

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 050004

參展科別 動物學

作品名稱 探討社會孤立對美洲蟑螂之行為與生理反應的
效應

得獎獎項

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學

指導教師 蔡任圃

作者姓名 詹佳穎

關鍵詞 社會孤立、蟑螂

作者簡介



摘要

本研究建立美洲蟑螂的社會孤立動物模式，藉由隔絕費洛蒙的交流，探討對昆蟲行為與生理的效應。社會孤立的美洲蟑螂，具有較高的死亡率，並改變以下的行為反應：減少蟑螂的探索行為，使蟑螂運動的時間與距離降低，並增加對能產生較高能量之食物的需求。社會孤立可改變以下的生理反應：個體代謝過程的呼吸商降低，以脂質代謝作為能量來源；脂肪體觸酶活性下降；包囊作用的免疫反應下降。本研究發現，即使是非社會性昆蟲的蟑螂，社會孤立亦會造成生存上的負面影響，而引發隔離症候群(isolation syndrome)。

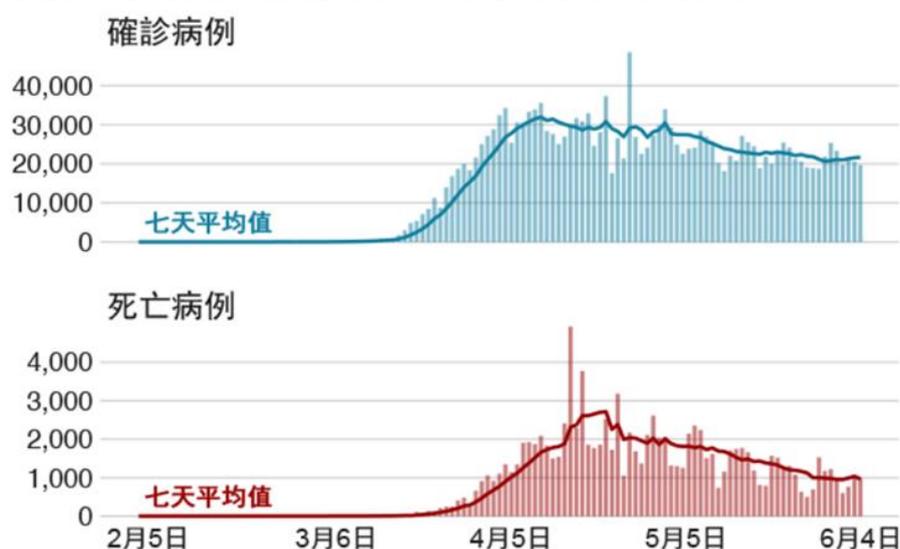
Abstract

We established an animal model of social isolation in American cockroaches and investigated the effects on insects' behavior and physiological responses via blocking their pheromone communication. It's observed that the social-isolated American cockroaches had higher mortality and altered their behavior responses, which is reducing exploratory behavior as well as duration of movement and increasing their demand for more energy-generating food. Social isolation can also alter several physiological responses. For example, the respiratory quotient of metabolic processes is reduced, and lipid metabolism is used as main energy source. Additionally, the activity of fat body catalase is declined, so is the immune response of encapsulation. To sum up, our study found that even for non-social insect, social isolation can lead to negative survival effects, triggering isolation syndromes.

壹、前言

自 2020 年新型冠狀肺炎在全球爆發以來，造成了 5.97 億人染疫、646 萬人死亡，台灣目前也已累積了五百萬的病例、近一萬人的死亡(統計至 2022.08.23)。儘管感染新冠病毒有著高感染率及驚人的死亡率(圖一)，但在 2020 年日本的自殺率卻超過新冠肺炎死亡率(圖二)，顯示因隔離政策而失去社會互動，所引發的心理疾病是非常嚴重的。此外，Nature 期刊在 2021 年發表一篇報導，美國在新冠肺炎爆發的一年內，因隔離而漸少了社交互動，使得罹患憂鬱與焦慮的人口數量增加了 31%(圖三)(Abbott, 2021)，而依據長庚醫院的資料表示，憂鬱會導致 15% 的患者死於自殺(張家銘，2009)。故自疫情爆發以來，因社會孤立而引發的憂鬱症等心理疾病，成為公共衛生的重要議題。

