

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 生物科

030302

蠅虎適合進行撲食的光環境探討

學校名稱：臺東縣立寶桑國民中學

作者： 國三 葉柏亨 國一 郭芯妤 國一 朱昊恩	指導老師： 吳若嘉 游家豪
---	-----------------------------

關鍵詞：蠅虎、色光、撲食行為

摘要

蠅虎獨特的視覺構造一直是動物生理學有趣的題材，Nagata 在 2012 發表的研究（參考文獻一）指出蠅虎有可能是利用不同色光折射角度不同來判斷距離。去年我們發現（參考文獻二）眼鏡黑條蠅虎（*Phintella versicolor*）在單一色光下的撲食表現與安德遜蠅（*Hasarius adansoni*）有差異。眼鏡黑條蠅虎在綠光下的表現不佳，而在藍光下才能夠有最佳的撲食表現。我們採納了去年評審的建議，改進了研究過程，並且將平地灌木叢中也很常見的拉邁宇跳蛛（*Cosmophasis lami*）加入研究當中，以期能夠更加地了解不同色光對蠅虎撲食的影響。我們發現，眼鏡黑條蠅虎和拉邁宇跳蛛在純綠光環境中表現都不如預期，而三種蠅虎在純藍光環境的表現都與白光環境差異不大，我們猜測藍光或許才是適合大部分蠅虎進行撲食的色光。

壹、研究動機

一、實驗動機

去年我們從實驗結果得知：不同於安德遜蠅虎，生活在灌木叢中的眼鏡黑條蠅虎在綠光下的撲食能力較差，反而在藍光下的撲食能力與控制組白光表現相當。而我們今年想要延續著去年的研究成果，更進一步了解”光”對於這些棲息在不同環境中的蠅虎有什麼樣的影響（尤其是純藍光環境）？雖然文獻提及藍光在安德遜蠅虎的視覺上應會聚焦在第二層視網膜而非第一層（參考文獻1），所以應無法利用藍光來進行瞄準，但我們認為安德遜蠅虎可能可以利用藍光順利瞄準獵物，因為我們相信眼鏡黑條蠅虎能夠在藍光下順利瞄準獵物絕對不是個案，因此我們今年想要增加安德遜蠅虎的實驗，以及另一種在台灣低海拔平地也很常見的拉邁宇跳蛛，看其是否也能夠在藍光下準確的瞄準撲食。另外，去年全國賽的評審，對於我們提出的結論有一些質疑，也對我們的研究流程提出需要再改進的地方，因此今年我們對於實驗的整個過程重新檢討與修改，將控制變因控制得更精確，讓整體研究更加地嚴謹。（參考文獻七）

二、前人研究文獻探討

(一) Depth perception from image defocus in a jumping spider. Nagata, T., Koyanagi, M., Tsukamoto, H., Saeki, S., Isono, K., Shichida, Y., Tokunaga, F., Kinoshita, M., Arikawa, K. and Terakita, A. (2012). *Science* (2012)335, 469-71：這一篇刊登在「科學」期刊的研究，是我們重要參考文獻，也是我們這個研究的發想來源，提供了我們許多背景資料以及實驗方法。這篇研究主要提及蠅虎使用的視覺深度測量方法有別於其他生物，牠們可以利用光聚焦在四層視網膜中的其中一層，而其他層就不會聚焦的特性，並根據散焦那層的模糊程度來進一

步判斷獵物的距離。然而，這篇研究更重要的重點在於，因不同色光有不同的波長，而不同波長就會導致牠在經過角膜後的偏折角度不同，這篇研究就進一步利用物理公式來計算出紅光和綠光跳躍情形的差異，最後在透過行為實驗驗證，發現其跳躍情形與公式計算出來的十分吻合。其結論十分明瞭，安德遜蠅虎在綠色的色光底下捕食較為精確，反觀在紅色則有跳不準的問題，另外也做出同色光光線的明暗程度對蠅虎撲食的影響並不大的結果。

- (二) 「虎」光三色—不同色光環境對蠅虎撲食準確度之探討（中華民國第 59 屆中小學科學展覽會）：有別於安德遜蠅虎，此篇研究發現另一種蠅虎—眼鏡黑條蠅虎在綠光下的瞄準撲食表現較差，反而在藍光下的瞄準撲食表現優異。另外本篇研究尚未對蠅虎適合撲食的色光以及其生存環境的關係做出進一步的探討。
- (三) 跳跳虎跳不準—蠅虎的三維跳躍精準度（中華民國第 56 屆中小學科學展覽會）：安德遜蠅虎進行瞄準跳躍會有一段最佳距離，這一段最佳距離和距離的遠近無關，無論是少於最佳距離太多或是多於最佳距離太多皆會影響安德遜蠅虎跳躍到目標物上的成功機率。最後本研究也用了和 Nagata 一樣的理论模型來解釋此事，也就是不同層視網膜可以同時提供模糊和清晰的影像，而蠅虎可以進一步利用這種機制來判斷距離。
- (四) 虛擬實鏡～安德遜蠅虎撲食模式（中華民國第 55 屆中小學科學展覽會）：這篇文獻主要探討安德遜蠅虎的基本生態，而其中有一項實驗提到色光是否會對安德遜蠅虎的捕食造成影響，其一部分結論為：發現規則固定色光背景中，蠅虎在綠、藍、靛、紫為主的色光中會撲食。蠅虎在不規則色譜圖色光背景中不會撲食。
- (五) 活躍於光明的闇獵人 ---- 安德遜蠅虎（中華民國第 48 屆中小學科學展覽會）：這篇研究主要是在探討有關安德遜蠅虎的生態行為，包括雌雄個體的比例、分類學地位、生殖行為等等，其中有探討到了蠅虎食性，以活蠅為最喜愛食物，蚊子則次之。

貳、研究目的

一、研究目的

我們想要改善去年研究過程中的瑕疵，並對這幾種不同蠅虎適合撲食的色光作探討，並找出這幾種蠅虎適合撲食色光環境的共同點。

二、研究假設

- (一) 由於去年我們發現眼鏡黑條蠅虎可以在藍光下撲食準確，我們認為眼鏡黑條蠅虎可以在藍光下撲食準確不會是個案，因此我們假設安德遜蠅虎及拉邁宇跳蛛都可以使用藍光撲

食準確。

- (二) 去年眼鏡黑條蠅虎在綠光下撲食表現不如藍光，我們推測可能是因為葉蟬是綠的緣故，因此我們假設若使用獵物的顏色為綠色，在綠光下會導致蠅虎撲食不準。
- (三) 我們觀察到果蠅在紅光下的行為表現不如白光敏捷，這可能會讓蠅虎更容易捕食到牠，但卻不能夠讓蠅虎跳得更準。因此我們推測蠅虎在某種色光下成功撲食到獵物的機率和牠能否在某種色光下跳準不一定有關係。

參、研究設備及器材

- 一、實驗暗箱：實驗箱內側貼滿白紙。中間隔黑色隔板，在隔板兩邊箱子的直立面上各黏一個黑色瓦楞板方框（放置塑膠透明盒用），框內分別貼了紅（630 nm）、藍（470 nm）、綠（520 nm）、冷暖白（暖白色溫 3000~3500k，冷白色溫 6000k ~ 6500k）的 SMD 5050 led 燈條，每一種色光的亮度都控制在距離塑膠透明盒的正中心面對光源大約 1500 lux。實驗暗箱蓋子內側貼白紙，四邊壁貼黑紙，中間黏擋光的黑色隔板。



▲ 圖一：實驗用暗箱（左）與蓋子（右）



▲ 圖二：實驗暗箱內部的黑色方框設置了紅、綠、藍、白四種不同 LED

在紙箱的方框下方位置開洞連接點亮 LED 燈的 2V, 1A 的變壓器。在黑色瓦楞板方框對面，依手機鏡頭的大小，鑽洞，在洞的右邊兩公分黏一個手機架。



▲ 圖三：實驗箱一側放置錄影用手機（左）與另一側連接 2V, 1A 變壓器（右）

二、蠅虎撲食實驗盒：16mm*16mm 透明塑膠盒，盒子內側底部貼上白紙，並標註比例尺（50 mm）。客製壓克力板蓋，蓋子與盒子用橡皮筋綁住固定。



▲ 圖四：蠅虎撲食實驗盒與客製壓克力板蓋

肆、實驗過程及方法

一、實驗物種捕捉方法

(一) 蠅虎捕捉方式：

1. 人工建物上的蠅虎捕捉方法：捕捉人工建物上蠅虎的方法是以目視為主，因為人工建物為平面，可以看到蠅虎時直接利用透明小盒子蓋住，等到其進入布丁盒再蓋上蓋子，用此方法捕捉蠅虎只須注意蓋住時不要壓死蠅虎便可以順利捕捉蠅虎了。
2. 灌木叢中的蠅虎捕捉方式：將灌木叢的枝葉利用一根木棒敲打，並讓其掉落在黑色的瓦楞紙版或雨傘上，以利尋找白色的眼鏡黑條蠅虎和金色的拉邁宇跳蛛將其捕捉。



