

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 生物科

第一名

080315

飛天遁地虎父子—貝氏虎甲蟲動物行為之探討

學校名稱：嘉義市東區崇文國民小學

作者： 小六 游舒珈 小六 李紫寧 小五 黃詩蘊	指導老師： 李宗來 廖建溢
---------------------------------------	-------------------------

關鍵詞：捕食行為、繁殖行為、築穴巢行為

得獎感言

虎甲引路，光明前途

科展進行的過程中充滿了許多挑戰，三個志同道合的女孩犧牲了許多休息時間，不斷的解決問題與克服困難，最終苦盡甘來，完成了一個不可能的任務，這樣圓滿的結果讓長期辛苦的點點滴滴都變成了甜美的回憶。

舒珈：非常榮幸能夠在這次科展中獲得第一名，參展期間，與同學們一起展示我們的作品，彼此合作、互相鼓勵的情景，讓我深刻體會到團隊合作的重要性，也更加珍惜彼此的友誼。

科展對我個人更是受益良多，在研究中除了學到更多生物知識，也培養了我解決問題的能力和探究的精神，讓我明白到，科學是一個無窮無盡的世界，只要我們保持好奇心和探索的精神，就能不斷突破自己。

更體認到「不要害怕挑戰，勇於嘗試」的信念，研究雖然會有遇到困難的時候，但只要用持之以恆，相信自己的信念，就能克服一切困難。相信自己，一定能夠創造出更驚人的成果！

我要感謝所有支持和幫助我們的老師及家人。沒有你們的鼓勵和指導，我無法取得這次的佳績。這次的得獎讓我更加堅信，只要努力不懈，勇於追求夢想，就能夠實現！

紫寧：整個實驗一開始便充滿了挑戰，須要不斷嘗試的將虎甲蟲成功的在教室內飼育與繁殖，以及設計出可完整清楚觀察幼蟲動物行為的實驗器具。最後加上不斷克服過程中的困難才完成了整個實驗。而我們也透過實驗，從對虎甲蟲的一知半解到一步一步慢慢地剖析和充分了解，過程中不斷驗證我們的推論和顛覆我們對虎甲蟲原有的想像，而這樣的歷程也讓我們得到了對自己的肯定與獲得新知的喜悅。實驗中，非常感謝李宗來老師，他的辛苦指導與帶領，是我們今天可以站在台上的重要助力！也要感謝廖建溢老師及所有指導過我們的老師，有著老師們強而有力的後盾，科展的許多艱辛才能更順利的突破！我們因天時、地利、人和，不負眾望的得到了全國科展第一名，這是很珍貴的榮耀與經驗。

詩蘊：實驗期間，每天觀察著我們研究的虎甲蟲，也習慣了每天有牠們的陪伴。雖然有時覺得枯燥與辛苦，但也有不少令人回味無窮的畫面，例如今我們記憶深刻的「夜探虎甲蟲」。我們佈置好一切，當夜色一暗燈光一開，許多昆蟲趨光而來，昆蟲在燈光下漫天飛舞的畫面，讓我們驚呼連連！可說是令人難忘且特別的回憶。生物科展是辛苦與需要花費許多時間的探究活動，但在野外看到許多不同且又特別的生物時，卻都是一種驚奇，我想樹林裡一定有著更多的生物等著我們持續的去探索與研究。最後要謝謝在背後一直支持著我們的老師與家長們，謝謝您們！



野外調查—雖然頂著大太陽，仍然細心觀察著虎甲蟲棲息環境的特徵



市賽獲推薦參加全國賽，雖然開心，但卻也是新壓力的開始



國小組生物科第一名，大家終於可以開開心心的合照一張照片囉！

飛天遁地虎父子—貝氏虎甲蟲動物行為之探討

摘要：

貝氏虎甲蟲多在溪流附近開闊明亮處活動，有趨光性，成蟲活動範圍雄蟲大於雌蟲。捕食模式因獵物體型或移動類型差異有不同階段，獵物偏離追擊方向時突然改變角度且速度在 $4.0^\circ/\text{ms}$ 以上時，易「重新鎖定」；對接近地面的獵物反應明顯且偏好較大型獵物。

雄蟲對動態雌蟲反應較明顯，會主動咬上交尾，雌蟲偏好產卵於潮濕、水平土層。幼蟲偏好潮濕、沙質、明亮土層築巢，土層深度達 2 倍以上體長時較能穩定棲息；捕獵時以頭與前胸塞住洞口，藉光影變化感覺獵物，以頭與前胸的彈器及腹部 1-5 節快速後甩彈出捕食(最快約 34.9cm/s)。土層狹窄時會築延伸穴道。土坡越斜挖掘角度越大。淹水時築土門塞洞，土門深度與水量大小有關。

壹、前言：

一、研究動機：

露營是我們家日常休閒活動，有一次在溪邊遊玩時，發現很多隻背上有金屬綠色及白色斑點的昆蟲，媽媽說這好像是金龜子，但她並不確定；於是我將牠拍照下來。回到學校，利用課餘時間查尋了關於綠色身體，白色斑點的昆蟲；知道了這是虎甲蟲：這種昆蟲行為很特殊，雖然牠會飛，不過通常比較喜歡在地面或步道上行走且飛飛停停，我對牠感到萬分好奇，於是開始了我們的實驗與探討。

二、研究目的：

(一)野外調查 (二)生活史與形態特徵 (三)成蟲捕食行為 (四)成蟲繁殖行為 (五)幼蟲動物行為

貳、研究設備及器材：攝影機、筆電、手機、M5stack 與土壤濕度計、照度計、溫濕度計。

參、研究架構：如封面—研究架構圖

肆、研究方法、結果與討論：

研究一、野外調查

一、大樣區調查：

研究過程與方法：

隨機選擇溪流附近的步道進行調查，分別於 7 月、8 月、9 月各進行 1 次調查並進行紀錄。

結果：共選擇了 9 個大樣區，將大樣區調查的相關結果紀錄如下：

樣區編號	樣區環境	虎甲蟲(成蟲)棲息狀況	成蟲蹤跡 有：O；無：X
一	溪流緊鄰步道，步道兩側有許多植物，步道上亦有相當的植被狀況，有兩條無植被長形地帶，另外有泥巴地也無植被。	前二次發現大約僅有 3 隻，第三次則發現數量較多約為 10 隻。容易在無植被地帶活動。僅發現 1 次停於植物上。另陽光下容易發現蹤跡。	O O O
二	溪流離產業道路有一段距離，道路相當寬闊且長。一邊是水泥坡，坡上為樹林，另一邊為樹林草叢形成的斜坡。	道路寬且長，發現隻數不多，每次隻數都沒有超過 5 隻，第二次完全沒有發現。大多在產業道路上活動。常有農用車或工程車出入。	O X O
三	緊鄰溪流，前半段與樣區 1 較類似，一側為容易坍塌的斜坡。後半段則是較寬且無植被的產業道路。	前半段發現隻數每次最多為 3 隻，大都在無植被的環境活動。後半段較寬闊(但不如樣區 2 寬闊)，每次發現隻數大約在 6-10 隻左右(道路上)	O O O
四	溪流在附近，有部分道路緊鄰溪。後半段為農家菜園與養魚人工池。人為活動應較頻繁。	前二次無發現蹤跡，第三次在道路上一積水且有泥沙淤積附近發現約 5 隻。且有疑似幼蟲的穴巢	X X O
五	溪流離步道有段距離，步道兩側為樹林與草叢。步道寬度不大，兩側樹林容易遮住陽光。	前二次有發現虎甲蟲蹤跡，大都在步道上活動，每次數量約為 3 隻，第三次則無發現。	O O X
六	產業道路位於溪流上方有段距離，樣區開闊明亮，尤其是最後段，兩側為樹林與草叢。	三次都有發現蹤跡，前二次較多都約 10 隻左右，第三次則約發現 6 隻左右。大都在產業道路上活動。	O O O
七	產業道路位於溪流上方有段距離，但有步道分岔通往溪流，具一定明亮程度的道路。	每次發現數量都在 5 隻以內。發現時都在道路上活動。	O O O
八	沿著樣區 7 的分岔步道往下所到達的溪流，因流量小所以溪流旁有需多大小石頭與泥沙堆積的地方。整體相當開闊明亮	每次都可發現約 15 隻以上。活動蹤跡較常發現在泥沙堆積較開闊的位置，有時也可在石頭上發現。	O O O
九	進入樣區的主要產業道路寬闊(與樣區 2 同為本次調查樣區中最寬)，後半段分岔出四條產業道路。第一條分岔雖有林蔭但仍算明亮，尤其於後半段常透入陽光，第二、三條開闊明亮，第四條分岔步道整段大都相當狹小且兩側樹林形成較暗的林蔭環境。溪流大都緊鄰產業道路道。	此樣區是本樣區調查中發現虎甲蟲數量最多的地點，每次都可發現 20 隻以上的數量。僅有第四條分岔步道無發現虎甲蟲蹤跡外，其他都可以相當容易發現。大都在產業道路上活動。並且很容易在產業道路旁的泥土牆或地面發現幼蟲的洞穴。	O O O

<p>樣區一：兩條無植被長形地帶容易發現虎甲蟲活動。(紅色箭頭處)</p>	<p>樣區一：大都在無植被環境活動。</p>	<p>樣區一：有陽光照耀且裸露地容易發現虎甲蟲活動(紅色箭頭處)。</p>
<p>樣區二：產業道路相當開闊，虎甲蟲大都在產業道路上活動(之後樣區也都類似)</p>	<p>樣區二：調查時常發現有農民貨車經過或施工車輛停放，人為干擾可能影響棲息</p>	<p>樣區三：前半段與樣區一較類似，虎甲蟲仍發現常在無植被環境活動。</p>
<p>樣區三：後半段較寬且明亮，虎甲蟲數量變多。</p>	<p>樣區四：後半段兩側有菜園與人工魚池，人為干擾多。</p>	<p>樣區 4：第三次調查出現積水泥沙地，在泥沙地與附近發現虎甲蟲。</p>
<p>樣區五：溪流距離較遠，且林蔭明顯。</p>	<p>樣區六：溪流位於下方有段距離，產業道路較樣區五開闊明亮。</p>	<p>樣區七：道路與樣區六開闊度及明亮程度相當，有分岔步道與下方溪流連結。</p>

		
<p>樣區八：位於溪流兩側在水量較少時所裸露出來的石頭與泥沙堆積地。(虎甲蟲數量相當多)</p>	<p>樣區九：有 4 條分岔產業道路與步道樣區，都與溪流相當接近。(虎甲蟲數量相當多)</p>	<p>樣區九：在道路樣區一側土壤土坡平面與垂直面上都發現幼蟲洞穴。</p>

討論：在溪流附近發現虎甲蟲的機率約為 85.2%(23/27)，且離溪流越近虎甲蟲容易出現較多的數量(如樣區八、樣區九)，之後以實驗觀察驗證虎甲蟲習性與環境水份關係：研究四-四、研究五-二-(一)，我們認為虎甲蟲的棲息與溪流環境有相當重要的關係。也發現虎甲蟲偏好在無植被(如產業道路等)、開闊明亮(研究一-二)且人為干擾較少的環境活動。

二、虎甲蟲活動與環境關係—環境溫溼度、照度與虎甲蟲活動數量之調查

研究過程與方法：

1.大樣區九再分成 5 個樣區，每個樣區面積約 57m²(以樣區 4 為依據)。較長樣區再分成幾個小樣區求其平均值，樣區 2 分成 3 個，而樣區 3 則分成 2 個。**樣區分佈如右圖。**

2.各樣區來回調查虎甲蟲出現於樣區的隻次，每次間隔 1 小時。並測量溫濕度與照度。實驗重複 3 次。

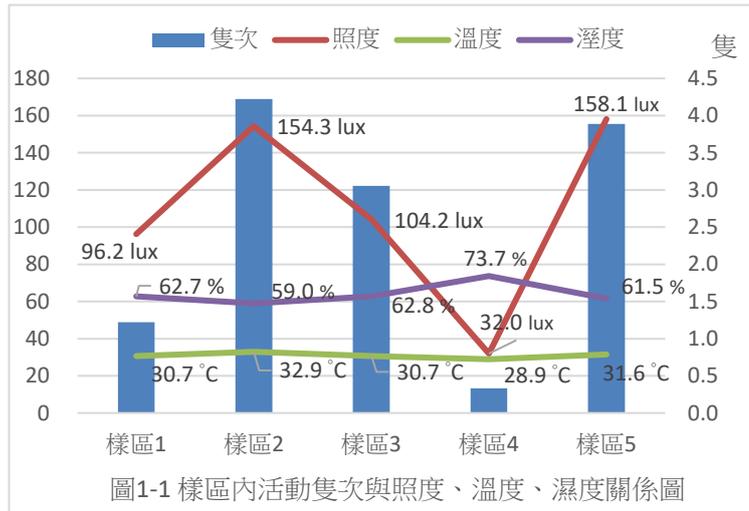


		
<p>樣區 1：步道最短，寬度中等，有部分林蔭，離溪流稍遠。</p>	<p>樣區 2：步道最長，寬度大，開闊明亮，溪流於旁邊。分成 3 個子樣區。</p>	<p>樣區 3：步道次長，寬度第二，開闊明亮，離溪流稍遠。分成 2 個子樣區。</p>



結果：樣區 2 在每次來回調查時發現虎甲蟲活動的平均隻次數量最高(約 4.2 隻次)，樣區 4 則最少(約 0.3 隻次)。如圖 1-1。

討論：發現樣區 2 與樣區 5 照度高；發現虎甲蟲活動的平均隻次數量也較多，而樣區 4 因狹小且林蔭遮住陽光導致較為陰暗(照度最低)，虎甲蟲活



動的數量最少，且其中幾次記錄到虎甲蟲活動都是在步道較為開闊明亮的入口處，再深入步道內部則都沒有紀錄。而溫濕度則因 5 個樣區相當接近而差異不大，僅有樣區 4 的濕度較大，從結果發現溫濕度對於虎甲蟲活動的影響較不明顯。由此驗證在進行樣區調查時，開闊明亮的樣區一般也較容易發現較多虎甲蟲活動。

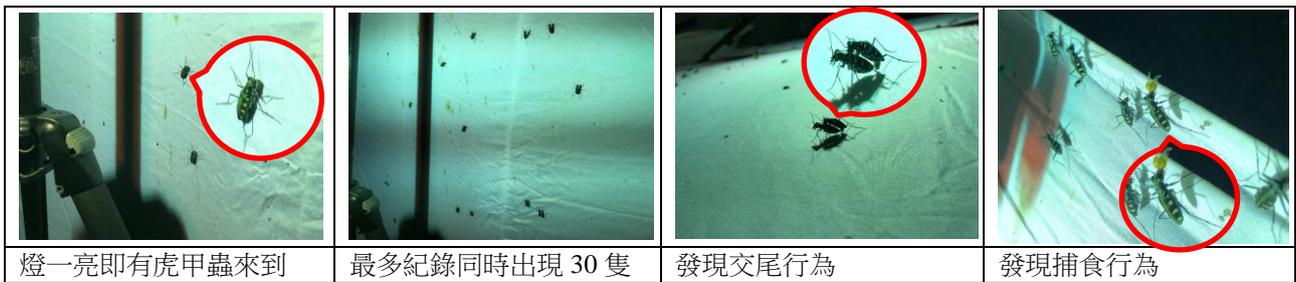
※想法：既然虎甲蟲偏好開闊明亮環境，那夜晚也會趨向光亮環境嗎？

研究過程與方法：

在大樣區九進行夜間燈光誘集，誘集時間 19：00-21：30。

結果：誘集時間內發現最多有 30 隻虎甲蟲(雌雄皆有)同時在光源附近停棲與活動。其餘發現昆蟲紀錄於研究日誌中。





討論：一開始點燈 5 分鐘內有 6 隻虎甲蟲出現在光源附近的白幕上，約 1 小時左右則為 28 隻，誘集時間內最多發現了 30 隻同時停棲於白幕上。因此我們認為虎甲蟲即使於夜間仍會趨向光線明亮的環境(具趨光性)活動，如捕食與交尾等行為。

三、虎甲蟲的領域範圍

想法：一開始試著以手機的測距儀跟著虎甲蟲移動來測距離，發現常常跟丟了而徒勞無功，最後參考文獻的標記法(B. Merle Shepard et al.,2008)來進行實驗。