美國每日新型冠狀病毒病確診與死亡病例



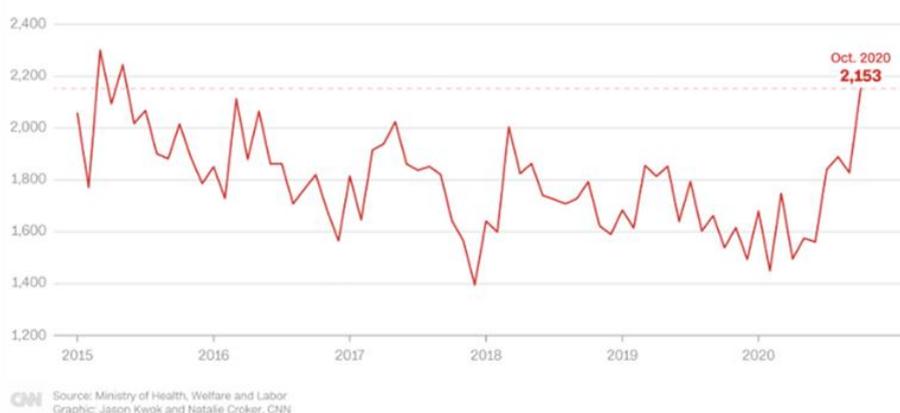
資料來源：歐洲疾病預防控制中心；截至2020年6月4日

BBC

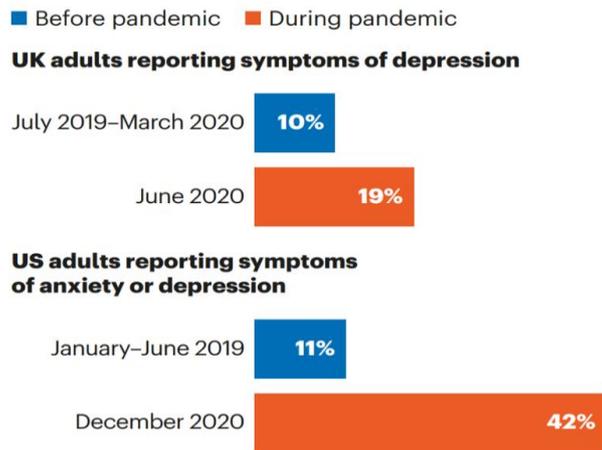
圖一 新冠肺炎的確診病例與死亡病例。

Japan recorded over 2,100 suicides in October

After decreasing in recent years, monthly suicides rose to their highest number since May 2015.



圖二 日本自 2015 年以後的自殺率趨勢圖。



圖三 美國與英國疫情爆發前後，所接獲的憂鬱通報。

由上述可知，社會隔離對人類生活產生許多重大的影響，更甚至對生命造成危害。事實上，社會隔離對許多脊椎動物個體的發展也產生了巨大的影響，引發一系列行為障礙 (Lihoreau, *et al.*, 2009)，除了人類外，其他的哺乳動物也會因受到孤立而出現分離焦慮的症狀。以家犬為例，當寵物獨自在家時，有時會出現吠叫、逃跑離家、來回踱步、咀嚼以及破壞傢俱等焦慮症狀，嚴重者還會有食入排泄物來穩定情緒的行為 (Sherman, 2008)。近年來科學家也發現啮齒動物也會出現抑鬱的現象 (Qingzhong, 2018)，動物會出現習得性無助 (learned helpless, LH)、減少進食等現象，故社會孤立對哺乳動物所造成的影響不容小覷。不過與脊椎動物較深的研究相比，目前科學家對無脊椎動物經社會孤立後，所引發的行為與生理反應較不清楚 (Scharf, 2021)，但許多學者仍認為隔離症候群 (isolation syndrome) 是動物普遍存在的特徵 (Lihoreau, *et al.*, 2009)。在社會性昆蟲的研究中，發現社會孤立會使螞蟻 (*Camponotus fellah*) 的壽命減少 (Boulay, *et al.*, 1999、Koto, *et al.*, 2015)，減少社會梳理行為 (allogrooming)，與增加交哺現象 (trophallaxis) 的程度 (Boulay, *et al.*, 1999)，也會透過將食物保留在嗉囊 (crop) 而未消化吸收養分，改變了個體能量收入和支出的平衡狀態 (Koto, *et al.*, 2015)。社會孤立也會減少螞蟻 (*Temnothorax nylander*) 與其他同伴的互動行為，減少自身梳理行為 (grooming)，增加對於後代的照護，且透過大腦轉錄組分析 (brain transcriptome analysis) 顯示，只有少數與行為相關的基因因為隔離的處置而改變，但許多與免疫系統功能和壓力反應相關的基因活性下降，這可能使社會孤立的個體對各種壓力源更為敏感 (Scharf, *et al.*, 2021)。其他研究也發現社會互動的刺激對成熟工蟻的巢穴識別行為十分重要 (Boulay and Lenoir, 2001)