▲ 圖五：左：安德遜蠅虎 (*Hasarius adansoni*)、中：眼鏡黑條蠅虎 (*Phintella versicolor*)、右：拉邁宇跳蛛 (*Cosmophasis lami*)，圖中蠅虎皆為上母下公。(參考文獻六)

(二) 獵物果蠅捕捉方式：

使用自製的果蠅陷阱：手搖飲料杯，杯口放漏斗型的紙，杯子內放戳洞的小盒子。來捕捉生活環境中的果蠅。我們嘗試後發現，鳳梨釋迦和酵母菌粉的搭配，誘捕效果最強。

二、實驗設計

我們參考了 Nagata 在 2012 的實驗 (參考文獻一)，製作出了一個實驗專用的固定色光實驗箱 (實驗用具(一))。

我們安排每隻蠅虎一天做一次色光實驗。做色光實驗前，要先將果蠅置於冷凍庫 4~5 分鐘，趁牠們昏迷時，分裝入小盒子，一盒 3~5 隻。真正要開始實驗前，確認蠅虎編號，放入實驗盒中，再把分裝好的果蠅拿進冷凍庫約 1 分鐘後倒進去，為了避免在錄影前，蠅虎已撲到果蠅，導致蠅虎在實驗中不進食，所以蠅虎和果蠅放在一起後，要盡速開始錄影。兩邊實驗須同時進行，不能中途打開蓋子，以免外界環境光影響實驗。錄影時，曝光值調為可以清楚看到蠅虎和比例尺。約 30 分鐘後，停止實驗，紀錄蠅虎編號、片長、開始與結束時間及影片編號。將影片匯入電腦後，觀看影片，紀錄撲食行為，我們將紀錄以下兩種數據：

- (一) 一次命中率：只要蠅虎精準地一次跳中獵物原本的所在位置，不論獵物是否逃脫，皆為一次命中。
- (二) 撲食偏差率：假設蠅虎與果蠅的距離為 X 公分，蠅虎只跳了 Y 公分， $X - Y$ 即為跳後與獵物的距離差，而撲食偏差率等於 $(X - Y) / X$ ，這個數值會介於 0~1 之間，越接近 0 代表偏差越少，若等於 0 則代表跳躍準確。
- (三) 捕食成功率：當蠅虎成功地捕食到獵物，並吸食獵物，無論是否為一次命中，皆算為成

