行為的問題與討論

前人研究指出，壺蜂需要透過自然的環境下，經過交配、產卵、獵捕等行為，才會自行築巢(黃，2017)。可是我們利用剛羽化，鑽出土巢後的性成熟的成蟲個體為樣本，以人工飼養的方式，成功讓 3 對黃胸錐腹蜾蠃完成交尾行為。

我們當時把即將羽化的蛹體先暫時放在室內，溫度為  $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、濕度 48~50%RH、照度 430~750lux、再利用長 60cm、寬 30cm 的小網室，待羽化後性成熟的雌雄壺蜂，放到網室內，大約經過 45 分鐘，雄蟲就開始折彎腹部不斷向雌蟲示愛，並跳上雌蟲的背上，雌雄身體呈現 1 字形姿態的抱接行為，之後雌蟲會背著雄蟲走來走去，於是我們把牠們移到透明盒中方便觀察。整個過程我們認為第二階段訊息傳遞期的動作最有趣，因為雄蟲這時不斷且重複的利用第二對胸足敲擊雌蟲的胸部、再用第三對胸足敲擊雌蟲的腹柄，然後雌雄蟲就一上一下的蠕動腹部，二者間似乎在培養默契，以進行下一個階段的腹部交尾結合。

壺蜂可以交尾幾次？這點我們很好奇，有新聞資料指出蜂王會出現重複多次交尾，目的是接受更充足的精子(文獻八)。而我們研究的黃胸錐腹蜾蠃屬於獨居蜂，沒有蜂王、也不會產下數百顆的卵粒，但是能不能進行二次交尾也令人感到興趣。於是，我們將交尾過的雌壺蜂與還沒交尾過的雄蟲放在一起，看看雌性壺蜂是否會重複交尾。所獲得的結果是沒有交尾過的雄蟲雖然會跳上交尾過的雌蟲背上，但很快又跳下來離開雌蟲背部，經過 2 天牠們仍然沒有再出現交尾行為，所以初步獲得，雌性的黃胸錐腹蜾蠃只有一次的交尾行為。

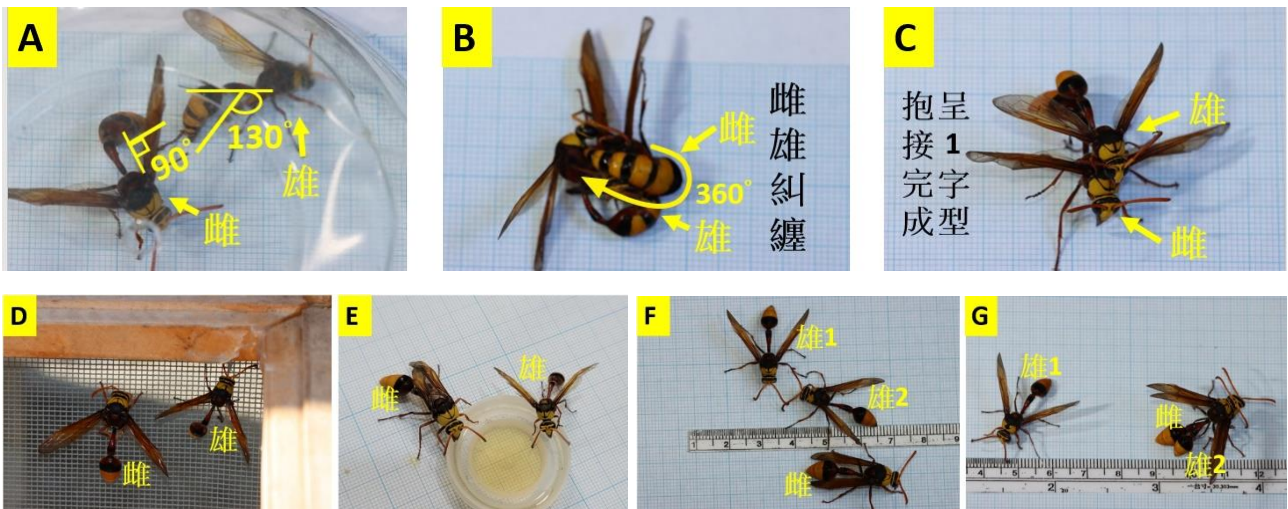


圖 A、B、C 雌雄雙方折彎腹部求愛，最後完成抱接雄上、雌下的姿勢。圖 D、E 網室內的雌雄蜂並用比例 1:1 的蜂蜜水餵養；圖 F 交尾成功後再放一隻雄 2 號進入；圖 G 雄 2 號很快跳到交尾過的雌蟲身上，但很快又跳下來了。

### 二、關於研究二黃胸錐腹蜾蠃『做巢的環境』對後代成長影響的問題與討論

我們在進行實驗 2-4 的測試壺蜂各類巢的硬度時，發現有一些巢，裡面有一層『半透明的膜』，我們討論了許久這膜是從哪裡來？後來實驗進行到 4-1 飼養記錄時，才發現這個膜是壺蜂幼蟲所吐出來，類似蠶寶寶化蛹前吐出來蠶繭一般，我們把半透膜稱為『蜂繭』。

蜂繭如何形成？對壺蜂的幼蟲生存有什麼助益？我們做了二個實驗來認識蜂繭。

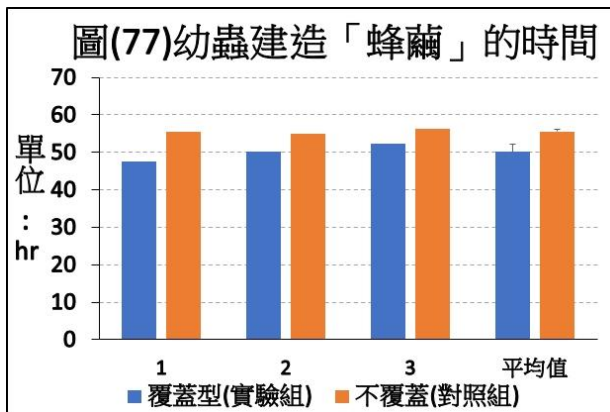
### 實驗一 蜂繭的建造與形成：

- (1) 第一組把前蛹幼蟲放到『只有下半邊的土巢』，再用『黑色細網覆蓋』。
- (2) 第二組把前蛹放到黑色紙盒、『上方不覆蓋』，觀察蜂繭形成過程，共以 6 隻前蛹實驗。

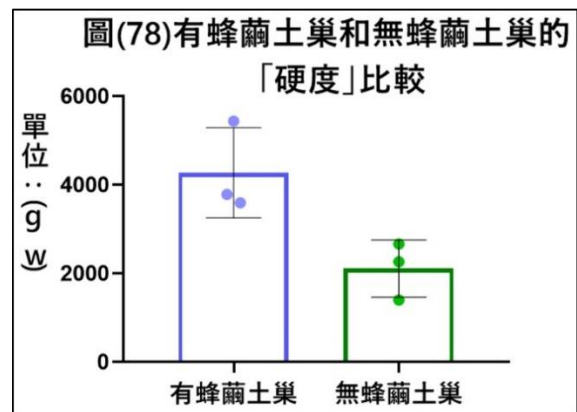
### 實驗二 蜂繭的功能：

- (1) **蜂繭巢的硬度實驗：**實驗組『有蜂繭』、對照組『無蜂繭』的巢，放到硬度計下測試硬度，各以 6 個有無蜂繭的巢做實驗。
- (2) **蜂繭的滲透作用：**實驗組『有蜂繭』、對照組『無蜂繭』的巢，將二組每隔 30 秒滴入 1cc 的水到巢內，直到 8 分滿為止，觀察水滲出蜂繭及巢的時間以及巢崩塌時間，各以 6 個巢實驗。

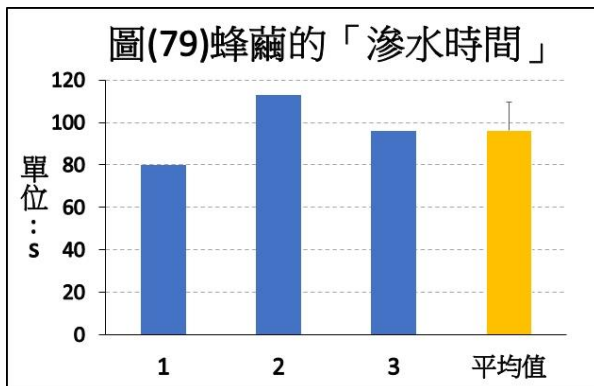
### 實驗結果：發現幼蟲在不同環境下，會做出不同形態的蜂繭。



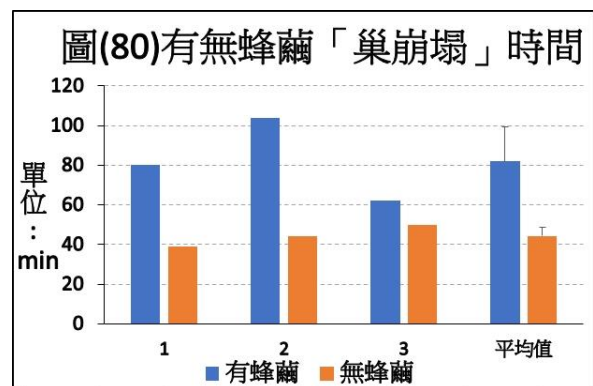
圖(77)幼蟲建造蜂繭的時間，覆蓋型土巢的平均時間為  $50 \pm 2$  小時；不覆蓋土巢的平均時間為  $56 \pm 0.5$  小時，(n=6)。