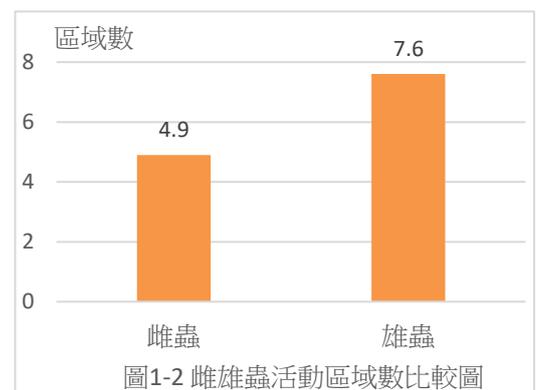
研究過程與方法：

- 1.將大樣區九的樣區 2 與樣區 5 劃分成寬 3m 長 8m 區域共 21 區，並以標記法進行調查。
- 2.第 1 天標記，第 2 天分三個時段(0800-1000、1100-1300 及 1400-1600)再捕捉與紀錄。
- 3.原標記區域再捕捉到記為 1 區域，若離原標記區域 2 個區域則記為 2 區域，以此類推。



結果：雄雌蟲活動區域分別平均約為 7.6 與 4.9 個區域。

討論：發現雄蟲的活動範圍較雌蟲廣，若換算成面積雄蟲平均活動範圍約 $182.4\text{m}^2(24\text{m}^2 \times 7.6)$ ，雌蟲約 $117.6\text{m}^2(24\text{m}^2 \times 4.9)$ ；在繁殖行為實驗中(研究四-二)，發現雄蟲會主動尋找雌蟲進行交尾，雄蟲擁有較廣的



活動範圍，這樣可能較有利於找尋到雌蟲進行交尾。而捕食行為方面，透過我們在之後捕食行為的觀察(研究三-一)發現雄蟲能夠捕食的獵物體型較雌蟲小，因此若活動範圍廣能夠搜尋到的獵物也能夠更多樣，更有利於生存。

研究二、生活史與型態特徵

透過飼育觀察與紀錄將貝氏虎甲蟲的生活史與形態特徵紀錄如下：

		
<p>卵：長約 2.44mm，寬約 1.24mm，剛產下的卵會稍微略小，發育期約 7.8 天。</p>	<p>1 齡蟲：長約 5.88mm，寬約 1.21mm，穴巢口徑約 1.95mm，幼蟲期蛻皮前會將洞口封住，發育期約 12.6 天(含封土約 4 天)。</p>	<p>2 齡蟲：長約 12.99mm，寬約 1.98mm，穴巢口徑約 3.12mm，發育期約 27.3 天(含封土約 6.3 天)。</p>
		
<p>3 齡蟲：長約 19.96mm，寬約 3.61mm，穴巢口徑約 5.16mm，發育期落差大約 115-235 天進入蛹期(含封土約 16.6 天)。</p>	<p>蛹：長約 14.03mm，寬約 3.63mm，發育期約 11 天。</p>	<p>成蟲：雄長約 16.16mm，寬約 5.08mm，雌蟲略大於雄蟲長約 17.36 mm，寬約 5.51mm。發生期 5-11 月。雄蟲前足跗節具黃色毛，雌蟲則無。</p>
		
<p>蟄伏：蛹蛻皮成成蟲時會蟄伏在土裡約 4 天。</p>	<p>封土：幼蟲期蛻皮前會將洞口上方封住，封住形式與文獻不同(文獻為在距洞口 2cm 的地方封住)</p>	<p>破土：幼蟲蛻皮後會破土並將蛻皮拋出穴道後修飾成適合棲息的穴巢，也可能換位置在挖掘新穴巢，洞口相當接近圓形。</p>

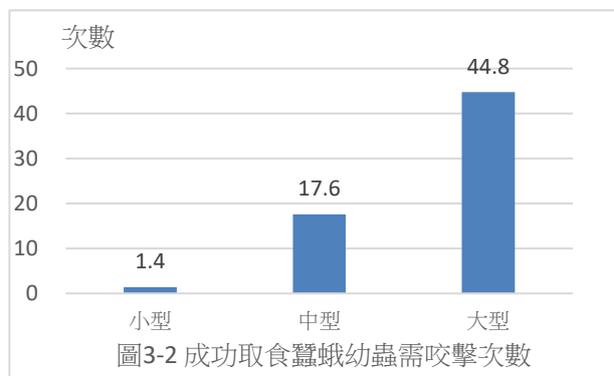
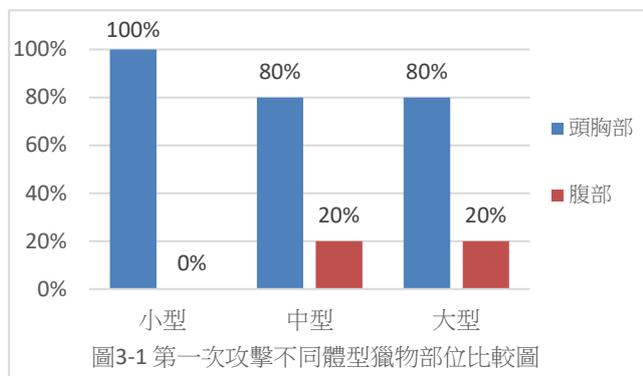
研究三、成蟲的捕食行為

參考文獻(Tomasz Rewicz and Radomir Jaskuła,2018、周佳儒等，2017)找出貝氏虎甲蟲的捕食模式與捕食獵物體型偏好。

一、不同體型獵物捕食模式

研究過程與方法：容器內放入飢餓三天的虎甲蟲雌蟲，穩定後放入不同體型的蠶蛾幼蟲，分成小型約「1.5-2cm」、中型約「2.5-3cm」、大型約「3.5-4cm」，記錄捕食行為。重複 5 次。

結果：第一次攻擊蠶蛾幼蟲頭胸部機率高。成功捕食大型蠶蛾幼蟲需咬擊次數最多。

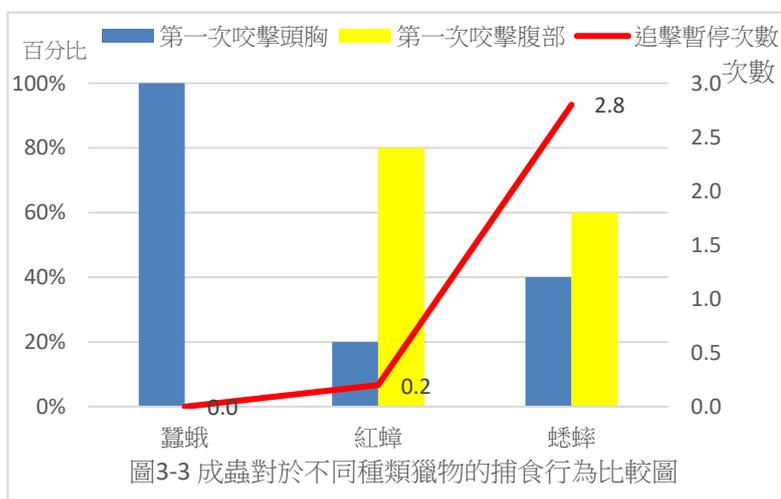


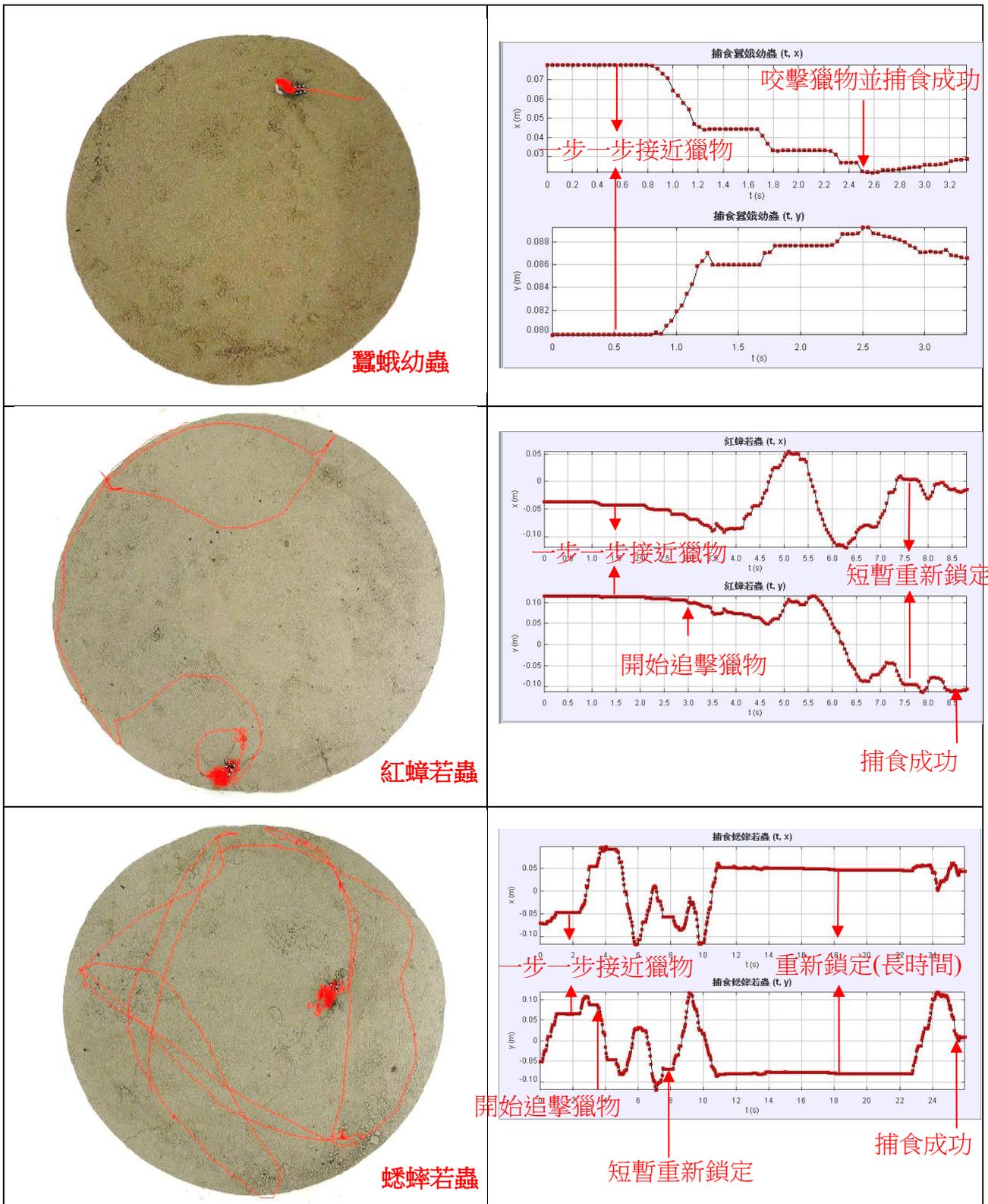
討論：不論蠶蛾體型大小，虎甲蟲大都會先選擇攻擊幼蟲的頭胸部，我們認為是因為頭胸部常是幼蟲「移動」較明顯的部位。且面對較大體型的獵物時，會出現「重複咬擊」減弱獵物反抗能力的捕食模式。體型越大「重複咬擊」次數越多。

二、對不同移動方式獵物的捕食模式

研究過程與方法：以蠶蛾幼蟲、紅蟑若蟲與蟋蟀若蟲三種不同移動方式的獵物(體長約 8-10mm)供飢餓三天虎甲蟲雌蟲捕食。紀錄其捕食行為，重複 5 次。

結果：第一次捕食蠶蛾幼蟲咬擊頭胸部的機率达 100%，而紅蟑與蟋蟀若蟲的機率較低。捕食蟋蟀若蟲時追擊暫停的次數最高，每次測試平均約有 2.8 次的暫停追擊次數。



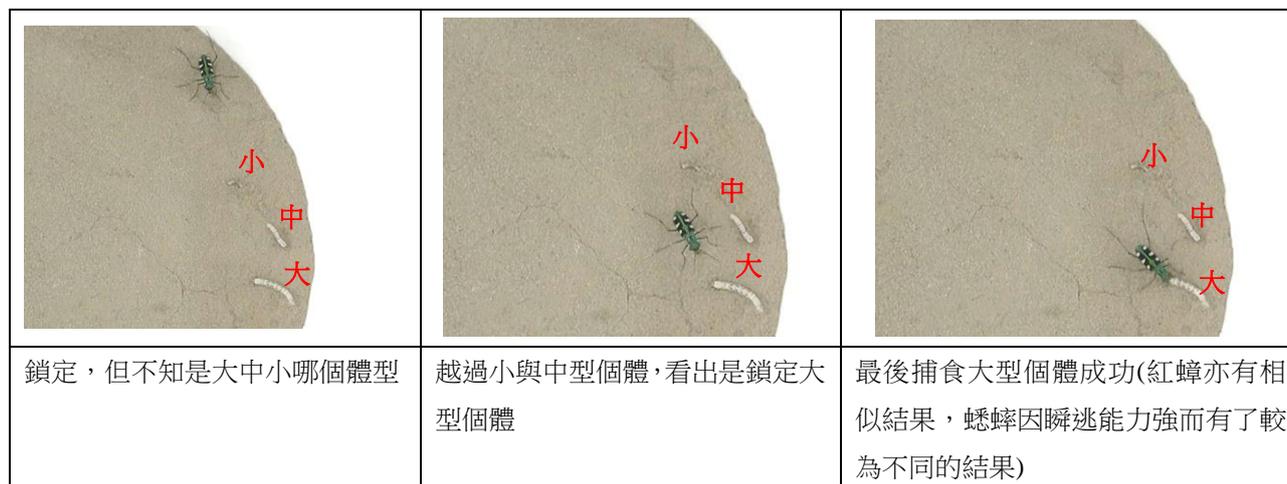
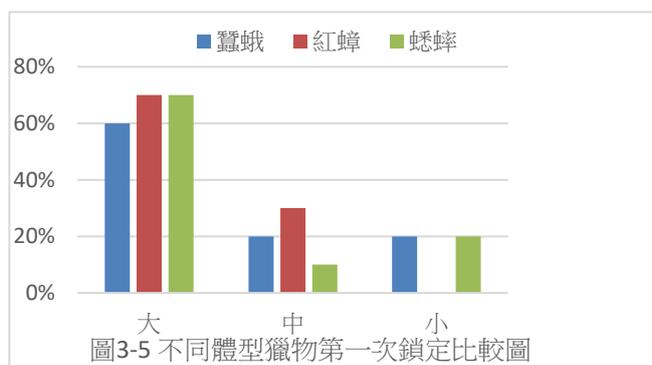
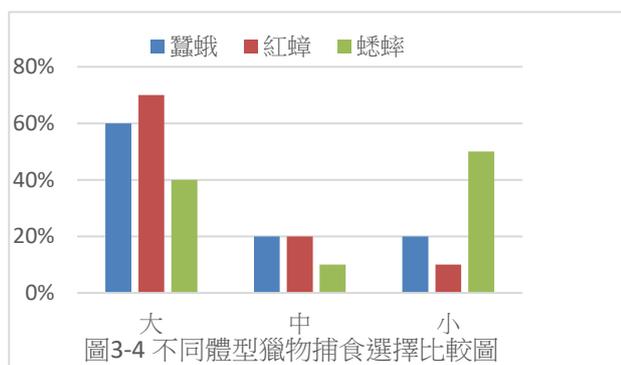


討論：捕食蠶蛾幼蟲等移動速度較慢獵物時容易成功咬擊到頭胸部，捕食紅蟻、蟋蟀若蟲等移動速度快的獵物時，則在獵物後方「追擊」，以至於第一次容易咬擊到獵物的腹部。此外，獵物瞬間跳離時，易失去追擊獵物方向而暫停追擊，當獵物重新移動時，再「重新鎖定」追擊，尤其在捕食能瞬間跳躍移動的蟋蟀時更容易出現。

三、不同移動方式與體型獵物的捕食選擇

研究過程與方法：雌成蟲穩定後分別放入不同移動方式的大中小不同體型的獵物，獵物種類分別為蠶蛾幼蟲(17-19、12-14、7-9mm)、紅蟑若蟲與蟋蟀若蟲(兩獵物體型為：8-9、6-7、4-5mm)。隨機選取 10 隻飢餓三天的虎甲蟲實驗，觀察記錄捕食情形。

結果：對於蠶蛾幼蟲與紅蟑若蟲偏向捕食體型大的個體，對蟋蟀則捕食體型小的個體，但第一次鎖定的獵物，都是三種獵物中的大型個體。



討論：虎甲蟲第一次鎖定的獵物都偏好大型個體，但像蟋蟀若蟲這類具有較強跳躍能力的獵物，常讓虎甲蟲失去追擊方向(如研究三-二實驗)，轉而常重新鎖定在其附近的中型或小型個體，而小型個體因跳躍能力較弱，被捕食成功的機率也就提高了。因此我們認為虎甲蟲在可捕食成功的情況下，偏好捕食較大型的獵物。