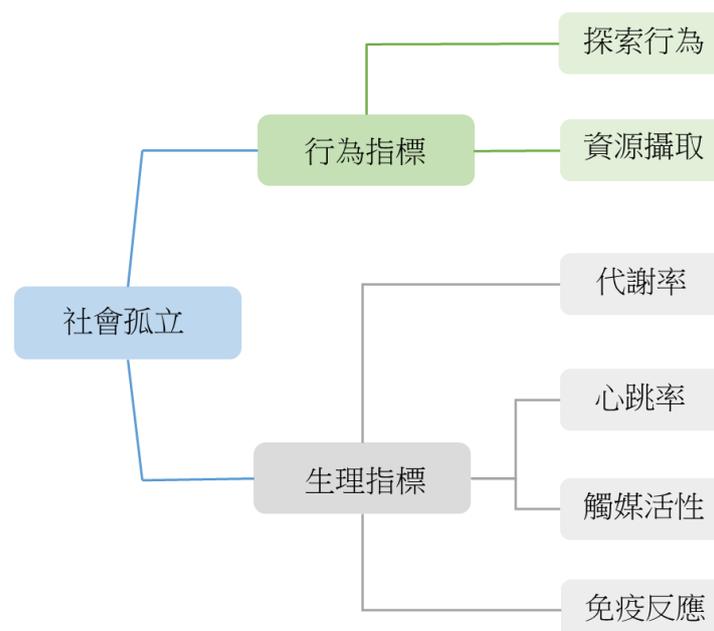
另一方面，在非社會性昆蟲的研究中，也發現了社會隔離對昆蟲的效應。例如：長期 (5 或 7 天) 的社會隔離可改變了黑腹果蠅 (*Drosophila melanogaster*) 代謝基因的表現，減少睡眠時間，也誘導飢餓信號使食量增加 (Li, *et al.*, 2021)；地中海田野蟋蟀 (Mediterranean field

cricket, *Gryllus bimaculatus*)若經隔離後，會增加個體間打鬥的攻擊性(Stevenson and Rillich, 2013)。屬於群居性的非社會性昆蟲-德國蟑螂(*Blattella germanica*)，在經社會隔離後可增加探索-迴避(exploration-avoidance)行為，但覓食活動(foraging activity)與社交互動意願(willingness to interact socially)減少，甚至使得評估交配伴侶質量(assess mating partner quality)的能力下降(Lihoreau, et al., 2009)。

前述實驗大多從行為學的觀點探討社會孤立對昆蟲的效應，有關生理作用的探討較少，尤其針對非社會性昆蟲的研究則又更少，故本實驗欲研究社會孤立對非社會性昆蟲-美洲蟑螂的影響，期望能以更宏觀的行為、生理與演化觀點，探討社會孤立對行為與生理的效應是否在動物界具有普遍性，以利討論社會孤立對動物演化的影響。最近由於疫情延燒導致實驗動物(如靈長類等哺乳動物)的缺乏，使科學研究面臨衝擊，故期待未來可以將昆蟲的研究結果應用在心理相關研究，可作為研究焦慮、憂鬱等行為與生理時使用的動物模型。

一項由美國奧勒岡健康與科學大學(Oregon Health & Science University)的團隊做做的研究指出，視訊電話、電子郵件、社群網站及即時通訊四種常見的通訊媒介中，使用視頻聊天而不使用其他通信方式的老年人，其患抑鬱症的風險較低(Teo, et al., 2019)，代表社會互動不只聲音的溝通，也包含臉部表情等溝通媒介。昆蟲個體間串常使用的溝通媒介為費洛蒙(pheromone)，本研究針對費洛蒙溝通作為社會互動的媒介，探討缺乏費洛蒙交流的社會孤立處置對美洲蟑螂行為與生理的效應。

本研究實驗架構如圖四。



圖四 本研究的實驗架構圖。

本研究的研究目的如下：

- 一、建立美洲蟑螂缺乏費洛蒙交流之社會孤立的動物模式
- 二、探討社會孤立對蟑螂行為表現的影響
 - (一)、對探索行為、運動狀態的影響
 - (二)、對攝取資源行為的影響
- 三、探討社會孤立對蟑螂生理表現的影響
 - (一)、對心搏週期的影響
 - (二)、對代謝率的影響
 - (三)、對脂肪體觸酶活性的影響
 - (四)、對免疫反應的影響

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	廠牌與規格	備註
1	1ml 微量吸管		
2	橡皮軟管		
3	60ml 針筒		
4	強力磁鐵		
5	大頭針	手牌大頭針	
6	雙氧水		濃度為 3%
7	電子秤		
8	棉花棒	上潔棉花棒	
9	氫氧化鈉		粒狀固體氫氧化鈉
10	紗布		
11	蟑螂屋貼紙/膠帶	上黏蟑螂屋	
13	量筒		
14	珍珠板		
15	塑膠密封盒		15X10X5 公分
16	透明壓克力箱		37.5 X 25.5 X5.5 公分