圖(78)有蜂繭土巢平均硬度是  $4269 \pm 830$  gw 無蜂繭土巢的平均硬度則是  $2106 \pm 529$  gw，(n=6)。



圖(79)蜂繭的滲水時間平均為  $96 \pm 13$  秒，(n=6)。



圖(80)有無蜂繭的巢崩塌時間平均為  $82 \pm 17.2$  min、 $44.3 \pm 4.5$  min，(n=6)。

### 三、關於研究三黃胸錐腹蜾蠃『產卵行為』對卵孵化影響的問題與討論

雌性黃胸錐腹蜾蠃把卵產在泥巢壁上，並懸吊在半空中，除了有卵柄支撐護卵之外，對未來孵化的幼蟲有什麼好處嗎？經過詳細觀察，我們發現雌性壺蜂把獵物放進巢內之後，雖然立刻飛離巢室，但還是常常回來還把頭深入巢內，我們當時不大了解這行為的意義，直到打開土巢之後才發現，原來雌性壺蜂是將已經被迷昏的獵物，調整成背上、腹下的姿勢。

為何要把獵物擺成背上、腹下？我們認為是因為獵物的體背有一條貫穿身體的背血管，當孵化成幼蟲且還沒離開卵殼，只要一觸碰到獵物，就會以懸吊的方式直接吸食背血管內血液，即使獵物因被幼蟲吸食產生疼痛而蠕動身體，甩開了壺蜂幼蟲，但有卵柄支撐，擺盪幾下後又回到原位，仍然可以繼續吸食獵物。反之如果不是懸吊的形式，剛孵化的幼蟲一旦被獵物甩開後，很難再找回獵物的背血管，最終無法進食導致死亡。所以黃胸錐腹蜾蠃產卵行為有利於後代的攝食與生存。圖 A~D 為壺蜂調整獵物的姿勢與打開巢觀察的結果。



### 四、關於研究四黃胸錐腹蜾蠃『捕抓獵物育幼後代』的行為問題與討論

前人研究指出，壺蜂會捕抓獵物到巢內，雌蜂以口器和腳並用叼著和自身體長一樣大小的蛾類幼蟲持續飛行(黃, 2017)。不過經過研究四的實驗，我們把黃胸錐腹蜾蠃所抓回來的獵物，逐一測量體型後，以壺蜂自己的體型分類，發現至少會抓三種不同大小的獵物到巢裡面，而且體重也並不相同。

看到壺蜂抓獵物運送到巢的行為，如果不是攝影機拍下的畫面，我們很難知道壺蜂竟然會把獵物折彎後再運送的超高智慧行為。但是為了證實我們所看的影像，決定打開土巢測量獵物的體長，結果更加確定被折彎的獵物長達 3.0~3.3cm 間，而壺蜂的體長平均也只有 2.84cm，因此證實壺蜂會抓比自己還大的獵物，如圖 A~C-1。

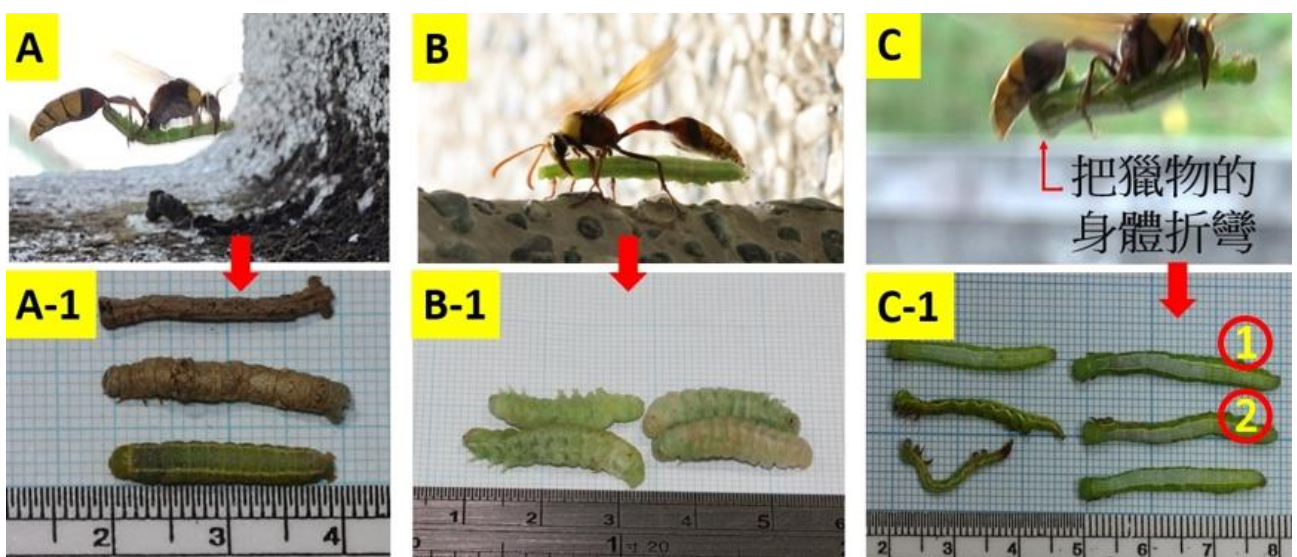


圖 A、A-1 壺蜂抓入 3 隻比自己體長小的獵物；圖 B、B-1 壺蜂抓入 4 隻與壺蜂體長相等的獵物；圖 C、C-1 壺蜂抓入 6 隻大小不一的獵物，其中 2 隻長約 3.4cm 的獵物，被折彎搬運。

研究總結：我們與前人研究報告的差異結論之比較

	前人的研究	與前人『不同的研究』與『新發現』
一、黃胸錐腹 蜾蠃『交 尾行為』 的研究	無研究	<p><b>1.新發現：</b>雌雄壺蜂平均性成熟的時間分別為 <math>77\pm 10.8\text{hr}</math>、<math>63.7\pm 5.7\text{hr}</math>。</p> <p><b>2.新發現：</b>雄蟲會用胸足敲擊雌蟲胸部與腹柄，藉此傳達交尾訊息。交尾過程雖然長達 <math>21\text{hr}</math>，但雌雄腹部真正的結合卻只有短短 <math>11\text{秒}</math>，才佔整個交尾過程的 <math>0.01\%</math>。</p>
二、探討壺蜂 『做巢環 境、巢的 定型的原因』與 『特性』	無研究	<p><b>1.新發現：</b>半遮蔽獵物的體重與體長只減少 <math>48\%</math>、<math>23\%</math>、可活 <math>8\text{天}</math>、有利後代的生存。</p> <p><b>2.新發現：</b>以 <math>0.009\sim 0.0008\text{m/s}</math> 的速度挖土、抹土、拍打泥球，讓巢能固定成型。</p> <p><b>3.新發現：</b>做巢遇天敵會棄巢、<math>67\%</math>會產下 <math>2\sim 3</math> 粒卵、並把巢做厚或做空巢偽裝。</p> <p><b>4.新發現：</b>土巢有微量蛋白質成分，因此壺蜂所做的乾濕泥球硬度 <math>603.5\text{gw}</math>、<math>284.1\text{gw}</math>、有蜂繭覆蓋的巢硬度更達 <math>4269\text{gw}</math>，這成分與構造，能使壺蜂的巢變得更堅固。</p>
三、研究『卵 與卵柄』 間的關係	無研究	<p><b>1.新發現：</b>卵柄最大負重平均為 <math>0.041\pm 0.018\text{gw}</math>，因此懸吊姿態有助提高卵的孵化率。</p> <p><b>2.新發現：</b>受微風影響卵搖 <math>9.3\pm 0.94\text{次/s}</math>，此時卵柄張力對卵做出 <math>164.3\pm 12.5\text{nkg.m/s}</math> 的衝量值、向心力為 <math>1.41\pm 0.22\text{達因}</math>。</p>
四、獵物數量 與後代性 別間關係	無研究	<p><b>1.新發現：</b>壺蜂捕抓 <math>3\sim 5</math> 隻獵物的巢室，未來後代發育為雄性成蟲。抓 <math>6\sim 7</math> 隻獵物的巢室，未來發育為雌性成蟲。</p>
五、壺蜂如何 『搬運獵 物到巢』 的施力方 式	無研究	<p><b>1.新發現：</b>搬運等長等重、較短較輕、較短較重的獵物時，分別只有『<b>2種、1種、3種</b>』的施力方式。</p> <p><b>2.新發現：</b>當搬運較長、較重獵物，會出現『<b>8種</b>』施力的可能，並引起飛行重心偏移，所以壺蜂會將獵物折彎約 <math>1/3</math> 長再搬運。</p>
六、壺蜂『育 幼的行 為』與 『後代攝 食』的方 式	無研究	<p><b>1.新發現：</b>獵物被麻痺、被抑制、甚至氣孔可張開 <math>494\%</math>，皆可延長獵物的壽命。</p> <p><b>2.新發現：</b>獵物被麻痺後 <math>1\sim 7</math> 天平均血液流速為 <math>1.64\sim 1.13\text{cm/s}</math>，血液流動逐漸變慢。</p> <p><b>3.新發現：</b>壺蜂幼蟲 <math>1\sim 3</math> 齡階段，吸食獵物的血液，<math>4</math> 齡幼蟲會啃食獵物的身體。</p>



## 捌、結論

### 研究一、黃胸錐腹螺贏『成蟲交尾』的生殖行為結論

1. 壺蜂性成熟的時間：雌雄壺蜂平均性成熟的時間分別為  $77\pm 10.8\text{hr}$ 、 $63.7\pm 5.7\text{hr}$ 。
2. 壺蜂交尾的過程：雌雄成蟲交尾行為的過程，分成四個階段：第一階段抱接期→第二階段訊息傳遞期→第三階段摩擦求偶期→第四階段結合期。壺蜂交尾過程長達 21 hr，其中訊息傳遞期時間最長佔了 95.94%、而雌雄腹部結合期只佔了短短的 0.01%。

