

2014 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 050008

參展科別 動物學

作品名稱 美洲蟑螂可分泌警告物質的證實與相關研究

得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 臺北市立中山女子高級中學

指導教師 蔡任團

作者姓名 毛靖雯、姚乃筠

關鍵字 蟑螂、警告物質、軟便

作者簡介



作者：毛靖雯

參加北市科展、中等教育科學獎助計畫、旺宏科技獎、IBM 創意團體獎、新加坡國際科展等比賽除了是我的興趣，也可以磨練我對研究科學的能力，並學習如何在課業與科展之間平衡運用時間，這其中來自於父母師長的很大鼓勵與支持，故能在上學期成為優良生代表。在數資班的數理風潮下，我擔任了數學研究社社長一職，期許在未來辦一系列的演講與討論會，滿足社員對數學知識的期待。在平時學業時間以外，參與羽球隊來鍛鍊身體，和讀小說做為休閒活動。很高興能參加這次的國際科展比賽，希望未來我們的研究在動物行為領域裡能有一點貢獻！目前科學界對於美洲蟑螂是否可分泌警告費洛蒙都還是未知的，本研究證實美洲蟑螂可分泌警告物質藉以驅離同種個體，達到保護群體不接近危險區域的目的。較古老的蟑螂已發現警告物質存在於第二節腹部的囊形袋中，但經漫長歷史的演變，此部位已經消失，在腹部上找不到囊形的器官，因此本研究從分泌物找尋警告物質，並加入種間作用的討論，未來仍會探究分泌此物體的器官和萃取此分泌物。

My name is Vivian Mao. I have been intrigued with scientific research for as long as I can remember. Ever since the first time I entered in a science challenge, I have dealt with adversity, dedicated my best efforts to achieve greater results, and learned how to allocate my time wisely. My participation in this challenge is motivated by my desire to experience the overseas exchange program, absorb valuable knowledge from others like me and broaden my horizons. It is my hope that our research and findings will be able to contribute to our world in the very near future.

作者：姚乃筠



能夠在準備國際科展複審資料時提筆寫下我人生中第二篇自傳，實在是我莫大的榮幸。從小動手觀察動物的各種特徵，奠定了我對探索動物行為的興趣，我曾赤手碰觸泥鰍、蟋蟀、蝴蝶、螢火蟲等這些小動物，目的是為了親手驗證流言的真實性。很幸運地，一年半前，能如願加入中山女高數理資優班，並在一得知本校有一位研究蟑螂十年的專家

後，我便毫不猶豫選擇了生物組，因為我相信我也能透過人們眼中的「害蟲——蟑螂」，探索多采多姿的科學世界！

如今，已經過了一年半的歲月，我與我可靠的隊友面臨數不清的難關，原本的我們：不敢自己抓蟑螂、不會用 tracker 影片分析、看不懂英文文獻、不會打說明書、上台發表時結結巴巴……，不過我們一點也不願退卻，反而更努力想挑戰自己的極限，經過校內科展、北市科展、中等獎助、旺宏、青少年培育、Singapore International Science Challenge in NJC 這些科展比賽的磨練，我們終於一一克服了困難，除此之外我們也體悟到參加比賽的目的絕對不是為了要拿到獎項，而是在曲折的路程中找到自己對生物源源不絕的熱忱。回首一看，真的很感謝一路陪伴我的隊友以及指引我方向的老師，一路走來雖然幾度走得搖搖晃晃，終於我們走到最精彩的一站——國際科展，期盼它能為我們的努力付出獲得圓滿的回應。

It's my honor to be here to write down the second autobiography in my life. One and a half year ago, I was fortunately admitted to mathematical gifted class, which was the beginning of the friendship between "cockroaches" and me.

Many games I played as a child such as catching loach, flooding cricket, capturing butterflies and chasing fireflies not only enrich my childhood but also insure my passion

for animals and insects. Therefore, upon learning there is a teacher who researches in cockroaches for years, I gave biological group a first choice without hesitation.

Since then, my teammate and I have encountered countless difficulties--afraid of catching cockroaches by ourselves, unable to read English reference, too nervous to speak on the stage....So tough as the difficulties were, we still managed to challenge ourselves, participating in several science contests. All in all, we realized that process is more meaningful than results. It was our passion for biology that helped us overcome all the adversities. Hopefully, our research can also benefit the whole world in the near future.

美洲蟑螂可分泌警告訊息的證實與相關研究

中文摘要

社會性昆蟲已被證實可產生警告物質(disperation-inducing or alarm substances)，對同種其他個體具有警告、驅離的效果。本研究發現美洲蟑螂(*Periplaneta americana*)雖不屬於真社會性昆蟲，但也可分泌類似作用的警告物質，同時也證明此物質存在於軟便與唾液中，其中以軟便的驅散效果較強，且不同性別間皆具有驅離作用，跨物種間(對蟋蟀)也有作用。若去除反應者的觸角後，警告物質的驅離效果降低，並延長了反應潛伏期，證明觸角是此警告物質的接受器官。我們也利用沾附酒精的濾紙吸附蟑螂所產生的警告物質，也有相同的驅散效果。利用後腿基節屈肌的肌肉電位圖(electromyography, EMG)記錄蟲體對此物質的反應電位，亦顯示受到警告物質的影響，可使步足肌肉放電頻率增加。

The characters of American cockroach's alarm substances

英文摘要(Abstract)

Social insects have been shown to generate and secrete alarm pheromones, which induce dispersing of other intraspecific individuals, during emergencies. Our study found that the Americana cockroach (*Periplaneta Americana*) is not even eusocial insects, but also secrete alarm substances, displayed intraspecific and interspecific effects, affect regardless of the gender of releaser or responder. The effect of disperation-inducing is reduced or disappeared after the responder's antenna removed, that proved that antenna are the receptor of alarm substances. It is shown also that the extract from injured cockroach also has disperation-inducing effect.

壹、前言

動物可分泌許多種類的費洛蒙，包含性費洛蒙，例如：山羊可分泌性費洛蒙吸引異性；多種社會性昆蟲可分泌追蹤費洛蒙，例如：螞蟻的追蹤費洛蒙可引導其他個體的行進路徑；蟑螂可分泌聚集費洛蒙吸引蟑螂族群聚集；黃蜂可分泌警告費洛蒙，引發其他個體逃亡或攻擊，其中「警告費洛蒙(alarm pheromone)」引發了我們的好奇。Nakayama 等人(1987)及 Rollo 等人(1995)曾提到美洲蟑螂腹部可分泌某種物質，將同種蟑螂由遮蔽物下驅散，且無論何種性別或年齡皆有效果，但 Capinera(2008)卻指出其所研究方法是死的蟲體進行物質的粹取，活的蟲體是否會分泌警告費洛蒙目前仍無定論。我們參考了許多相關文獻來解答我們的疑惑，包括 Brossut(1983)、Takahashi and Kitamura (1972)，前者發現七星蟑螂在受攻擊時可分泌防禦性分泌物，而後者的實驗設計與量化方法過於主觀，其結論不足為信，因此我們想更進一步深入解決此一主題。

科學家發現社會性昆蟲可分泌警告費洛蒙，例如蜂(*Vespula squamosa*, Landolt, *et al.*, 1999)、蟻(Regnier, 1968)。其他非社會性昆蟲的相關研究較少，蜚蠊目(Order Blattaria)中，目前已發現一種原始的蟑螂—七星蟑螂(seven-spotted cockroach, *Therea petiveriana*)在受到干擾時會舉起翅膀，同時其腹部第 2、3 節間的囊袋可分泌警告性的物質(Erienne, *et al.*, 2002)，該物質可驅離同種個體，德國蟑螂(*Blattella Germanica*)的唾腺中亦發現有警告物質(Faulde, *et al.*, 1990)。七星蟑螂屬地蠶蠊科(Polyphagidae)，德國蟑螂屬姬蜚蠊科(Blattellidae)，其形態(如圖一)、親緣關係皆與生活中常見的美洲蟑螂(*Periplaneta americana*，屬蜚蠊科, Blattidae)差距甚遠，我們好奇：日常生物中常見的美洲蟑螂具有聚集的行為，雖不屬於真社會性昆蟲，但也表現許多社會性的行為(胡琬穠與蔡任圃，2011)，是否也具有類似警告費洛蒙的物質？此警告物質的作用與性別有關嗎？它的接受器官為何呢？此物質是否可

應用於蟑螂的防制呢？為了解決心中的疑惑，於是設計了本研究，期望能解出這些謎團。



圖一 左圖：七星蟑螂(*Therea petiveriana*)(引用自維基百科)；
右圖：德國蟑螂(*Blattella Germanica*)(引用自維基百科)。

本研究之目的如下：

一、驗證美洲蟑螂是否具有警告物質

- (一)、建立警告物質影響蟑螂個體、觸角行為與步足肌肉電位的觀察模式，
驗證美洲蟑螂是否可分泌警告物質

二、探討警告物質的作用性質

- (一)、探討警告物質的分泌與作用是否具有習慣性質
- (二)、探討性別在警告物質作用過程中的角色

三、研究警告物質的接收器官

- (一)、驗證觸角是否為警告物質的偵測器官

四、檢驗警告物質的跨物種作用特性

五、探討警告物質可能的分泌位置

六、討論警告物質於蟑螂防制的相關應用

貳、 研究方法或過程

一、研究器材與設備(表一)

表一 實驗裝置與器材

| 編號 | 名稱 | 型號及規格 | 備註 |
|----|----------------|---------------------------------|------------|
| 1 | 電磁爐 | 1400w，型號 HR1330 | 尚朋堂 |
| 2 | 照相機 | SonyHDR-XR500 高階畫質彩 | SONY |
| 3 | 二氧化碳鋼瓶 | | 麻醉 |
| 4 | 溫度快速感應、 記錄器 | PASCO PS2143 USB LinkPS2100A | |
| 5 | 置物籃 | 具有網格 | 以利傳送警告物質 |
| 6 | 大培養皿 | 直徑 18.7 公分，高 2.5 公分 | 玻璃製 |
| 7 | 中培養皿 | 直徑 9 公分 | 玻璃製 |
| 8 | 小培養皿 | 直徑 6 公分 | 玻璃製 |
| 9 | 紙捲 | 直徑 8 公分，高 9.5 公分 | 使物質傳遞不四逸 |
| 10 | 檯燈 | 60w | 使蟲體聚集 |
| 11 | 紅色玻璃紙 | 圓形，直徑 6 公分 | |
| 12 | 冰水一盆 | | |
| 13 | 紗網 | 鐵製 | 避免加熱時遇高溫熔化 |
| 14 | 鋁箔紙 | | 妙潔 |
| 15 | 酒精 | 95% | |
| 16 | 濾紙 | 直徑 9 公分 | |

二、實驗動物

美洲蟑螂(Americana cockroach, 學名: *Periplaneta americana*)飼養於室內昆蟲箱, 為本校人工飼養繁殖。飼養之環境溫度約為 25~28°C, 定期換水、提供充足飼料(玉米、大麥磨成粉配製)。實驗的進行以色澤明亮, 身體外表無破損之成蟲作為實驗動物, 且實驗過的動物不再進行實驗, 每隻成蟲體長約 3-4 公分。本研究為了觀察蟑螂觸角擺動狀態與蟲體位置的變化, 皆先進行蟲體麻醉以利操作, 麻醉後靜置一個小時, 等待其回復到正常狀態後, 才進行實驗。