17	解剖用具		鑷子與小剪
18	銅絲		直徑 180 微米
19	計時器		
20	二氧化碳鋼瓶		
21	網路攝影機		
22	複式顯微鏡	OLIMPUS BX41	
23	剪裁用具		大剪刀
24	載玻片		76*26mm

二、實驗動物

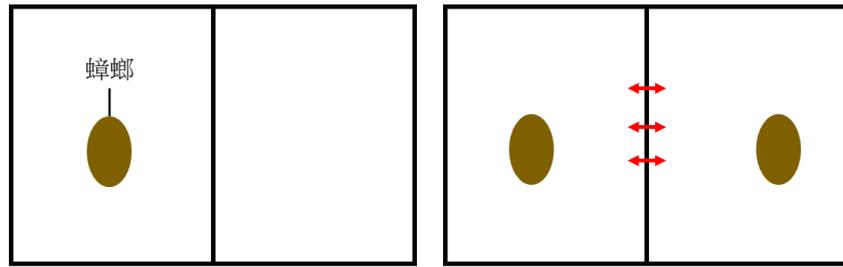
本實驗以美洲蟑螂(*Periplaneta americana*)雄性成蟲為實驗動物，為本校自行飼養繁殖。研究過程中挑選健康且無受損之蟑螂。

三、研究過程或方法

(一)、建立美洲蟑螂缺乏費洛蒙交流的社會孤立動物模式

將透明壓克力盒內放入珍珠板，在盒子內區分出兩個空間，美洲蟑螂先經過麻醉後，移動至隔離盒當中。美洲蟑螂依社會隔離的程度，分為全隔離與半隔離組：全隔離組在其中一個空間內放入蟑螂一隻，而另外一邊維持空無一物；半隔離組以有打洞的珍珠板區分盒子空間，並將兩邊的空間皆放入蟑螂一隻。全隔離與半隔離組的蟑螂擁有同樣的活動空間，差別僅在半隔離組能接收到其他蟑螂個體的費洛蒙。隔離一共為期七天，並將隔離盒放置於陰暗處，隔離期間不供給水或食物，以避免進食的個體差異或殘餘的食物衍生的其他變因。部分實驗另設置無隔離組，是直接從蟑螂飼養箱裡成群(**grouped**)的蟑螂中，直接取出個體，未經過社會隔離的處理。

(A)



(B)



圖五 蟑螂的社會孤立模型(攝影機由上俯視拍攝)。

(A)裝置示意圖。左圖：全隔離、右圖：半隔離(紅色剪頭處代表孔洞，空氣可流通)。

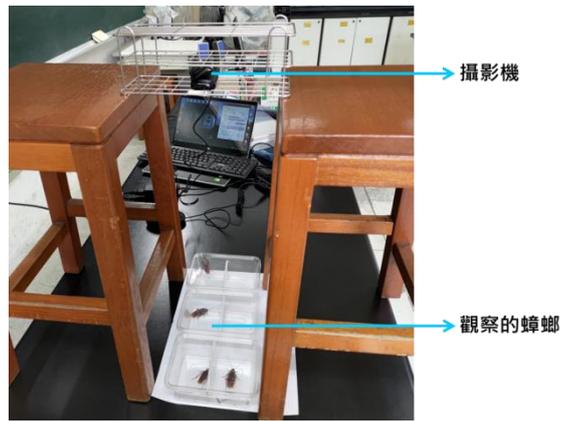
(B)實際照片。

(二)、死亡率的計算

隔離七天到期後，分別記錄全隔離組與半隔離組的死亡數量，並分別計算全隔離組與半隔離組的個體死亡率。

(三)、全隔離與半隔離昆蟲的行為表現

隔離七天到期後，將整個隔離盒放置在錄影機下錄影觀察蟑螂的行為與運動狀態(圖六)，每隻個體錄製 20 分鐘，並使用 Cockroach Tracker (NTNU BIO 製 版本 1.0.0.1)分析每相隔 10 秒，以蟑螂頭部作為測量蟑螂座標的定位點，測量蟑螂的座標變化。最後分析蟑螂在這些時段裡的移動量、進行運動的時間等參數。進行座標的量化時，先是以盒寬為單位，最後再換算成公分(一盒寬=10 公分)。