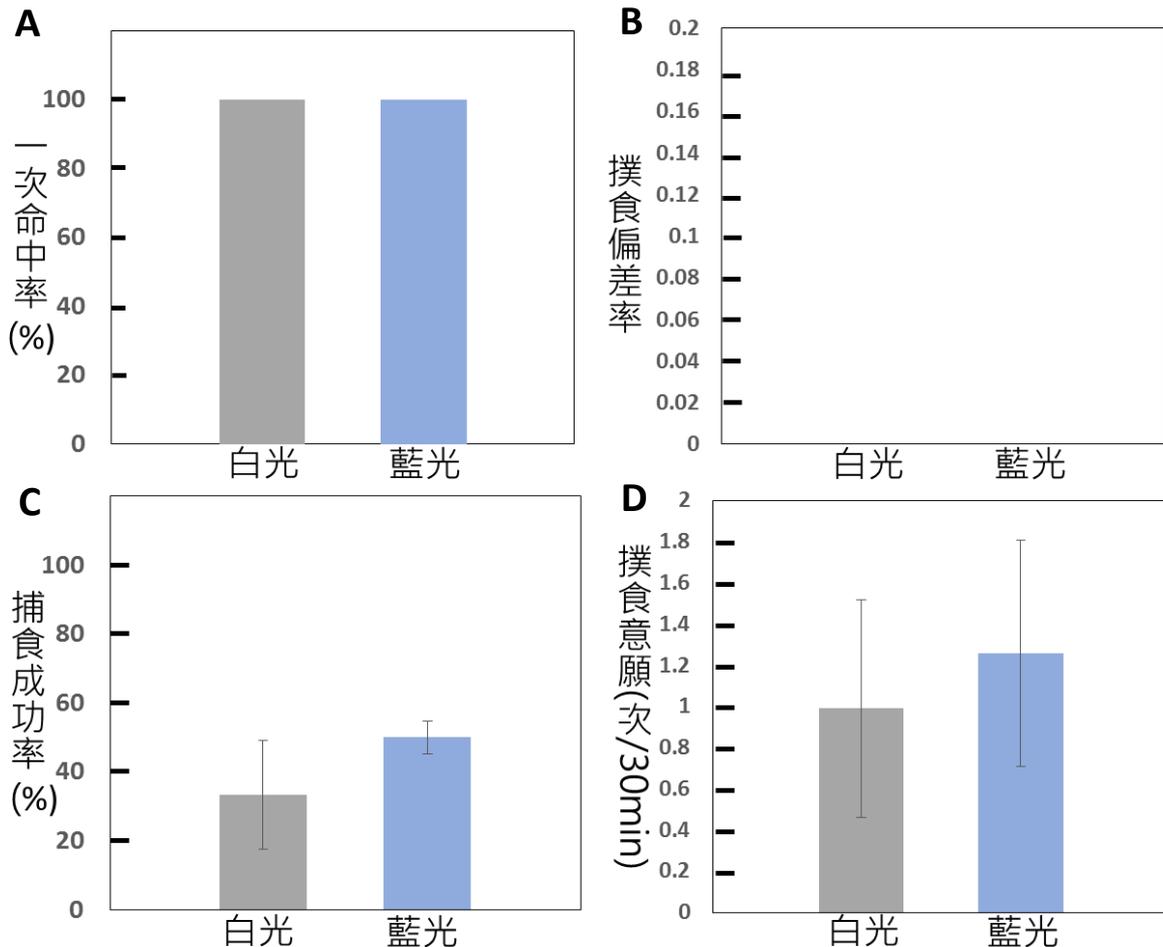
功捕食，而蠅虎成功捕食的機率稱為捕食成功率。

(四) 撲食時距光源距離：為了解這三種蠅虎在藍光和白光下會選擇在離光源多遠的地方捕食，我們測量了牠在藍光和白光下每次捕食離光源有多遠的數據。

(五) 撲食意願：紀錄每隻蠅虎在每次實驗的 30 分鐘內平均撲食次數。

伍、實驗結果

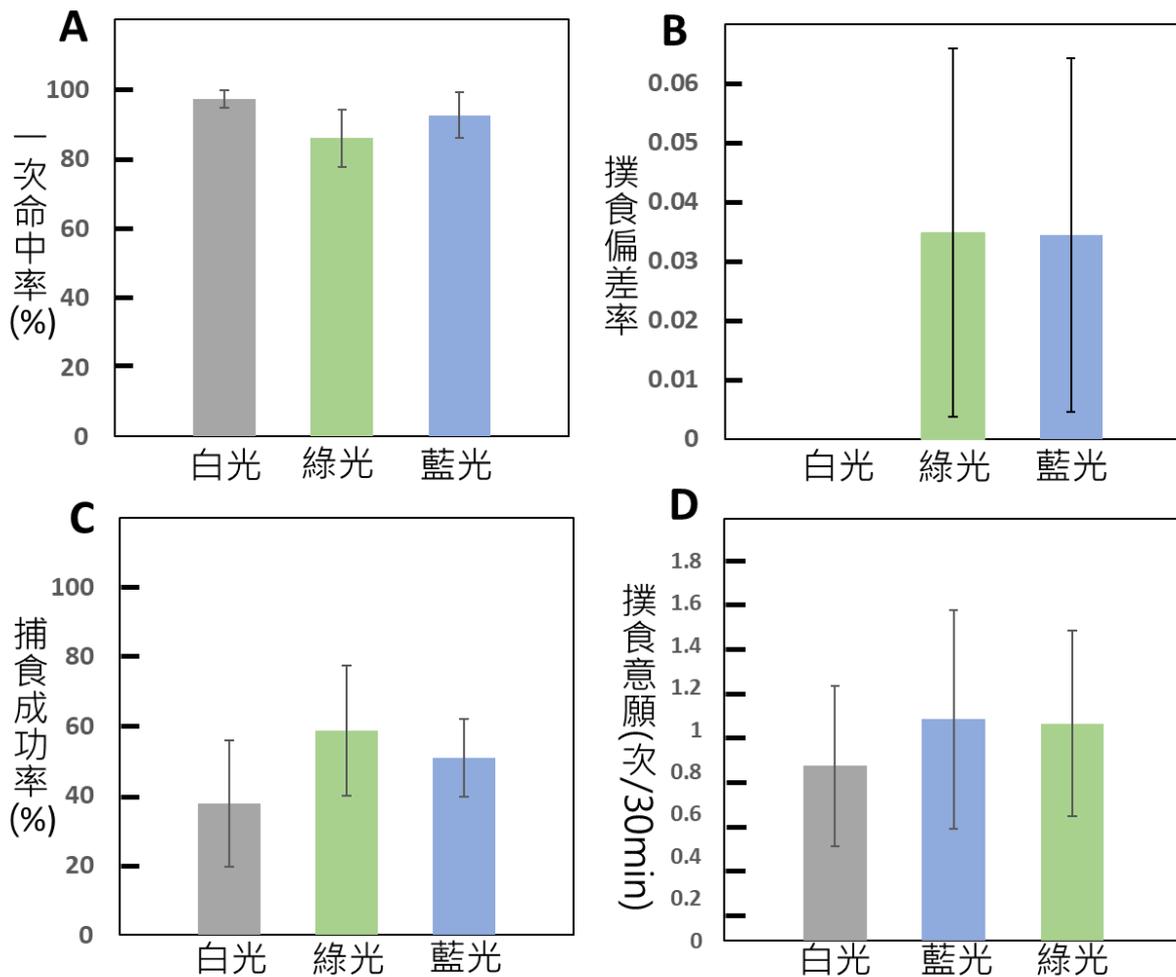
一、安德遜蠅虎撲食實驗結果



▲ 圖六、安德遜蠅虎在白、藍光下的各種數據。

(A) 安德遜蠅虎在白、藍三種色光下的一次命中率 ($n = 3$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，一次命中率白光和藍光都為全部命中。(B) 安德遜蠅虎在白、藍三種色光下的撲食偏差率 ($n = 3$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，撲食偏差率白光和藍光都為完全準確，沒有誤差。(C) 安德遜蠅虎在白、藍三種色光下的捕食成功率 ($n = 3$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，捕食成功率藍光大於白光。(D) 安德遜蠅虎在白、藍三種色光下的撲食意願 ($n = 3$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，撲食意願藍光的撲食意願比白光高。

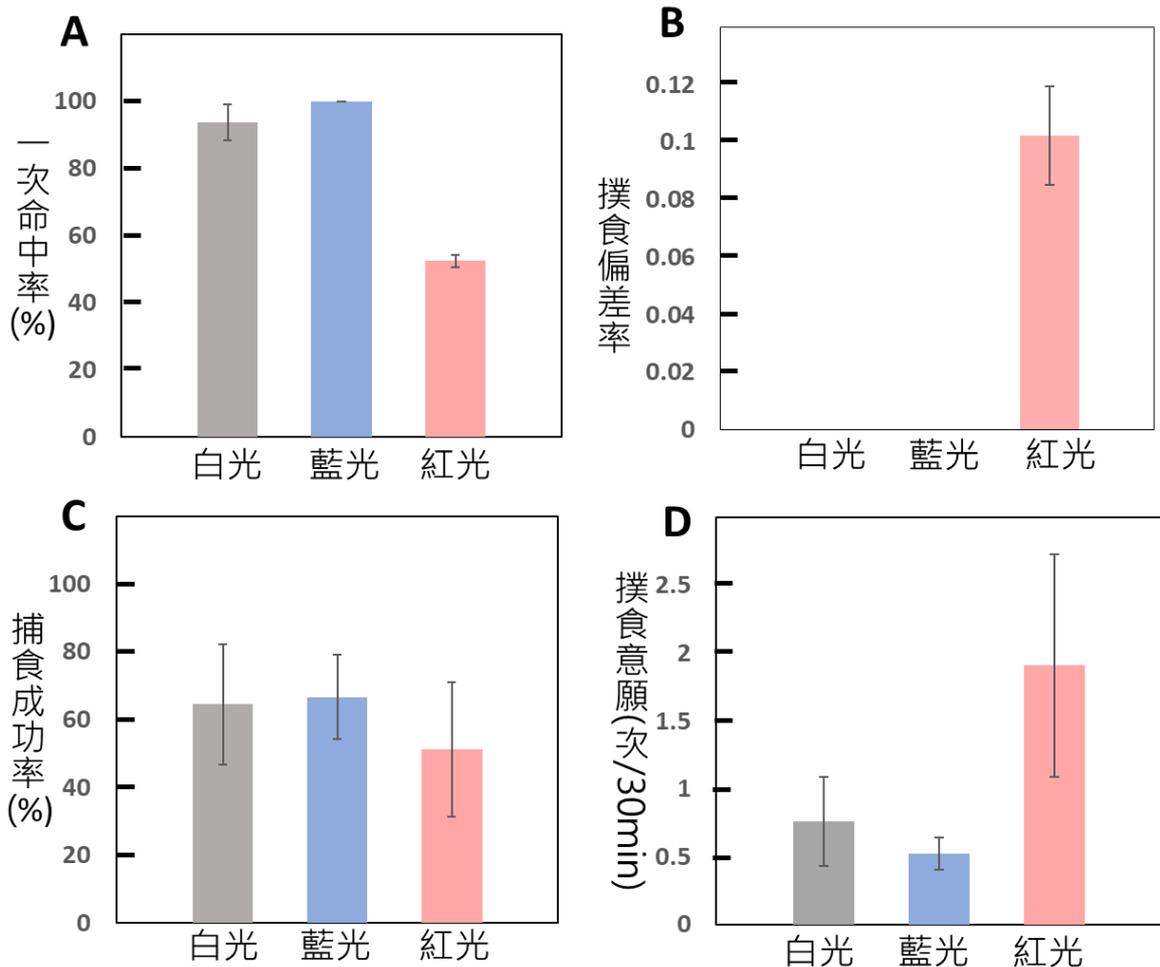
二、眼鏡黑條蠅虎撲食實驗結果



▲ 圖七、眼鏡黑條蠅虎在白、綠、藍光下的各種數據。

(A) 眼鏡黑條蠅虎在白、綠、藍三種色光下的一次命中率 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，一次命中率最高的是白光，其次是藍光，最後是綠光。(B) 眼鏡黑條蠅虎在白、綠、藍三種色光下的撲食偏差率 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，偏差率最高的是綠光，其次是藍光，白光的偏差率為 0。(C) 眼鏡黑條蠅虎在白、綠、藍三種色光下的捕食成功率 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，成功率最高的是綠光，其次是藍光最後則是白光。(D) 眼鏡黑條蠅虎在白、綠、藍三種色光下的撲食意願 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，眼鏡黑條蠅虎在藍光下的撲食意願最高，其次是綠光，最後則是白光。

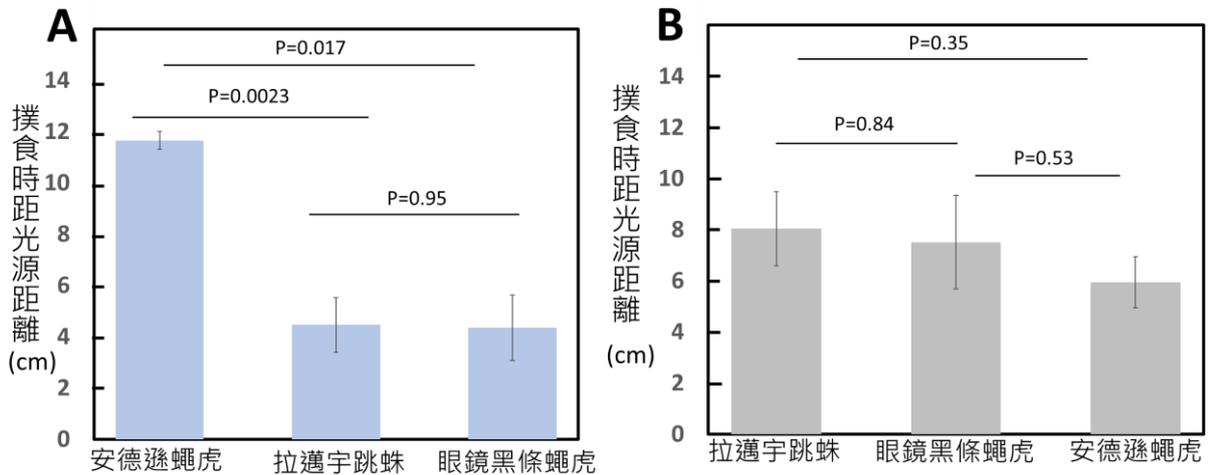
三、拉邁宇跳蛛撲食實驗結果



▲ 圖八、圖八是拉邁宇跳蛛在白、藍、紅光下的各種數據。

(A) 拉邁宇跳蛛在白、藍、紅三種色光下的一次命中率 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，一次命中率最高的是藍光，其次是白光，最後是紅光。(B) 拉邁宇跳蛛在白、藍、紅三種色光下的撲食偏差率 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，撲食偏差率最高的是紅光。而白光和藍光的撲食偏差率則都為 0。(C) 拉邁宇跳蛛在白、藍、紅三種色光下的捕食成功率 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，捕食成功率最高的是藍光，其次為白光，最後則是紅光。(D) 拉邁宇跳蛛在白、藍、紅三種色光下的撲食意願 ($n = 5$) ($\text{Mean} \pm \text{SEM}$)，撲食意願最高的是紅，其次是白光，最後則是藍光。