### 研究二、黃胸錐腹螺贏『做巢環境』對後代成長的影響結論

1. 壺蜂選擇做巢環境：半遮蔽的環境下平均光照在  $3563.68\pm 1141.6\text{lux}$  且溫度較適宜，獵物的體重與體長只減少 48%、23%、壽命可活 8 天、巢沒有遇水立即崩塌的危機，所以選擇半遮蔽環境下的巢利於獵物保存，空間也沒有被立即破壞的問題，有利於後代的生存。
2. 土巢定型的原因：雌蟲大顎挖土範圍、移動的震幅約在  $0.00038\sim 0.00223\text{m}$ ，做泥球平均速度是  $0.9\times 10^{-2}\text{m/s}$ ；大顎與前足的拍打速度很快，移動頻率震幅約在  $0.00023\text{m}$  以下，抹土與拍擊泥球平均速度為  $0.8\times 10^{-3}\text{m/s}$ ，因此巢能在短時間內成型。
3. 壺蜂做巢過程遇到天敵的行為：出現 3 種棄巢行為，其中成壺形巢時，竟有 67% 會產下 2~3 粒的卵再棄巢，當巢已經做好才遇到天敵，壺蜂不僅會持續鋪沙，把巢再做厚一點，將獵物封死在巢內，或者另做一個空巢，來當作偽裝，讓下方巢內幼蟲順利成長。
4. 巢有多堅固：泥球內有微量蛋白質，泥球乾了後硬度是  $603.5\pm 160.3\text{gw}$ 、一旦做成巢後硬度是  $633.5\pm 422.5\text{gw}$ 、覆蓋型巢是  $2124\pm 1398.6\text{gw}$ 、被寄生巢是  $3388.2\pm 1381.8\text{gw}$ 。壺蜂幼蟲化蛹前，平均花  $50\pm 2$  小時吐絲線做成蜂繭，完成後的蜂繭能防止土巢快速崩塌，巢的硬度從  $2106\pm 529\text{gw}$  提升到  $4269\pm 830\text{gw}$ 。

### 研究三、黃胸錐腹螺贏『產卵行為』對卵孵化的影響結論

1. 卵與卵柄間的關係：卵柄是雌蟲隨機產下，平均長度只有卵長的  $0.32\pm 0.11$  倍。
2. 懸吊卵的孵化率：懸吊姿態的卵孵化平均花費  $66\pm 8.8\text{min}$ ，且能吸食獵物血液，因此懸吊姿態有助提高卵的孵化與攝食率。
3. 卵柄的負重：卵柄直徑為  $0.012\sim 0.015\text{mm}$ ，卻能承受  $0.041\pm 0.02\text{gw}$ ，當遇到微風環境，卵平均搖晃次數  $9.3\pm 0.94$  次/s、此時平均衝量為  $164.3\pm 12.5\text{ng}\cdot\text{m/s}$ 、向心力為  $1.41\pm 0.22$  達因。因此當衝量越大、卵搖晃時間越長、卵要停下來所花費時間也較長，所以在和風的狀態下，向心力小於 2.25 達因，此時就會因向心力不足卵柄剝落而飛出去(n=7)。

### 研究四、黃胸錐腹螺贏『育幼後代』的行為結論

1. 獵物的數量：雌蟲抓 3~5 隻獵物的平均體長  $2.26\pm 0.18\text{cm}$ 、體重  $0.23\pm 0.05\text{g}$ ，未來將發育雄蟲。抓 6~7 隻獵物的平均體長  $2.64\pm 0.4\text{cm}$ 、體重  $0.34\pm 0.05\text{g}$ ，未來將發育雌蟲。
2. 壺蜂搬運獵物回巢的行為：
  - (1) 搬運等長、等重獵物：有『2種』施力搬運方式，各施力點平均為大顎  $0.05\text{gw}$ 、第一對胸足  $0.025\text{gw}$ 、第二對胸足  $0.145\text{gw}$ 、第三對胸足  $0.135\text{gw}$ ，以第二對胸足的施力較大。
  - (2) 搬運較短、較輕獵物：只有『1種』施力搬運方式，各施力點平均為大顎  $0.008\text{gw}$ 、第一

- 對胸足 0.033gw、第二對胸足 0.05gw、第三對胸足 0.008gw，以第二對胸足的施力較大。
- (3) 搬運較短、較重獵物：有『3種』施力搬運方式，各施力點平均為大顎 0.029gw、第一對胸足 0.037gw、第二對胸足 0.214gw、第三對胸足 0.148gw，以第二對胸足的施力較大。
- (4) 搬運較長、較重獵物：有『8種』施力搬運方式，各施力點平均為大顎 0.145gw、第一對胸足 0.17gw、第二對胸足 0.059gw、第三對胸足 0.049gw，此時第一對胸足施力大。所以當壺蜂抓到比自己大的獵物時，搬運的重心會偏移且飛行不穩定，因此壺蜂會將獵物折彎，以接近第三種(搬較短、較重)的搬運方式，也比較能夠順利的把獵物搬運回巢。
3. 壺蜂如何延續獵物生命：因為壺蜂把毒液注入獵物身上，而出現了 3 種延長壽命的方式。(1)被麻痺的獵物壽命活到第 8 天。(2)抑制獵物的蛻變成長，壽命活到第 7 天。(3)被麻痺的獵物身上的氣孔，到後期可張開 494%，讓更多氧氣進入體內，而延長壽命。
4. 獵物的血液循環與壺蜂後代攝食之間的關係：獵物被麻痺後 1~7 天平均血液流速為 1.64~1.13cm/s，第 8 天死亡血液流速停止。而壺蜂 1~3 齡幼蟲成長期 5 天，正可以吸食到獵物的血液，4 齡熟齡幼蟲成長期 2 天，可吸食獵物血液並攝食獵物的身體。

## 玖、參考資料及其他

- 一、徐堉峰 (2004)·昆蟲學概論·臺北市：合記圖書出版社。
- 二、翰林出版社 (2016)·自然與生活科技 國一自然與生活科技 上冊、下冊生物篇。
- 三、林孟寬 (2019)·泥造城堡--探討黃胸泥壺蜂「銜泥建造巢室」的策略·中華民國第 59 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 四、吳采頤 (2018)·獨行俠的神秘生活--五種獨居蜂築巢行為及成長習性之探討·中華民國第 58 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 五、黃芃迎 (2017)·泥壺內的秘辛~赭腰圓領螺贏和黃胸錐腹螺贏生存策略探討·中華民國第 57 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 六、陳抒函 (2017)·麻醉大師--壺蜂麻醉獵物的策略與幼蟲捕食間關係·中華民國第 57 屆中小學科學展覽會作品說明書
- 七、戴東翰(2013)·土樓神秘客—泥壺蜂生態研究(17 頁)·嘉義市第三十一屆中小學科學展覽會作品說明書
- 八、蜂王出房後多久交尾？交尾次數是不是越多越好？  
<https://kknews.cc/news/ryj4oax.html>
- 九、動量與衝量  
[http://www.hkpe.net/hkdsepe/movement\\_analysis/momentum\\_impulse.htm](http://www.hkpe.net/hkdsepe/movement_analysis/momentum_impulse.htm)
- 十、向心力-維基百科，自由的百科全書 <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%90%91%E5%BF%83%E5%8A%9B>

## 拾、待研究的問題

經過初步的檢測，我們發現壺蜂的巢上有微量蛋白質成分，能使泥巢變得更堅固，我們覺得這是一個非常有趣的問題，未來想進一步的繼續研究蛋白質的種類與性質。

## 【評語】 030315

優點：

本作品選用校園昆蟲黃胸錐腹螺羸作為研究題材，從日常觀察與文獻回顧整理後擬定研究方向，經由環環相扣的提問，逐步提出假說，設計實驗進行探究，研究架構相當完整。研究與實驗設計的邏輯清晰。研究者是由仔細的觀察啟動，進行細緻的實驗設計，逐步實作驗證所好奇之問題，實驗設計合理且具創意，書面報告圖文呈現清晰，實為佳作！

建議及檢討：

1. 有觀察記錄結果，但研究隻數較少，如交尾實驗僅有雌雄 3 對，可增加數據。
2. 此研究專注於單獨築巢型黃斑陶壺蜂，未與其他陶壺蜂物種或屬的全面比較，缺乏其他陶壺蜂物種的資訊，是否可以平行轉移資訊應用須待後續研究驗證。

3. 圖說應加強說明，結果呈現部分皆直接將結果顯示於圖說中，此部分應在結果中先敘述性說明研究數值結果，而非將結果直接列於圖說中。
4. 建議在實驗中連結壺蜂的生殖行為與生態意義或可能相關的環境議題。這樣的連結可以提升主題的重要性，並突顯研究在生態學或生物多樣性保育方面的價值。

## 作品海報



# 壺蜂的生殖行為-

探討黃胸錐腹螺贏交尾、做巢、  
產卵、育幼的生殖過程研究



## 摘要

本研究探討黃胸錐腹螺贏(*Delta pyriforme*)交尾、做巢、產卵、育幼等生殖行為。結果一雌雄壺蜂平均性成熟為  $77 \pm 10.8$ 、 $63.7 \pm 5.7$  小時，交尾結合只有 11 秒。結果二壺蜂用大顎與前足以  $0.8 \times 10^{-3} \text{m/s}$  速度拍打泥球，讓巢固定成形，結蜂繭後巢硬度達 4269gw。結果三受微風影響卵搖 9.3 次/s，此時卵柄的張力對卵做出  $164.3 \text{kg} \cdot \text{m/s}$  衝量值，當衝量越大、卵搖晃的時間越長、停下時間要越久。結果四壺蜂會依不同體型獵物，施予不同的力搬運回巢，被麻痺獵物血液流速為  $1.64 \sim 1.13 \text{cm/s}$ ，氣孔被打開 494%，以延長獵物壽命，有助於壺蜂幼蟲攝食，達到育幼後代的目的。