圖六 螞蟻行為觀察的實驗系統照片。

1. 測量螞蟻的移動總和距離

測量每單位時間(10 秒鐘)每一隻螞蟻移動的距離，再累加成移動總和距離。分別計算全隔離組與半隔離組的平均，並進行比較。

2. 測量螞蟻的移動時間

每段時距內螞蟻會有移動或停在原地不移動的情形，測量各組每一隻螞蟻有移動行為的時間長度，計算每隻螞蟻的總移動時間占觀察期間的比例，並分別將兩組計算平均再進行比較。

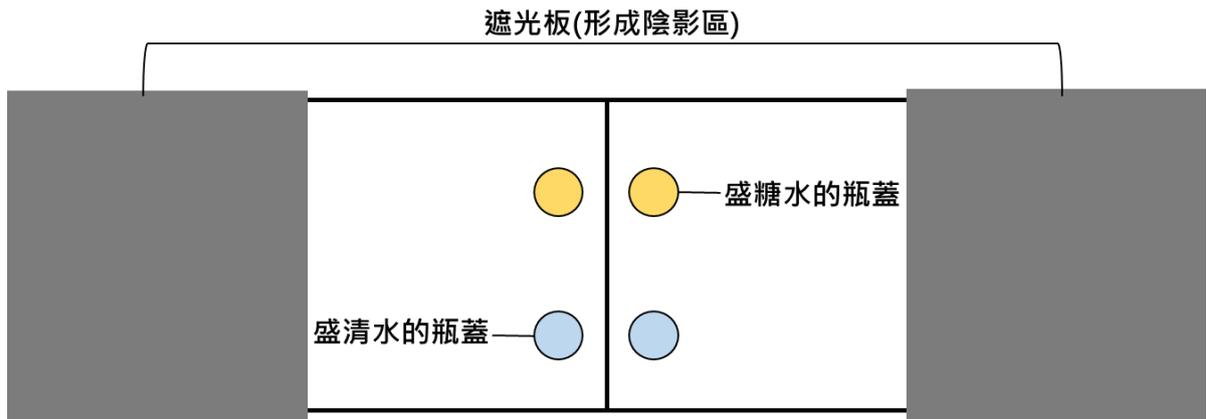
3. 測量螞蟻在移動過程中的最大速度

選擇螞蟻在單位時間內有最大的移動距離參數作為最大速度(單位：公分/10 秒)，並將全隔離組與半隔離組分別計算平均，再進行比較。

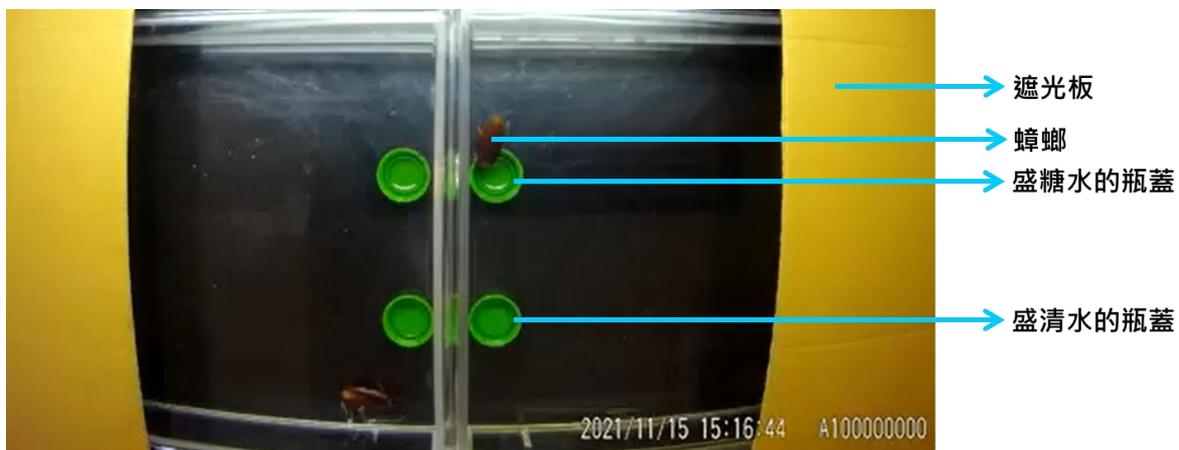
4. 資源攝取行為

在一透光的透明壓克力箱(37.5 X 25.5 X5.5 公分)上方兩側一半以厚紙板蓋住(面積約為透明壓克力箱的一半)，並於沒有遮光的光區中放入裝有糖水與清水的瓶蓋(圖七)，觀察 15 分鐘內螞蟻待在光區的時間、躲在陰影區的時間、攝取糖水以及清水的時間，紀錄螞蟻對不同資源的選擇與攝取。

(A)



(B)