四、獵物逃離追擊方向角度改變速度

想法：在之前實驗發現，蟋蟀藉由瞬間跳躍逃離虎甲蟲的追擊，那麼瞬間跳躍到甚麼程度才可以逃離被追擊呢？

名詞定義：角改速度：錄影影片速度為每秒 60 幀，錄製獵物逃離瞬間的影片並單幀格放，每幀測得獵物偏離追擊方向角度÷(1/60 秒)=角度改變速度，簡稱角改速度。

研究過程與方法：放入蟋蟀若蟲(8-9mm)供虎甲蟲雌蟲捕食，以影片記錄計算出偏離追擊方

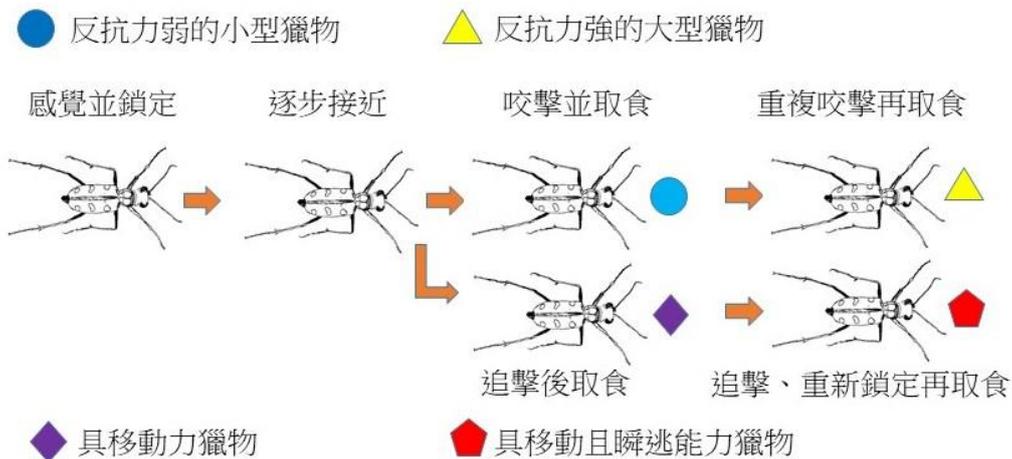
向的角度改變速度。(錄製 50 個捕食影片，並回放找尋較確定的偏離角度進行統計)

結果：最後我們統計了共 10 個角度。偏離追擊方向的角改速度平均約為 4.0°/ms。紀錄如右表。

編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
角度(度)	62.7	93.7	65.1	88.9	46	66.3	63	49	54.7	74.7
角改速度(度/ms)	3.8	5.6	3.9	5.3	2.8	4.0	3.8	2.9	3.3	4.5
平均偏離追擊方向角度=66.4°；平均角改速度=4.0°/ms										



討論：在實驗中發現，當蟋蟀若蟲沒有跳躍出足夠的偏離追擊方向的角度時，虎甲蟲都能夠準確的繼續追擊。但當偏離角度約在 49°-93.7°之間(平均約 66.4°)且跳離速度夠快時；虎甲蟲才容易停下來「重新鎖定」，計算發現約在 2.8°/ms-5.6°/ms 之間，平均約 4.0°/ms 以上的角改速度才能使得虎甲蟲停下來「重新鎖定」獵物。綜合研究三-一至四的實驗，將捕食模式整理如下圖：



五、視覺鎖定獵物垂直高度 1

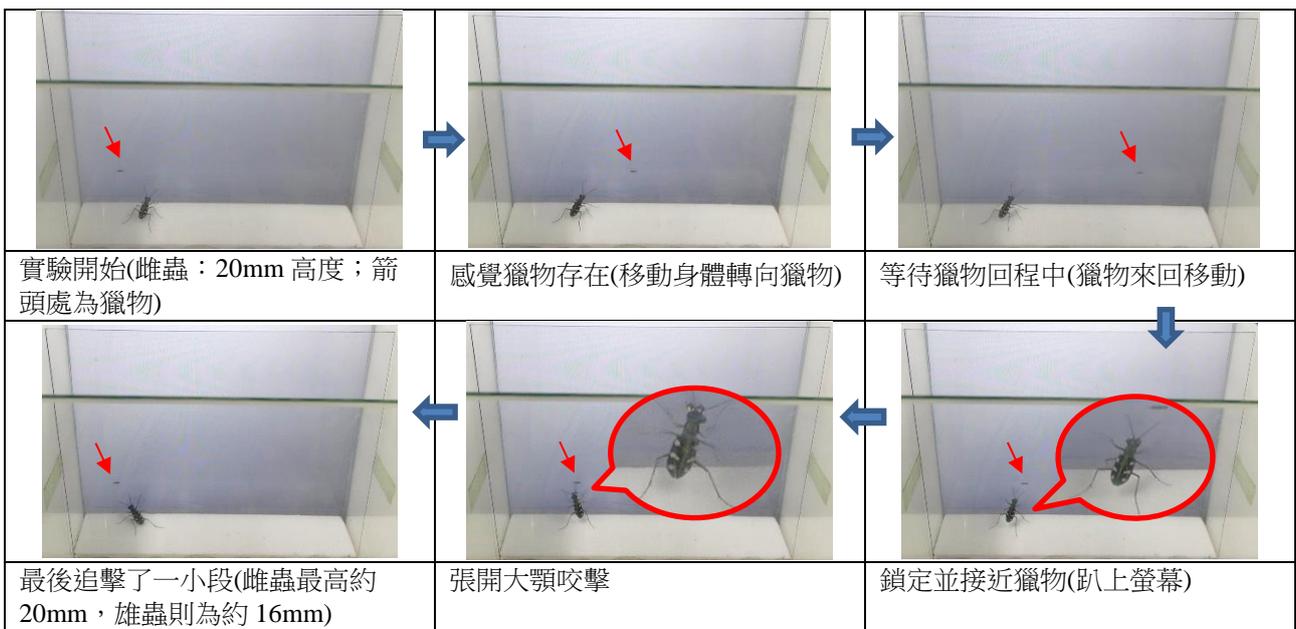
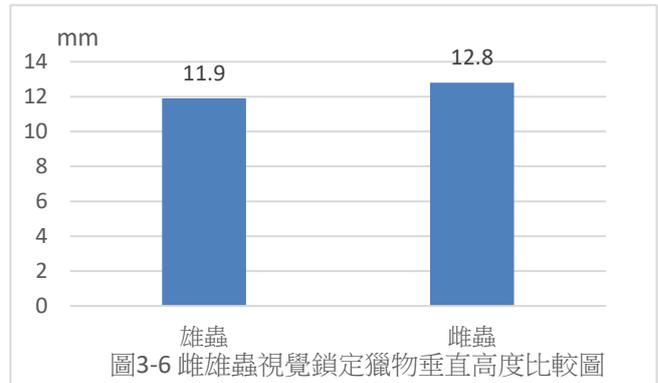
想法：虎甲蟲容易捕食大型個體，會不會是因為體型大較接近視覺容易鎖定的垂直高度呢？

研究過程與方法：以 scratch 程式設計來回於螢幕移動的模擬黑色獵物(長 4mm×寬 1mm)。

並改變獵物離地面的垂直高度，紀錄可鎖定獵物的垂直最大高度。隨機選取飢餓三天的雌雄成蟲各 10 隻進行測試。



結果：虎甲蟲視覺鎖定獵物的垂直高度雄雌蟲平均分別約為 11.9mm 及 12.8mm。而記錄到最大垂直高度雄雌蟲分別為 16mm 及 20mm。



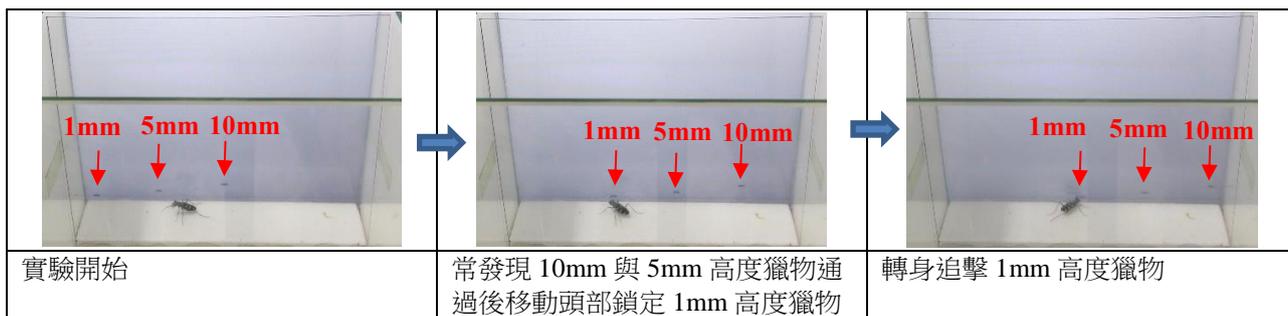
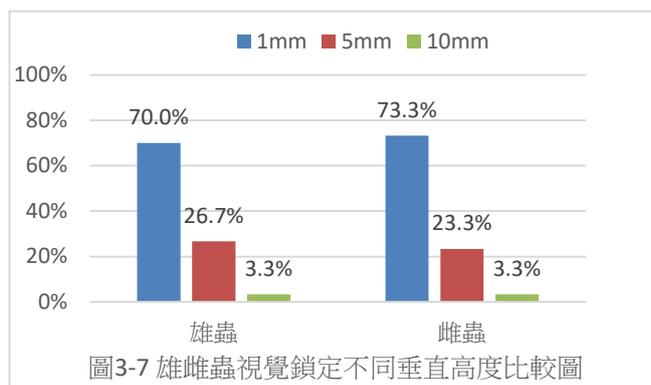
討論：雌蟲視覺鎖定垂直高度大於雄蟲，這應與雌蟲體型較大有關。而結果與我們推測不相符，之前實驗的大型獵物離地面的垂直高度都小於實驗中的平均值甚多，且發現雄雌蟲似乎都對於越貼近地面的獵物越容易進行鎖定與追擊(如 1mm 高的獵物)。因此進行下一個實驗來驗證這樣的觀察。而本實驗則發現雄雌蟲視覺鎖定獵物的垂直高度範圍，雄、雌蟲最大分別約為 16mm 及 20mm。

六、視覺鎖定獵物垂直高度 2

想法：上個實驗發現虎甲蟲似乎對於越貼近地面的獵物越容易鎖定與追擊，真的是如此嗎？

研究過程與方法：模擬獵物如之前實驗設計。但以 1mm、5mm、10mm 三個垂直高度依序出現，出現順序共分三組 1-5-10，5-10-1，10-1-5。隨機選取 10 隻雄雌蟲測試。

結果：雄雌蟲對於 1mm 的垂直高度都有較高的鎖定與追擊機率。



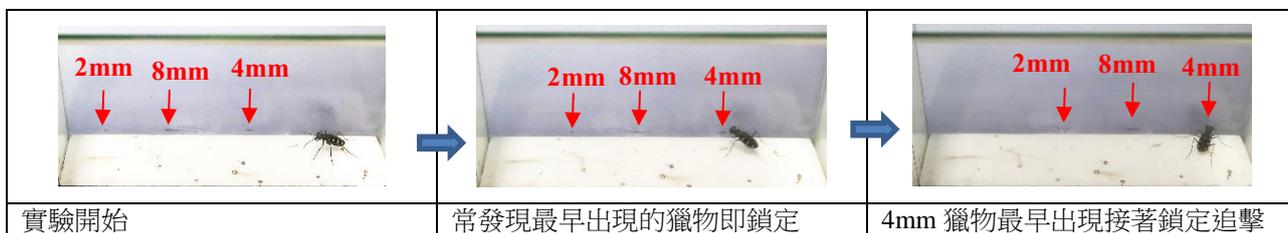
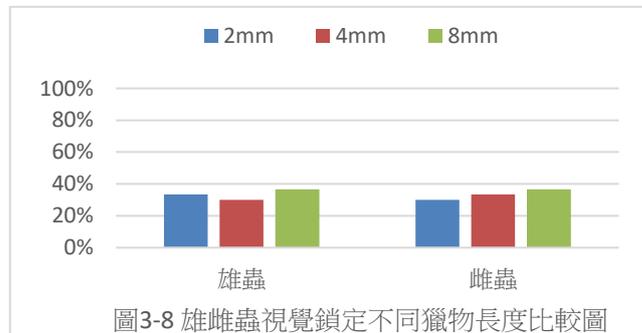
討論：結果與我們之前的實驗觀察相符，不論是雄蟲或雌蟲對於越貼近地面的獵物反應越明顯。我們認為大型獵物應是從地面垂直往上佔有虎甲蟲較多的反應明顯的視覺範圍，因而容易吸引虎甲蟲進行鎖定與追擊。

七、視覺鎖定獵物長度

想法：獵物垂直高度會影響捕食，那長度呢？

研究過程與方法：如視覺鎖定獵物垂直高度實驗 2，更改獵物長度分別為 2mm、4mm、8mm。

結果：雄雌蟲對於獵物長度鎖定與追擊機率都在約 30.0%-36.7%之間。



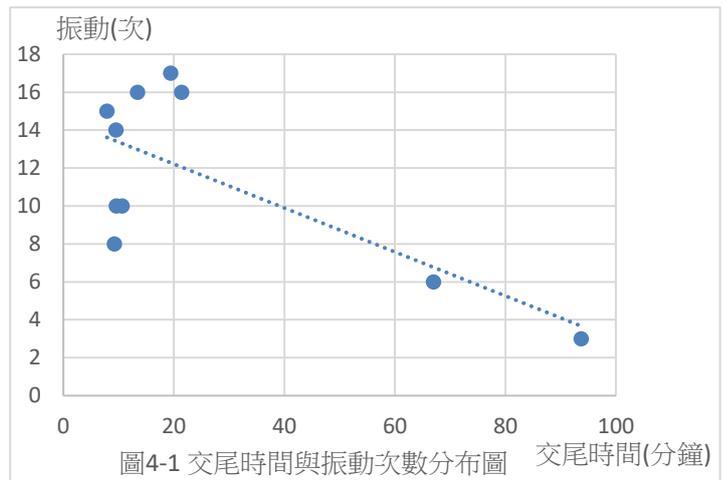
討論：發現雄雌蟲對於不同獵物長度的反應機率都相當接近，並沒有較明顯的不同，因此我們認為獵物離地面的垂直高度對於虎甲蟲捕食影響較長度明顯。這樣的結果也可驗證在視覺鎖定垂直高度 2 實驗中的推論。

研究四、虎甲蟲的繁殖行為

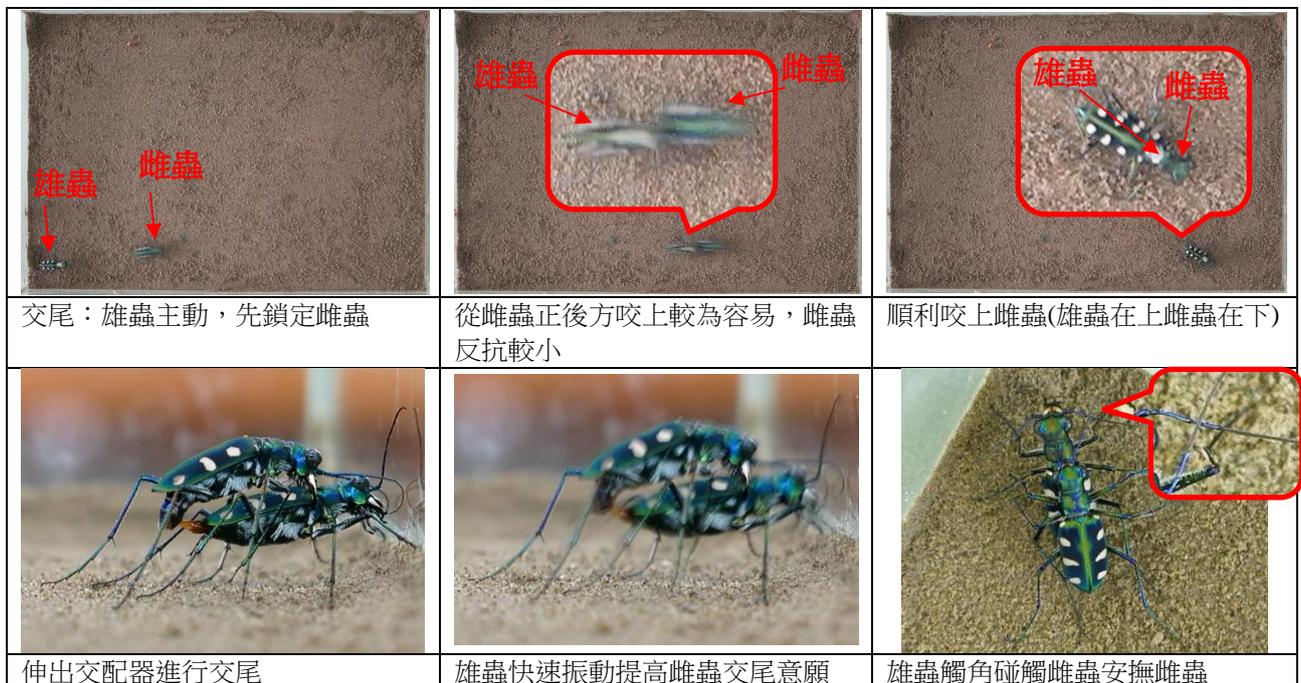
一、交尾行為

研究過程與方法：隨機選取 10 對雌雄成蟲放入容器內，觀察記錄交尾行為。

結果與討論：發現交尾由雄蟲主動開始，一般常從雌蟲的正後方逐步接近，再以大顎咬上雌蟲的前胸背板後方，接著伸出交配器進行交尾。雄蟲咬住雌蟲時間可長達 8 小時以上，並進行多次交尾，交尾時間有