三、研究方法

(一)、建立警告物質對蟑螂行為作用的觀察模式

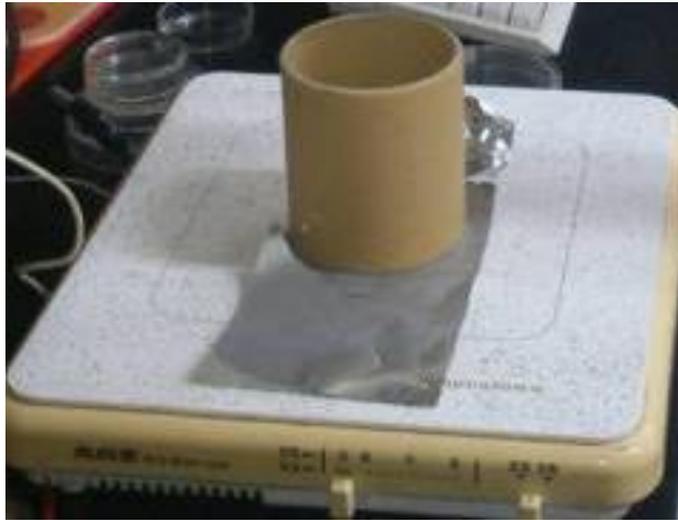
1. 紀錄活體分泌之警告物質對其他個體的驅散效應

用鐵紗網蓋住小培養皿內含一隻雄蟲(受刺激者), 下方平鋪鋁箔紙, 以紙筒罩住小培養皿(如圖二), 大培養皿(直徑 18.7 公分)覆蓋於倒置之置物籃(底板具網格)上, 內裝四隻雄蟲(反應者, 如圖三), 大培養皿上覆蓋圓型之紅色玻璃紙(直徑 6 公分), 此裝置上方以檯燈由上而下進行照明(如圖四), 誘使蟑螂個體停棲於紅色玻璃紙下, 此時打開電磁爐開關至最大以加熱並持續五秒, 利用「熱」刺激小培養皿內的受刺激者, 同時觀察、紀錄大培養皿內之待反應者的移動情形, 每次實驗後, 皆以冷水冷卻實驗器材。本研究以人工熱刺激方式迫使受刺激者釋放警告物質, 觀察四隻反應者接收到警告物質前、中、後之行為模式, 藉此證明此物質是否有驅離及警告的作用。

以錄影機由上向下垂直拍攝受刺激者接受熱刺激前、中各五秒、及刺激結束後 30 內, 反應者的行為影片。影片以 Tracker-4.71 軟體(屬自由軟體, 下載網址: <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>)分析各反應者於不同時間時的頭部、尾部座標, 並以受刺激者的頭部座標為圓心, 計算四隻反應者的運動路徑與離心速度(正

值為離心方向，負值為向心方向，單位為體長/秒)，以及反應潛伏期(latency，由開始熱刺激至反應者開始移動之時間差，單位為秒)。

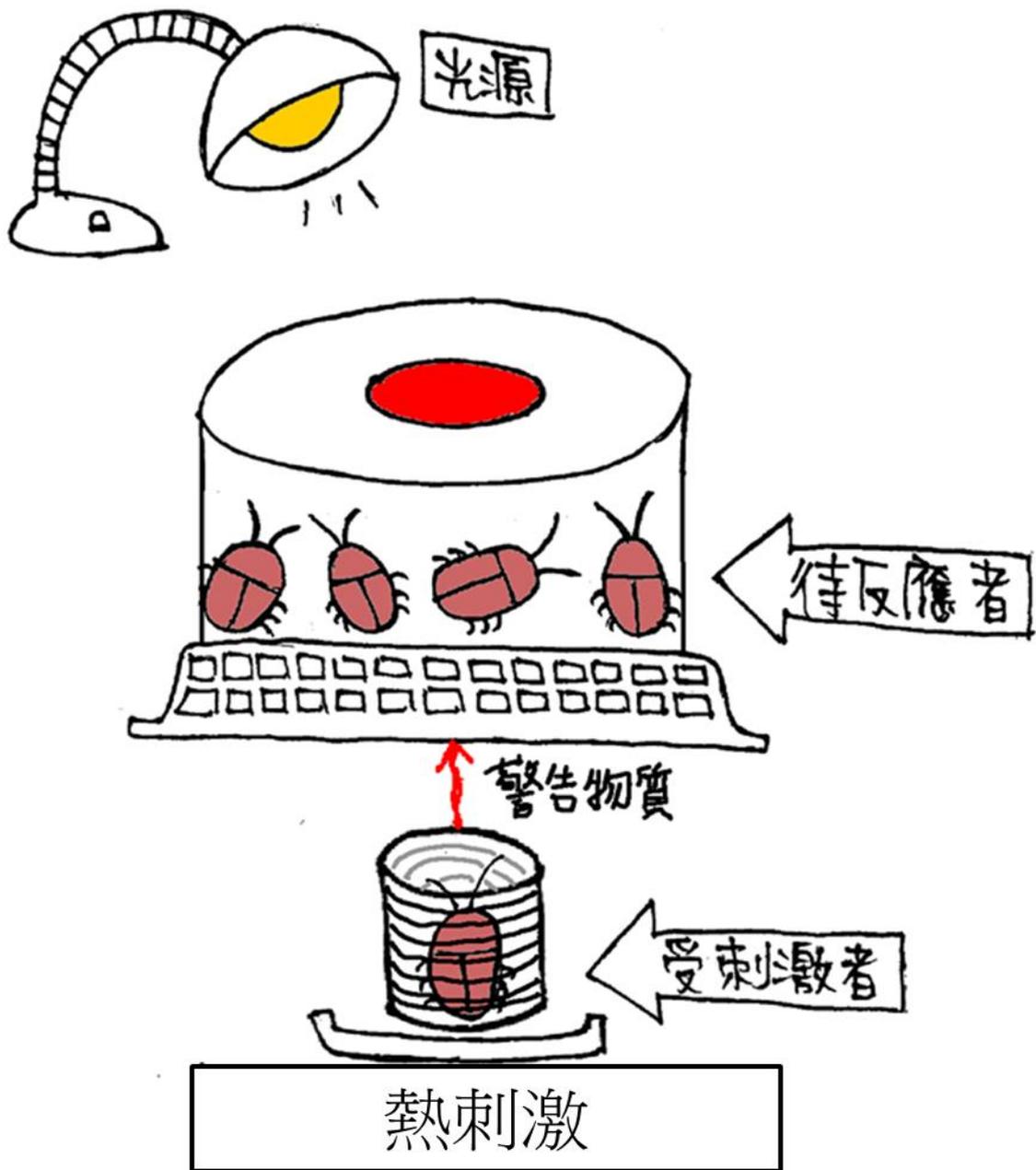
為了排除反應者可能受到熱氣或煙霧等因子的影響，我們記錄、分析在小培養皿中無受刺激個體時，反應者在熱刺激前、中、後的行為反應，作為本實驗之對照組。我們也利用溫度快速感應記錄器測量了實驗過程中小培養皿內的溫度變化，以瞭解實驗過程中，受刺激者接受熱刺激的程度，溫度變化請見圖十二。



圖二 用紙筒覆蓋受刺激者(紙筒約高 9.5cm)，下方鋪墊鋁箔紙，鋁箔紙下方為電磁爐之裝置照片。



圖三 反應者置於大培養皿中的裝置照片，紅色玻璃紙約直徑 6cm。



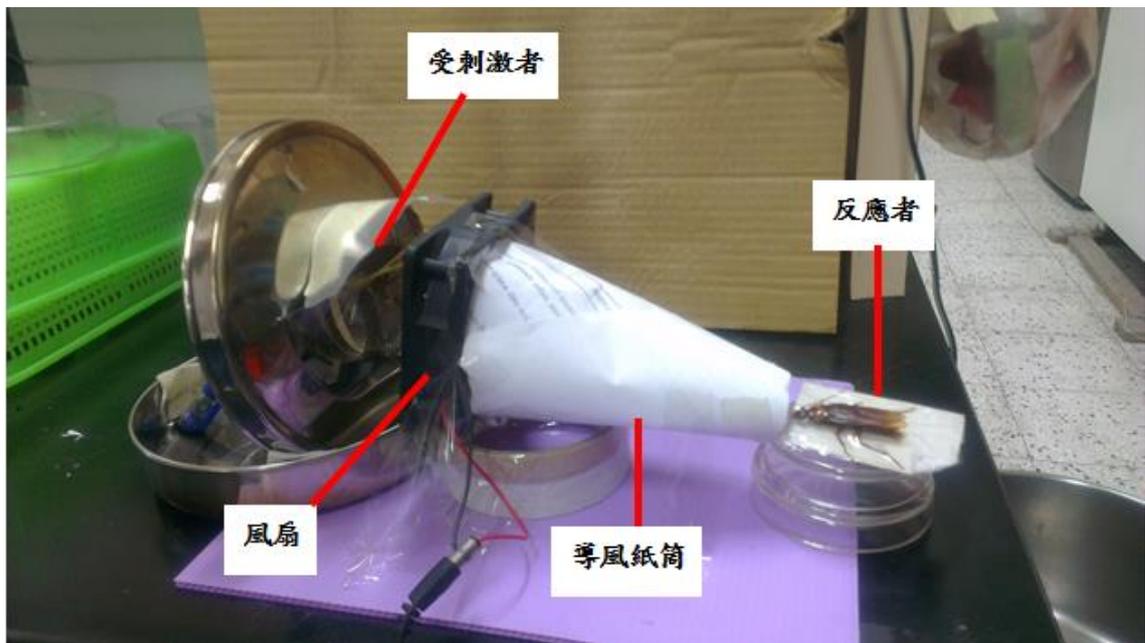
圖四 「建立警告物質對蟑螂行為作用的觀察模式」實驗之裝置圖。

2. 紀錄活體分泌之警告物質對其他個體觸角運動的效應

觀察反應者觸角反應的實驗裝置如圖五。以熱水流過「受刺激者」，引發受刺激者產生警告物質，經由風扇、導風紙筒輸送並作用於反應者，同時觀察、紀錄反應者觸角擺動角度的變化(度)以及擺動速率(度/秒)。擺動角度以觸角與體軸的夾

角作為參數進行比較。實驗中，為避免氣流干擾反應，全程啟動風扇，將此設為控制變因。

為了排除反應者可能受到熱氣或水氣等因子的影響，我們記錄、分析在小培養皿中無受刺激個體時，反應者在熱刺激前、中、後的行為反應，作為本實驗之對照組。我們也利用溫度快速感應記錄器測量了實驗過程中小培養皿內的溫度變化，以瞭解實驗過程中，受刺激者接受熱刺激的程度，溫度變化請見圖十三。



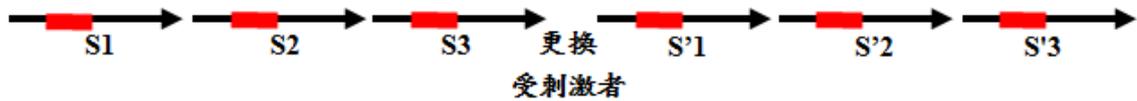
圖五 以 100°C 熱水由上而下流經受刺激者周圍，引發受刺激者產生警告物質，經由風扇、導風紙筒輸送而作用於反應者之裝置圖。

3. 由活體收集之警告物質的作用活性

於中型培養皿(直徑 9 公分)內平鋪濾紙(直徑 9 公分)，沾附適量 95% 酒精(約三滴)，將一隻雄蟲置入，將此培養皿外倒入熱水進行刺激，約五秒後取出濾紙，迅速放置於圖四裝置中的受刺激者位置(取代受刺激者)，同時記錄反應者的行為反應，實驗流程如「1. 紀錄蟲體位置變化」。對照組為將沾附 95% 酒精(約三滴)的濾紙(未接觸任何蟲體)，迅速放置於圖四裝置中，同時記錄反應者的行為反應。

(二)、對警告物質之習慣性質的探討

從實驗經驗中發現，第二次的反應多弱於第一次，我們認為有以下兩種可能：一是待反應者已產生習慣性，二則為受刺激者的警告物質已消耗殆盡。為了驗證何者為真，我們設計以下實驗流程：裝置如圖四，實驗流程如「(一)、1. 紀錄蟲體位置變化」，即給予受刺激者熱刺激 5 秒，紀錄反應者於熱刺激前、後各 5 秒與刺激結束後 30 秒內的行為反應，但重複上述流程三次，每次間隔 3 分鐘，皆待反應者螂回到紅色玻璃紙下，再進行下一輪實驗(S1、S2、S3，S 代表刺激)；然後改變受刺激者，並重複上述實驗步驟三次，(表示為 S'1、S'2、S'3)(如圖六)。