四、撲食時距光源距離



▲ 圖九、三種蠅虎在白光及藍光下撲食時距光源距離數據。

(A) 三種蠅虎在藍光下撲食時距光源距離。安德遜蠅虎和拉邁宇跳蛛，以及眼鏡黑條蠅虎在藍光下撲食時距光源距離達到顯著差異水準 ($P < 0.05$)，但拉邁宇跳蛛和眼鏡黑條蠅虎卻差異不大。另外在藍光下距光源距離最遠的為安德遜蠅虎，依次為拉邁宇跳蛛、眼鏡黑條蠅虎。(B) 三種蠅虎在白光下撲食時距光源距離，三種蠅虎在白光下距離光源距離皆未達顯著差異水準，其中距離光源最遠的為拉邁宇跳蛛，依次為眼鏡黑條蠅虎、安德遜蠅虎。

陸、討論

一、安德遜蠅虎和拉邁宇跳蛛是否可以使用藍光撲食？

我們的假設一提到拉邁宇跳蛛和安德遜蠅虎可能也可以使用藍光撲食準確，因此我們將分別討論這兩種蠅虎的撲食情形，進一步檢視其是否可以在藍光下撲食準確。

(一) 安德遜蠅虎的撲食行為

Nagata 已經以清楚的理論解釋安德遜蠅虎適合在綠光下撲食，但卻不能在紅光下撲食準確，所以目前我們對於安德遜蠅虎的撲食行為已經有一定程度的理解。可是我們仍然對藍光下的對焦機制不清楚，原因在於，Nagata 根據他的計算，藍光應該會聚焦在第二層視網膜而非第一層，而且安德遜蠅虎藍光感光細胞不靈敏，因此便沒有進行安德遜蠅虎在藍光下的實驗。但在我們這次實驗中，安德遜蠅虎在藍光下的撲食意願是大於白光的 ($1.26 > 0.99$) 雖然撲食意願並不能夠作為感光細胞是否對某段波長敏感的直接證據，但卻至少可以證明安德遜蠅虎是看的到藍光，並且在藍光下是會有捕食意願的。

而在藍光下安德遜蠅虎是否可以撲食準確呢？我們在安德遜蠅虎藍光下撲食行為得到了

和白光幾乎沒有差異的結果（偏差率皆為 0，一次命中率皆為 1），根據我們的實驗結果顯示，安德遜蠅虎是能夠利用藍光來進行瞄準撲食的（而且還撲的很準）。這也就表示 Nagata 一開始所設定的假設可能並非完全正確，其實牠能夠看得到藍光，並且藍光並也是聚焦在 L1 上，這有待我們日後再做更多藍光和綠光的比較來做驗證。

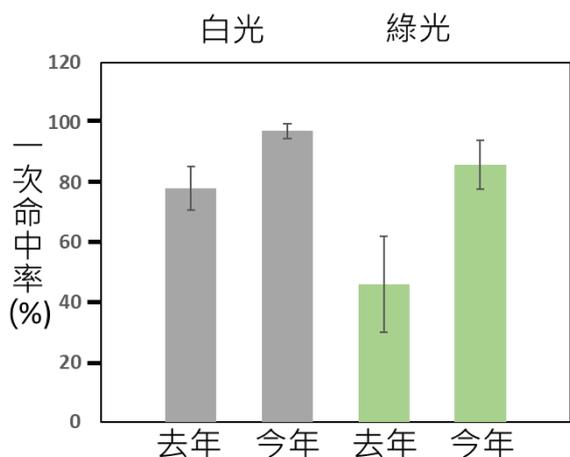
(二) 拉邁宇跳蛛的撲食行為

拉邁宇跳蛛的行為表現在我們這次實驗中和眼鏡黑條蠅虎非常的類似，他們在藍、白光下的撲食都非常地準確，而紅光則是所有色光中最不準確的，因此這兩種生活在灌木叢中的跳蛛在白、藍、紅三種色光下的表現很類似。但在綠光下，拉邁宇跳蛛不捕食或是一開始就吃到獵物的情況很多，這導致我們收集不到足夠的綠光數據。不過就以僅有的數據來看，拉邁宇跳蛛在綠光 7 次的撲食下，僅有一次是沒有一次命中的。這或許也代表拉邁宇跳蛛的綠光表現應該不至於太差，就算不及藍光，應該也不至於像在紅光那樣差的表現。

關於假設一，以我們目前的數據來看，我們認為我們的假設是正確的。因為安德遜蠅虎和拉邁宇跳蛛的在藍光下的撲食行為的確是準確的，這也代表其實他們視網膜的結構適合藍光。

二、綠色的葉蟬是否會影響蠅虎在綠光下撲食？

去年我們使用的獵物是綠色的葉蟬，我們懷疑在這種情況下，可能影響蠅虎在綠光下的撲食行為。我們將去年的眼鏡黑條蠅虎使用葉蟬在綠光和白光下的數據，和今年使用褐色果蠅在綠光和白光下的數據做比較，在綠光下牠的一次命中率比去年更高，雖然白光的一次命中率也有所提升，但綠光的提升幅度卻更高。



▲ 圖十、今年及去年白、綠光一次命中率比較

我們猜測會造成此種差異的原因很有可能是因為我們去年的獵物是使用葉蟬，而葉蟬是綠色的，導致眼鏡黑條蠅虎在綠光下無法清楚的看到葉蟬的輪廓，所以才會撲食不準確。今年我們所使用的獵物是褐色的果蠅，較有可能在各種色光下都有相同的效果，而沒有綠光下葉蟬可能輪廓模糊的問題。但牠在綠光下的表現依然不如白光及藍光，但這卻不一定代表牠的視網膜構造不適合綠光，這有待後面再解釋。

不過在假設二的結論還是很清楚的，的確使用葉蟬或是果蠅會影響牠在綠光下的撲食行為。

三、成功捕食到獵物和適合在哪種色光下撲食有關係嗎？

其實從我們這次的數據中可以發現眼鏡黑條蠅虎在綠光下雖然一次命中率和撲食偏差率都比白光和藍光的表現要來得差，但是牠的成功率卻是這三種色光裡面最高的；而拉邁宇跳蛛也類似，綠光的成功率是所有色光裡面最高的，而紅光的成功率也比藍光高出一點點，但藍光和白光的偏差率和一次命中率依然是這三種色光裡面最好的，可能的原因為何？我們這一篇研究主要聚焦在討論這幾種蠅虎的眼睛適合在哪一種色光環境下撲食，更準確地說應該是討論這幾種蠅虎的眼睛在哪一種波段的光下才能最正確的聚焦，並且在撲食時可以一次命中獵物。因此，從撲食偏差率和一次命中率所得到的結論應該都會和牠的眼睛內部構造有很大的關係。然而實際上色光這個變因可能影響到的並不只是蠅虎眼睛的聚焦構造，還有獵物在不同色光下的逃跑能力可能也會不同，我們有觀察到果蠅在紅光下的活躍程度不如其他色光，或許果蠅在紅光下的敏捷程度是低於其他色光的，才會使蠅虎比較好捕食。因此若真的要了解蠅虎在自然棲息環境中最適合在哪一種環境下捕食，可能也要將獵物等等的因素考慮進去，才有辦法得到完整的結論。不過可以肯定的是，蠅虎的視覺構造適合在哪種色光下聚焦，並不等於他們就最適合在那種環境色光下捕食獵物，可能還要考量到不同獵物的視覺能力也會有所不同。