時長達 1 小時以上，有時卻只有短短幾分鐘。雄蟲長時間咬住雌蟲應是一種守護交配權的行為。交尾過程中雄蟲會產生振動以及擺動觸角，有時觸角也會輕撫雌蟲觸角，我們記錄了第一次交尾成功時間，以及第二次交尾成功前雄蟲所產生的振動次數，發現交尾時間越長，振動次數有越少的趨勢。我們認為雄蟲振動、擺動觸角與觸角輕撫雌蟲都是為了提高雌蟲交尾意願。雌蟲的意願應是決定交尾是否繼續進行的一個關鍵因素。



二、兩雄一雌共處

想法：雄蟲有守護交配權行為，如果出現另一隻雄蟲，會有甚麼影響或行為發生呢？

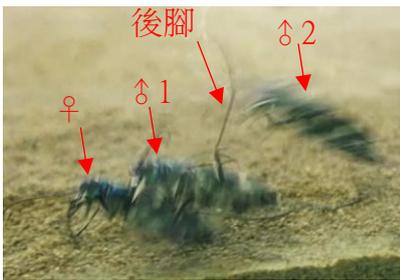
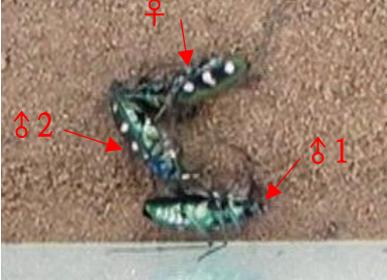
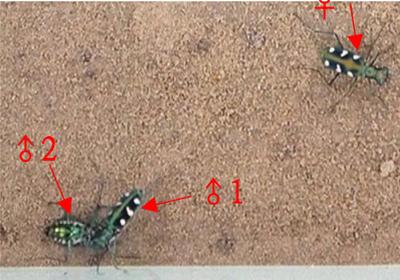
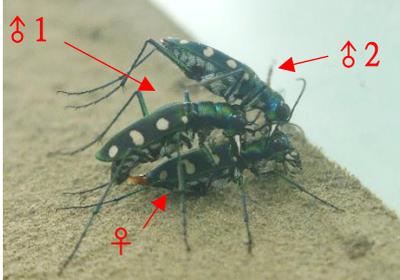
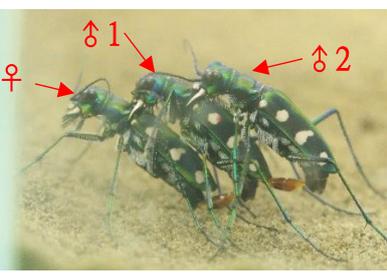
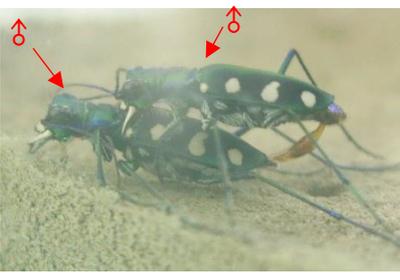
研究過程與方法：紀錄一對虎甲蟲第一次無競爭下交尾時間後，放入第二隻雄蟲並記錄原雄

蟲第二次交尾時間，視為競爭下交尾時間。如果交配權更換，也視為為競爭下交尾，等 24 小時後再讓此雄蟲與雌蟲進行無競爭下交尾，觀察紀錄交尾與其他行為，實驗重複 5 次。

結果：結果紀錄如下表：(♂1：先放入容器內交尾之雄蟲；♂2：第二次放入之雄蟲)

組別	無競爭下交尾時間	競爭下交尾時間	雄蟲行為	備註
A	7 分 28 秒	20 分 40 秒	♂1 以後足踢開 ♂2	♂1 擁有原來交配權
B	27 分 58 秒	11 分 29 秒	遭 ♂2 搶奪交配權成功	♂2 取得交配權
C	6 分 13 秒	6 分 25 秒	♂2 將 ♂1 從雌蟲身上咬下，且 ♂2 與 ♂1 發生交尾動作。	♂2 最後取得交配權。
D	17 分 02 秒	11 分 25 秒	三蟲疊在一起，雌蟲上方兩雄蟲出現交尾動作，♂2 與雌蟲交尾	♂2 最後取得交配權
E	19 分 40 秒	15 分 37 秒	三蟲疊在一起，♂1 未失交配權	♂1 仍有原來的交配權

5 組雌蟲均未發現選擇雄蟲行為

		
以後腳將其他雄蟲踢開	(1)有時會以大顎將守護中的雄蟲咬下	(2)雄蟲互咬互後雌蟲離開，♂2 一度咬上 ♂1 想與其交尾，最後重新正確鎖定 ♀ 蟲取得交配權
		
有時也會直接咬上雌蟲，再將原守護雄蟲甩下	三蟲相疊，♂2 甚至伸出交配器伸入 ♂1 腹部與翅鞘間想與其交尾。	兩隻雄蟲在沒有雌蟲的情形下也會咬上並伸出交配器想要交尾

討論：交尾行為中雄蟲主動，雌蟲沒有選擇雄蟲的行為。雄蟲常以大顎爭奪交配權。交尾時雄蟲不會因另一隻雄蟲干擾而影響交尾時間，且交尾取決於雌蟲的意願。也曾發現雄蟲會咬上雄蟲，甚至出現交尾的動作；究竟是雄蟲沾上雌蟲的氣味導致雄蟲誤判？還是雄蟲以視覺判斷為同類就本能的咬上呢？

測試將 3 組個別飼養的雄蟲放入同一容器，發現都不只一次咬上另一雄蟲，有 2 組會伸出交配器想進行交尾。3 組咬住時間都不長，約 15 秒內。因此認為虎甲蟲雄蟲以視覺判斷為同類時，會把握機會嘗試咬上進行交尾。

三、兩雌一雄共處

想法：多隻雄蟲時會爭奪交配權，那多隻雌蟲對雄蟲是否有影響？

研究過程與方法：

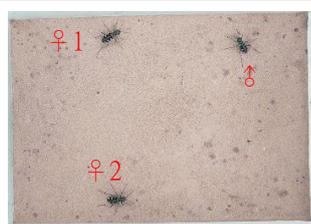
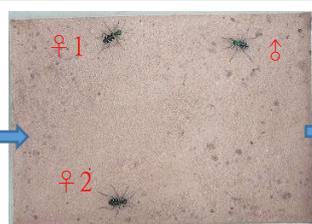
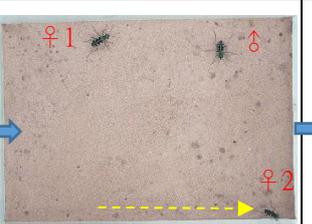
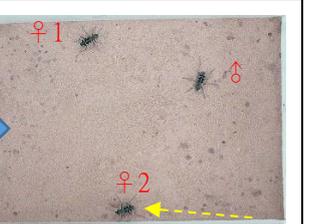
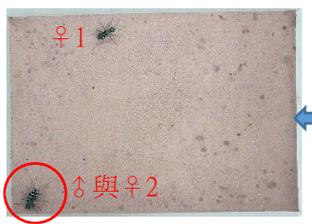
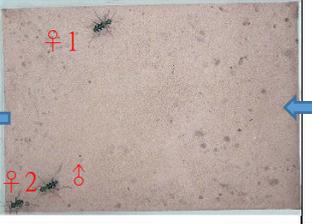
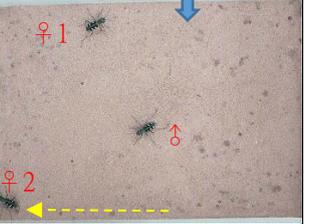
1. 容器內先放入 2 隻虎甲蟲雌蟲，穩定後，放入 1 隻雄蟲。
2. 待雄蟲咬上雌蟲後立即將其分開，穩定後再重複步驟 1，每組測試 3 次，隨機選取 5 組進行實驗。

次數組別	第一次(交尾雌蟲)	第二次(交尾雌蟲)	第三次(交尾雌蟲)
A	♀1	♀1	♀2
B	♀1	♀2	♀1
C	♀1	♀1	♀1
D	♀1	♀2	♀2
E	♀1	♀2	♀1

雄蟲選擇雌蟲原則：1.動態雌蟲；2.近距離雌蟲

結果：結果紀錄如右表：

(♀1：表示該組第一隻交尾雌蟲；♀2：表示該組第二隻交尾雌蟲)

			
實驗開始	♂ 轉頭面向鎖定近距離的♀1	♂ 改面向鎖定遠距離但移動的♀2	♂ 持續面向鎖定移動中的♀2
			
♂ 在守護交配權狀態下，即使另一♀移動接近也不改變對象 另一♀接近	♂ 成功咬上並與♀2 成功交尾(圓圈處)	♂ 接近至一定距離，準備從正後方咬上	♂ 一步一步接近♀2 中

討論：雄蟲沒有特別偏好某一隻雌蟲，觀察發現距離近且動態的雌蟲較容易吸引雄蟲咬上交尾。類似捕食行為，虎甲蟲不只對於「動」的獵物反應明顯，在交尾時也是如此。而且正在守護交配權狀態(即使交配器分開)的雄蟲也不會受到附近移動的雌蟲吸引而改變交尾對象。由以上兩個實驗也得知雌雄蟲在交尾方面均無專一性。

四、產卵偏好-乾燥與潮濕

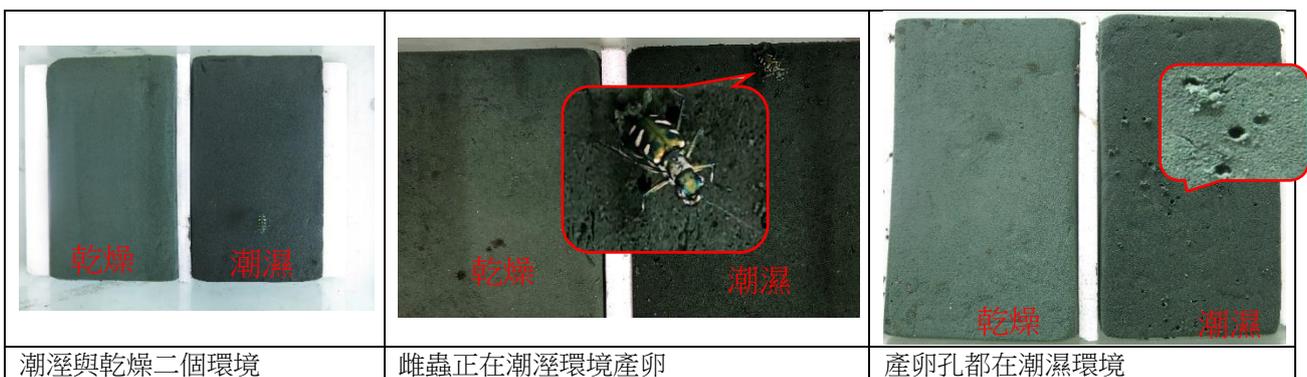
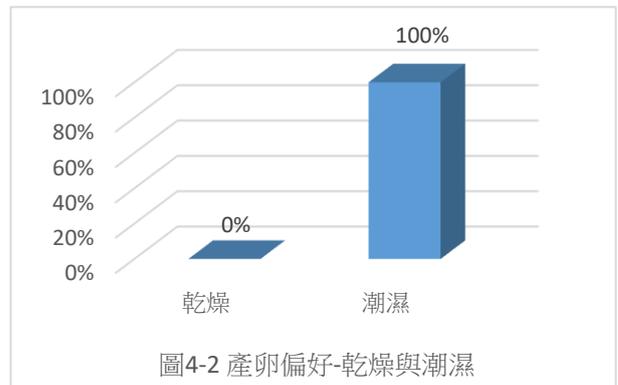
產卵行為：雌蟲產卵時會抬起身體將產卵器插入土層後，重新抬高身體角度到約 63.5°再插深，並產卵於較深的穴道內，一開始身體角度較小時形成岔開穴道可能是為了保護卵。整個產卵時間大約接近 2 分鐘。(與自然課時討論到南攀雀巢假出入口類似)



※想法:虎甲蟲偏好棲息在有溪流的地方，雌蟲會將卵產在潮濕的環境嗎?

研究過程與方法：分別將兩塊插花海綿分成乾濕兩種產卵環境放入容器中，並放入交尾後的雌蟲，三天後統計產卵孔數，實驗重複五次。

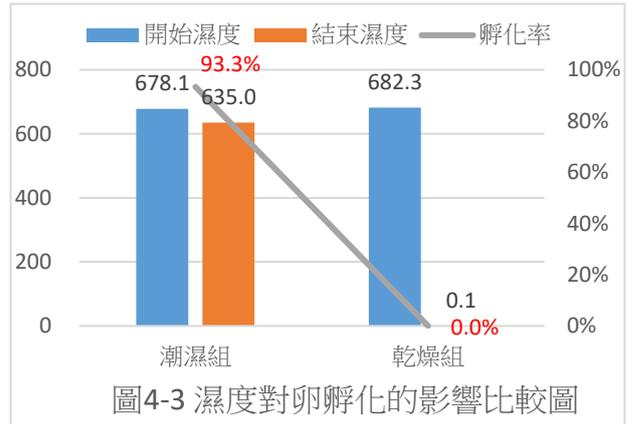
結果:在潮濕環境的插花海綿上共發現 69 個產卵孔，乾燥環境則為 0 個產卵孔。



討論:雌蟲偏好將卵產於潮濕的環境，也想到野調時在樣區四前二次調查時都沒發現虎甲蟲蹤跡，而第三次路面積水潮濕，附近泥土地就出現虎甲蟲，且符合其他樣區中虎甲蟲較易出現在附近有溪流，較潮濕環境的偏好傾向。

※想法:雌蟲偏好將卵產於潮濕環境，那是否是因這樣的環境有助於卵孵化呢?

研究過程與方法：裝土容器中將卵放入約9mm 深的洞裡，分為:實驗組加蓋保濕，對照組無蓋且自然乾燥。實驗前後分別測兩組的濕度值，觀察到卵孵化為止，共 15 組。
結果:潮濕組孵化比例高，可達 93.3%。



討論:發現卵要在一定濕度的環境下才能夠孵化，以我們用 M5 stack 設計的土壤濕度計測試濕度值發現:如果保持在約 678.1-635.0 之間，孵化率可達 93.3%。由此可知雌蟲偏好產卵在潮濕環境有助於卵的孵化，並印證虎甲蟲偏好棲息在類似溪流附近有水的潮濕環境。

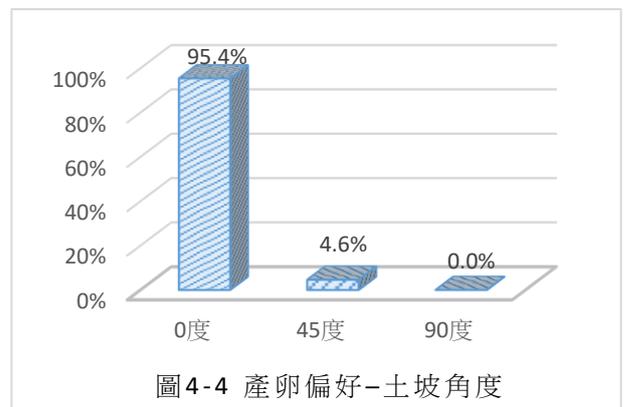
五、產卵偏好—土坡角度

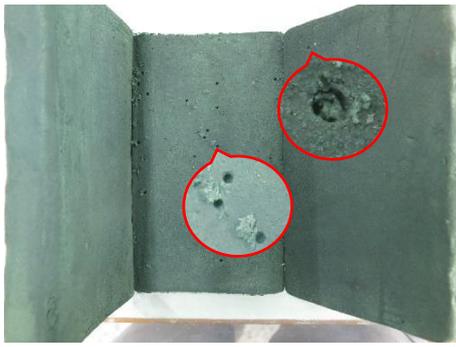
想法:在大樣區九發現幼蟲的穴巢有些在平地，也有在垂直土坡，雌蟲喜歡產卵在什麼土坡角度呢?