圖六 「習慣或疲勞性質的探討行為」的實驗流程。紅色粗線代表熱刺激期間。

(三)、性別在警告物質作用中的角色

實驗裝置如圖四，以「受刺激者/反應者」的組合為雄/雄、雄/雌、雌/雄、雌/雌進行實驗，實驗流程如「(一)、1. 紀錄蟲體位置變化」。

(四)、測試觸角是否為警告物質的偵測器官

實驗裝置如圖四，以「受刺激者/反應者」為雄/雄、雄/雌、雌/雄、雌/雌的組合進行實驗，實驗流程如「(一)、1. 紀錄蟲體位置變化」，但將待反應者的觸角完全剪除，並經三天適應、恢復後，再進行實驗記錄，實驗數據以未剪觸角時的行為表現作為對照組，以測試觸角在接受警告訊息的過程中，是否扮演重要角色。

(五)、後腿基節屈肌的電位變化

插入電擊後，以沾有警告訊息的濾紙作為刺激，記錄下電位變化，與自然情況下的電位變化相比。

(六)、異種間警告物質的作用效應

實驗裝置如圖四，其中「受刺激者/反應者」為蟑螂/蟋蟀(♀)、蟋蟀(♀)/蟋蟀(♀)的組合進行實驗，實驗流程如「(一)、1. 紀錄蟲體位置變化」，由於蟋蟀並無明顯的負趨光性，因此決定將上方圓盤縮小至直徑十公分的培養皿，確保其活動範圍皆在能接收警告物質的區域。

(七)、警告物質可能的分泌位置

實驗裝置如圖四，其中以沾附受侵犯蟲體之軟便或唾液的濾紙(圖七)作為刺激物，其來自超過 10 隻因受刺激(由鑷子夾起)而自行分泌之唾液及肛門排出之軟便(泥狀的糞便)。待反應者為雄性美洲蟑螂。實驗流程如「(一)、1. 紀錄蟲體位置變化」，由於 Faulde 等人(1990)證明德國蟑螂的警告物質可能為高接觸性物質(contact pheromone)，指出必須在很近的距離內才有作用的效果，因此濾紙距離反應者的垂直距離為一公分內。



圖七 沾附受侵犯蟲體之軟便或唾液的濾紙。左方沾附軟便，右方沾附唾液。

參、 研究結果與討論

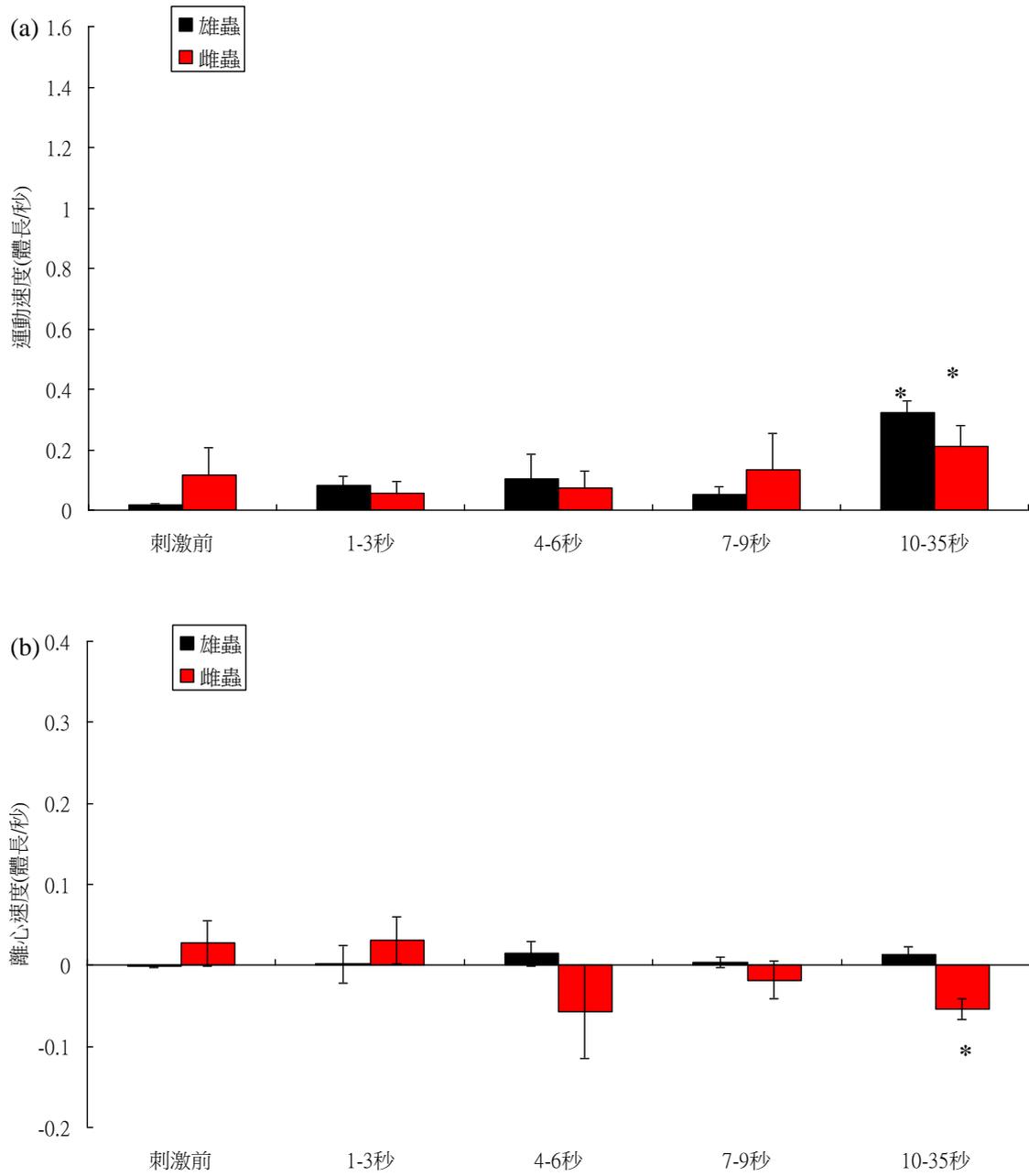
一、研究結果

(一)、 驗證警告物質對蟑螂行為的作用

1. 紀錄活體分泌之警告物質對其他個體的驅散效應

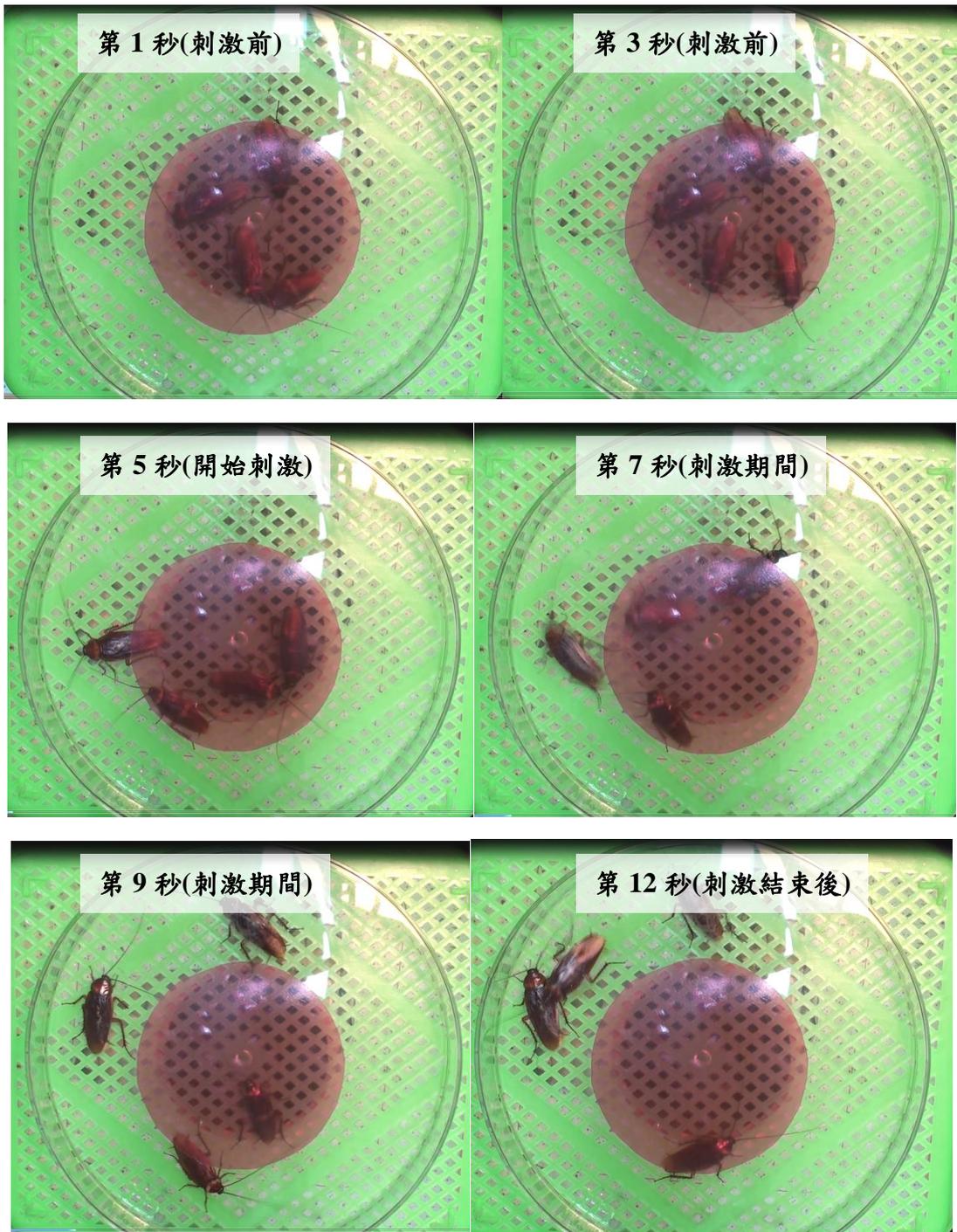
在無受刺激者的情形下，進行加熱對反應者的移動速度(圖八 a)與離心速度(圖八 b)沒有影響，代表加熱器(電磁爐)產生的磁場變化並不干擾本實驗的紀錄、分析。

在受刺激者與反應者皆為雄蟲的情形下，測量、計算接受刺激前、後，反應者的運動座標變化，可發現反應者具有明顯的驅離反應(圖九、圖十)。相對於刺激前的活動力低，刺激後行動較為明顯，瞬時離心速度在刺激的五秒期間波動達到最大(如圖十一)，離心速度在接收熱刺激期間有加速的情形(如圖十二)，代表受刺激個體所發出的費洛蒙確實可引發其他個體的驅離行為，且其反應潛伏期為 3.71 ± 0.61 (平均 \pm 標準誤， $n = 20$)，故後續之數據分析，將比較刺激開始 1-3 秒與 4-6 秒期間的行為表現。