四、蠅虎到底適合藍光抑或適合綠光？

這三種蠅虎的撲食行為各有不同之處：安德遜蠅虎是在藍綠光下皆可撲食準確，而紅光則不準；拉邁宇跳蛛在藍光下可以撲食準確，但在綠光下卻尚未有定論；而眼鏡黑條蠅虎差異最大，眼鏡黑條蠅虎有幾隻個體可以在綠光下撲食準確，有幾隻卻不行，但共同點是在藍光下都可以撲食準確。

其中比較特別的就是那些不適合在綠光下撲食的眼鏡黑條蠅虎，我們可以從今年和去年的數據發現一件事：某幾隻蠅虎可以在綠光下撲食準確，但另外幾隻卻不行（表一），在表一中去年的蠅虎 1、2 號和今年的 2 號都是相較於其他隻蠅虎在綠光下撲食狀況較為不佳者，這也讓我們對於眼鏡黑條蠅虎到底是不是在使用綠光進行瞄準有所疑惑，不過可以肯定的是他們都適合藍光，但適不適合在綠光下撲食卻有個體差異。

去年	命中率	偏差率
1號	0.222	0.101519
2號	0.0909	0.075791
3號	1	0
4號	0.375	0.067555
5號	0.6	0.052558

今年	偏差率	命中率	成功率
1號	0	1	0
2號	0.173936	0.545454	0.181818
3號	0	1	1
4號	0	0.75	0.75
5號	0	1	1

▲表一、兩年來每隻蠅虎的各項數據平均

那麼適合在藍光下撲食卻不適合在綠光下撲食，有可能是什麼原因呢？我們推測可能是跟安德遜蠅虎在綠光和紅光下的情形類似，安德遜蠅虎將波長較長的紅光誤判成綠光，因此用綠光的計算方式去計算，導致跳躍距離較短，而撲食不到獵物。因此我們推測眼鏡黑條蠅虎可能也有類似的情形，假設眼鏡黑條蠅虎習慣使用藍光來判定距離，但給了牠波長較長的綠光，這時就會發生在綠光下用藍光的判定方式，而導致跳的不夠遠的狀況發生。

五、距離光源遠近的討論

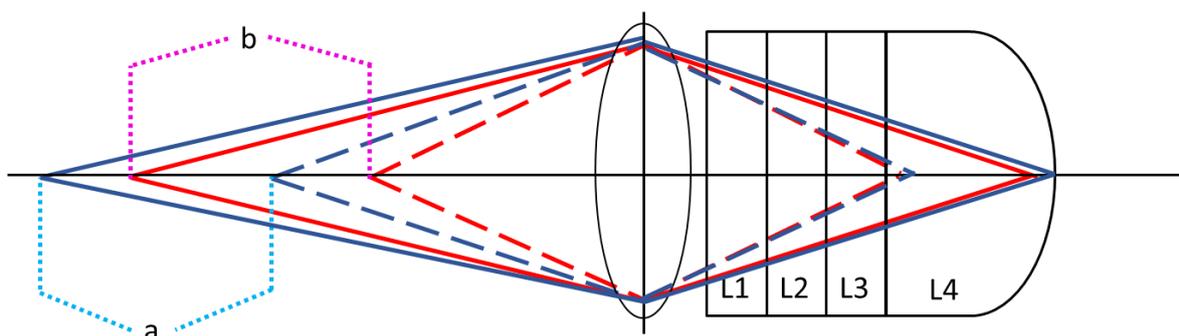
我們在這次光源遠近的結果發現，安德遜蠅虎和另外兩種蠅虎差異較大，安德遜蠅虎在藍光下距離光緣距離和眼鏡黑條蠅虎有顯著差異 ($p < 0.05$)，和拉邁宇跳蛛也有顯著差異 ($p < 0.001$)，但拉邁宇跳蛛和眼鏡黑條蠅虎則未達顯著差異水準 ($p > 0.05$)，其平均距離為安德遜蠅虎 > 眼鏡黑條蠅虎 > 拉邁宇跳蛛。另外在白光下則三種都沒有顯著差異。然而以目前現有的數據來看，我們尚無法對「蠅虎撲食是否對特定色光有特別的遠近差異」來下結論，要等到日後針對此問題有其他更多的實驗再做探討。

六、展望

從我們這一次的研究中，可以得到一些科學界還未有人發現的行為結果，例如這三種蠅虎皆可以在藍光下撲食準確。但事實上本研究仍然有許多疑點以及問題有待日後實驗才能進一步釐清。其中關於眼鏡黑條蠅虎為什麼有些適合藍、綠光？有些卻只適合藍光？以及安德遜蠅虎在藍光下的撲食機制到底為何？另外拉邁宇跳蛛真的適合在綠光下撲食嗎？這些都是我們在未來想要找出的答案。

我們一開始以為蠅虎的跳躍距離會和色光有關，因為不同波長的光折射角度不同的關係。但我們估查這兩年來的數據發現，其實和我們所想的不一樣，按照這個理論，蠅虎在藍光下可以瞄準的距離應該要最長（圖十一），假設藍光和紅光都是使用第一層視網膜聚焦第二層視網膜模糊的方式來計算距離的話，那理論上藍光可瞄準的距離就會是 a ，而紅光為 b 。但後來發現其實藍、紅光反而一樣都比較短，綠光最長。這跟我們一開始的預期很不一樣，但

我們推測會造成這樣的原因可能跟對色光的敏感度有關，因為在強綠下跳躍距離更遠，這些需要更多數據才能證明。



▲ 圖十一、蠅虎藍、紅光聚焦在第一層視網膜可瞄準距離假設圖

另外一點值得探討的是這三種蠅虎為何都適合藍光，而都不適合紅光？這對他們的生存到底有什麼影響？是什麼樣的環境因素讓牠們較適合在藍光而不適合在紅光下撲食呢？原本我們以為蠅虎都棲息在灌木叢底部，因此藍光比例相對提升，牠們才會使用藍光。但後來我們卻發現牠們都棲息在灌木叢表層，因此這個猜測也就不攻自破了。不過可以肯定的是：牠們可以在某種色光下撲食準確一定跟視網膜結構有關，而牠們適合撲食的色光和其生存上的意義則需要更多實驗再做驗證了。

柒、結論

- 一、眼鏡黑條蠅虎和拉邁宇跳蛛在純綠光環境中表現都不如預期，而三種蠅虎在純藍光環境的表現都與白光環境差異不大，我們猜測藍光或許才是適合大部分蠅虎用來進行瞄準撲食的色光。
- 二、安德遜蠅虎其實在藍光下是有撲食意願的，並且在藍光下撲食的很準確。
- 三、獵物本身的顏色和視覺能力，對於蠅虎撲食的研究有很大的影響，未來進行相關研究時須審慎考慮獵物種類以及增加對獵物行為的了解。
- 四、適合蠅虎撲食的色光，和蠅虎適合捕食的色光不一定相關，因為捕食成功與否還須考慮獵物在不同色光下的逃跑能力與敏捷程度。

捌、參考文獻及其他資料

- 一、Nagata, T., Koyanagi, M., Tsukamoto, H., Saeki, S., Isono, K., Shichida, Y., Tokunaga, F., Kinoshita, M., Arikawa, K. and Terakita, A. (2012). Depth perception from image defocus in a jumping spider. *Science* (2012)335, 469-71.
- 二、「虎」光三色—不同色光環境對蠅虎撲食準確度之探討（中華民國第 59 屆中小學科學展覽會）
- 三、跳跳虎跳不準—蠅虎的三維跳躍精準度（中華民國第 56 屆中小學科學展覽會）
- 四、虛擬實鏡～安德遜蠅虎撲食模式（中華民國第 55 屆中小學科學展覽會）
- 五、活躍於光明的闇獵人 ---- 安德遜蠅虎（中華民國第 44 屆中小學科學展覽會國中組）
- 六、台灣蜘蛛圖片資料
- 七、國民中學自然科學課本 1 上；趙大衛等