## 壹、研究動機

從小聽過青蛙、蟋蟀發出聲音求偶，看過螢火蟲發出螢光吸引異性交尾，從書上得知蝴蝶會舞動翅膀求偶，就是沒看過壺蜂求偶行為或交尾過程。

學校有 2 棵高大的鳳凰樹，常看到壺蜂不停穿梭，因此我們很疑惑壺蜂飛來這裡的目的。資料說，牠會用泥土做巢、抓獵物給幼蟲吃，所以牠是來抓獵物或覓食？用泥土做的巢堅固嗎？

我們對牠們的生殖行為很好奇，例如牠們怎樣交尾？抓的獵物多大？如何搬運獵物？幼蟲怎麼吃獵物長大？我們想解開疑問，所以進行研究找尋答案。

## 貳、研究目的

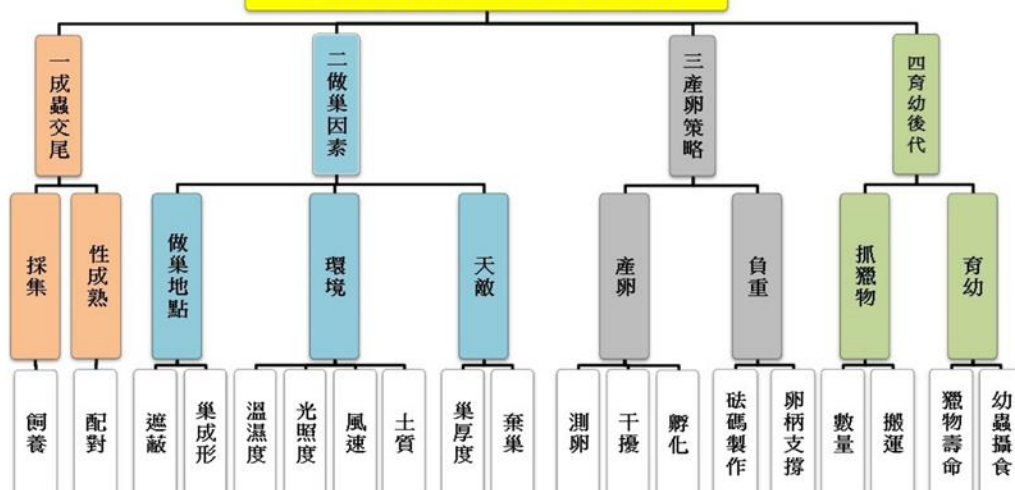
- 一、研究黃胸錐腹螺贏『成蟲交尾』的生殖行為
- 二、研究黃胸錐腹螺贏『做巢的環境』對後代成長的影響
- 三、研究黃胸錐腹螺贏『產卵行為』對卵孵化的影響
- 四、研究黃胸錐腹螺贏『育幼後代』的行為

## 參、研究設備及器材

1. 數位相機、攝影機、手機
2. 電子天秤(ATY124、SNUG-300)
3. 顯微鏡(DinoLite2.0)
4. CO<sub>2</sub> 鋼瓶
5. 蛋白質測定液
6. 光譜儀
7. 溫溼度計
8. 量角器
9. 輕黏土
10. 脂肪測定液
11. 硬度計
12. 熱熔槍
13. 鋼刷
14. 培養皿
15. 碘液
16. 風速計
17. 夾鏈袋
18. 燈罩
19. 釣魚線
20. 捕蟲網

## 肆、研究方法

黃胸錐腹螺贏的生殖行為之研究架構



### 研究一、黃胸錐腹螺贏『成蟲交尾』的生殖行為

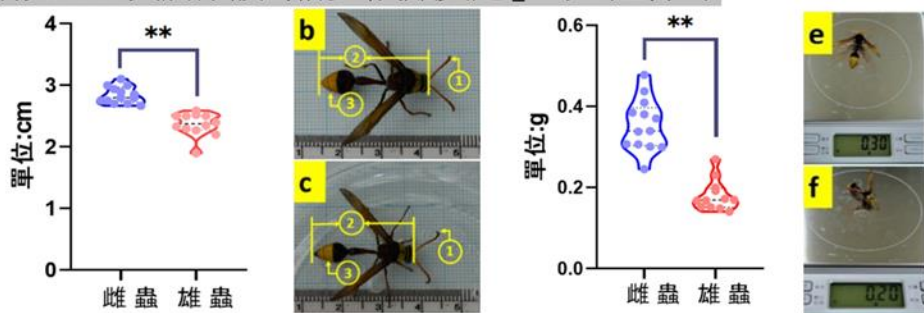


圖 1、雌雄體長與體重測量，獲得雌大雄小的結果。

(一) 觀察後產生的疑問及假設：我們好奇雌大雄小的壺蜂如何完成交尾？因此假設壺蜂交尾行為為雄上雌下，完成交尾。

(二) 動手實驗：實驗 1-1『不曾交尾過的雌雄成蟲』樣本取得

1. 採集卵、幼蟲或蛹體：採集 70 個土巢，在  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  的環境飼養。
2. 性成熟個體取樣：蛹蛻變成蟲，用原來巢覆蓋，到成蟲鑽出巢可以飛行時，為性成熟個體，以此取得不曾交尾過的雌雄樣本。

### 實驗 1-2 黃胸錐腹螺贏的『交尾』實驗：

1. 『不曾交尾過』的雌雄配對：取不曾交尾過的雌雄樣本中的 3 對共 6 隻，隨機配對後記錄交尾過程。

### 研究二、探討黃胸錐腹螺贏『做巢的環境』對後代成長的影響



圖 2、空心磚、廢棄冷氣主機和汽車散熱格子都有壺蜂做巢足跡。

(一) 觀察後產生的疑問及假設：壺蜂做巢位置都會遮風蔽雨，我們想研究做巢處還有何特點？以及哪些因素會影響土巢建造？我們假設壺蜂會受到環境的因子而影響土巢建造。

(二) 動手實驗：實驗 2-1 探討壺蜂『做巢時的環境』特點

1. 調查壺蜂什麼時間飛出來：從 111 年 9 月~11 月週一到週五早上 08:00~17:30 間，2 小時為一個觀察時段，分成 5 個時段。
2. 分組調查實驗：用儀器測量壺蜂出現時的環境狀態。

### 實驗 2-2 探討『土巢為何能成形』？

1. 壺蜂如何把『泥土』做成『泥球』的形狀：

- ① 利用攝影機拍攝雌蟲利用大顎做泥球的過程。
- ② 分析大顎挖土移動的範圍與速度。

2. 壺蜂如何把『泥球』做成『土巢』的形狀：

- ① 利用攝影機拍攝雌蟲把泥球塗抹做巢的過程。
- ② 分析大顎抹泥球與前足拍打泥球動作的速度。

### 實驗 2-3 探討『做巢過程』遇『天敵』，會影響做巢嗎？

1. 依上述土巢形成的過程，提出三種做巢中遇天敵的行為假設。
2. 假設天敵出現在壺蜂『剛做巢』、『巢成壺形』、『巢做好』時，用 CO<sub>2</sub> 短暫迷昏蒼蠅後，用鑷子夾住蒼蠅放在土巢上。

### 實驗 2-4 探討『壺蜂做的巢有多堅固』？

1. 壺蜂泥球性質測試：用酸鹼試紙、蛋白質測定液、脂肪測定液以及碘液等檢測壺蜂做的泥球成分。
2. 根據步驟 1 的結果，進行壺蜂做的泥球與土巢的硬度實驗：
  - (1) 第一次實驗：實驗組為壺蜂做的『乾、濕泥球』；對照組為鮮奶+土做成乾、濕泥球、以及水+土做成乾、濕泥球。
  - (2) 第二次實驗：實驗組為『初形成未封口土巢』；對照組為鮮奶+土捏成壺狀土巢，以及水+土捏成壺狀土巢。
  - (3) 第三次實驗：實驗組為『覆蓋完成的土巢』；對照組為鮮奶+土捏成覆蓋型土巢，以及水+土捏成覆蓋型土巢。
- (4) 操作方法：實驗都以硬度計擠壓，直到泥球、土巢破裂，求實驗組與對照組硬度。

### 研究三、研究黃胸錐腹螺贏『產卵行為』對卵孵化的影響

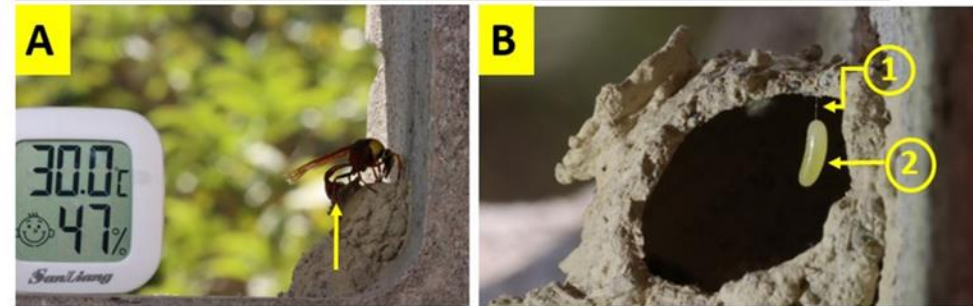


圖 3、壺蜂常在  $29 \sim 30^\circ\text{C}$  間產卵，打開土巢發現有①卵柄②卵。

(一) 觀察後產生的疑問及假設：我們好奇卵懸吊半空的意義，提出卵懸吊的方式能降低外界對卵的干擾，提高孵化率。

(二) 動手實驗：實驗 3-1 研究『卵』與『卵柄』之間的相關性

1. Image J 軟體測量：把尺放卵邊，用軟體測卵與卵柄的長度。
2. Dino Capture 軟體測量：465x 觀察卵柄，用軟體測量直徑。

### 實驗 3-2 研究『卵柄』的負重

1. 微量砝碼的製作：取下每支  $0.0322 \text{g}$  的小鋼刷，剪成 3 段，每段重量約  $0.005 \sim 0.01 \text{g}$ ，對折後製作成微量砝碼。
2. 求卵柄最大與最小負重：把微量砝碼掛到卵柄與卵間，直到卵落下，把卵與微量砝碼拿到電子秤秤重，得卵柄負重。