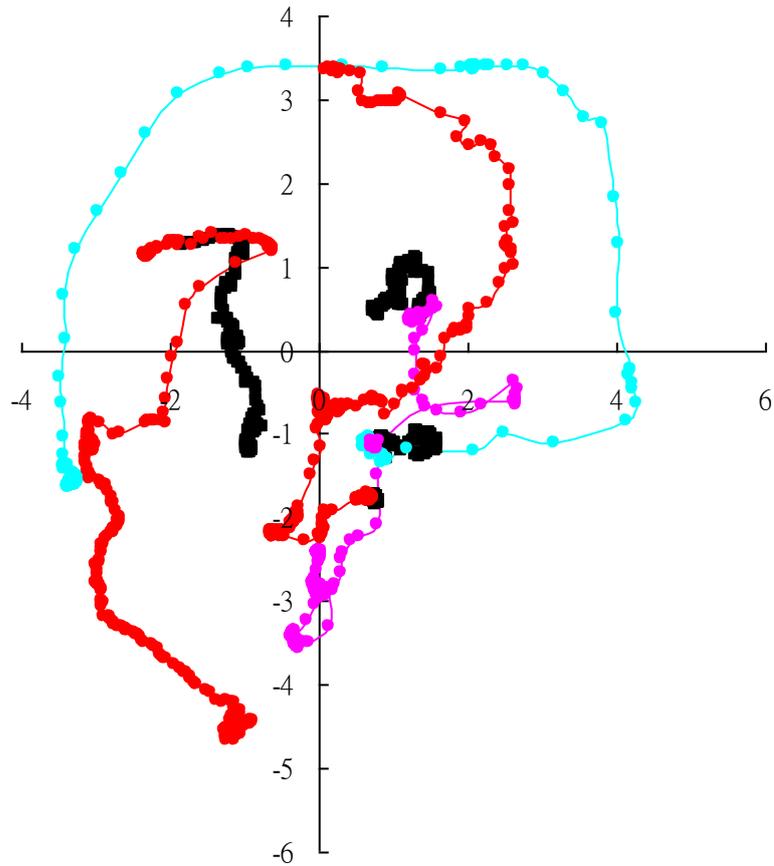


圖八 加熱器加熱對受試個體對移動速度(a)與離心速度(b)的影響(平均 ± 標準誤， $n = 4$)。

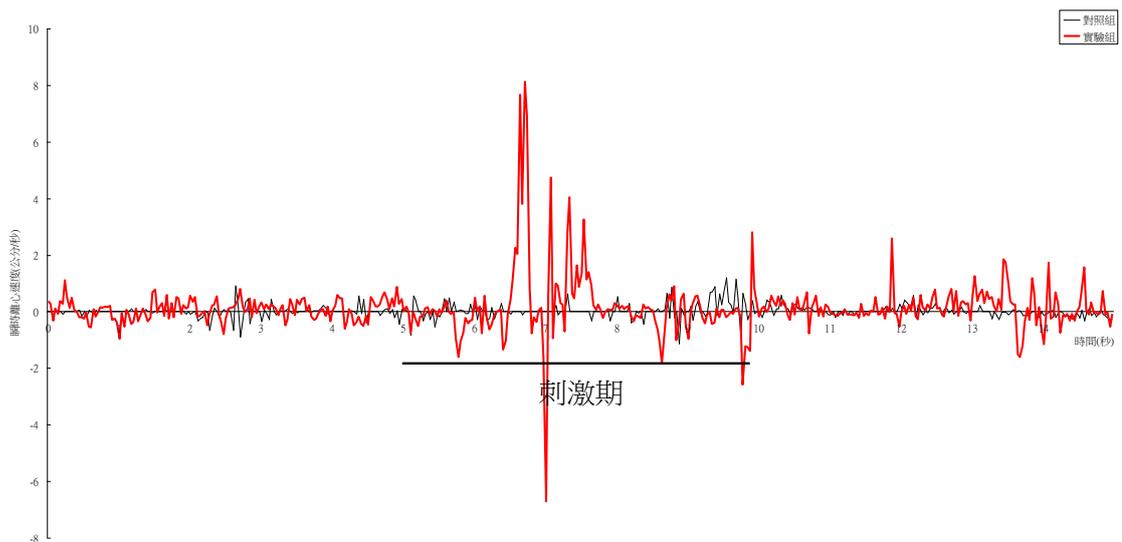
*：與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。



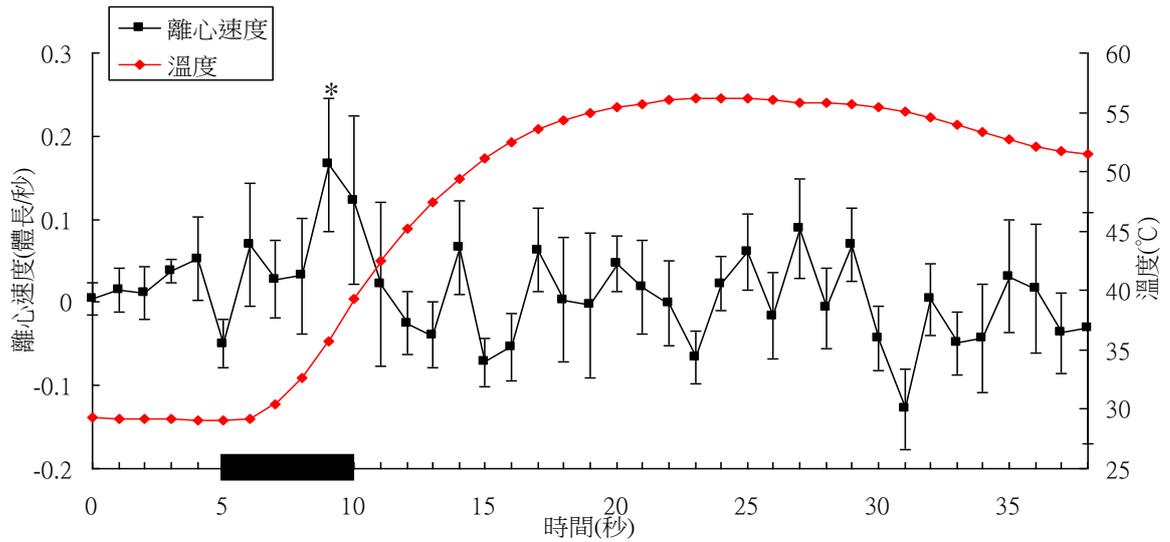
圖九 反應者在接收警告訊息後，產生驅離行為(受刺激者與反應者皆為雄蟲)。



圖十 四隻反應者於受刺激者接受熱刺激前(黑色)與後(其他顏色)的運動路徑。每個圓點之間相隔 1/30 秒。



圖十一 反應者於受刺激者接受熱刺激前、中、後的平均瞬時離心速度變化(n=4)。圖中黑橫線為受刺激者接受熱刺激期間。

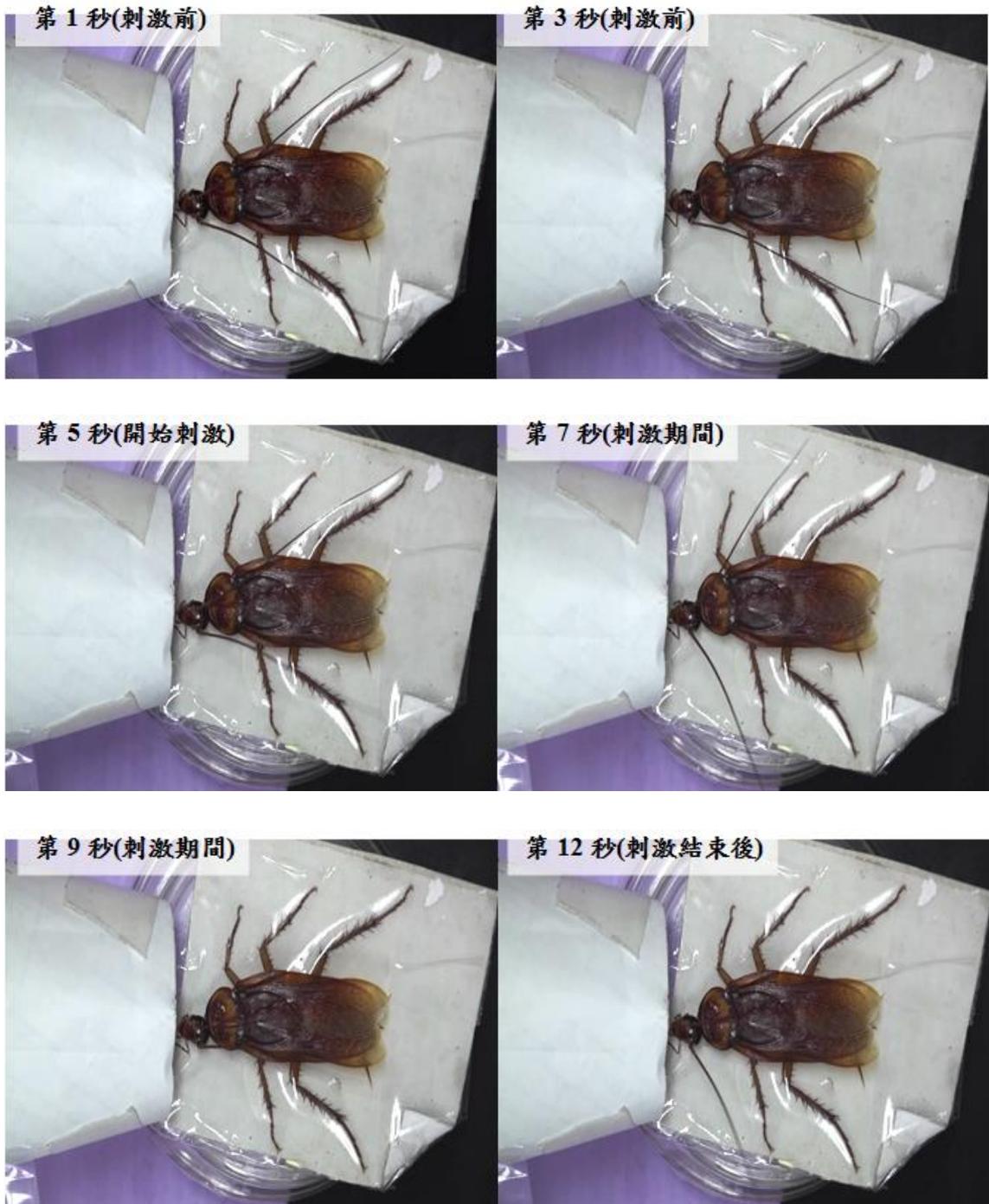


圖十二 加熱刺激過程之溫度變化與雄性個體分泌警告物質對其他雄性個體離心速度的影響 (n = 20)。X 軸之粗線為熱刺激期間。

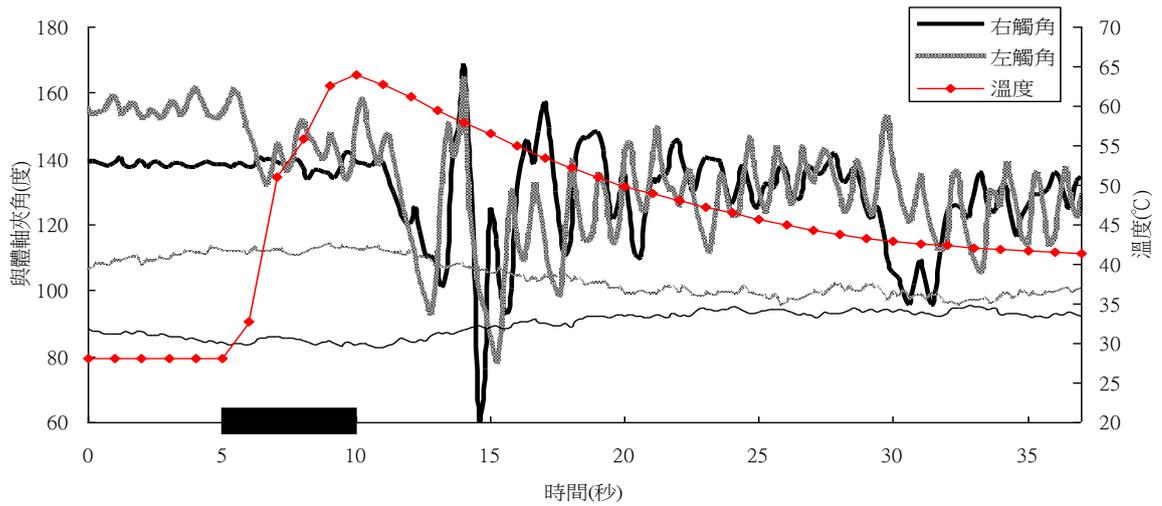
*：與第 0 秒時之離心速度相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。