圖七 資源攝取行為的觀察裝置(攝影機由上俯視拍攝)。(A)裝置示意圖。(B)實際照片。

(四)、全隔離與半隔離昆蟲的生理表現

1.代謝率

參考劉等人(2016)測量昆蟲代謝率的方法，本實驗中所進行的代謝率測量，包括測量消耗氧氣與產生二氧化碳的速率。將蟑螂放置於大塑膠針筒中(圖八)，針筒的開口接上橡皮管以及微量吸管，並抽取微量的水，觀察 10 分鐘內水柱的移動變化；此裝置的操作，分為大塑膠針筒內放置氫氧化鈉與不放置氫氧化鈉兩種情形。在大塑膠針筒內放置氫氧化鈉時，計算水柱的每一次的移動時間，可推得蟑螂呼吸周期；另透過計算裝置內的氣體體積變化速率，可推算美洲蟑螂的耗氧速率。若大塑膠針筒內沒有氫氧化鈉時，所計算的氣體體積變化速率，可作為計算美洲蟑螂產二氧化碳速率的依據。計算耗氧速率與產二氧化碳速率的方式如下：

(1).有氫氧化鈉時所求得的代謝率(V 為氣體變化速率)，即為耗氧速率：

$$\frac{\Delta \text{水柱刻度(毫升)}}{\Delta \text{經過時間(秒)}} = V_{\text{耗氧}}$$

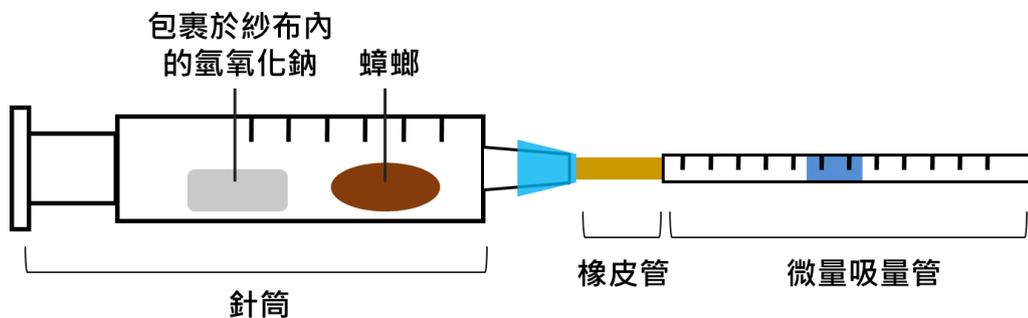
(2).無氫氧化鈉時所求得的氣體體積變化速率(V 為氣體變化速率)，

即為耗氧速率 - 產二氧化碳速率：

$$\frac{\Delta \text{水柱刻度(毫升)}}{\Delta \text{經過時間(秒)}} = V_{\text{耗氧}} - V_{\text{產二氧化碳}}$$

(3).將 1 的數值減去 2 的數值，即可得產二氧化碳速率。

(A)



(B)