### 實驗 3-3 研究懸吊卵與『孵化率』、『剛孵化幼蟲攝食』有關？

1. 設計實驗組『卵懸吊』、對照組『卵橫躺』孵化：記錄懸吊與橫躺卵孵化間有何不同。
2. 設計實驗組『剛孵化懸吊』、對照組『剛孵化橫躺』攝食：記錄懸吊與橫躺卵孵化後，攝食率的差異。

### 研究四、黃胸錐腹螺贏『育幼後代』的行為



圖 4、壺蜂抓獵物回巢，打開巢發現裡面有 1 顆卵和 6 隻獵物。

(一) 觀察後產生的疑問及假設：一個巢有幾隻獵物？如何運送獵物？幼蟲如何攝食？我們提出獵物數量是隨機捕抓；用大顎、胸足把獵物夾回巢；幼蟲吸食獵物等假設。

(二) 動手實驗：實驗 4-1『獵物數量』與『育幼後代』的關係

1. 壺蜂捕抓多少獵物到巢內：計算與測量 14 個巢內獵物數量、體長、體重，並飼養到成蟲。

(1) 生活史記錄：記錄不同巢內後代成長，直到蛻變成蟲為止。

(2) 巢內增加獵物：實驗組增加到 6 隻，對照組維持 3 隻。

(3) 巢內減少獵物：實驗組移走 3 隻，對照組維持 6 隻。

### 實驗 4-2 研究壺蜂『搬運獵物』、『育幼後代』的行為

1. 用攝影機拍攝壺蜂搬運獵物回巢，直到抓獵物結束對巢封口。打開巢測獵物體長、體重、擷取影片分析壺蜂搬運獵物方式。
2. 依步驟 1 結果，照抓到獵物大小分類，提出三種搬運假設。
  - (1) 假設壺蜂捕抓『與自己體長相等、體重相等的獵物』、『體長較短、體重較輕的獵物』、『體長較長、體重較重的獵物』
  - (2) 以上三個假設大顎施力  $F_1$ 、第一對胸足  $F_2$ 、第二對胸足  $F_3$ 、第三對胸足  $F_4$  當  $F_1 + F_2 + F_3 + F_4 =$  假設體重，且合力為 0。
  - (3) 依獵物的支點而獲得各施力臂為： $a(F_1) + b(F_2) = c(F_3) + d(F_4)$ ，且合力矩為 0。
  - (4) 當施力不為 0，會出現 6561 筆施力可能，從(3)找到  $F_1 \sim F_4$  「施力總和」與「獵物重量」相等比例依獵物實際重量帶入公式，得  $F_1 \sim F_4$  施力大小。

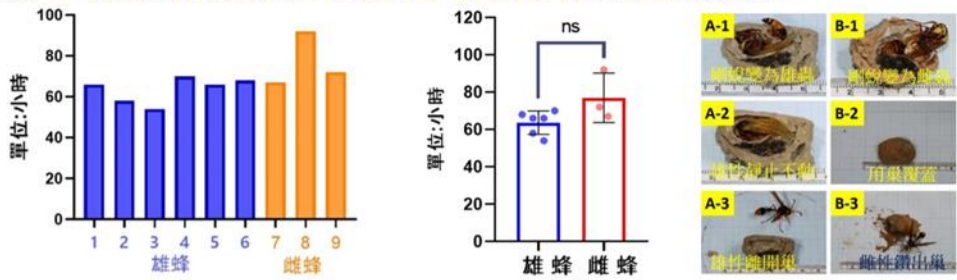
### 實驗 4-3 壺蜂『延長獵物壽命的方法與後代攝食的方式』

1. 記錄有無麻痺獵物體長體重，進行可能延長壽命三個實驗。
2. 假設獵物『血液循環』、『抑制蛻變成長』、『氣孔打開』可能延長獵物壽命。
3. 壺蜂『後代攝食構造』與『獵物血液循環』間的研究：
  - (1) 『後代攝食構造』：用顯微鏡 227x 觀察幼蟲攝食構造。
  - (2) 『攝食與獵物關係』：不同階段的幼蟲後代攝食方法與獵物存活間的記錄。

**陸、研究結果**

**研究一、黃胸錐腹蜾蠃『成蟲交尾』的生殖行為實驗結果**

**實驗 1-1 蛹體羽化成蟲後，性成熟平均時間與變化過程的結果：**

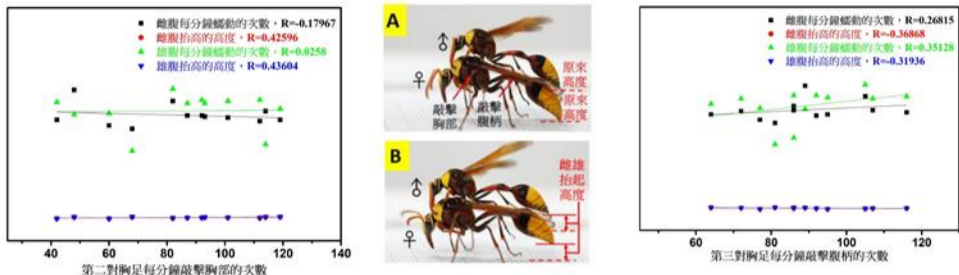


圖(6、7)雄蜂平均性成熟時間 63.7±5.7hr，雌蜂平均性成熟時間 77±10.8hr。

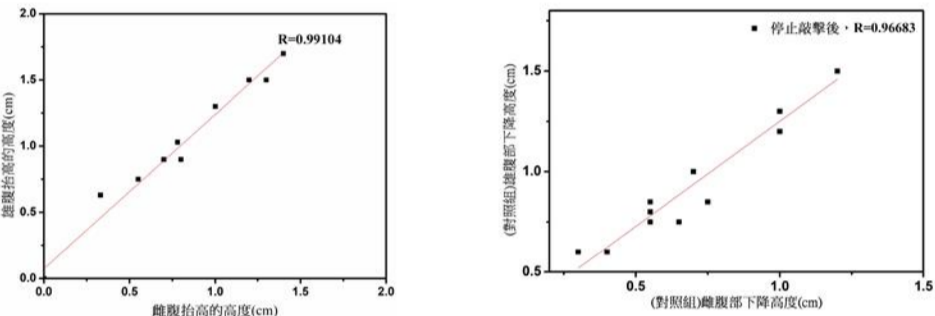
**實驗 1-2 黃胸錐腹蜾蠃『交尾』的結果分析：**

**(1)分析結果可將行為分成四個階段，分別是：**

抱接期→訊息傳遞期→摩擦求偶期→結合期。

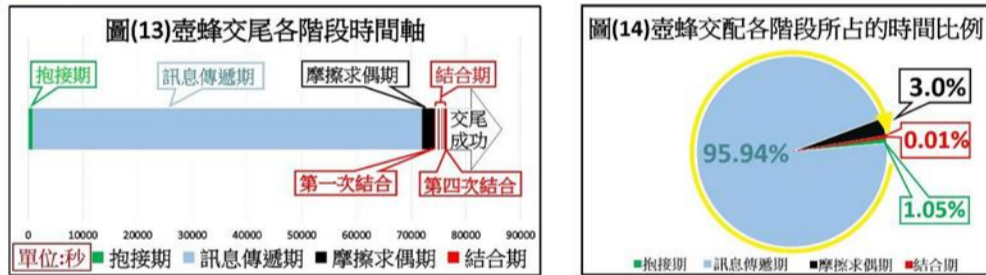


圖(8、9)雄蟲敲擊雌蟲時，雌蟲的腹部蠕動與抬高的行為，只有低度或中度相關而已，但能顯示雄蟲敲擊雌蟲時訊息有緩慢的在相互傳遞。



圖(10、11)當雌蟲受到『敲擊』與『中斷敲擊』的訊息，雌雄皆抬高或放下，兩者間具有 0.991、0.966 的高度相關性。

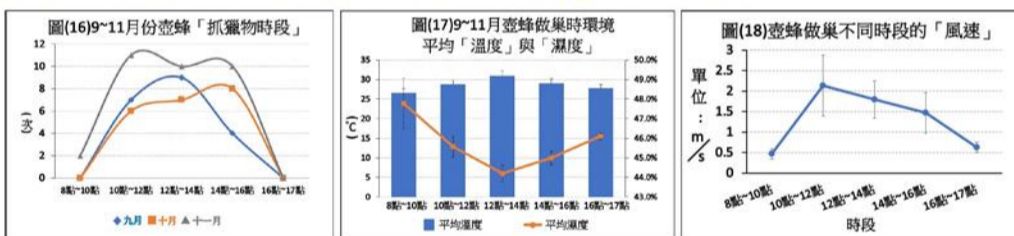
**(2)壺蜂各階段的交尾時間之結果**



圖(13、14)訊息傳遞期時間最長佔 95.94%、而結合期只佔了短短的 0.01%。

**研究二、探討黃胸錐腹蜾蠃『做巢環境』對後代成長的影響之實驗結果**

**實驗 2-1 壺蜂『做巢環境』與『抓獵物時段』的結果分析：**



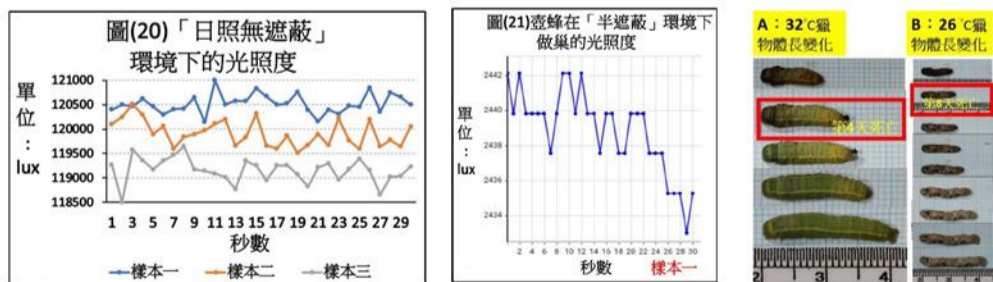
圖(16)10~14 點為抓獵物主要時段。圖(17、18)壺蜂最常在溫度 30.9±0.16°C、濕度 44.2±0.004RH、1.8±0.45m/s 的風速下做巢。