2. 紀錄活體分泌之警告物質對其他個體觸角運動的效應

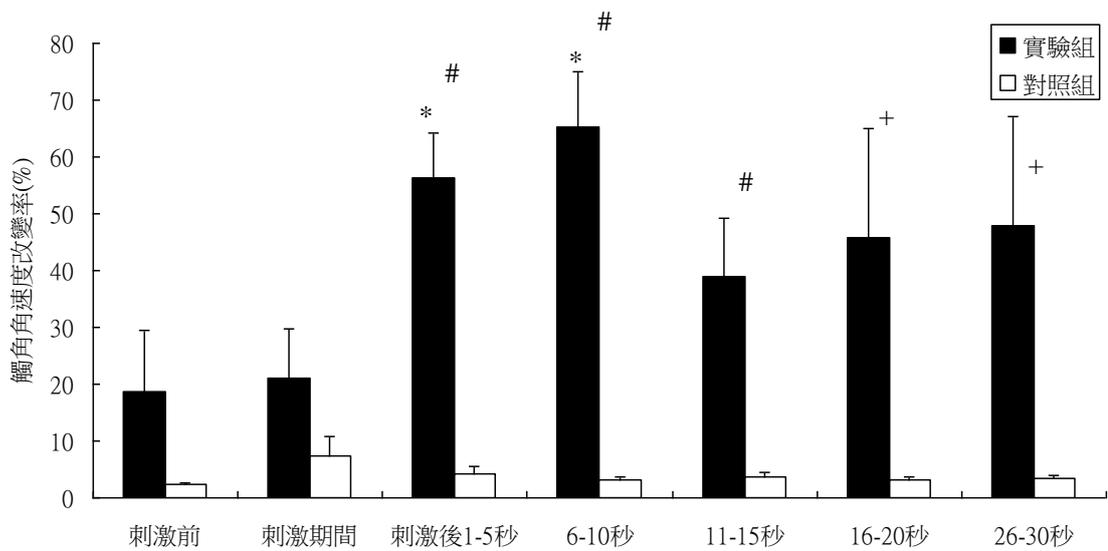
在刺激受刺激者期間，反應者的觸角擺動模式有明顯的改變(圖十三、圖十四)，且與對照組達到統計上的差異(如圖十五)，代表警告物質確實存在，且蟑螂接受警告物質的訊息後，除了引發個體驅離行為與增加移動速度外，亦改變附肢(觸角)的行為。



圖十三 反應者在接收警告訊息後，觸角擺動模式發生改變(受刺激者與反應者皆為雄蟲)。



圖十四 以熱水刺激過程之溫度變化與受試者對反應者觸角擺動角度的影響(以與體軸夾角表示)。X 軸之粗線為熱刺激期間。粗線為實驗組，細線為對照組。



圖十五 以熱水刺激受刺激者對反應者觸角擺動之角速率的影響(2 個體, 4 觸角, 平均 \pm 標準誤)。時間解析度為 0.2 秒。

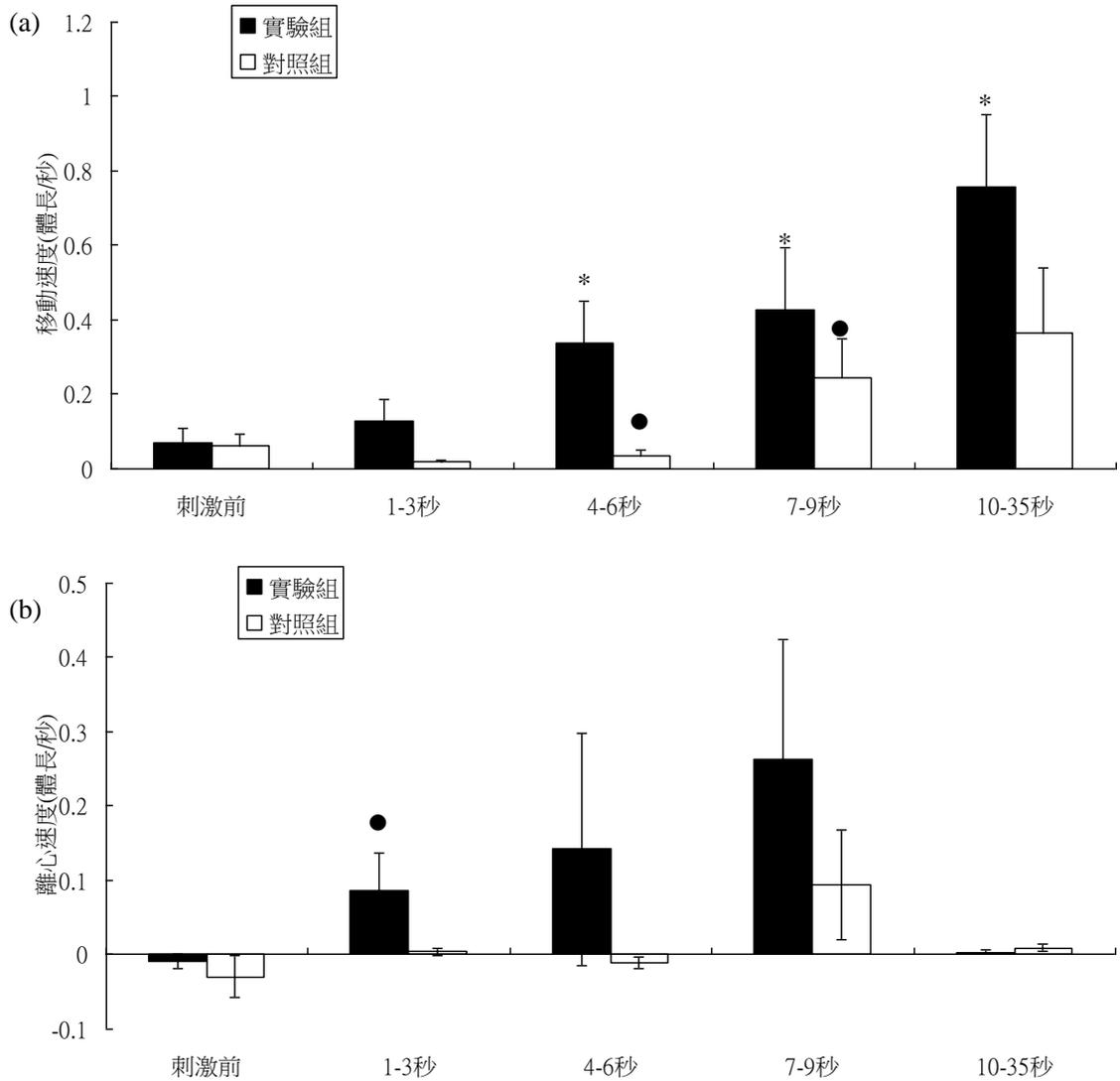
*：與刺激前相比達統計差異(單尾 t 檢定, $p < 0.05$)

#：與對照組相比達統計差異(單尾 t 檢定, $p < 0.05$)

+：與對照組相比接近統計差異(單尾 t 檢定, $0.05 < p < 0.08$)

3. 由活體收集之警告物質的作用活性

利用沾附酒精的濾紙收集警告物質，直接以警告物質作用於反應者，可增加其移動速度與離心速度(圖十六)，其結果與上述刺激受刺激者的結果一致，代表確實為警告物質的作用，而非個體產生的震動、氣流、聲音等因子的干擾。



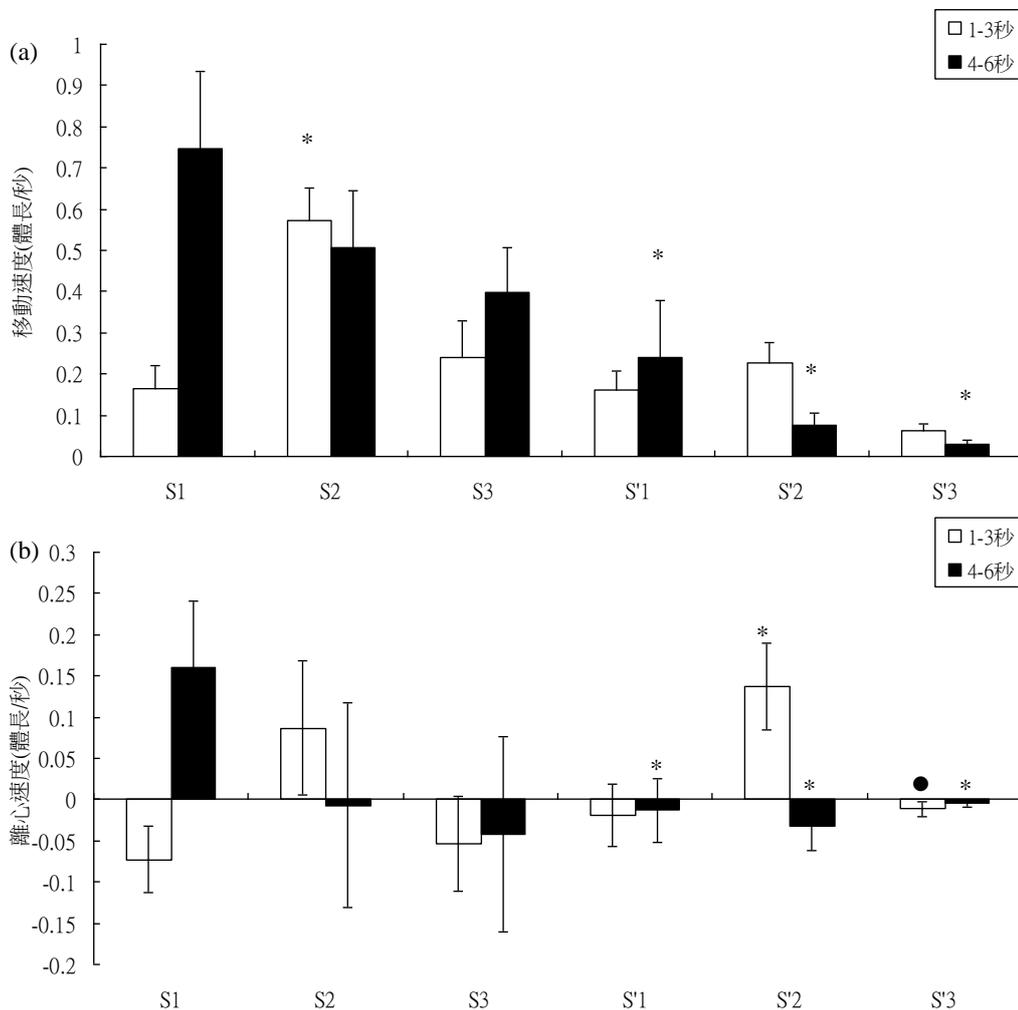
圖十六 沾附警告物質的濾紙對蟑螂之移動速度(a)與離心速度(b)的影響 (平均±標準誤，n = 4)。

*：與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。

•：與刺激前相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定， $0.05 < p < 0.08$)。

(二)、對警告物質之習慣性質的探討

若受刺激者與待反應者皆為雄性個體的情形下，依序進行多次刺激後，反應者的運動速度逐漸減小(圖十七 a)，即使更換受刺激者後(S'1~S'3)，反應仍弱。第一次刺激(S1)時，待反應者的離心速度大，產生驅離的行為反應，但第二次刺激後(S2~S3)則反應銳減，且更換受刺激者後(S'1~S'3)亦無反應(圖十七 b)。我們推測反應者的反應減弱或消失並非受刺激者的費洛蒙散發殆盡，而是反應者已產生習慣性。