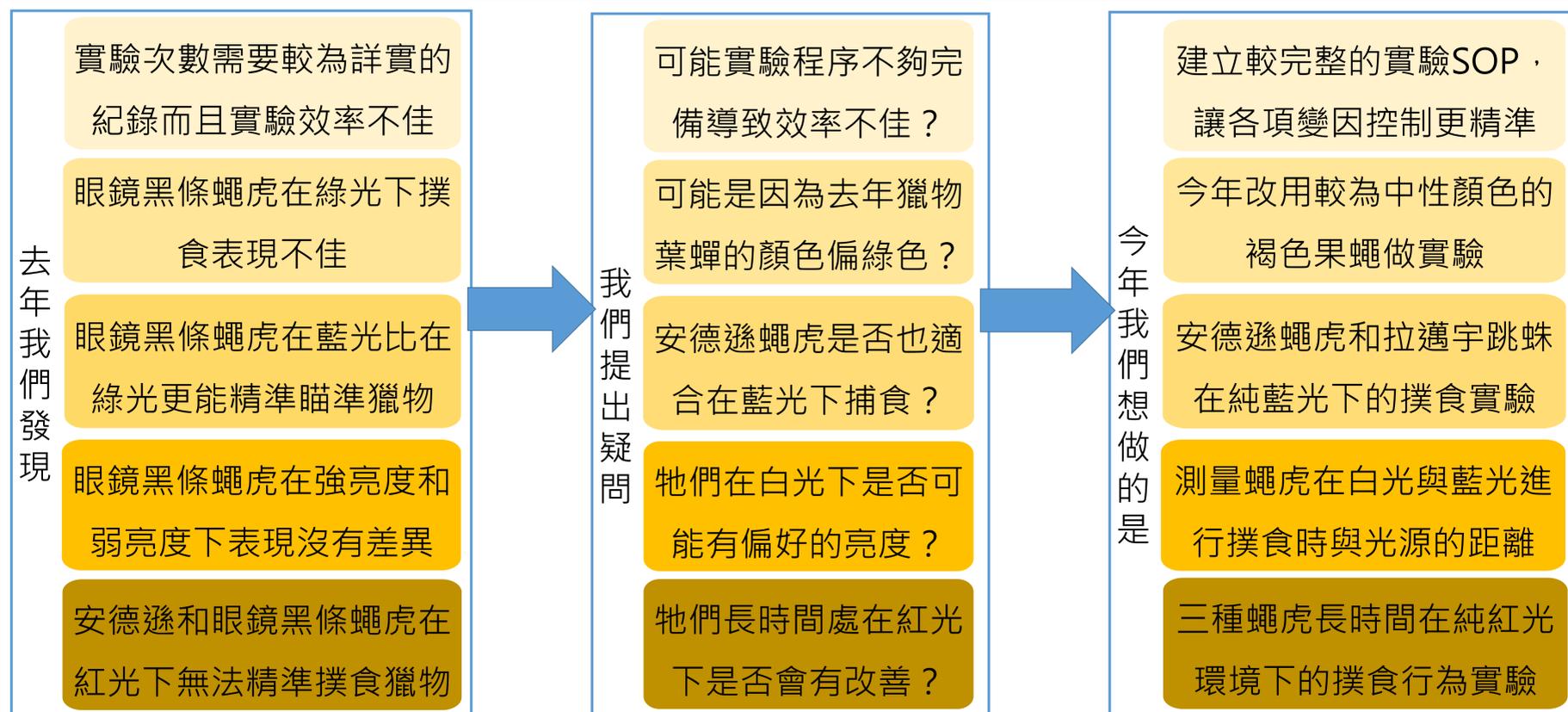
【評語】 030302

1. 本研究延續去年的研究，更改新的獵物物種，分析不同蠅虎適合撲食的色光作探討，並找出其適合撲食的色光環境，精神可嘉。唯自行捕捉實驗材料，是否因物種未鑑定，而未能有明確的結論。
2. 實驗結果需以結論做為標題，建議不要用實驗方法為標題。
3. 今年的研究成果中，學生改進了實驗流程，並且針對實驗有較詳盡的紀錄。在實驗箱的設計也較去年完善，提供穩定的變因控制。本研究的結果發現大部分蠅虎在藍光的環境下撲食效果較佳，也許可以針對這個結果進行更深入的探討。
4. 如同作者的結論中所述，同一顏色的光源對於特定蠅虎的撲食跟捕食結果之間是否有直接關聯仍有疑慮。除了獵物本身的顏色以及逃跑能力的不同之外，作者提出不同色光可能因在視網膜上的成像不同而改變撲食成功率，這個假設雖然有趣，但尚缺乏實驗證據，且不容易設計實驗來驗證。
5. 本作品是基於 Nagata et al. 2012 的文章立論，設計一連串研究的最新部分，應可以就目前所得的所有資料，去探討 Nagata et al. 2012 的立論是否完全正確。

壹、研究動機

去年我們得知：不同於安德遜蠅虎，生活在灌木叢中的眼鏡黑條蠅虎在綠光下的撲食能力不佳，反而在藍光下的撲食能力與控制組白光表現相當。而今年我們延續著去年的研究成果，提出了更多疑問：想要進一步了解不同「色光」對於這些不同種的蠅虎有什麼樣的影響，尤其是國外文獻較少提到的純藍、紅光環境，同時也對去年研究過程重新的檢討與修改，針對不完整的部分進行改進，以期獲得較佳的研究成果。

貳、研究目的及架構



參、研究設備及器材

實驗暗箱的設置：根據去年實驗的經驗，重新設計了一個新的實驗用暗箱。

實驗箱與暗箱蓋子的內側貼滿白紙，中間隔黑色隔板。箱子前方設置錄影設備放置架，箱子後方連接燈源用變壓器。

在箱子的一邊壁上各黏一個黑色瓦楞板方框（放置塑膠透明盒用），框內分別貼了冷暖白（色溫6000k ~ 6500k）、藍（470 nm）、綠（520 nm）、紅（630 nm）的SMD 5050 led燈條，每一種色光的亮度都控制在距離塑膠透明盒的正中心面對光源大約1500 lux。



肆、實驗過程及方法

一、實驗物種的採集與處理：

蠅虎撲食目標，從去年在草地捕捉的葉蟬，今年換成了使用陷阱捕捉的果蠅。

除了去年研究所使用的安德遜蠅虎和眼鏡黑條蠅虎之外，今年還新增了拉邁宇跳蛛來進行實驗，實驗用的所有蠅虎個體皆為野外捕捉，捉到後會先禁食一天再進行實驗，每隻蠅虎一天只進行一次實驗。



二、實驗流程設計：

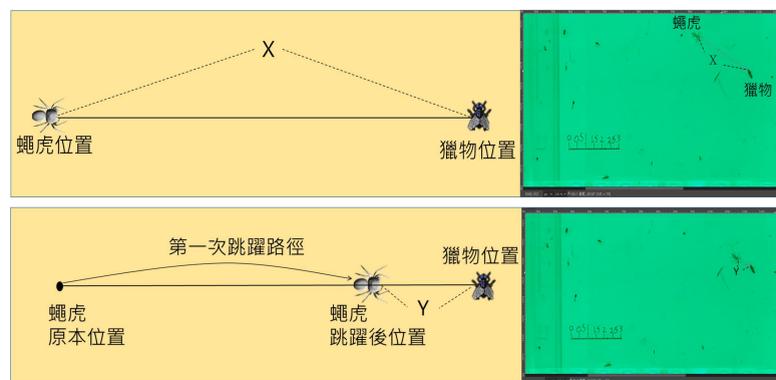
我們利用果蠅陷阱捕捉果蠅，並將果蠅冷凍，讓其暫時活動力降低，並在每次實驗放入3-5隻果蠅。

將果蠅和蠅虎放入實驗箱，並錄影30分鐘，要記錄開始錄影的時間、蠅虎編號、日期等。必須事先排好一個禮拜的實驗，以免過程中有缺漏或重複操作的情況發生。

最後觀看影片，並記錄各項數據，有一次命中率、撲食偏差率、捕食成功率、撲食時與距光源距離以及撲食意願。

三、實驗所記錄的五種數據：

1. 一次命中率：蠅虎精準地一次跳中獵物所在位置次數除以撲食總次數。
2. 撲食偏差率：假設蠅虎與果蠅的距離為X公分，蠅虎跳後與獵物距離差為Y，而撲食偏差率等於Y/X，數值介於0~1之間，越接近0代表偏差越少。
3. 捕食成功率：當蠅虎成功地捕食到獵物的次數除以總撲食次數。
4. 撲食意願：蠅虎在某種色光實驗30分鐘的平均撲食次數。
5. 撲食時蠅虎與光源距離：測量蠅虎在藍光和白光下每次撲食離光源有多遠。