**實驗過後的疑問與想法**

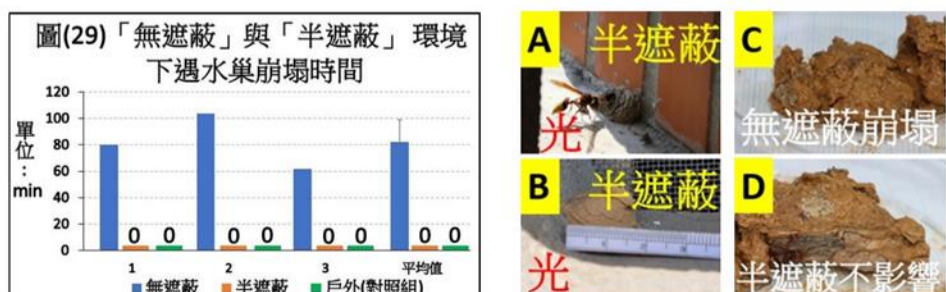
為什麼壺蜂就是喜歡在半遮蔽的地方做巢，不喜歡無遮蔽的日照環境做巢？

再次實驗，解決疑問

提出新假設：無遮蔽環境不利於壺蜂後代生存，因此不喜歡在此處做巢。



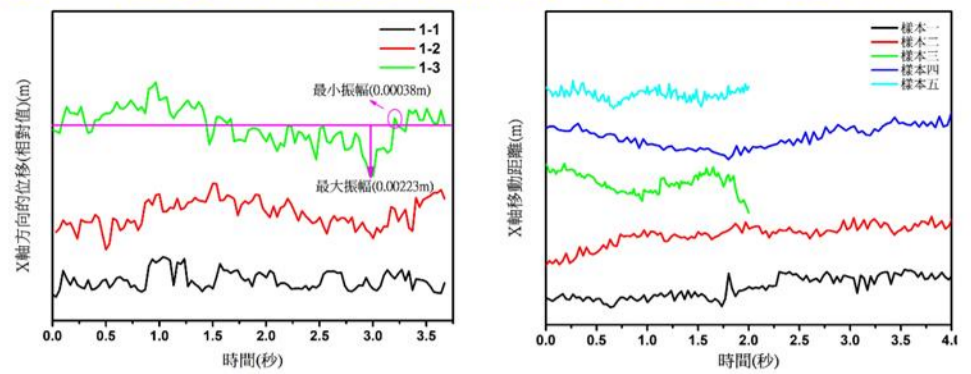
無遮蔽光照度範圍:119642.55lux~120998.63lux，獵物體長減 38%，第 4 天死亡  
半遮蔽光照度範圍:2442.1lux~5130.24lux，獵物體長減 23%，第 8 天死亡。



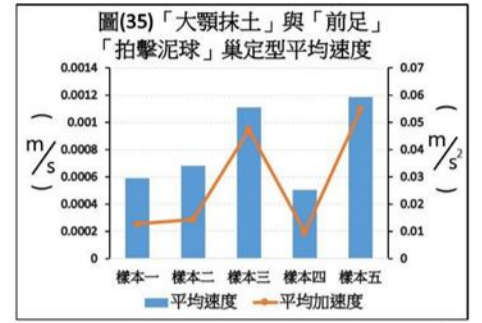
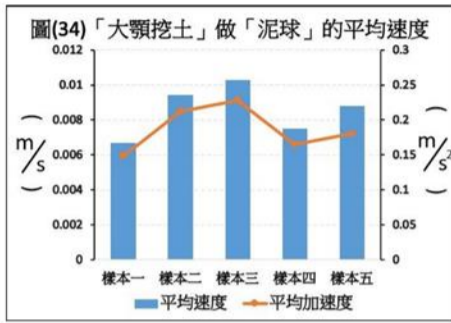
圖(29)在無遮蔽的環境下平均 82±17.2min 巢崩塌，半遮蔽環境下巢不會崩塌。

**結論:**無遮蔽的環境光照過強、溫度也過高，不利於獵物的保存，而且巢遇水容易崩塌，因此壺蜂比較不會選擇無遮蔽且光照強的環境下做巢。

**實驗 2-2 雌蟲會利用『大顎攪拌泥土』做成『泥球和土巢』的結果分析：**

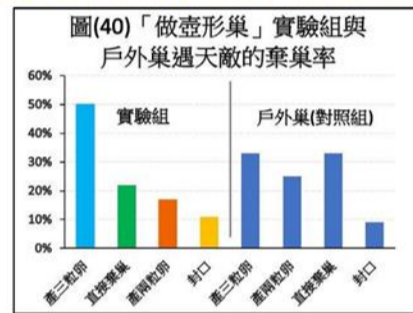


圖(30 左)當壺蜂把泥土做成泥球時，挖土的移動震幅大約為 0.00223m；圖(33 右)大顎與前足拍打泥球時，移動的震幅很小，約 0.00038m 以下。



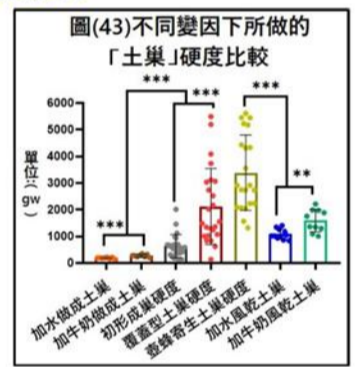
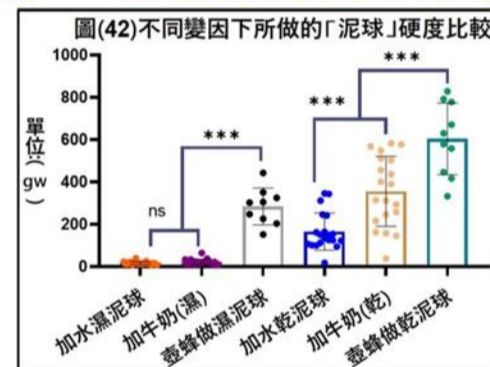
圖(34)大顎挖土做泥球平均速度 0.009±1.3m/s，平均加速度 0.19±2.96m/s<sup>2</sup>。圖(35)大顎抹土與前足拍打泥球平均速度 0.0008±0.0003m/s，平均加速度 0.03±0.02 m/s<sup>2</sup>，在大顎與前足兩者快速拍擊的結果，使泥球變成了土巢。

**實驗 2-3 壺蜂做巢期間『遇到天敵』，出現的行為實驗結果分析：**

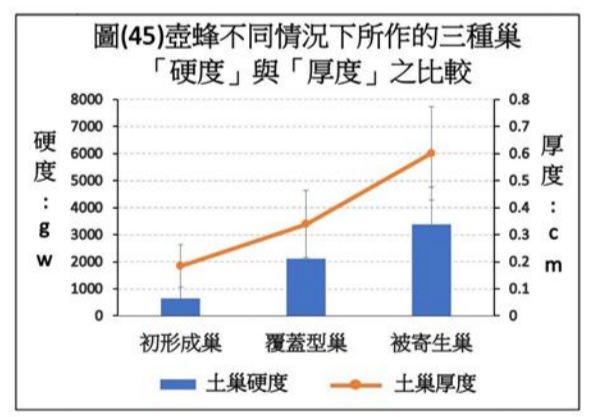
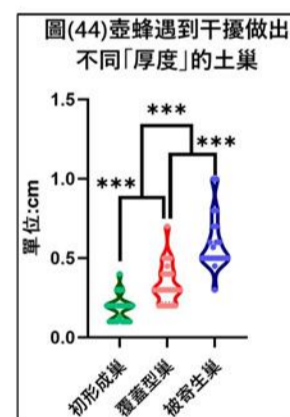


圖(40)當壺蜂做成壺形巢並遇天敵時，棄巢率分別為產三粒卵的 50%>直接棄巢的 22%>產兩粒卵的 17%>封口後才棄巢的 11%。圖(B)有 50%會產下 3 粒的卵後再棄巢，其中一粒已孵化剩卵殼，另外兩粒還沒孵化。

**實驗 2-4 『壺蜂做的巢有多堅固』的實驗結果分析：**



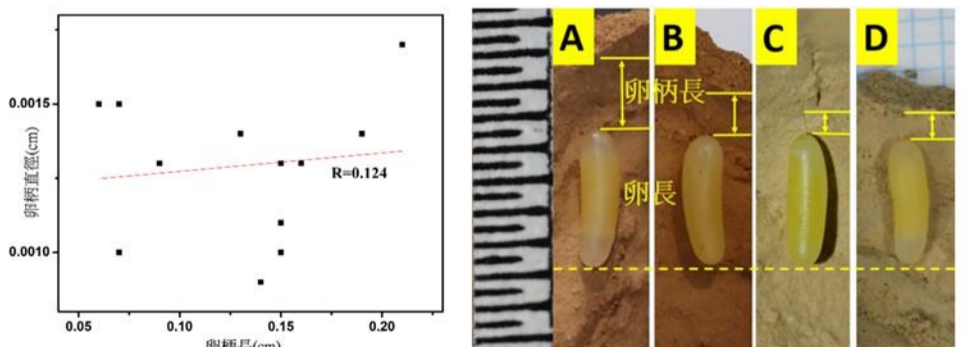
圖(42)壺蜂濕泥球硬度是 284.1±8gw、壺蜂乾泥球則是 603.5±160.3gw。圖(43)在不同變因下做的土巢硬度 p<\*\*\*0.001，顯示土巢之間的硬度有非常顯著的差異性。