圖十七 多次刺激於刺激後第 1 至 3 秒及第 4 至 6 秒期間對移動速度(a)與離心速度(b)的影響(n=4)，受刺激者與反應者皆為雄蟲。

S1~S3：第一次至第三次刺激；S'1~S'3：更換受刺激者後，第一次至第三次刺激。

*：與 S1 相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。

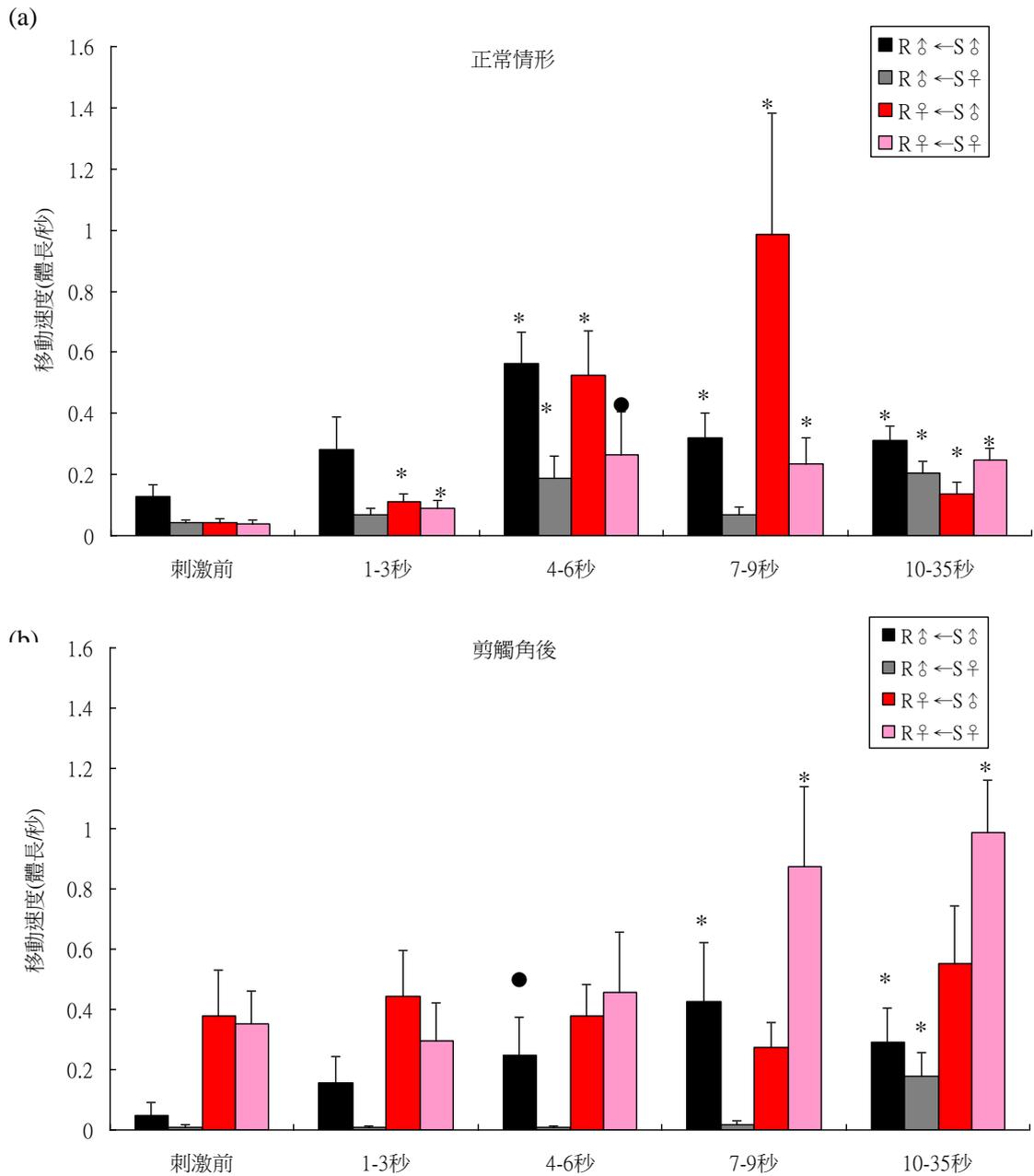
•：與 S1 相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定， $0.05 < p < 0.08$)。

(三)、性別在警告物質作用中的角色

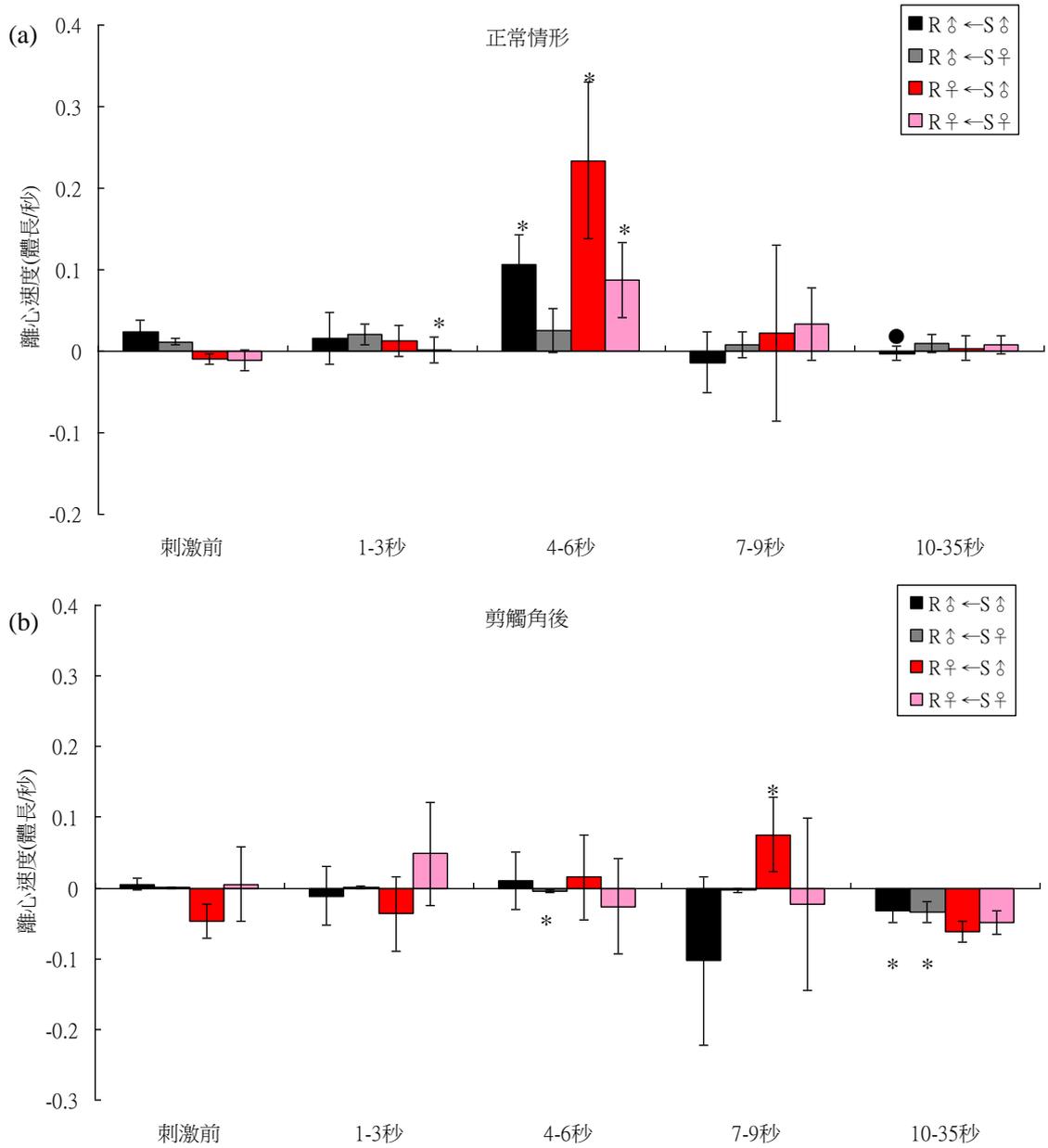
除了上述受刺激者與反應者皆為雄蟲的情形($R♂←S♂$)，受刺激者產生的警告物質可引發反應者移動速度增加與驅離行為，在其他的性別組合($R♂←S♀$ 、 $R♀←S♂$ 、 $R♀←S♀$)中也有類似的現象(圖十八 a、圖十九 a)，但 $R♂←S♀$ 的性別組合，反應者(♂)的驅離反應較弱(圖十九 a)。

(四)、觸角為警告物質的偵測器官

去除反應者的觸角後，對警告物質的反應產生嚴重的影響。無論何種性別組合，其運動行為(圖十八 b)與驅離行為(圖十九 b)皆減弱、減緩($R♂←S♂$ 組)或消失(其餘之性別組合)。另一方面，反應者剪去觸角後，對警告物質的反應率只有雄蟲下降(無論受刺激者的性別)，而雌蟲下降的程度未達統計標準(圖二十)，同樣的現象亦可見於反應潛伏期，雄性反應者剪去觸角後會增加對警告物質的反應潛伏期(無論受刺激者的性別，圖二十一)，但雌性反應者則不改變。綜合以上而言，實驗結果證明觸角是美洲蟑螂偵測警告物質的重要器官，且觸角對雄蟲而言，用於偵測警告物質的重要性大於雌蟲。



圖十八 警告物質對正常之蟑螂(a)與剪觸角後之蟑螂(b)「移動速度」的影響。
 $R♂←S♂$ ：刺激雄性個體，觀察雄性個體的反應(n 正常, 剪觸角 = 16, 12)。
 $R♂←S♀$ ：刺激雌性個體，觀察雄性個體的反應(n 正常, 剪觸角 = 10, 12)。
 $R♀←S♂$ ：刺激雄性個體，觀察雌性個體的反應(n 正常, 剪觸角 = 9, 12)。
 $R♀←S♀$ ：刺激雌性個體，觀察雌性個體的反應(n 正常, 剪觸角 = 12, 12)。
 *：與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定, $p < 0.05$)。
 •：與刺激前相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定, $0.05 < p < 0.08$)。

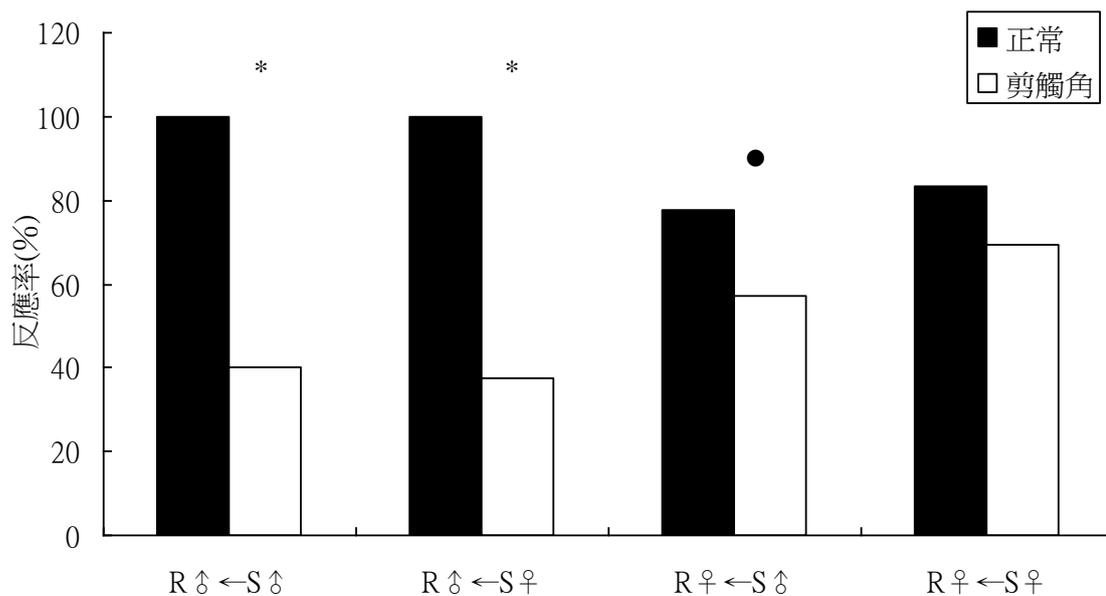


圖十九 警告物質對正常之蟑螂(a)與剪觸角後之蟑螂(b)「離心速度」的影響。

圖示意義與取樣數如圖十八。

*：與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定, $p < 0.05$)。

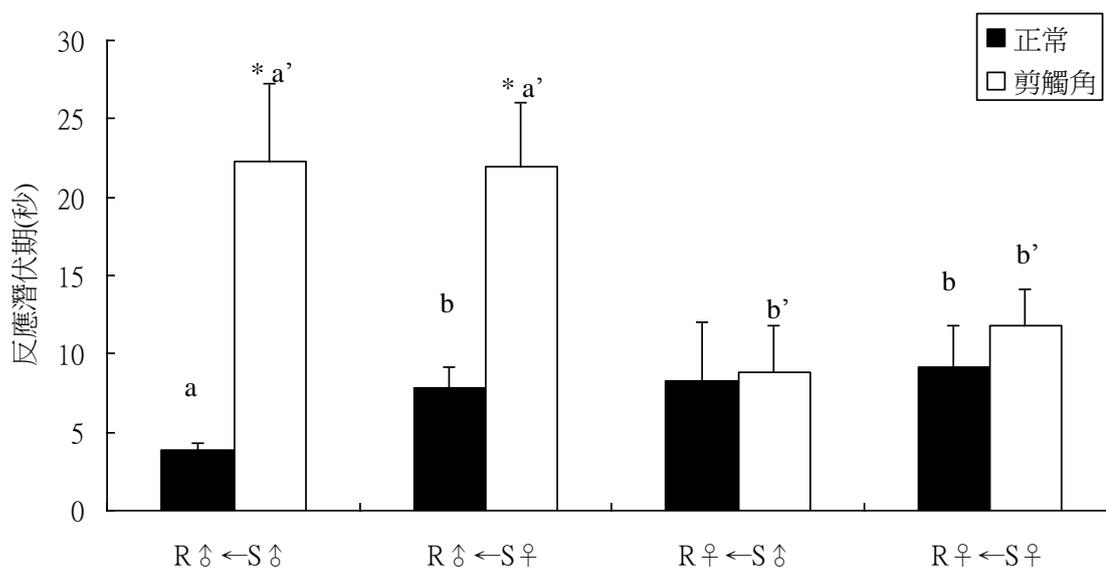
•：與刺激前相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定, $0.05 < p < 0.08$)。