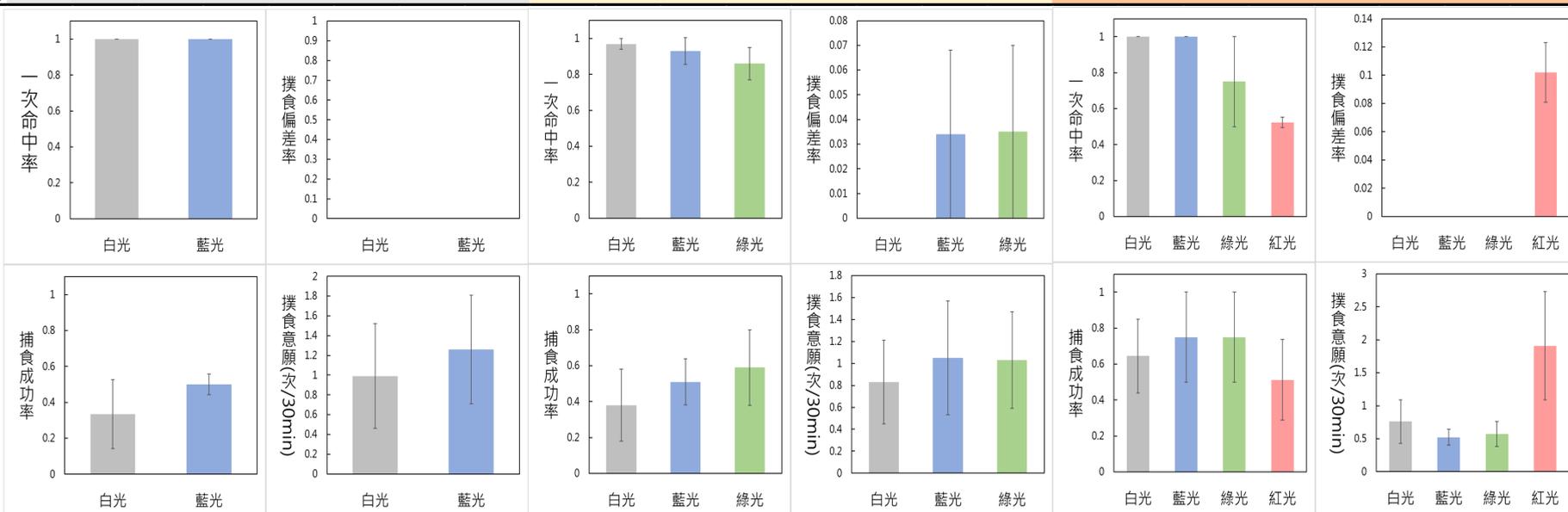


四、長時間純紅光下的撲食行為實驗：將三種蠅虎置於純紅光（紅光10小時/黑暗14小時）環境下14天，每種蠅虎共三隻，每日進行一次撲食行為實驗（步驟與前述相同），記錄一次命中率與捕食成功率。

伍、實驗結果

一、三種蠅虎在不同色光下的撲食結果

色光	安德遜蠅虎(<i>Hasarius adansoni</i>) N=5				眼鏡黑條蠅虎(<i>Phintella versicolor</i>) N=5				拉邁宇跳蛛(<i>Cosmophasis lami</i>) N=5			
	白光	藍光	綠光	紅光	白光	藍光	綠光	紅光	白光	藍光	綠光	紅光
一次命中率 (Mean ± SEM)	1 ± 0	1 ± 0	X	X	0.97 ± 0.029	0.93 ± 0.074	0.86 ± 0.09	X	1 ± 0	1 ± 0	0.75 ± 0.25	0.524 ± 0.029
撲食偏差率 (Mean ± SEM)	0 ± 0	0 ± 0	X	X	0 ± 0	0.034 ± 0.034	0.035 ± 0.035	X	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0.102 ± 0.021
捕食成功率 (Mean ± SEM)	0.333 ± 0.192	0.5 ± 0.058	X	X	0.38 ± 0.20	0.51 ± 0.129	0.59 ± 0.21	X	0.645 ± 0.206	0.75 ± 0.25	0.75 ± 0.25	0.512 ± 0.244



上為安德遜蠅虎 (n=5) 在白光和藍光下的一次命中率、撲食偏差率、捕食成功率的結果 (Mean ± SEM)。

- 一次命中率：白=藍
- 撲食偏差率：白=藍
- 捕食成功率：白<藍

上為眼鏡黑條蠅虎 (n=5) 在白、藍和綠光下的一次命中率、撲食偏差率及捕食成功率的結果 (Mean ± SEM)。

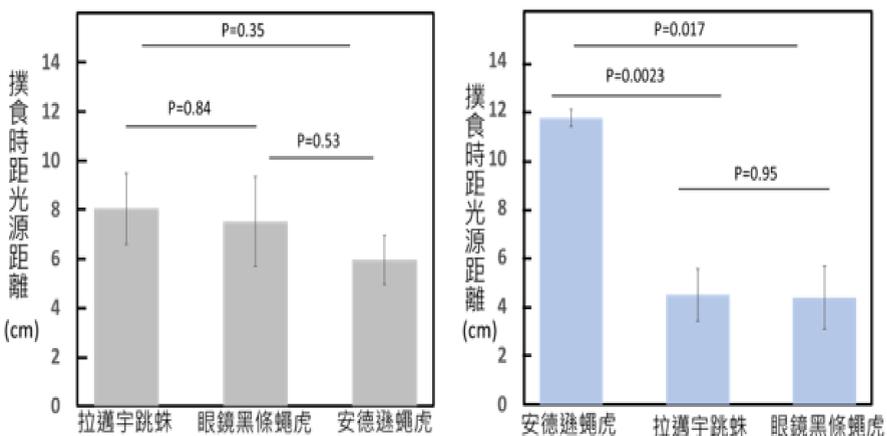
- 一次命中率：白=藍>綠 (差異不大)
- 撲食偏差率：白<藍=綠
- 捕食成功率：白<藍<綠

上為拉邁宇跳蛛 (n=5) 在四種色光之下的一次命中率、撲食偏差率及捕食成功率的結果 (Mean ± SEM)。

- 一次命中率：白=藍>綠>紅
- 撲食偏差率：白=藍=綠<紅
- 捕食成功率：綠=藍>白>紅

二、撲食時與光源距離 (cm)

色光	白光	藍光
安德遜蠅虎	6.56 ± 1.76	11.63 ± 1.39
眼鏡黑條蠅虎	4.51 ± 1.59	5.66 ± 0.69
拉邁宇跳蛛	8.23 ± 1.48	4.66 ± 1.21