圖(44、45)初形成巢與被寄生巢的厚度與硬度分別平均為 0.18±0.08cm、633.5±422.5gw 與 0.6±0.17cm、3388.2±1381.8gw；不同類型厚度的巢 p<\*\*\*0.001，顯示土巢間的厚度有非常顯著的差異性。

**研究三、黃胸錐腹蜾蠃『產卵行為』對卵孵化的影響之實驗結果**

**實驗 3-1 研究『卵』與『卵柄』之間的相關性，結果分析：**

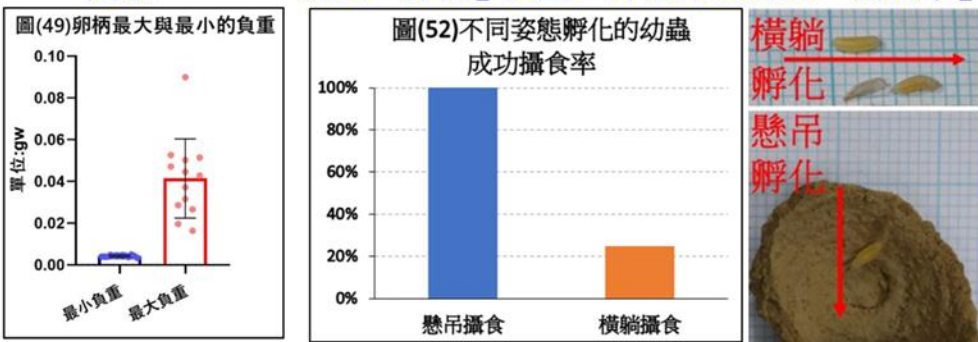


圖(47)卵柄長度與卵柄直徑之間 R 值為 0.12，兩者之間屬於低度相關，因此推測雌蟲產下卵柄的過程，可能為一種隨機的行為。

圖(A~D)測量得知，圖 B 卵柄 0.13cm、卵長 0.41cm；圖 C 卵柄 0.07cm、卵長 0.42cm，所以卵越長、卵柄不一定會越長。

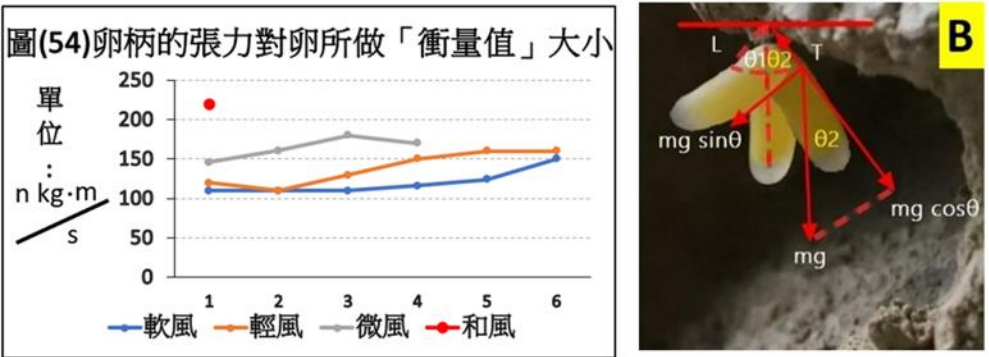


2、3.實驗 3-2、3-3 研究『卵柄』負重、卵懸吊姿態與『攝食率』

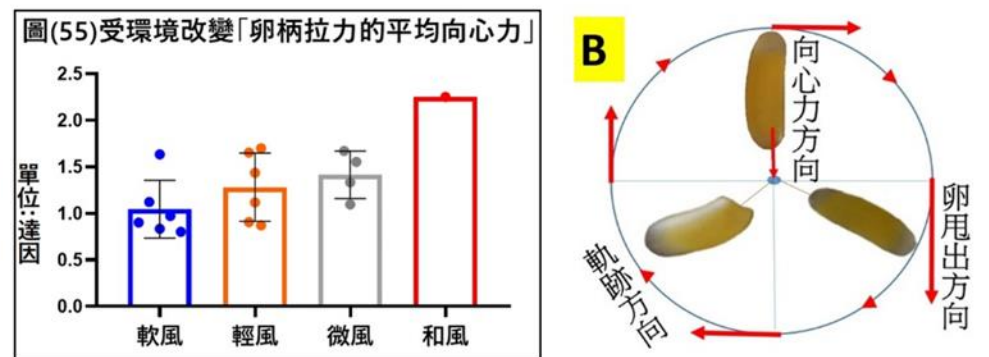


實驗過後的疑問與想法

疑問:壺蜂離開巢，此時巢口大開，若環境改變卵會不會有危險？  
 再次實驗，解決疑問  
 提出新假設：假設卵柄能承受外在環境變化，護住巢內懸吊的卵。  
 實驗步驟：用軟風~和風吹向巢內、外，算衝量值及向心力。

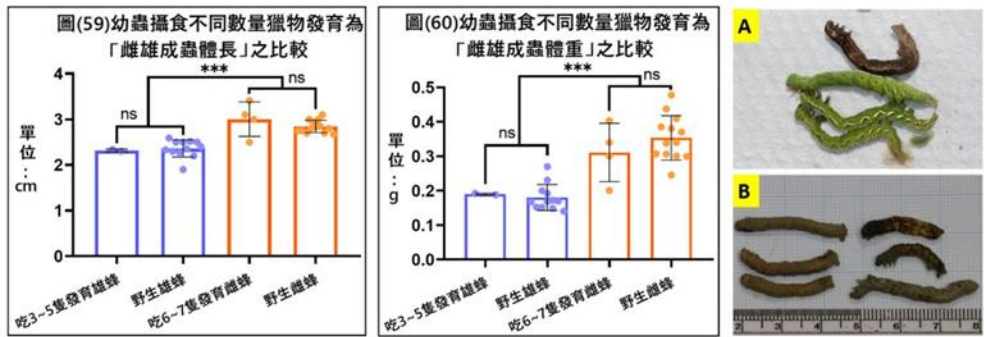


圖(54)卵在和風狀態下，衝量值達 220nkg.m/s，卵柄會從巢壁上剝落，卵掉下來(n=7)。圖 B 為卵柄拉回卵的向心力模擬圖。

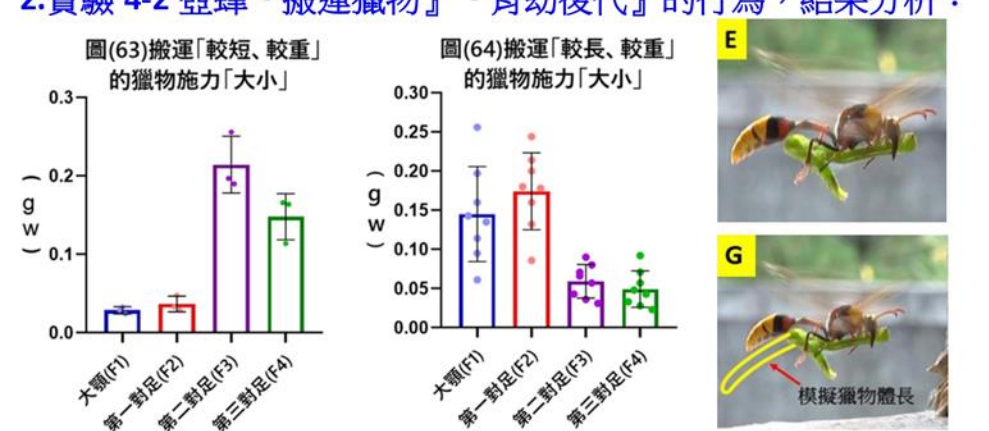


研究四、黃胸錐腹螺贏『育幼後代』的行為實驗結果：

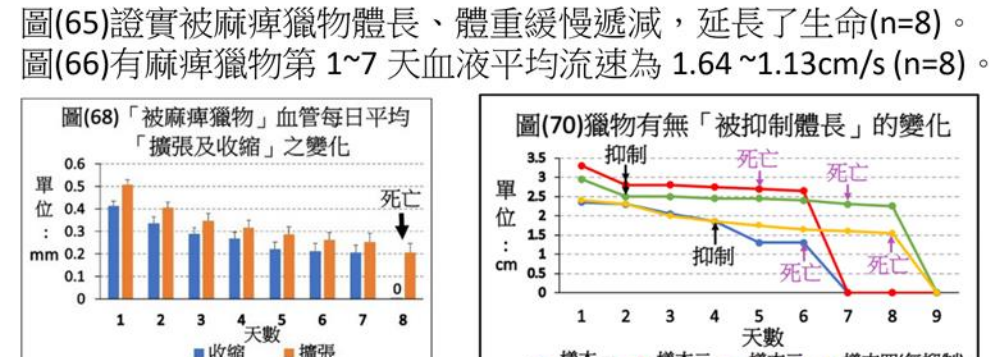
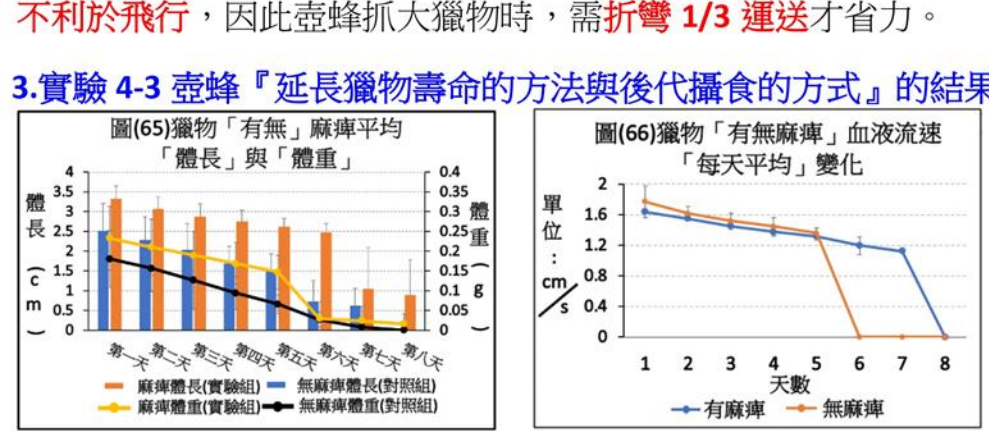
1.實驗 4-1 壺蜂『捕抓獵物的數量』與『育幼後代』的結果分析：