研究過程與方法：

將插花海綿分別以 0°、45°、90°模擬不同土坡角度供雌蟲產卵，放入交尾後的雌蟲，統計連續三天的產卵孔數，實驗重複五次。

結果:共紀錄到 87 個產卵孔。偏好產卵的角度為 0°，產卵孔數 83 個，約 95.4%。



		
共有 0°、45°、90°三種角度	正在 0 度角(水平面)產卵	大部分在水平 0 度角產卵，相當少數在 45 度角

討論：雌蟲偏好將卵產於水平的土層，但調查時發現不少幼蟲的穴巢在垂直土坡，飼養過程中，我們統計幼蟲是否更換地點築穴巢，發現換巢的機率为 50%，因此垂直土坡上的穴巢可能不是最初雌蟲的產卵地，很有可能環境因素導致幼蟲更換穴巢。可能有那些因素呢？在之後幼蟲築穴巢選擇探討時進行實驗。

研究五、幼蟲的動物行為

一、幼蟲的捕食行為

(一)感覺獵物存在方式:幼蟲是怎麼感覺到獵物接近再捕食的呢?

研究過程與方法：待幼蟲穩定後等頭胸部來到穴口再進行實驗；共分為以下幾種感覺方式。

1.視覺:

(1)視覺(動):用釣魚線吊著包有黑色膠帶的玻璃塊，振動並慢慢接近穴巢口且不觸碰到土層。

(2)視覺(靜):包有黑色膠帶的玻璃塊直接放在穴巢口旁邊。

2.振動:用釣魚線吊著透明玻璃塊，慢慢振動接近穴巢口且碰到土層表面，振動與視覺實驗操作者為同一人。並控制振動力量，且心裡默數。

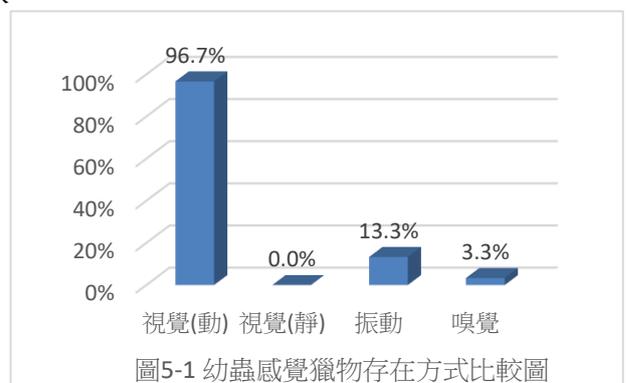
3.嗅覺:將剛死的麵包蟲放置於穴巢口邊。

4.分別從幼蟲的前、側與後方振動接近與放置

獵物，隨機選取 10 隻 3 齡幼蟲進行實驗。

結果:視覺(動)，幼蟲反應比例最高，約

96.7%。



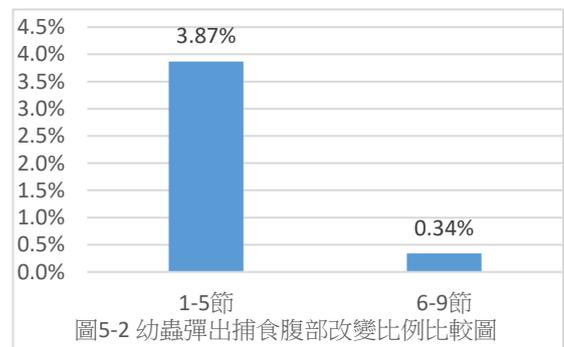
			
光影變化是感覺獵物存在的主要方式	振動感覺獵物只有少數個體有反應	更少個體利用嗅覺感覺獵物存在	靜態獵物都沒有反應

討論:幼蟲對於動態接近的獵物有明顯反應(比率達 96.7%)，因此我們認為幼蟲主要以**光影的變化**來感覺獵物存在進而捕食。

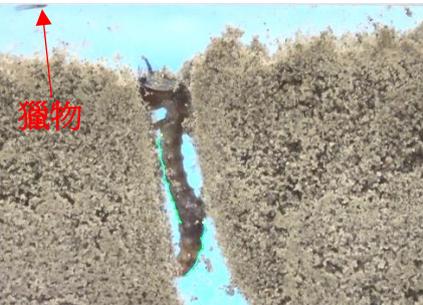
(二)幼蟲捕食獵物的力學探討

想法:觀察幼蟲捕食力學與文獻(周佳儒等, 2018)似乎有些不同, 想再藉由實驗進行驗證。

研究過程與方法: 1.讓 3 齡幼蟲在容器內築出清楚可見的穴道並等待頭胸部來到穴口。2.放入果蠅並錄下捕食過程, 測量幼蟲捕食前與彈出捕食時腹部 1-5 節及 6-9 節的長度, 並比較伸長比率。



結果:腹部 1-5 節伸長比率較明顯, 約 3.87%。

		
架設攝影機對準幼蟲位置, 耐心等待捕食畫面	測量彈出前腹部 1-5 節及 6-9 節長度	擷取彈出捕食瞬間, 再測腹部長度

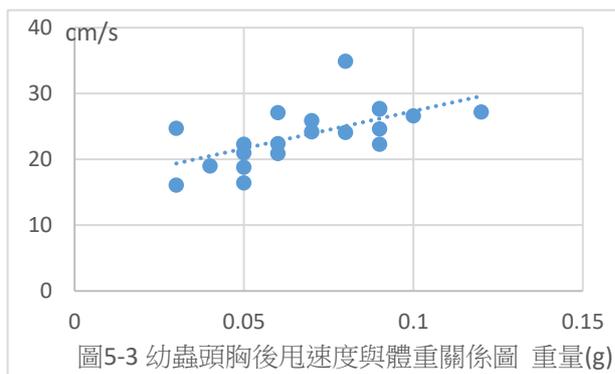
討論:因第 10 節常被土層遮住, 因此僅測量到第 9 節。發現腹部 1-5 節有較明顯的伸長比率, 因此**腹部 1-5 節肌肉的彈性力量**應是快速彈出捕食的力量來源之一。而 6-9 節並未有明顯縮短或伸長的變化, 因此應不是彈出力量的來源, 此與文獻不同。也發現幼蟲會以**頭部與前胸塞住穴口**, 並以相當快的速度將**頭與前胸往後甩出**捕食, 因此瞬間彈出捕食力量除了來自腹部 1-5 節外, **頭與前胸後甩的力量**再加上頭與前胸塞住穴道口產生的應力應也是主要來源, 甚至我們認為這股力量才是主要來源。接著試著測出後甩的速度。

(三)幼蟲頭胸後甩速度

研究過程與方法: 不傷害蟲體的情形下以比例尺輕碰 3 齡幼蟲腹部第 5 節後方附近, 以

tracker 測量後甩速度，並以電子秤測量重量，
隨機選取 20 隻幼蟲測試。

結果:後甩速度最快約 34.9cm/s，平均約
23.7cm/s 且隨幼蟲重量增加有加快的趨勢。



討論:發現幼蟲頭與前胸的後甩速度相當快，最快可達 34.9cm/s，幼蟲利用快速的後甩加上
洞口塞住的應力可瞬間迅速彈出捕食，因此我們認為幼蟲後甩將身體甩出穴巢應是幼蟲可以
瞬間彈出捕食的主要原因之一。

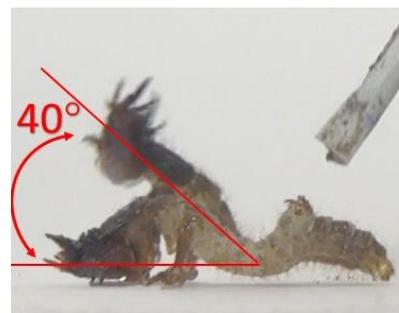
(四)彈器構造：為什麼後甩速度這麼快呢？

研究過程與方法：

- 1.以顯微鏡進行觀察。
- 2.在彈器位置塗上不傷害蟲體的凡士林後測量後甩角度與速度，並與凡士林擦掉後比較。

結果：發現在頭部腹面後緣與前胸腹面前緣發現一圓弧形互相卡住的彈器構造。彈器塗上凡
士林後幼蟲後甩的角度變小、速度變慢或是不後甩直接逃跑。



		
<p>小心輕巧的在彈器上塗上凡士林</p>	<p>塗上凡士林後，出現逃走、後甩角度變小與速度變慢</p>	<p>將凡士林擦拭後，可恢復後甩角度與速度</p>

討論：以手輕觸幼蟲頭胸背面時，感覺到與叩頭蟲相似的彈跳，因此開始尋找幼蟲是否具有如叩頭蟲般的彈器構造，發現在幼蟲**頭部腹面後緣有一突起能與前胸腹面前緣的卡樑**卡住形成**彈器**，幼蟲也就藉著彈器構造的協助，快速後甩彈出捕食。透過在**彈器**上塗上凡士林進行**驗證**，發現彈器塗上凡士林後，摩擦力減少，有時後甩無法順利完成(**角度變小**)或**速度也會變慢**(16.6cm/s→14.4cm/s)，甚至**直接逃走**。將我們的發現與之前科展文獻進行比較如下：

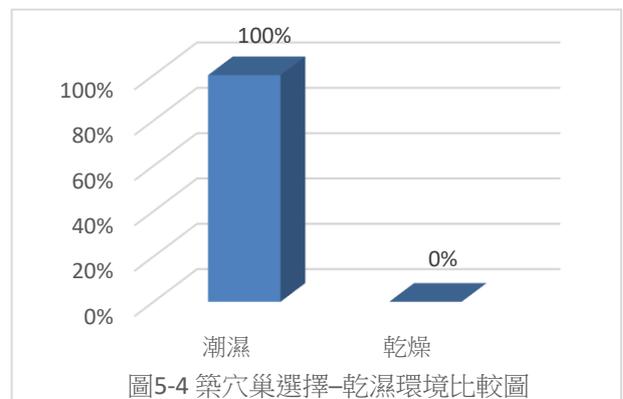
項目	文獻	本研究
<p>捕食彈出力量位置</p>	 <p>說明： 幼蟲埋伏在隧道口時採用分散力學策略，讓身體的重量分散到上唇、前足、第五腹節、腹部尾端等五處體節上。</p> <p>說明： 幼蟲獵捕捕蟻時，腹部尾端施力，瞬間拉直 6-10 腹節，同時運用變形彈力，將頭、胸及 1-4 腹節彈向蟻巢並加以獵捕。</p>	
<p>說明</p>	<p>腹部 6-10 腹節是幼蟲瞬間彈出捕食的力量位置(周佳儒，2018)。</p>	<p>頭與前胸間具彈器構造，後甩速度最快可達 34.9m/s，是瞬間彈出主要力量，腹部彈出力量主要應在 1-5 節，但 6-10 節應無伸縮變形</p>

二、幼蟲築穴巢行為

(一)築穴巢選擇—乾濕環境

研究過程與方法:容器二等分成乾燥與潮濕土層。隨機選擇 10 隻 3 齡幼蟲並將幼蟲置於乾濕土層之間。紀錄 24 小時後築穴巢位置。

結果: 幼蟲選擇潮濕環境築穴巢機率達 100%。





討論: 幼蟲偏好選擇潮濕環境築穴巢，與文獻提到幼蟲於乾燥土中生活(吳怡欣等，2006)有所差異。另外透過之前實驗發現雌蟲也偏好於潮濕環境的產卵，卵也須在潮濕環境才能孵化，且野外調查也發現虎甲蟲經常在溪流附近活動與棲息，因此我們認為虎甲蟲的生活史與潮濕環境(水分)有一定程度的關係。

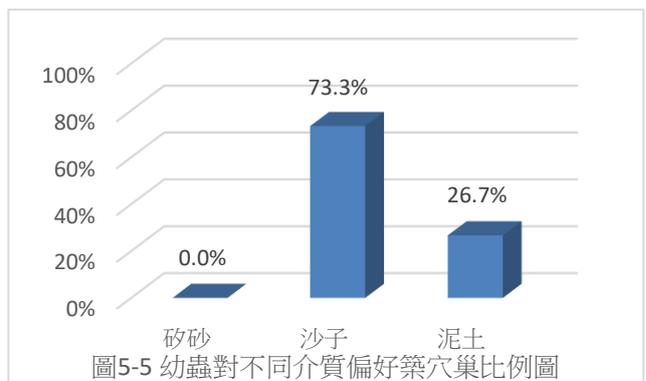
(二)築穴巢選擇—不同土層介質

研究過程與方法:

1. 在 3 等分圓形的容器內分別裝填矽砂、沙子和泥土三種介質，濕度調整至相似濕度。介質粒徑大小為矽砂>沙子>泥土。
2. 隨機選擇 15 隻 3 齡幼蟲並將幼蟲放置圓形容器中間。紀錄 24 小時後築穴巢位置。



結果: 幼蟲選擇沙子介質築穴巢機率最高，約 73.3%；其次為泥土介質，約為 26.7%。





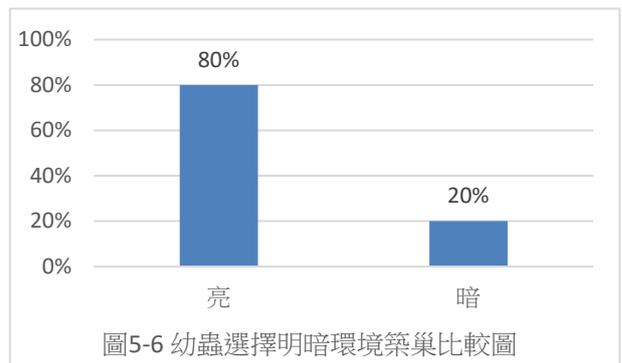
討論:發現幼蟲有時一開始會先選擇粒徑最大的矽砂介質挖掘，但卻沒有在矽砂環境築出完的穴巢。可能因為矽砂容易挖掘但較沒有黏性不容易形成穴道，因此無法穩定棲息；而沙子不僅較泥土容易挖掘且黏性亦足以形成完整穴道因此有較高的築穴巢比率。我們認為幼蟲偏好在容易挖掘且黏性足以形成穴道的土層介質築穴巢棲息。

(三)築穴巢選擇—明暗環境：野外調查時，發現成蟲容易在明亮空曠的地方活動，那幼蟲呢？

研究過程與方法:

- 1.以黑布蓋住容器半邊，另半邊用電燈照亮，形成明亮與黑暗的環境。
- 2.隨機選取 10 隻 3 齡幼蟲並放在容器中間。紀錄 24 小時後築穴巢位置。

結果:幼蟲選擇明亮環境築穴巢機率較高，約 80%。

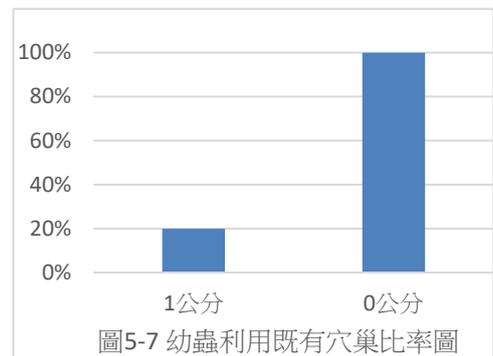


討論:幼蟲偏好選擇明亮環境築穴巢，之前實驗發現光影變化是幼蟲感覺獵物存在的主要方式，我們認為在明亮環境，獵物形成的光影變化明顯可幫助幼蟲更容易捕食成功。

(四)舊巢再利用

研究過程與方法:1.在直徑 9.5cm，土層厚 12cm 的圓柱形容器的中央位置築一直徑約 5mm，深約 60mm 的人工穴巢。分為：離人工穴巢 0cm 組與離 1cm 組。2.各組隨機選取各 10 隻 3 齡幼蟲，紀錄 24 小時後利用既有穴巢的情形。

結果:0cm 組既有穴巢使用率為百分之 100%，1cm 組則為 20%。



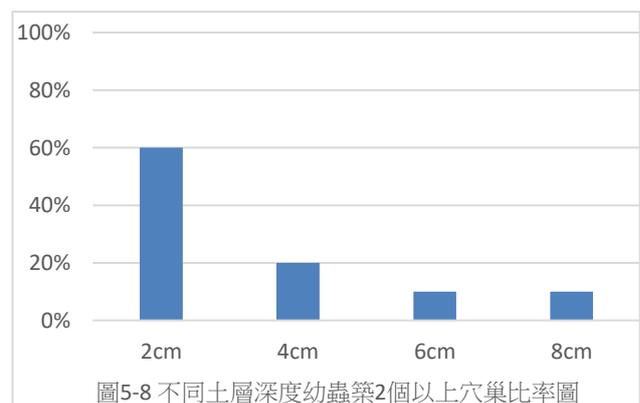
討論:發現 0cm 組使用既有穴巢的機率可達 100%，但 1cm 組使用機率則明顯下降許多。因此我們認為幼蟲並不會主動搜尋既有的穴巢並加以利用。