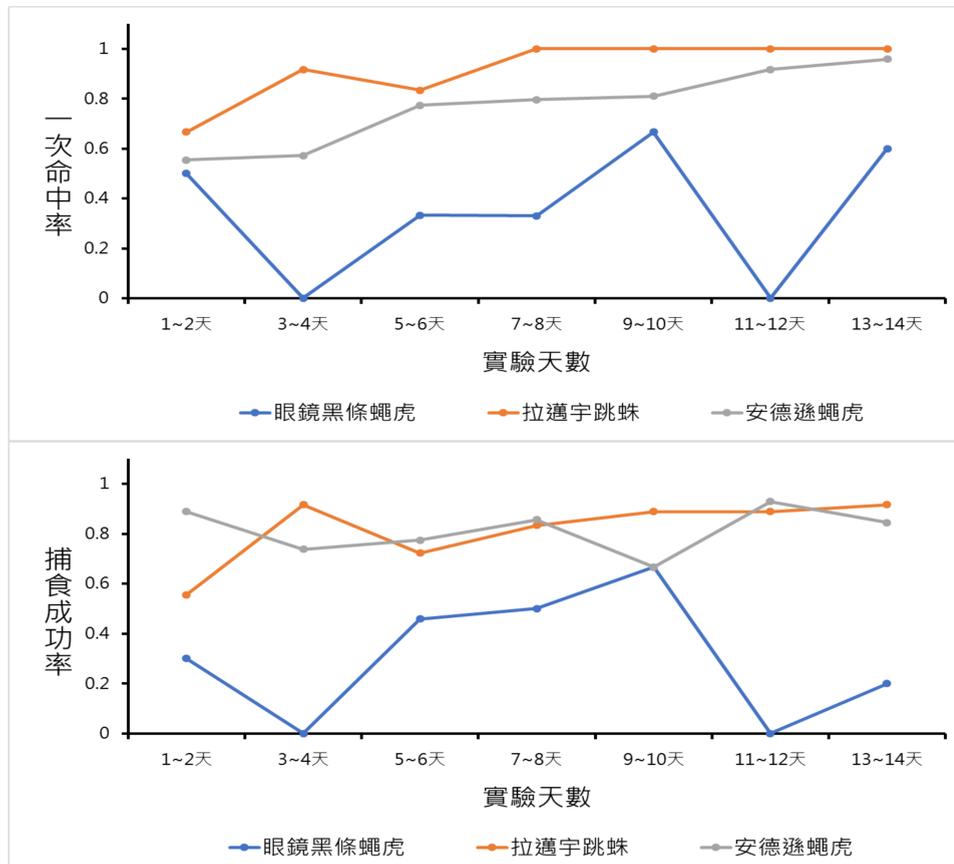


三種跳蛛在白、藍光下進行撲食時與光源的距離 (cm) 統計結果 (Mean ± SEM)。

白光下，距離光源遠到近依序為拉邁宇跳蛛 > 眼鏡黑條蠅虎 > 安德遜蠅虎，但其實三者無顯著差異。

藍光下，安德遜蠅虎進行撲食時距離光源最遠，且顯著遠於另外兩種蠅虎。

三、長時間純紅光下的撲食行為實驗



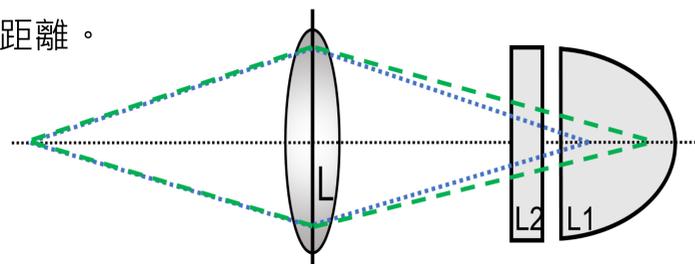
當處在純紅光環境下連續數天後，安德遜蠅虎和拉邁宇跳蛛的撲食精確度都有明顯進步，而眼鏡黑條蠅虎則無改善跡象。

陸、討論

一、蠅虎最適合進行瞄準撲食的色光？

(一) 是藍光嗎？

1. 發現三種蠅虎在藍光下撲食都非常準確，這代表蠅虎的視網膜構造是適合藍光。
2. Nagata於2012的研究文獻中提到安德遜蠅虎藍光聚焦在L2而非L1，所以應不能使用藍光進行瞄準撲食這件事還有待更進一步的探討，根據我們的研究，猜測藍、綠光可能都可以聚焦在較厚的L1上並用L2計算距離。



(二) 是綠光嗎？

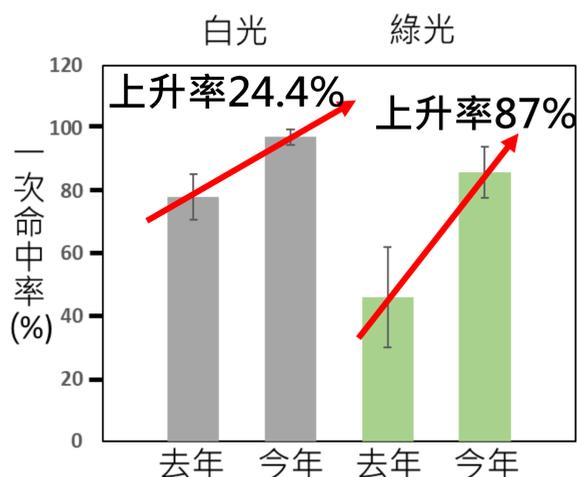
1. 安德遜蠅虎在藍光以及綠光下表現相當，都很準。
2. 拉邁宇跳蛛在綠光下撲食準確但撲食意願不高。
3. 眼鏡黑條蠅虎中卻有一兩隻在綠光下撲不準的個體，導致綠光平均降低。

去年	命中率	偏差率	今年	偏差率	命中率
1號	0.222	0.101519	1號	0	1
2號	0.0909	0.075791	2號	0.173936	0.545454
3號	1	0	3號	0	1
4號	0.375	0.067555	4號	0	0.75
5號	0.6	0.052558	5號	0	1

二、獵物種類是否影響結果？

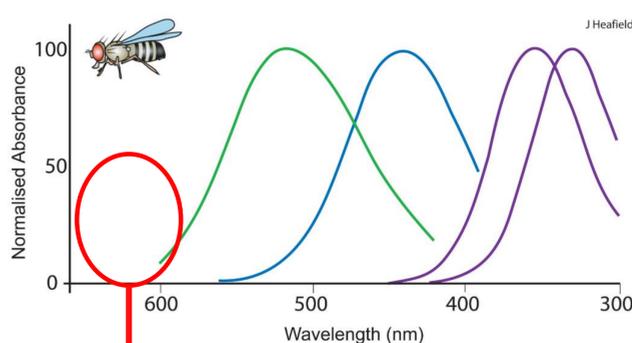
(一) 獵物的顏色會影響嗎？

今年眼鏡黑條蠅虎在白光和綠光下命中率皆有提升，但綠光提升的幅度更大。因此我們認為綠色的獵物可能會影響蠅虎在綠光下的撲食行為。



(二) 獵物的行為會影響嗎？

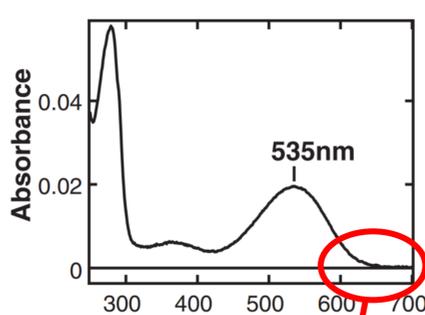
1. 我們發現一次命中率和捕食成功率並沒有正向關聯性。
2. 蠅虎捕食成功率高低可能和獵物的活動有很大關係，若獵物在某種色光下活動力低，那麼就相對會更好捕食。
3. 我們觀察到果蠅在紅光活動力較低，果蠅缺乏紅光感光細胞，在紅光下果蠅如同置身黑暗，可能使蠅虎在紅光下容易撲食果蠅。



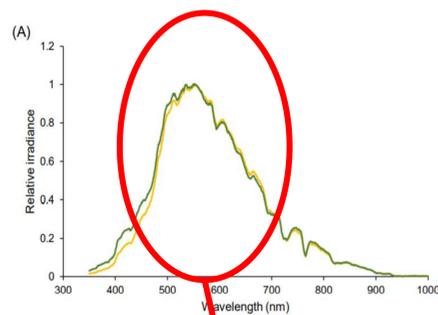
我們使用的紅光峰值波長為630nm，而果蠅不具備對此波長敏感的感光細胞。(參考文獻七)

三、蠅虎真的不適合在紅光下撲食嗎？

1. 從連續紅光的實驗中我們得知，安德遜蠅虎和拉邁宇跳蛛還是能夠使用紅光來進行瞄準和撲食。
2. 但為什麼牠們的視覺系統演化成了較習慣使用綠光來進行瞄準呢？我們猜想可能原因是，在自然光源中綠光的比例較高，且果蠅等許多日行性昆蟲並不會出現在紅光比例較高的環境，因此蠅虎的視覺演化過程中，對紅光敏感的細胞就漸漸地消失了。



安德遜蠅虎對紅光的感光較不靈敏。(參考文獻一)



陽光中綠光比例最高，在灌木叢中也是。(參考文獻六)

柒、結論

- 一. 眼鏡黑條蠅虎和拉邁宇跳蛛在純綠光環境中表現比白、藍光略差，而三種蠅虎在純藍光環境的表現都與白光環境差異不大，我們認為藍光和綠光其實都是適合大部分蠅虎進行撲食瞄準的色光。
- 二. 獵物本身的顏色和視覺能力，對於蠅虎撲食的研究有很大的影響，未來進行相關研究時須審慎考慮獵物種類以及增加對獵物行為的了解。
- 三. 並非所有蠅虎的視覺構造都不適合紅光，可能因為自然環境光的比例或是獵物喜好出現的環境等因素導致牠們在演化上漸漸地不再習慣使用紅光，但不代表蠅虎無法利用紅光進行瞄準撲食。

捌、參考文獻

- 一、Nagata, T., Koyanagi, M., Tsukamoto, H., Saeki, S., Isono, K., Shichida, Y., Tokunaga, F., Kinoshita, M., Arikawa, K. and Terakita, A. (2012). Depth perception from image defocus in a jumping spider. *Science* (2012)335, 469-71.
- 二、「虎」光三色—不同色光環境對蠅虎撲食準確度之探討 (中華民國第59屆中小學科學展覽會)
- 三、跳跳虎跳不準—蠅虎的三維跳躍精準度 (中華民國第56屆中小學科學展覽會)
- 四、虛擬實境~安德遜蠅虎撲食模式 (中華民國第55屆中小學科學展覽會)
- 五、活躍於光明的闇獵人——安德遜蠅虎 (中華民國第44屆中小學科學展覽會國中組)
- 六、跳蛛眼角膜奈米結構之生物光學研究 (游家豪成大碩論2017)
- 七、droso4schools: Online resources for school lessons using the fruit fly *Drosophila*.