圖八 測量蟑螂之代謝率與呼吸週期的裝置示意圖(A)與實際照片(B)。

2.全隔離與半隔離昆蟲心跳率差異觀察

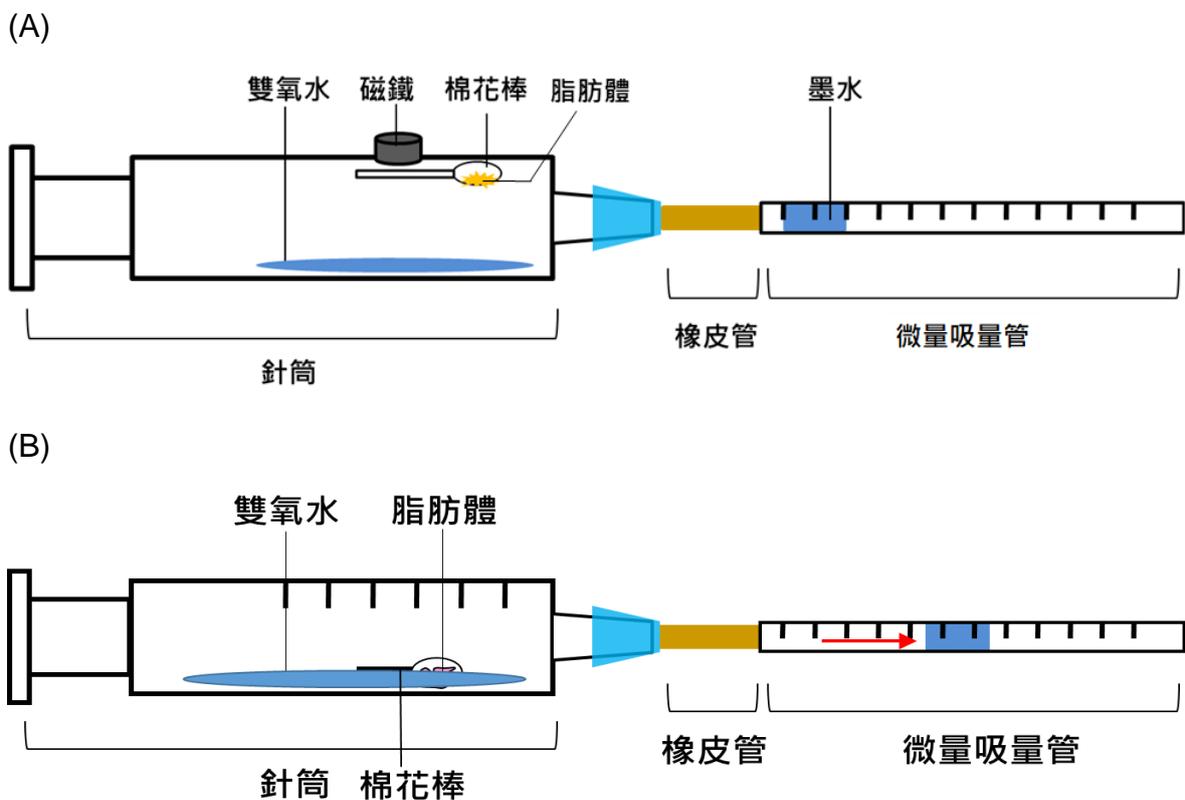
將蟑螂黏在貼紙上，置於顯微鏡下錄影觀察蟑螂心臟的收縮與舒張(圖九)，使用 Tracker 4.89 分析蟑螂的心臟收縮與舒張時臟壁的寬度，紀錄蟑螂的收縮時間、舒張時間、心搏週期、收縮移動的距離以及舒張移動的距離。



圖九 顯微鏡下蟑螂胸部第三節心臟的照片。

3.脂肪體觸酶活性

參考黃等人(2019)量化蟑螂脂肪體之觸酶活性的實驗設計，取出蟑螂脂肪體，將其抹在棉花棒上，測量脂肪體質量，在棉花棒中放入大頭針，以磁鐵吸附在塑膠針筒上，針筒內倒入 3%雙氧水 2 毫升，在開口處接上橡皮管以及微量吸管，並吸取微量墨水(圖十)，放開吸住抹上脂肪體的棉花棒的吸管，從放開磁鐵開始錄影紀錄脂肪體與雙氧水產生氣體使水柱完全流出的過程。



圖十 脂肪體觸酶活性測量系統的示意圖。

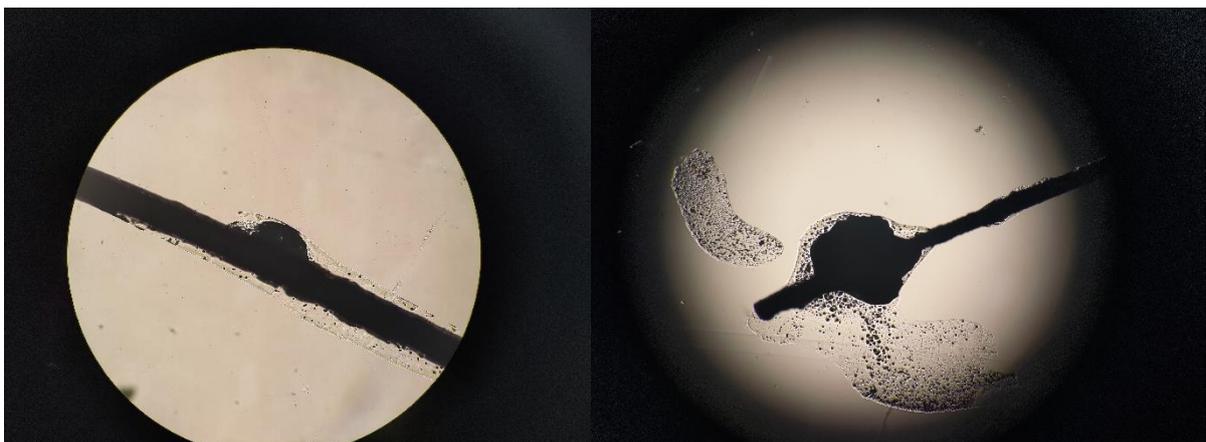
(A)脂肪體與雙氧水反應前。(B)脂肪體與雙氧水反應期間。

4. 免疫作用－包囊作用

參考蔡(2014)、吳與蔡(2017)與趙等人(2019)量化蟑螂免疫反應活性的實驗設計，透過觀察蟑螂的包囊作用作為蟑螂免疫反應的指標。將銅線(直徑 150 微米)由背部插入蟑螂體內(圖十一)，15 分後將銅線抽出並置於顯微鏡下拍攝照片，再利用點座標分析最大的包囊之直徑長(圖十二)。