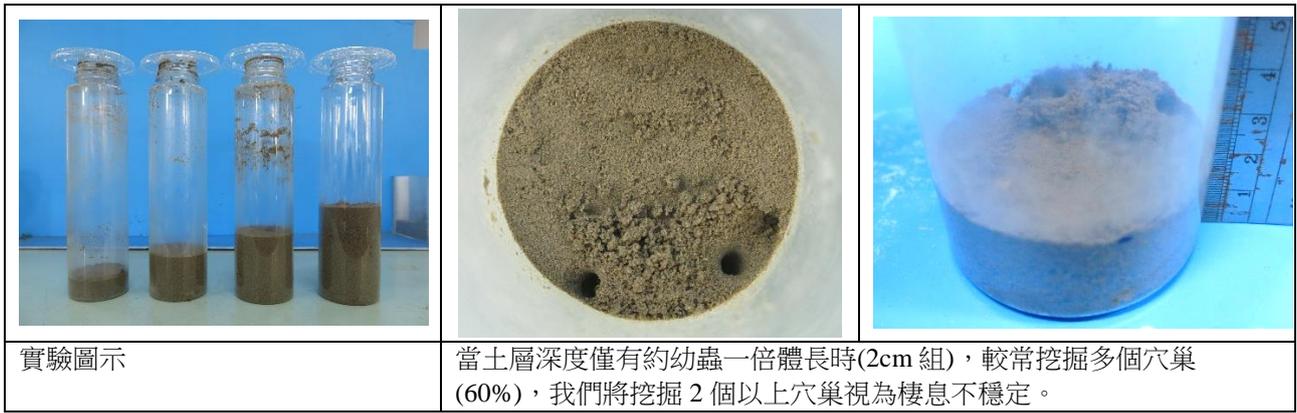
原本以土層厚度約 3cm 的布丁杯實驗，實驗當天 0 公分組使用人工穴巢機率約 70%，但 24 小時後，發現所有幼蟲都會再築起新巢，而這樣就是幼蟲不會利用既有穴巢的結果嗎？於是改進行本實驗，實驗後我們認為土層深度應會影響幼蟲的棲息，接著進行土層深度對幼蟲棲息穩定影響的實驗來進行驗證。

(五)土層深度影響

研究過程與方法:1.將 3 齡幼蟲放入以圓柱形容器設計出 2cm、4cm、6cm 與 8cm 不同土層深度的環境，紀錄 24 小時後穴巢孔數。2.穴巢孔數在 2 個以上時，則視為幼蟲棲息不穩定。

結果:土層深度 2cm 組穴巢孔數 2 個以上的比例最高，約為 60%。



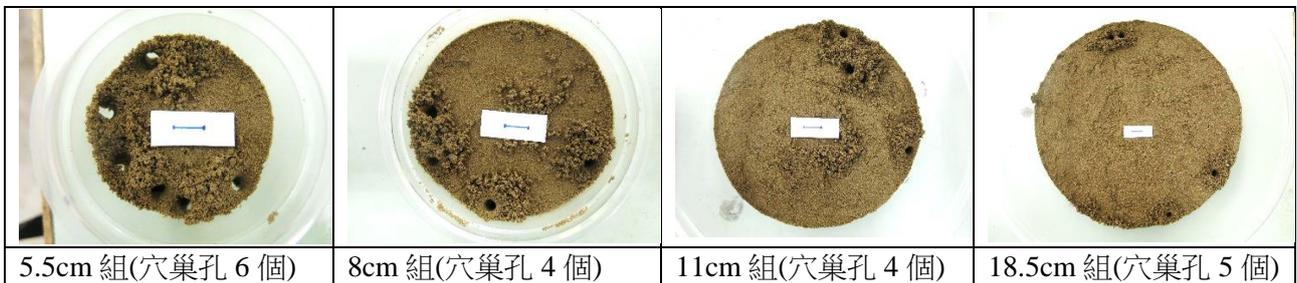
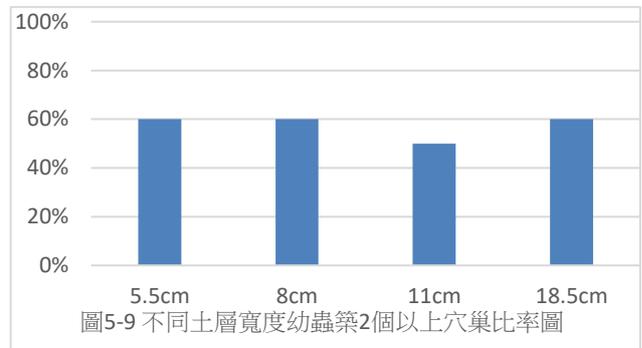


討論:發現 2cm 組築超過 2 個以上穴巢孔數機率超過 50%，其他組則明顯有較低比率，我們認為土層深度需達 2 倍以上幼蟲體長(3 齡蟲體長約 2cm)時，幼蟲才能較為穩定的棲息。

(六)土層寬度影響:深度對幼蟲棲息穩定有影響，那寬度有影響嗎?

研究過程與方法:1.不同寬度的圓形容器各裝入 2 公分厚的土層。2.隨機選取各 10 隻 3 齡幼蟲，放入容器中。紀錄 24 小時後穴巢孔數。

結果:各種不同寬度土層築 2 個以上穴巢孔數比率差異不明顯。

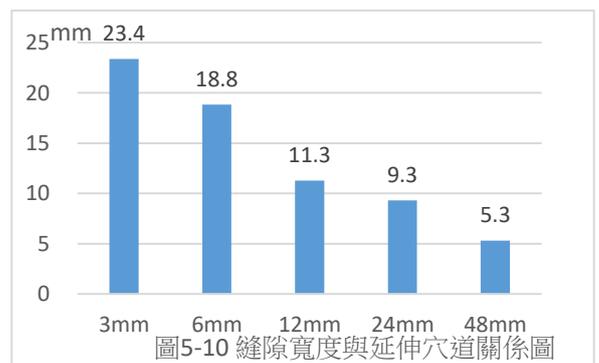


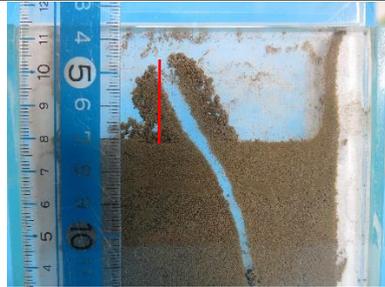
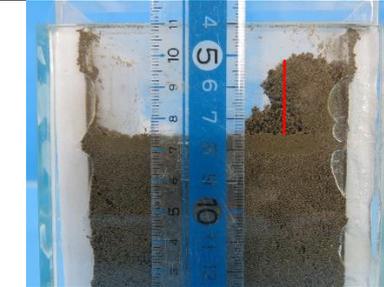
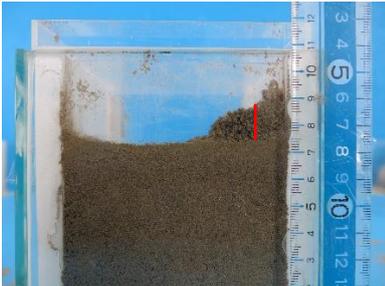
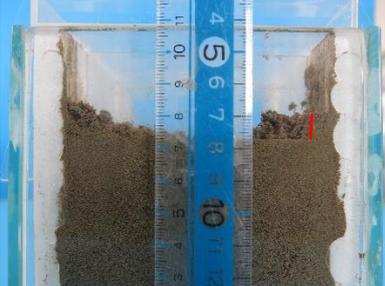
討論:如上圖示，有時各種土層寬度的穴巢孔數甚至都在 4 個以上，而各種不同寬度土層築 2 個以上穴巢孔數的比率都在 50%以上，若與不同深度土層實驗結果相比，我們認為土層深度對於幼蟲棲息穩定的影響較為明顯。

(七)築延伸穴道行為

研究過程與方法:1.將 3 齡幼蟲放入 3mm、6mm、12mm、24mm、與 48mm 不同縫隙的土層環境。紀錄 24 小時後築成延伸穴道的高度。重複 5 次。

結果:3mm 組延伸穴道最高約 24.9mm，48mm 組最低約 5.3mm。



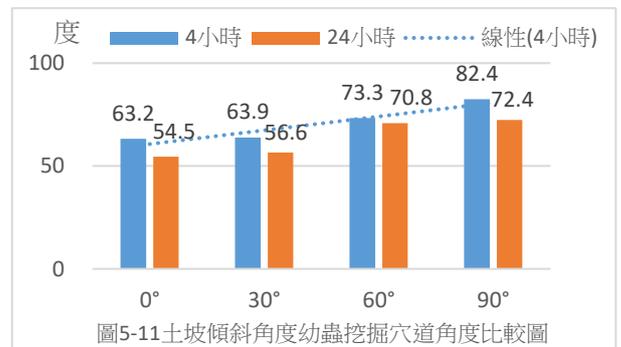
		
設計不同縫隙土層(圖為 6mm 組)	3mm 組延伸穴道大都超過 20mm(紅線段為延伸穴道高度)	6mm 組有少數仍可超過 20mm
		
12mm 組大都略大於 10mm，已開始出現不明顯延伸穴道	24mm 組則大都在 10mm 以內，延伸穴道更不明顯了	48mm 組則幾乎在 5mm 左右，有時甚至可視為無延伸穴道了

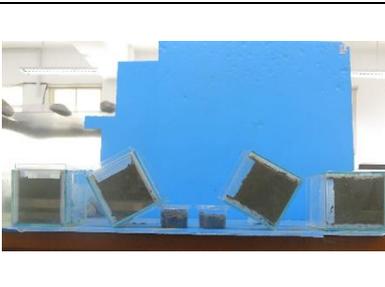
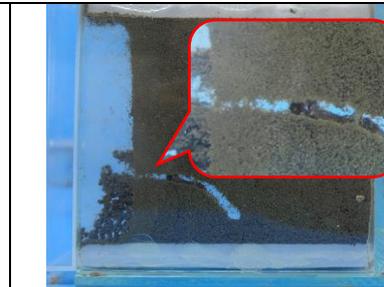
討論:發現隨著縫隙越小所築出的延伸穴道越高，大約在 6mm 左右以內的狹窄土層環境，3 齡幼蟲較容易築出明顯的延伸穴道。幼蟲修築延伸穴道應是為了延長其活動或棲息深度。

(八)土坡角度與挖掘角度：文獻(周佳儒，2018)提到幼蟲會挖出一定角度穴道，那土坡角度不同，也一樣嗎？

研究過程與方法:1.利用容器的傾斜設計出 0°、30°、60°、90°不同土坡角度環境。2.測量 4hr 與 24hr 後幼蟲挖掘穴道角度，實驗重複 10 次。

結果：土坡傾斜角度 90°時，挖掘穴道角度最大。



		
實驗圖示	水平面土坡(0°)下挖角度最小	垂直面土坡(90°)往往會先挖出一平台，然後再下挖

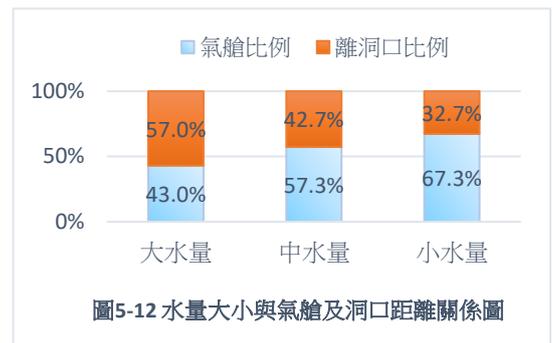
討論：發現土坡傾斜角度越接近垂直面時，幼蟲會先以接近垂直土坡面的角度(90°)挖掘出一個讓其更能施力的水平面。之後再進行角度修正，24 小時後角度常會略微減少。我們認為在土層密度均勻與周遭無阻礙時，幼蟲會以一個大略固定的角度開始挖掘穴道，且土坡傾斜

角度越接近 90°時，開始挖掘角度會越接近 90°。而這可能與幼蟲挖掘構造和動作有關。

(九)淹水反應：

研究過程與方法：以點滴管調整不同水量模擬淹水，觀察幼蟲在穴道內的反應:分別為大水量 8mm 高/min、中水量 4mm 高/min、小水量 2mm 高/min。統計氣艙、土門離洞口與穴道長的比例。

結果：幼蟲會築出土門擋水，門下形成氣艙應變，水量會影響氣艙/穴道長與土門離洞口/穴道長的比例。



討論：棲地淹水時，幼蟲會在穴道內構築土門，門後形成氣艙，水量多到洞穴開始積水時也能在氣艙內存活一段時間，與 Shou-Wang Lin 等(2014)研究符合，但另外發現幼蟲在水位消退後重新打開通道，如果原通道因積水泥濘不易定型會另開出口。

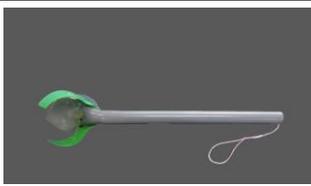
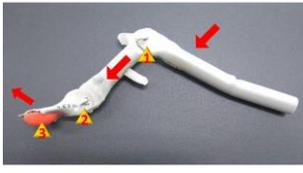
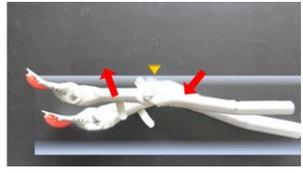
Shou-Wang Lin 等(2014)提到栓塞(plug)在地表或地下的深度變化很大，認為地表下形成栓塞的功能為躲避天敵；我們則以不同水量測試發現:水量大小與氣艙及距洞口距離關係如圖 5-12，水量愈小，應變時間愈夠，氣艙愈大，可提高存活率；且觀察到會以頭胸部頂著撐住土門(保護、支撐穩固與成氣艙)。與平時飼養時觀察到幼蟲蛻皮時築土堆封住地表洞口(如右圖)的行為不同，也與 Shou-Wang Lin 等研究不同；我們認為遇水築土門都低於土表，應該是避免逕流沖刷破壞而衍生的生存機制。



三、幼蟲行為的啟發--透過對幼蟲行為的探討，我們設計了兩種仿生工具，分別為：

(一)取土便利鏟：曾經在挖深洞穴時遇到一般鏟子不易將底下的土挖出，觀察幼蟲頭胸部、大顎形態與動作，設計出在向下挖深洞穴時，可以將挖出的土更順利的帶出洞穴的工具。

(二)挖深水平犁溝兩用鏟：幼蟲的型態與構造，在第五腹節後的固定勾在挖掘穴道時可以做為支點與施力點。模擬鏟柄中段可彎曲並有凸勾，能勾在洞壁施力，省力且易挖出寬度較一致洞穴。另外模擬幼蟲頭型圓弧能修整洞穴，而試操作時也發現在土表水平犁溝也很好用。

			
開始動作製作工具	「取土便利鏟」構造圖	「取土便利鏟」開始挖掘洞穴	可順利將挖掘的土順利取出，避免洞穴被土再蓋住
			
「挖深水平犁溝兩用鏟」構造圖	可挖出深度與寬度一致的溝渠與洞穴	「挖深水平犁溝兩用鏟」開始挖掘水平溝渠	溝渠挖掘後可再用圓弧形頭部構造修飾平整

伍、結論：

- 一、成蟲偏好活動與棲息於溪流附近開闊明亮環境且夜晚具趨光性。雄蟲的活動領域大於雌蟲，可能有助於捕食與繁殖。
- 二、成蟲捕食模式因不同體型或不同移動類型獵物而有不同階段模式，分為【感覺獵物】→【鎖定動的部位】→【逐步接近】→【咬擊】。對反抗力大的獵物容易出現【重複咬擊】，移動能力快的獵物則出現【追擊】，而瞬間逃離能力強的獵物容易出現【重新鎖定】階段。獵物偏離追擊方向的角度改變速度平均在 $4.0^\circ/\text{ms}$ 以上容易造成【重新鎖定】獵物的過程。
- 三、成蟲鎖定獵物的視覺垂直高度雄雌蟲平均分別約為 11.9mm 及 12.8mm 。最大垂直高度雄雌蟲則分別為 16mm 及 20mm 。但對於越接近地面的獵物反應越明顯，且偏好取食較大型獵物。獵物垂直高度對於視覺鎖定的影響較獵物長度明顯。
- 四、雄蟲主要以視覺搜尋附近動態雌蟲(動態雌蟲容易吸引雄蟲鎖定)並主動咬上雌蟲前胸背板後緣進行守護與交尾，以振動及觸角觸碰安撫雌蟲以提高雌蟲交尾的意願。且常以大顎力量爭奪交配權。雌雄蟲交尾均無專一性。
- 五、雌蟲偏好於水平的土坡與潮溼環境產卵。且潮濕環境有利於卵的孵化，濕度值若保持在 $678.1-635.0$ 之間，孵化率可達 93.3% 。
- 六、幼蟲以頭與前胸塞住洞口，主要以光影變化感覺獵物接近，再利用頭與前胸的彈器快速後甩與腹部 1-5 節力量彈出洞口捕食，後甩速度平均約 23.7cm/s ，最快約 34.9cm/s ，且有隨幼蟲重量增加而加快的趨勢。