圖二十 警告物質對正常與剪觸角後之蟑螂「反應率」的影響。

*：與正常組相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。

•：與正常組相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定， $0.05 < p < 0.08$)。



圖二十一 警告物質對正常與剪觸角後之蟑螂「反應潛伏期」的影響(無反應者，潛伏期以 35 秒計算)。

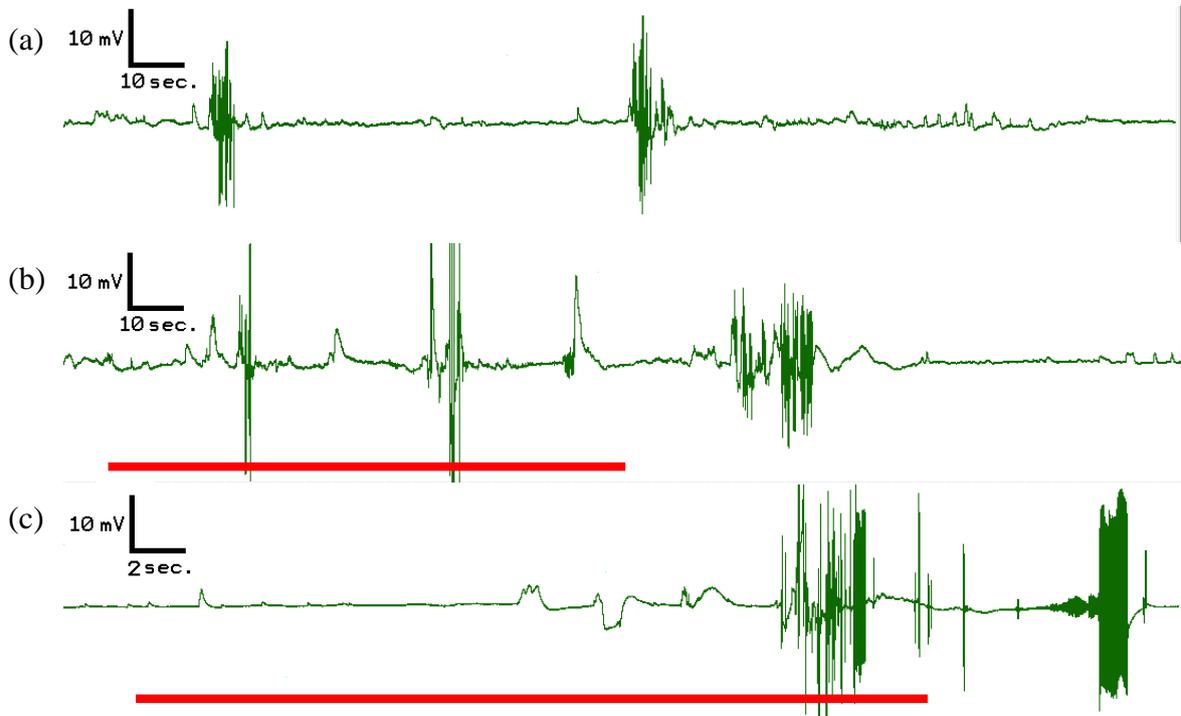
*：與正常相比達統計差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

a、b：正常蟑螂於不同處理組之間達統計差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

a'、b'：剪觸角後之蟑螂於不同處理組之間達統計差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

(五)、 蟑螂後腿屈肌電位變化

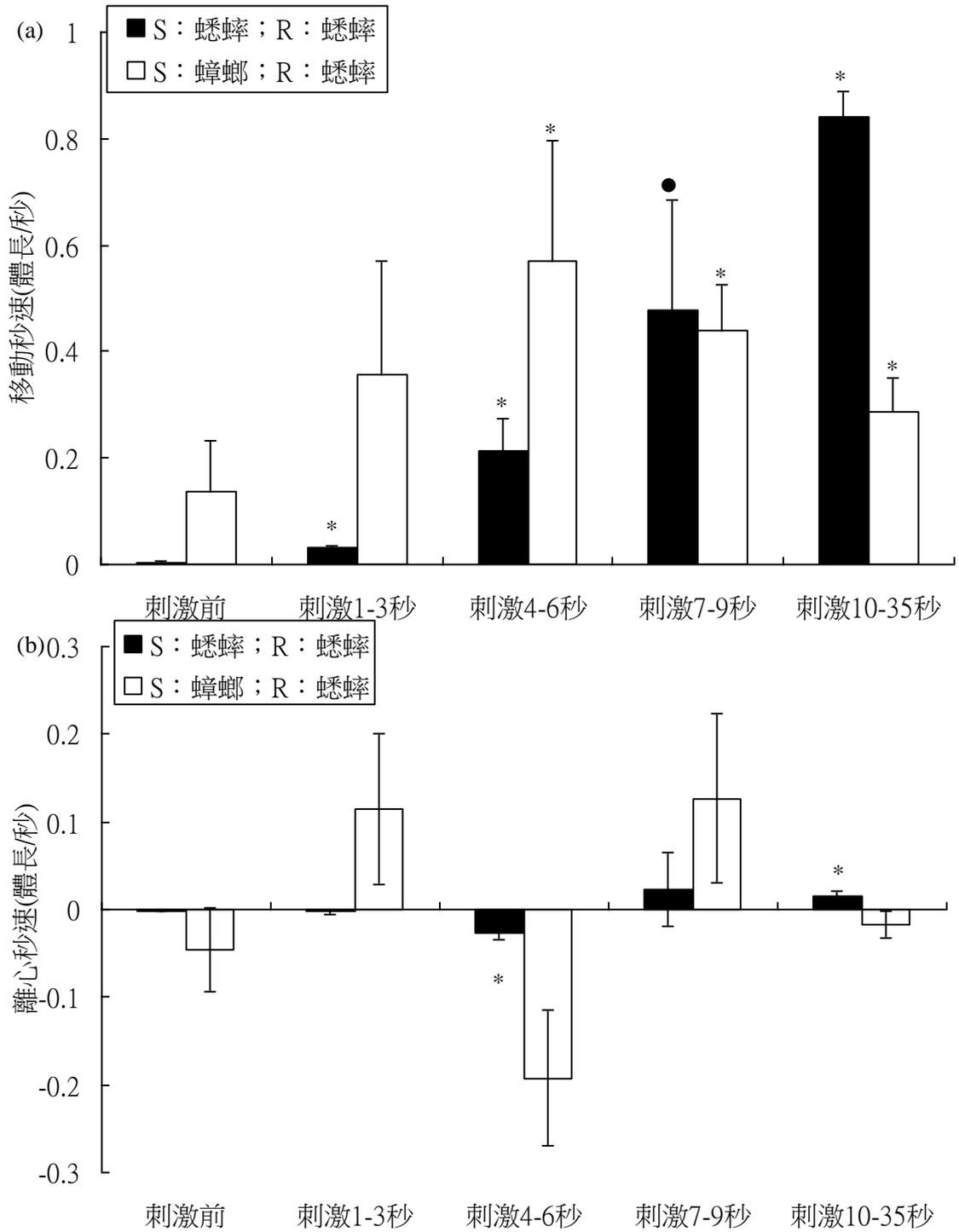
一般蟲體在自然形況下會放電引起運動行為，但在接收警告訊息期間肌肉放電頻率增加，幅度也比一般狀態下大(圖二十二)。



圖二十二 蟑螂後腳基節屈肌 EMG 的紀錄結果。(a) 蟑螂一般狀態時的紀錄。(b) 蟑螂暴露於警告物質時的紀錄(實驗組，紅色粗線代表暴露期間)。(c) 蟑螂暴露於沾附酒精之濾紙的紀錄(對照組，紅色粗線代表暴露期間)。

(六)、 異種間警告物質的作用效應

在受刺激者為蟑螂的情況下，蟋蟀(反應者)接收警告訊息後，其移動速度明顯增加，與美洲蟑螂接收警告物質的情況相似(圖二十三 a)，但離心反應則較不明顯(圖二十三 b)。在受刺激者為蟋蟀的情況下，蟋蟀(反應者)的移動速度亦明顯增加，顯示蟋蟀亦有分泌警告物質的現象(圖二十三 a)。由於蟋蟀(反應者)在接受警告訊息前，並無集中於中央的現象(不具正或負趨光性)，故不易呈現「離心運動」的現象。



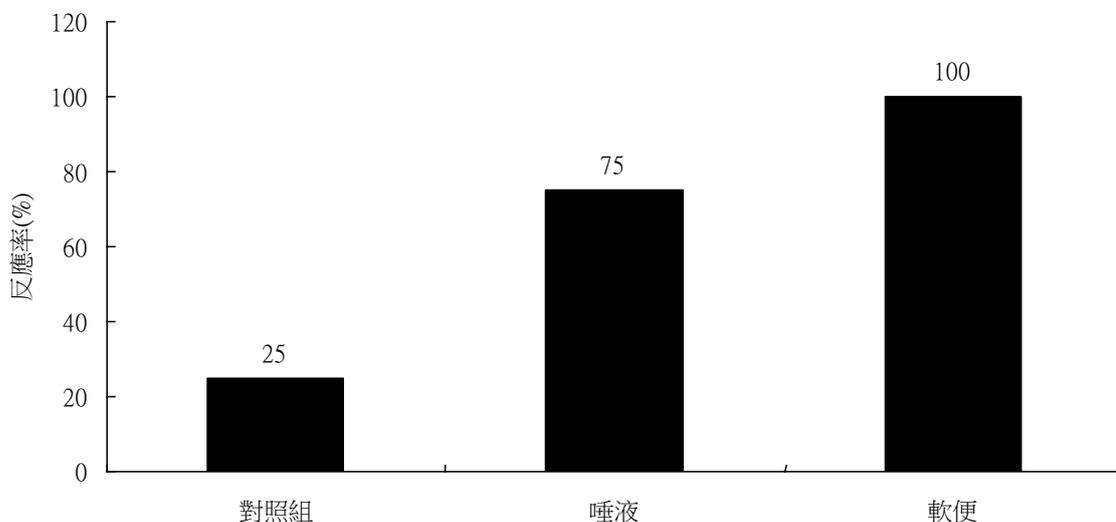
圖二十三 「蟋蟀(♀)-蟋蟀(♀)間」與「蟑螂(♂)-蟋蟀(♀)間」警告物質對移動速度(a)與離心速度(b)的影響(平均 ± 標準誤, 蟋蟀-蟋蟀間: n = 4; 蟑螂-蟋蟀間: n = 8)。

*: 與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定, $p < 0.05$)。

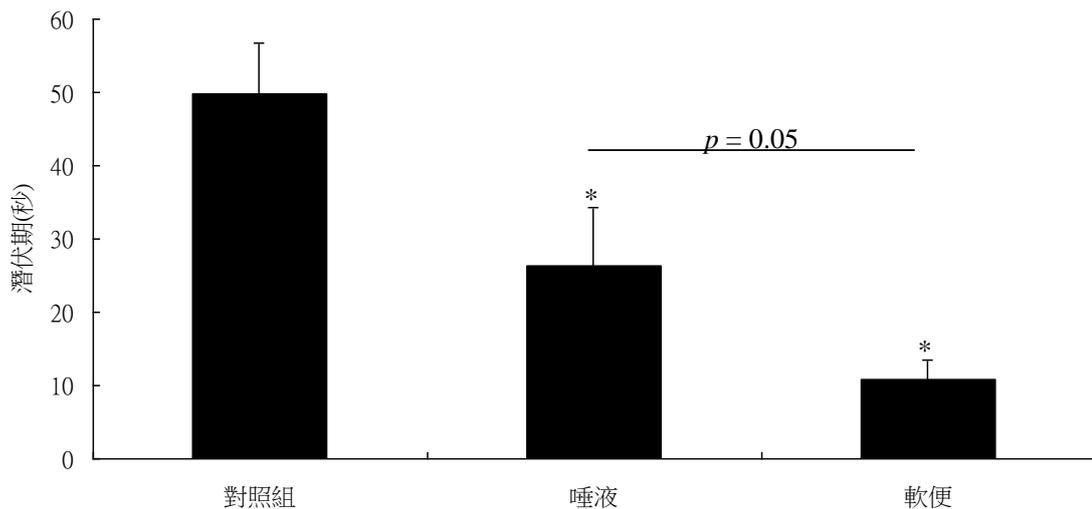
•: 與刺激前相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定, $0.05 < p < 0.08$)。