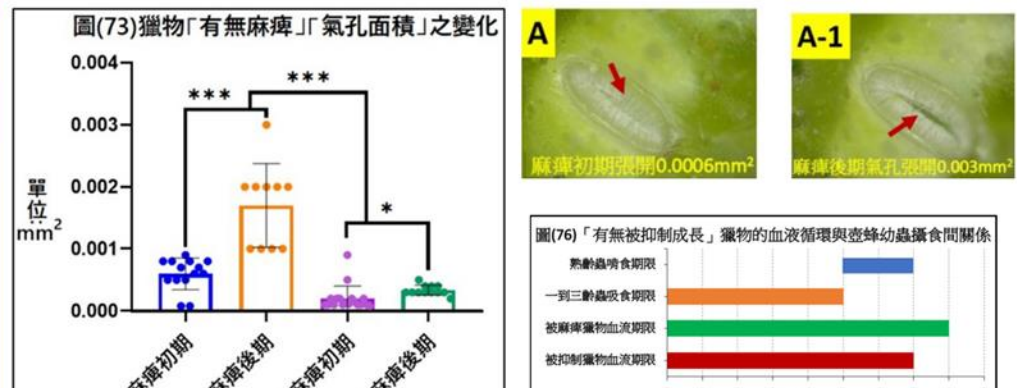
2.實驗 4-2 壺蜂『搬運獵物』『育幼後代』的行為，結果分析：



3.實驗 4-3 壺蜂『延長獵物壽命的方法與後代攝食的方式』的結果



圖(68)獵物血管平均第 1 天收縮與擴張分別為 0.41mm、0.51mm，第 8 天獵物死亡血管平均固定 0.21mm (n=8)。圖(70)獵物被抑制生長仍然可延長 3~5 天生命，壺蜂幼蟲可覓食新鮮獵物 (n=4)。



圖(73)獵物麻痺後，平均氣孔張開面積從 0.0006mm<sup>2</sup>~0.0017mm<sup>2</sup>，有無麻痺氣孔前後張開面積  $p < *** 0.001$  有非常顯著差異。圖(75、76)獵物被抑制或被麻痺，壺蜂幼蟲都可攝食新鮮獵物。

柒、問題與討論

一、關於『交尾』、『蜂繭』、『產卵』、『抓獵物』問題與討論

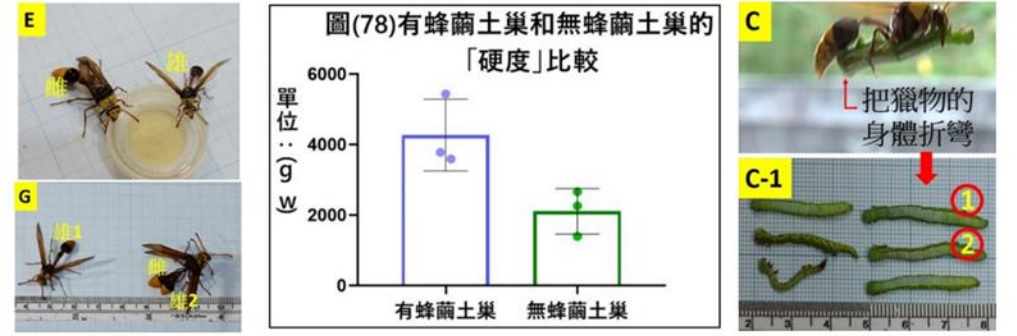


圖 E、G 初步獲得雌性黃胸錐腹螺贏只有一次交尾行為。圖(78)有、無蜂繭土巢平均硬度分別是 4269gw、2106gw。圖 C、C-1 壺蜂抓入 6 隻大小不一的獵物，其中 2 隻長約 3.4cm 的獵物，被折彎搬運。

研究總結：我們與前人研究報告的差異結論之比較

研究項目	前人的研究	與前人『不同的研究』與『新發現』
一、『交尾行為』的研究	無研究	1.新發現：雌雄壺蜂平均性成熟時間分別為 77±10.8hr、63.7±5.7 hr。交尾時間長達 21hr，結合期只佔 0.01%。
二、探討壺蜂『做巢環境、巢定型原因』與『特性』	無研究	1.新發現：半遮蔽獵物的體重與體長只減少 48%、23%，利於獵物保存。 2.新發現：做巢遇天敵棄巢、67%產 2~3 粒卵，把巢做厚、做空巢偽裝。 3.新發現：土巢有微量蛋白質成分，且有蜂繭覆蓋的巢硬度達 4269gw。
三、研究『卵與卵柄』間的關係	無研究	1.新發現：卵柄平均長度是卵的 0.32 倍、卵柄最大負重平均為 0.041gw。 2.新發現：微風吹卵搖平均 9.3 次/s，卵柄的張力對卵做出 164.3nkg.m/s 的衝量值、向心力為 1.41 達因。
四、獵物數量與後代性別間關係	無研究	1.新發現：壺蜂捕抓 3~5 隻獵物的巢室後代發育為雄性成蟲；捕抓 6~7 隻獵物的巢室後代發育為雌性成蟲。
五、壺蜂如何『搬運獵物到巢』施力方式	無研究	1.新發現：搬運等長等重、較短較輕、較短較重的獵物時，分別只有『2 種、1 種、3 種』的施力方式。 2.新發現：搬運較長、較重獵物時，有『8 種』施力可能，且飛行重心偏移，所以壺蜂將獵物折彎 1/3 再運送。
六、壺蜂『育幼的行為』與『後代攝食』的方式	無研究	1.新發現：獵物被麻痺、被抑制、氣孔張開 494%，皆可延長獵物壽命。 2.新發現：獵物被麻痺後 1~7 天平均血液流速為 1.64~1.13cm/s，因此獵物被麻痺血液流速會逐漸變慢。 3.新發現：壺蜂幼蟲 1~3 齡階段吸食獵物血液，4 齡幼蟲攝食獵物身體。

捌、結論

- 研究一、黃胸錐腹螺贏『成蟲交尾』的生殖行為結論：
- 壺蜂性成熟時間：雌雄壺蜂平均性成熟時間分別為 77hr、63.7hr。
  - 壺蜂交尾的過程：壺蜂交尾過程長達 21 hr，其中訊息傳遞期時間最長佔了 95.94%、而雌雄腹部結合期只佔了短短的 0.01%。
- 研究二、黃胸錐腹螺贏『做巢環境』對後代成長的影響結論：
- 壺蜂選擇做巢環境：半遮蔽環境下光照、溫度皆較適宜，獵物的體重與體長只減少 48%、23%、壽命可活 8 天，有利於後代的生存。
  - 土巢定型的原因：雌蟲大顎與前足拍打速度很快，巢能快速成型。
  - 壺蜂做巢過程遇到天敵的行為：巢成壺形遇天敵，有 67%產下 2~3 粒卵再棄巢，當巢做好才遇天敵，壺蜂會持續鋪沙，有 56%把巢做厚一點，或有 44%再做空巢當作偽裝，讓幼蟲順利成長。
- 研究三、黃胸錐腹螺贏『產卵行為』對卵孵化的影響結論：
- 卵與卵柄間關係：卵柄是雌蟲隨機產下，平均長度是卵的 0.32 倍。
  - 懸吊卵的孵化率：懸吊卵孵化可吸食獵物體背血液，增加生存率。
  - 卵柄的負重：微風下，卵平均搖晃速度 9.3±0.94 次/s、此時平均衝量為 164.3±12.5nkg.m/s、向心力則為 1.41±0.22 達因。
- 研究四、黃胸錐腹螺贏『育幼後代』的行為結論：
- 獵物數量：雌蜂抓 3~5 隻獵物的平均體重 0.23±0.05g，幼蟲將發育雄蟲；抓 6~7 隻獵物的平均體重 0.34±0.05g，幼蟲將發育雌蟲。
  - 壺蜂搬運獵物回巢的行為：壺蜂搬運『較長、較重』獵物時，有 8 種施力可能，且重心不穩，因此將獵物折彎 1/3 利於壺蜂飛行。
  - 壺蜂如何延續獵物生命：獵物被麻痺後，(1)被麻痺活到 8 天、(2)被抑制活到 7 天、(3)氣孔張開 494%讓更多 O<sub>2</sub> 進入體內延長生命。
  - 獵物的血液循環與壺蜂後代攝食之間關係：獵物被麻痺 1~7 天平均血液流速 1.64~1.13cm/s，第 8 天血液停止流動。壺蜂 1~3 齡幼蟲成長期 5 天，吸食獵物血液；4 齡幼蟲成長期 2 天，啃食獵物身體。

玖、參考資料及其他

一、林孟寬 (2019) · 泥造城堡--探討黃胸泥壺蜂「銜泥建造巢室」的策略 · 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會作品說明書