- 七、幼蟲偏好在潮濕(與文獻紀錄有所不同)、容易挖掘且黏性足以形成穴道的土層介質(如沙子)及明亮環境築穴巢棲息。
- 八、土層深度對於棲息穩定的影響比土層寬度明顯，土層深度約需在 2 倍幼蟲體長以上，幼蟲較能穩定棲息。
- 九、3 齡幼蟲在 6mm 以內的狹窄土層環境容易築成明顯的延伸穴道以加深棲息的深度。
- 十、幼蟲並不會主動搜尋既有的穴巢並加以利用。但若剛好遇上時則會加以利用並進行修飾成自己可用的穴巢，幼蟲離既有穴巢越近利用的機率越高。
- 十一、土坡傾斜角度越接近 90 度，幼蟲開始挖掘穴道角度越近 90 度。
- 十二、棲地淹水時，會在穴道內築起土門形成氣艙應變。水量愈小，應變時間愈夠，氣艙愈大，可提高存活率。
- 十三、透過對於幼蟲形態構造與挖掘穴道行為的探討，設計出「取土便利鏟」與「挖深水平犁溝兩用鏟」等兩種仿生工具。

陸、參考資料及其他

- 一、吳怡欣等。2006。八星虎甲蟲 *Cicindela batesi* (Fleutiaux, 1893) 之形態與生活史研究。動物園學報 18:7-14。
- 二、周佳儒等。2017。虎克Run and Fly-八星虎甲蟲成蟲的移動方式探究。中華民國第五十七屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 三、周佳儒、羅暉哲、黃玟睿。2018。臺灣八星虎甲蟲幼蟲獵捕螞蟻之生物力學研究。中華民國第五十八屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 四、Tomasz Rewicz and Radomir Jaskuła。2018。Catch fast and kill quickly: do tiger beetles use the same strategies when hunting different types of prey?。PeerJ. 2018; 6: e5971。
- 五、B. Merle Shepard, Edward G. Farnworth, Flash Gibson。2008。Diurnal Activity and Territorial Behavior of *Pseudoxycheila tarsalis* Bates (Carabidae: Cicindelinae)。Southwestern Entomologist, 33(3):199-208。
- 六、Shou-Wang Lin & Toshinori Okuyama。2014。Hidden burrow plugs and their function in the tiger beetle, *Cosmodela batesi* (Coleoptera, Cicindelidae)。Journal of Ethology volume 32, pages23 - 27。

【評語】 080315

本研究作品主題在於探討貝氏虎甲蟲的生活史與形態特徵，以及成蟲的捕食、繁殖行為等。作品的題目名稱相當有趣，容易吸引讀者目光。科學研究方法上，有系統地收集許多數據及分析。對於貝氏虎甲蟲的生態行為進行觀察，同學的生態調查很仔細，值得鼓勵。對於捕食策略、追求雌蟲的交配行為、產卵行為都有很好的觀察。研究結果可作為未來深入研究的基礎。

建議：

1. 隨機選擇溪流附近的步道進行大樣區調查，樣區地點？距離差距？經緯度等資訊？可以再更明確且嚴謹的定義及提供樣區資訊。
2. 淹水反應實驗：大水量 8mm 高 /min、中水量 4mm 高/min、小水量 2mm 高/min，如何操弄？在實驗設計上可以描述更精確詳細。
3. 「圖 1-1 樣區內活動隻次與照度、溫度、濕度關係圖」、「圖 3-3 成蟲對於不同種類獵物的捕食行為比較圖」自變數為非連續性，不應該以折線圖表示因變數的數據。

4. 作品說明書圖 4-3 中，宜對 M5Stack 土壤濕度計數值的意義做解說，一般土壤濕度計的原理係偵測土壤中含水多寡反映在電阻上（含水高則電阻小，越乾燥則電阻越大）。

作品海報

壹 前言

一、研究動機：

露營是我們家日常休閒活動，有一次在溪邊遊玩時，發現很多隻背上有金屬綠色及白色斑點的昆蟲，媽媽說這好像是金龜子，但她並不確定；於是我將牠拍照下來。回到學校，利用課餘時間查尋了關於綠色身體，白色斑點的昆蟲；知道了這是虎甲蟲：這種昆蟲行為很特殊，雖然牠會飛，不過通常比較喜歡在地面或步道上行走且飛飛停停，我對牠感到萬分好奇，於是開始了我們的實驗與探討。

二、研究目的：

- 研究(一) 野外調查
- 研究(二) 生活史與形態特徵
- 研究(三) 成蟲捕食行為
- 研究(四) 成蟲繁殖行為
- 研究(五) 幼蟲動物行為

貳 研究設備及器材

略

參 研究架構

略

肆 研究過程、方法、結果與討論

【研究一】 野外調查

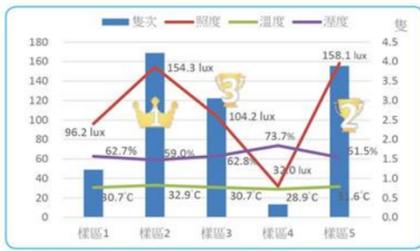
一、大樣區調查：

結果與討論：在溪流附近發現虎甲蟲的機率約為85.2%(23/27)，且離溪流越近虎甲蟲容易出現較多的數量，我們認為虎甲蟲的棲息與溪流環境有相當重要的關係。也發現虎甲蟲偏好在無植被、開闊明亮且人為干擾較少的環境活動。

二、虎甲蟲活動與環境關係

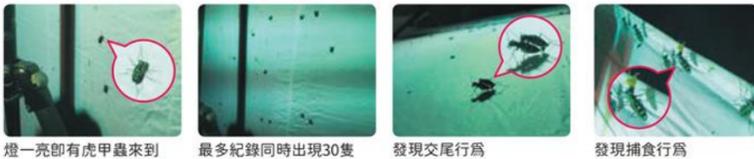
結果：如圖1-1

討論：樣區2與樣區5照度高；發現虎甲蟲活動的平均隻次數量也較多，由此驗證在進行樣區調查時，開闊明亮的樣區一般也容易發現較多虎甲蟲活動。



想法：既然虎甲蟲偏好開闊明亮環境，那夜晚也會趨向光亮環境嗎？

結果：誘集時間內發現最多有30隻虎甲蟲(雌雄皆有)同時在光源附近停棲與活動。

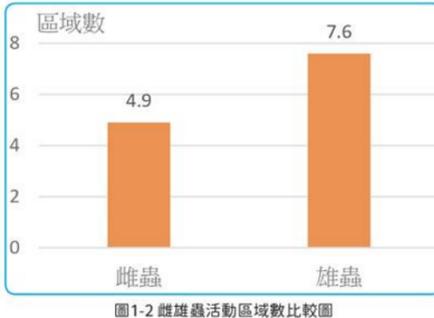


討論：我們認為虎甲蟲即使於夜間仍會趨向光線明亮的環境(具趨光性)活動，如捕食與交尾等行為。

三、虎甲蟲的領域範圍

結果：如圖1-2

討論：發現雄蟲的活動範圍較雌蟲廣，雄蟲擁有較廣的活動範圍，可能有利於尋找雌蟲交尾與搜尋捕食到更多樣的獵物。



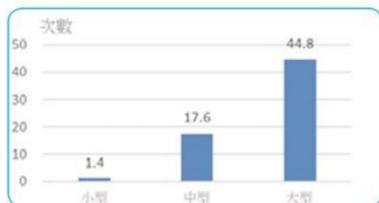
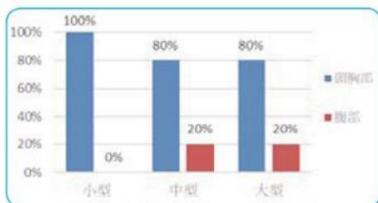
【研究二】 生活史與型態特徵

略

【研究三】 成蟲的捕食行為

一、不同體型獵物捕食模式

結果：如圖3-1、3-2。

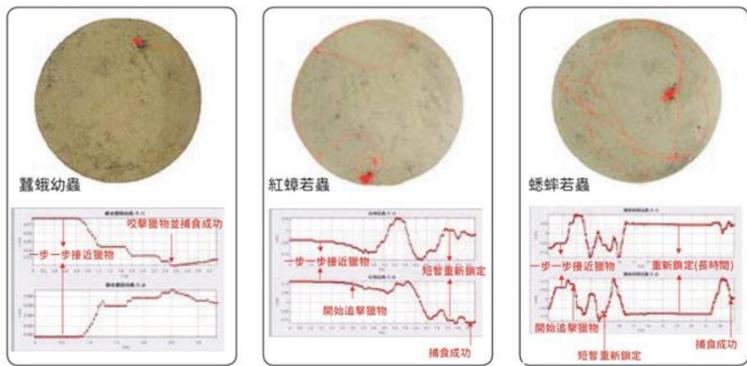
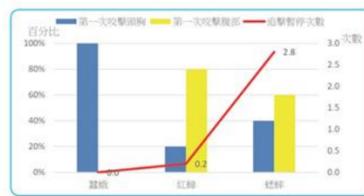


討論：不論蠶蛾體型大小，虎甲蟲大都會先選擇攻擊幼蟲的頭胸部，因為頭胸部常是幼蟲「移動」較明顯的部位。且面對較大體型的獵物時，會出現「重複攻擊」減弱獵物反抗能力的捕食模式。

二、不同移動方式獵物捕食模式

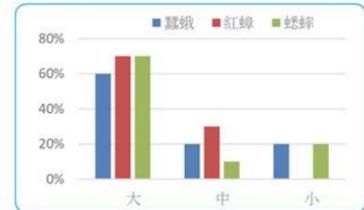
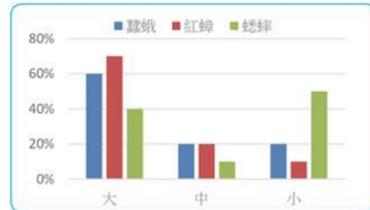
結果：如圖3-3。

討論：捕食移動能力較強的獵物時，虎甲蟲會出現在獵物後方「追擊」的捕食模式，當獵物瞬間逃離時，易失去追擊獵物的方向而暫停追擊，出現「重新鎖定」的捕食模式。



三、不同體型獵物的捕食選擇

結果：如圖3-4與3-5。



討論：虎甲蟲第一次鎖定的獵物都偏好大型個體，但像蟋蟀若蟲這類具有較強跳躍能力的獵物，常讓虎甲蟲失去追擊方向(如研究三-二實驗)，轉而常重新鎖定在其附近的中型或小型個體，而小型個體因跳躍能力較弱，被捕食成功的機率也就提高了。因此我們認為虎甲蟲在可捕食成功的情況下，偏好捕食較大型的獵物。

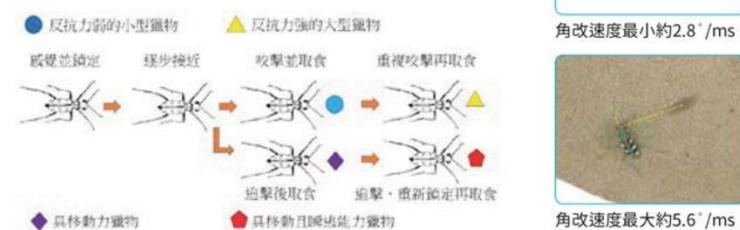
四、獵物逃離追擊方向角度改變速度

結果：共統計了10個角度。紀錄如表。

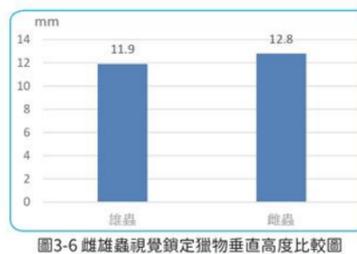
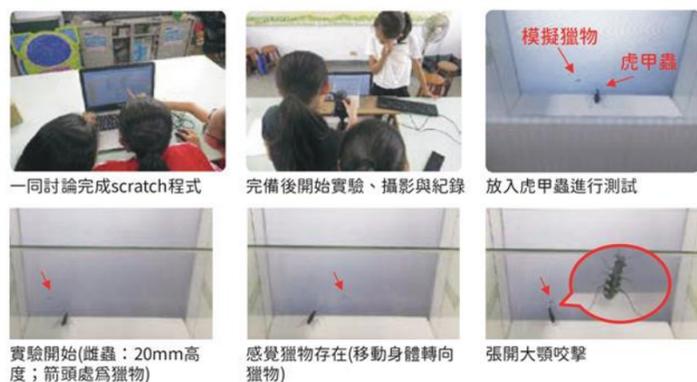
編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
角度(度)	62.7	93.7	65.1	88.9	46	66.3	63	49	54.7	74.7
角改速度(度/ms)	3.8	5.6	3.9	5.3	2.8	4.0	3.8	2.9	3.3	4.5

平均偏離追擊方向角度=66.4°；平均角改速度=4.0°/ms

討論：當蟋蟀若蟲跳躍出足夠的偏離追擊方向的角度且跳躍速度夠快時，才容易停下來「重新鎖定」。平均約4.0°/ms以上的角改速度才能使得虎甲蟲停下來「重新鎖定」獵物。將捕食模式整理如下圖：



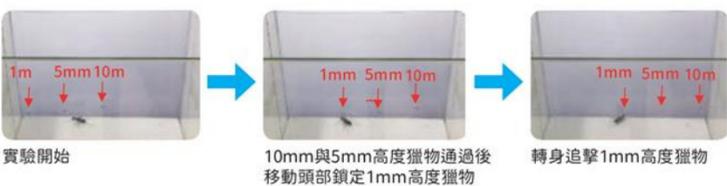
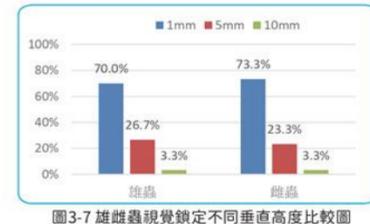
五、視覺鎖定獵物垂直高度1



結果：如圖3-6。
討論：發現雌雄蟲視覺鎖定獵物的最大垂直高度分別約為16mm及20mm。也觀察到虎甲蟲似乎對於越貼近地面的獵物越容易進行鎖定與追擊。

六、視覺鎖定獵物垂直高度2

結果：如圖3-7。



討論：雌雄蟲都對於越貼近地面的獵物反應越明顯。而大型獵物應是從地面垂直往上佔有虎甲蟲較多的反應明顯的視覺範圍，因而容易吸引虎甲蟲進行鎖定與追擊。

七、視覺鎖定獵物長度

結果：如圖3-8。

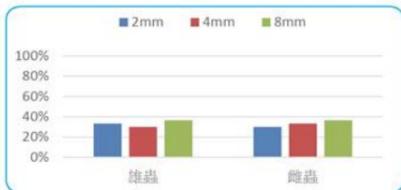


圖3-8 雄雌蟲視覺鎖定不同獵物長度比較圖

討論：雄雌蟲對於不同獵物長度的反應機率都相當接近，我們認為獵物離地面的垂直高度對於虎甲蟲捕食影響比獵物長度明顯。

【研究四】虎甲蟲的繁殖行為

一、交尾行為

結果與討論：交尾由雄蟲主動開始，雄蟲會逐步接近雌蟲，然後迅速的咬上雌蟲並交尾。咬住時間有時可長達8小時以上，期間可交尾多次，交尾時間不一。雄蟲長時間咬住雌蟲應是一種守護交配權的行為。

在交尾的過程中雄蟲會產生振動以及擺動觸角輕撫雌蟲觸角，發現交尾時間越長時，振動次數有越少的趨勢。雄蟲振動、擺動觸角與觸角輕撫雌蟲應都是為了提高雌蟲交尾意願。

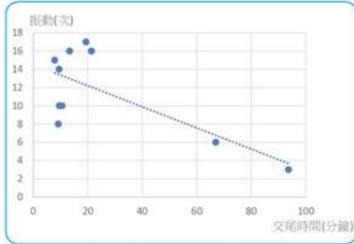


圖4-1 交尾時間與振動次數分布圖



二、兩雄一雌共處

結果：結果紀錄如表：(♂1：先放入容器內交尾之雄蟲；♂2：第二次放入之雄蟲)

組別	無競爭下交尾時間	競爭下交尾時間	雄蟲行為	備註
A	7分28秒	20分40秒	♂1以後足踢開♂2	♂1擁有原來交配權
B	27分58秒	11分29秒	連♂2搶奪交配權成功	♂2取得交配權
C	6分13秒	6分25秒	♂2將♂1從雌蟲身上咬下，且♂2與♂1發生交尾動作。	♂2最後取得交配權
D	17分02秒	11分25秒	三蟲疊在一起，雌蟲上方兩雄蟲出現交尾動作，♂2與雌蟲交尾	♂2最後取得交配權
E	19分40秒	15分37秒	三蟲疊在一起，♂1未失交配權	♂1仍有原來的交配權