(七)、警告訊息的作用位置

軟便物質引發受刺激者反應的反應率高於以唾液刺激(圖二十四)，且移動速度與離心速度明顯增加(圖二十六)，與活體分泌之警告物質的效應有類似的趨勢，而在唾液刺激下的蟲體，反應則延遲(圖二十五)，因此我們推測軟便與唾液皆含有警告訊息，但軟便較具驅散效果。前人發現德國蟑螂的警告物質能持續 15 日的作用(Nakayama, *et al.*, 1987)，而我們發現美洲蟑螂的警告訊息僅能作用數分鐘，應為易揮發性的物質。

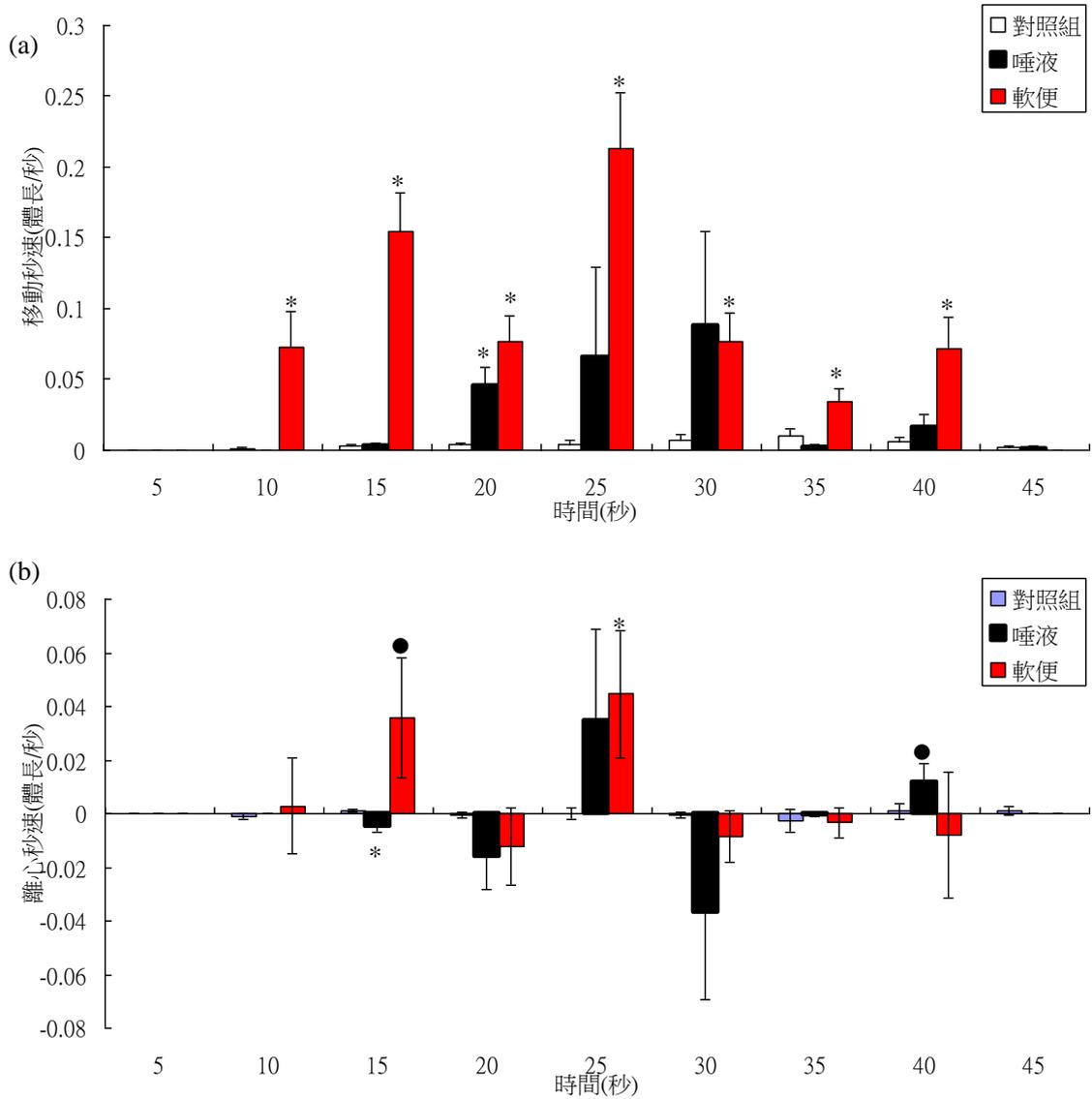


圖二十四 蟑螂受刺激時所分泌的唾液與軟便，引發個體運動的反應率(n=8)。



圖二十五 蟑螂受刺激時所分泌的唾液與軟便，引發個體運動反應的潛伏期(n=8，無反應者，潛伏期以 60 秒計算)。

*：與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。



圖二十六 蟑螂受刺激時所分泌的唾液與軟便，對蟑螂之移動速度(a)與離心速度(b)的影響(平均±標準誤，n = 8)。

*：與刺激前相比達統計差異(單尾配對 t 檢定， $p < 0.05$)。

•：與刺激前相比接近統計差異(單尾配對 t 檢定， $0.05 < p < 0.08$)。

二、討論

本研究發現美洲蟑螂與蟋蟀具有警告物質，為第一個探討美洲蟑螂與蟋蟀的活體具有分泌警告物質及其作用之研究。黃蜂需要警告費洛蒙來維持族群的安定，當有同伴被攻擊時會群聚以禦敵，而我們發現具群聚習性的美洲蟑螂，在遭受危險時可釋放警告物質驅離同種個體。

蟑螂藉由擺動觸角增加搜索的範圍與效率，當蟑螂探知環境狀態時，觸角運動的程度與狀態會隨環境因子而改變，因此我們可能藉由觀察蟑螂觸角擺動狀態，推測蟑螂的生理狀態與所處的環境因子性質(蔡，2006)，從觸角接收警告物質的反應中，我們發現藉由警告物質的釋放，可增加反應者觸角的擺動範圍與速度，進而增加其對補食者或其他環境因子的偵測，以做出適當的反應，增加其存活率。

由座標系統的紀錄，當蟑螂發出警告訊息，可促使同種其他個體增加移動速度與離心速度，但若這些個體去除觸角後，則移動速度與離心速度下降，其行為表現似個體的自發運動，而非偵測到警告訊息。

本研究目前以發現美洲蟑螂確實可分泌警告物質，且可由觸角進行偵測。我們也嘗試利用記錄生物細胞、組織電位變化的紀錄儀，進行步足肌肉電位(electromyogram, EMG)的紀錄，證實此警告物質能引起步足肌肉產生較高的放電頻率。

我們也利用酒精與濾紙收集警告物質，施測於反應者，其效果與受刺激者的作用一致，代表確實有該物質的存在，而非受刺激者的行為、聲音、震動等因子。此外，我們也發現美洲蟑螂之警告物質亦可作用於異種生物，且當美洲蟑螂遭受刺激時(如：被鑷子夾起)，常會分泌唾液與軟便，經由探討唾液與軟便的驅散效果後，我們發現美洲蟑螂的警告物質可能經由唾液與軟便分泌至體外，此項發現對於日後分析組成物質提供重要的萃取資訊。

若能藉由質譜分析等技術分析警告物質的主要成分，爾後就可能快速收集此警告物質或由人工方法大量生產，則未來可應用於蟑螂的防制，例如：於住家水管電線之管線、門窗等出入口噴灑此警告物質，則可驅離蟑螂，免於入侵住家。或是食品包裝盒含有此警告物質，可避免蟑螂前來取食，以達食品保存的功效。此是以自然界本來存在的方式達到與化學藥劑同樣的驅蟑效果，不僅給予環境較小的破壞，也解決藥劑汙染以及蟲體抗藥性等問題。

肆、 結論與應用

- 一、美洲蟑螂的活體可分泌警告物質，此警告物質具有驅離同種個體的功能。
- 二、蟑螂對警告物質的反應具有習慣性。
- 三、無論何種性別組合，受刺激者分泌的警告物質皆會對反應者產生運動速度增加與引發驅離行為的作用。
- 四、剪除觸角後的反應者對警告物質的反應下降或消失，推測觸角為接收警告物質的重要器官。但雌蟲去除觸角後，其對警告物質的反應率與潛伏期影響較小，代表以觸角偵測警告物質，在雄蟲較為顯著。
- 五、利用酒精與濾紙收集警告物質，施用於反應者亦有同樣的驅離效果，代表本研究所觀察到的反應確實為警告物質所致。
- 六、蟋蟀亦可分泌警告訊息，對同種個體產生作用。
- 七、美洲蟑螂的警告訊息對於蟋蟀亦有作用，證實警告物質可跨物種作用。
- 八、警告訊息存在於軟便與唾液之中，其中軟便的驅散效果明顯大於唾液。
- 九、警告物質未來可應用於蟑螂防制。

伍、 參考文獻

- 林宗岐，2007。社會性昆蟲。科學發展，409，40-47。
- 胡琬穠、蔡任圃，2011。認識身旁的小傢伙（九）—美洲蜚蠊社會互動行為與空間資源分配關係的探討。科學教育月刊，341，24-43。
- 維基百科(German cockroach) 網址：
http://en.wikipedia.org/wiki/German_cockroach(檢索日期：2013.03.17)
- 維基百科(*Therea petiveriana*) 網址：
http://en.wikipedia.org/wiki/Therea_petiveriana(檢索日期：2013.03.17)
- 蔡任圃，2006。認識身旁的小傢伙(一) 美洲蟑螂生態與行為的初步觀察。科學教育月刊，289，30-35。
- Brossut, R. 1983. Allomonal secretions in cockroaches. *J. Chem. Ecol.* 9(1): 143-158.
- Capinera, J. L. (ED.) 2008. *Encyclopedia of Entomology*. Springer Verlag.
- Chikao, N. and Hisao, T. 1979. Electroantennogram responses from parts of antennae of the American Cockroach. *Appl. Ent. Zool.* 14(3): 326-332.
- Erienne, J., Semon, C. E., Abed, D., Grandcolas, P. and Brossut, P. 2002. Defensive secretion of *Therea petiveriana*: chemical identification and evidence of an alarm function. *J. Chem. Ecol.* 28(8): 1-10.
- Faulde, M., Fuchs, M. E. A. and Nagl, W. 1990. Further characterization of a dispersion-inducing contact pheromone in the saliva of the German cockroach, *Blattella Germanica* (Blattodea: Blattellidae). *J. insect Physiol.* 36(5): 353-359.
- Landolt, P. J., Reed, H. C. and Health, R. R. 1999. An alarm pheromone from heads of

- worker *Vespula squamosa* (Hymenoptera: Vespidae). *Florida Entomologist* 82(2): 356-359.
- Nakayama, Y. Suto, C. and Kumada, N. 1987. Further studies on disperation-inducing substances of the *German Cockroach*, *Bleettella germanica*. *Appl. Entomol. Zool.* 19(2): 227-236
- Regnier, F. E. and Wilson, E. O. 1968. The alarm-defence system of the ant *Acanthomyops claviger*. *Great Britain* 14: 955-970.
- Rollo, C. D., Borden, J. H. and Casey, I. B. 1995. Endogenously produced repellent from American cockroach Blattaria: Blattidae: Function in death recognition. *Environ. Entomol.* 24(1): 116-124.
- Takahashi, S., and Kitamura, C. 1972. Occurrence of phenols in the ventral glands of the American cockroach *Periplaneta americana*. *Appl. Entomol. Zool.* 7:199–206.

評語

研究內容有趣而仔細，建議進一步弄清研究之主題物質，並與已知之相關物質比較，並釐清成分物質之功能。