5組雌蟲均未發現選擇雄蟲行為



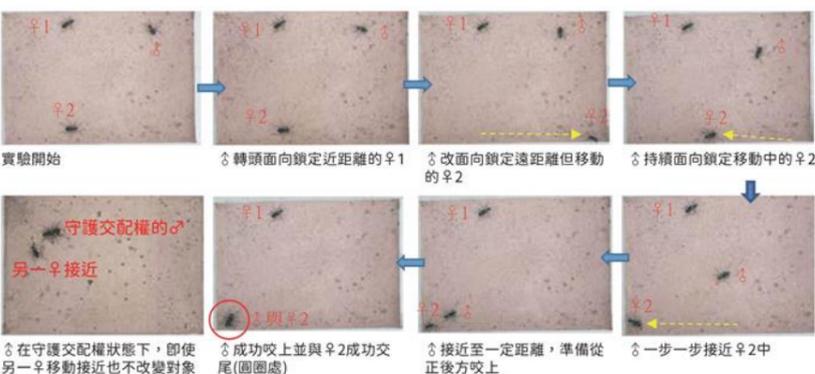
討論：雄蟲常以大顎爭奪交配權。交尾時間仍主要取決於雌蟲的意願。也會發現雄蟲會咬上雄蟲，甚至進行類似交尾的動作。測試3組個別飼養的雄蟲放入同一容器，發現雄蟲都會咬上另一隻雄蟲且有2組伸出交配器想進行交尾。因此認為虎甲蟲雄蟲以視覺判斷為同類時，會保握機會嘗試咬上進行交尾。

三、兩雌一雄共處

結果：結果紀錄如表：
(♀1：表示該組第一隻交尾雌蟲；
♀2：表示該組第二隻交尾雌蟲)

測試次數組別	第一次(交尾雌蟲)	第二次(交尾雌蟲)	第三次(交尾雌蟲)
A	♀1	♀1	♀2
B	♀1	♀2	♀1
C	♀1	♀1	♀1
D	♀1	♀2	♀2
E	♀1	♀2	♀1

雄蟲選擇雌蟲原則：1.動態雌蟲；2.近距離雌蟲



討論：發現雄蟲對雌蟲沒有專一性，而是越接近且為動態的雌蟲越容易吸引雄蟲咬上，尤其是動態的雌蟲。由以上兩個實驗也得知雌雄蟲在交尾方面均無專一性。

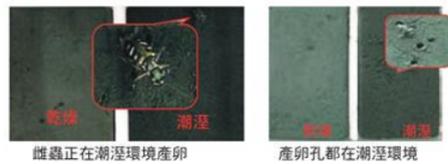
四、產卵偏好-乾燥與潮濕

產卵行為：

產卵時會抬起身體將產卵器插入土層後，接著重新抬高身體角度再插深並產卵於較深穴道內。整個產卵時間大約2分鐘。(與自然課時討論到南攀雀巢假出入口類似)



結果：如圖4-2。



討論：雌蟲偏好將卵產於潮濕的環境中，符合其他樣區中虎甲蟲較易出現在附近有溪流，較潮濕環境的偏好傾向。

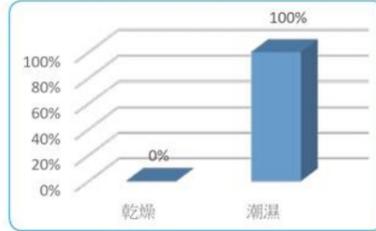


圖4-2 產卵偏好-乾燥與潮濕

想法：雌蟲偏好將卵產於潮濕環境，那是否是因為這樣的環境有助於卵孵化呢？

結果：圖4-3。



討論：發現卵要在一定濕度的環境下才能夠孵化，若濕度值保持在平均約678.1-635.0之間，孵化率可達93.3%。由此可知雌蟲偏好產卵在潮濕環境是有助於卵的孵化，並印證虎甲蟲偏好棲息在類似溪流附近有水的潮濕環境。



圖4-3 濕度對卵孵化的影響比較圖

五、產卵偏好—土坡角度

結果：如圖4-4。

討論：雌蟲偏好將卵產於水平的土層，但在調查時發現不少穴巢在垂直的土坡，飼育過程中發現換巢的機率約為50%，因此垂直土坡上的穴巢可能不是最初雌蟲的產卵地，很有可能是環境等因素導致幼蟲更換的穴巢。而有那些因素呢？在幼蟲築穴巢選擇探討時進行實驗。

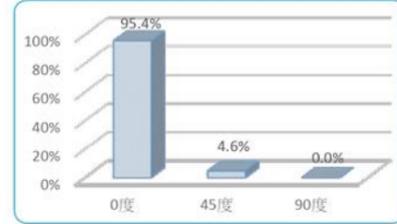


圖4-4 產卵偏好—土坡角度



【研究五】幼蟲的動物行為

一、幼蟲的捕食行為

(一)感覺獵物存在方式

結果：如圖5-1。

討論：幼蟲主要以光影的變化來感覺獵物存在進而捕食。

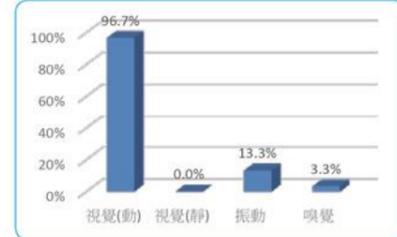


圖5-1 幼蟲感覺獵物存在方式比較圖



(二)幼蟲捕食獵物的生物力學

結果：如圖5-2。

討論：腹部1-5節有較明顯的伸長比率，因此我們認為腹部1-5節肌肉的彈性力量應是快速彈出捕食的力量來源之一。而6-10節應不是彈出力量的來源，此與文獻有所差異。發現幼蟲會以相當快的速度將頭與前胸往後甩出捕食，因此瞬間彈出捕食力量除了來自腹部1-5節外，頭胸後甩的力量再加上頭胸塞住穴道口產生的應力應也是來源之一，甚至這股力量才是主要來源。

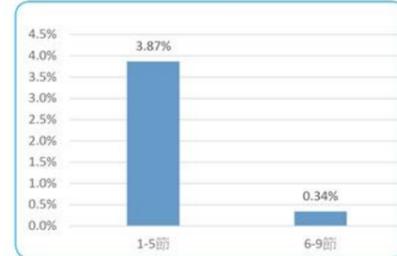


圖5-2 幼蟲彈出捕食腹部改變比例比較圖



(三)幼蟲頭胸後甩速度

結果：如圖5-3。

討論：發現幼蟲頭與前胸的後甩速度相當快，幼蟲利用快速的後甩加上洞口塞住的應力可瞬間迅速彈出捕食。因此幼蟲後甩將身體甩出穴巢應是幼蟲可以瞬間彈出捕食的主要原因之一。

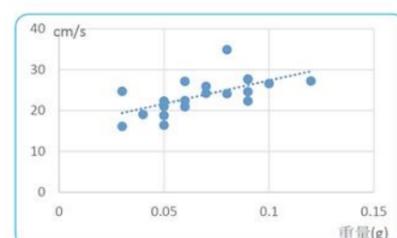


圖5-3 幼蟲頭胸後甩速度與體重關係圖



(四)彈器構造：為什麼後用速度這麼快呢？

結果：在頭部腹面後緣與前胸腹面前緣發現一圓弧形互相卡住的彈器構造。



討論：輕觸幼蟲時，感覺到與叩頭蟲相似的彈跳，因此開始尋找幼蟲是否具有如叩頭蟲般的彈器，發現在幼蟲頭部腹面後緣有一突起能與前胸腹面前緣的卡榫卡住形成彈器，幼蟲也利用彈器快速後用彈出捕食。透過在彈器上塗上凡士林進行驗證，發現後用無法順利完成(角度變小)或速度也會變慢，甚至直接逃走。將我們的發現與之前科展文獻進行比較如下：

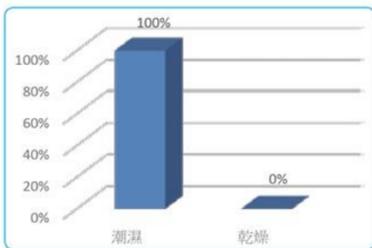
項目	文獻	本研究
捕食彈出力位置		
說明	腹部6-10腹節是幼蟲瞬間彈出捕食的力量位置(周佳偉, 2018)。	頭與前胸間具彈器構造，後用速度最快可達34.9m/s，是瞬間彈出主要力量，腹部彈出力主要應在1-5節，但6-10節應無伸縮變形

二、幼蟲築穴行為

(一)築穴巢選擇—乾濕環境

結果：如圖5-4。

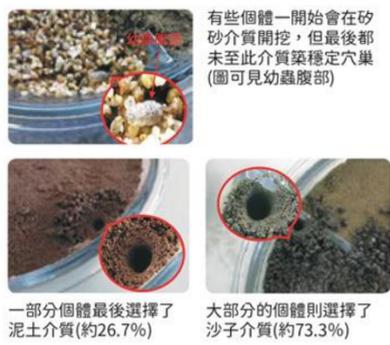
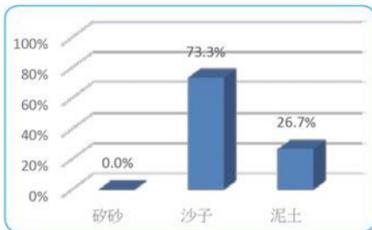
討論：發現幼蟲都偏好選擇潮濕環境築穴巢，與文獻提到幼蟲於乾燥土中生活(吳怡欣等, 2006)有所差異。另外雌蟲也偏好於潮濕環境的產卵，卵也須在潮濕環境才能孵化，且野外調查也發現虎甲蟲經常在溪流附近活動與棲息，因此虎甲蟲的生活史與潮濕環境(水分)有一定程度的關係。



(二)築穴巢選擇—不同土層介質

結果：如圖5-5。

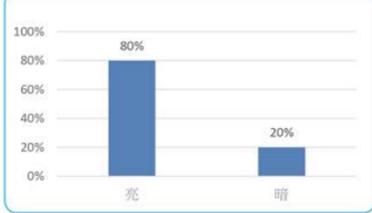
討論：我們認為幼蟲會偏好在容易挖掘且黏性足以形成穴道的土層介質築穴巢棲息。



(三)築穴巢選擇—明暗環境

結果：如圖5-6。

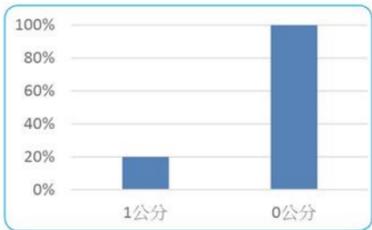
討論：幼蟲偏好選擇明亮環境築穴巢，在明亮的環境，獵物形成的光影變化明顯可以幫助幼蟲更容易捕食成功。



(四)舊巢再利用

結果：如圖5-7。

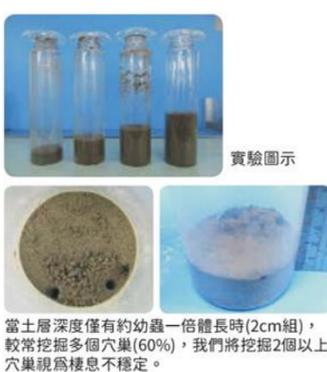
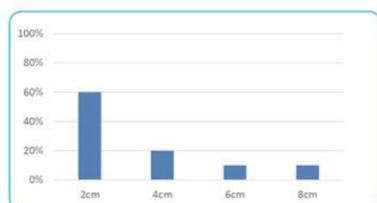
討論：幼蟲並不會主動搜尋既有的穴巢並加以利用。但當幼蟲剛好遇上時則會加以利用並進行修飾成自己可用的穴巢。



(五)土層深度影響

結果：如圖5-8。

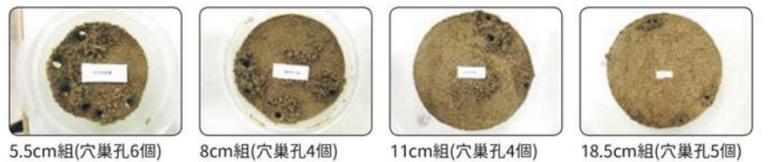
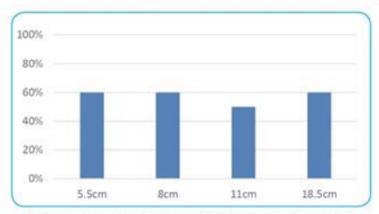
討論：發現土層深度應需達2倍以上幼蟲體長時，幼蟲才能較為穩定的棲息。



(六)土層寬度影響

結果：如圖5-9。

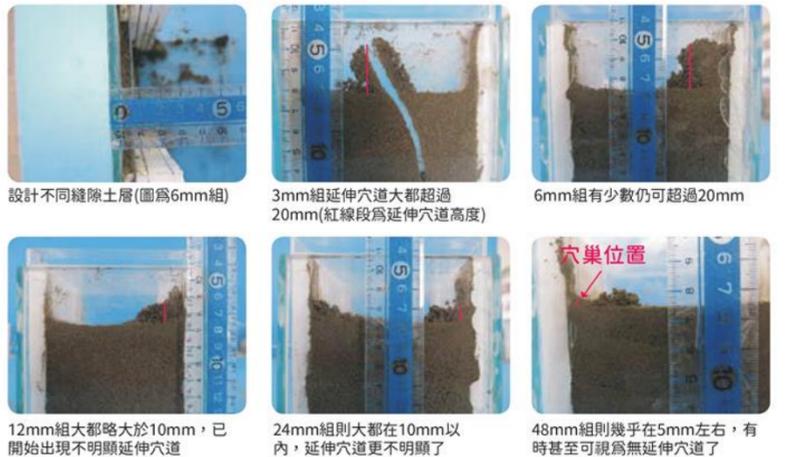
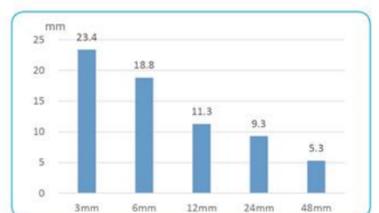
討論：各種不同寬度土層築2個以上穴巢孔數的比率都在50%以上，若與不同深度土層實驗相比，土層深度對於幼蟲棲息穩定的影響應較為明顯。



(七)築延伸穴道行為

結果：如圖5-10。

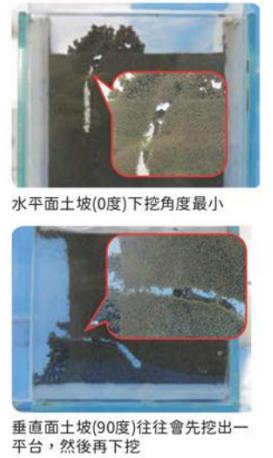
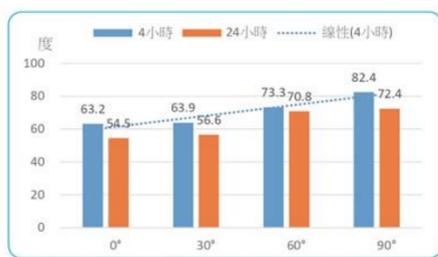
討論：隨著縫隙越窄所築出的延伸穴道越高，大約在6mm左右以內的狹窄土層環境，3齡蟲較容易築出比較明顯的延伸穴道。幼蟲修築延伸穴道應是為了延長其活動或棲息的深度。



(八)土坡角度與挖掘角度

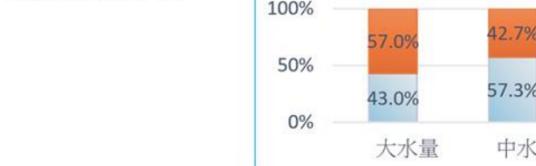
結果：如圖5-11。

討論：我們認為幼蟲會以一個大略固定的角度開始挖掘穴道，且土坡傾斜角度越接近90°時，開始挖掘角度會越接近90°。



(九)淹水反應

結果：如圖5-12。



討論：棲地淹水時，幼蟲會在穴道內構築土門，門後形成氣艙。以不同水量測試發現：水量愈小，應變時間愈久，氣艙愈大，可提高存活率。且發現與平時飼養時觀察到幼蟲蛻皮時築土堆封住地表洞口(如右圖)的行為不同，也與Shou-Wang Lin等(2014)研究不同；遇水築土門都低於土表，應該是避免逕流冲刷破壞而衍生的生存機制。



三、幼蟲行為的啟發

透過對幼蟲構造與行為的探討，設計了兩種仿生工具，分別為：

- (一)取土便利鏟：觀察幼蟲頭部、大顎形態與動作，設計出可以將挖出的土更順利的帶出洞穴的工具。
- (二)挖深水平犁溝兩用鏟：幼蟲的第五腹節後的固定勾在挖掘穴道時可以作為支點與施力點，省力且易挖出寬度較一致洞穴。另外模擬幼蟲頭型圓弧能修整洞穴，而試操作時也發現在土表水平犁溝也很好用。



伍、結論：請參閱報告書

陸、參考資料及其他：請參閱報告書