圖十一 插入銅線靜置 15 分鐘等待包囊反應的蟑螂。

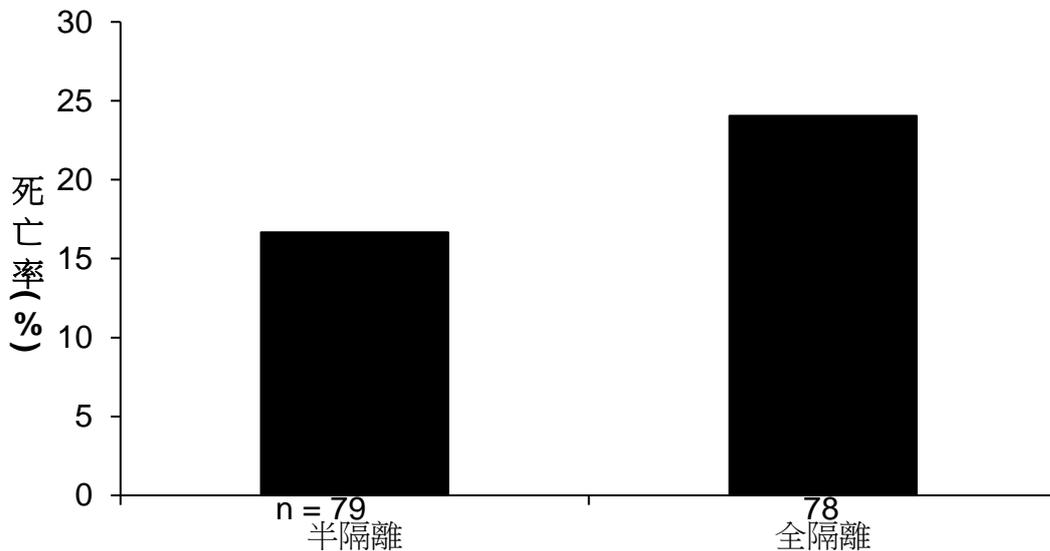


圖十二 顯微鏡下銅線經包囊作用後的照片。

參、研究結果與討論

一、不同隔離程度的蟑螂死亡率

在本實驗所有進行隔離的蟑螂中，全隔離蟑螂共有 79 隻，而半隔離蟑螂共有 78 隻。在隔離期間死去的蟑螂：全隔離組共有 19 隻，而半隔離只有 13 隻。死亡率全隔離組的蟑螂(24.1%)高於半隔離組(16.7%)，兩組之死亡率相差了 7.4%(圖十三)。

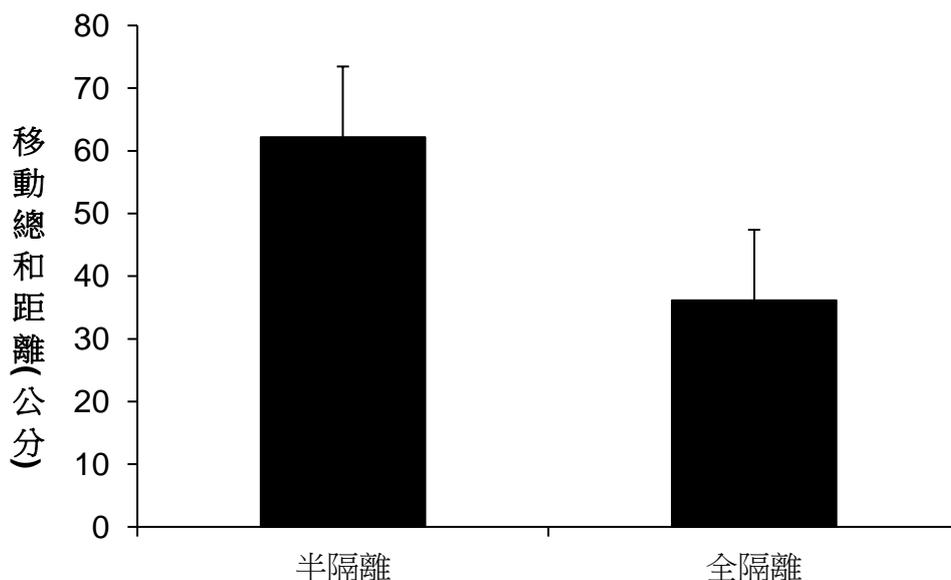


圖十三 全隔離組與半隔離組的死亡率比較(n = 取樣數)。

二、不同隔離程度對蟑螂行為的效應

(一)、蟑螂的移動總和距離

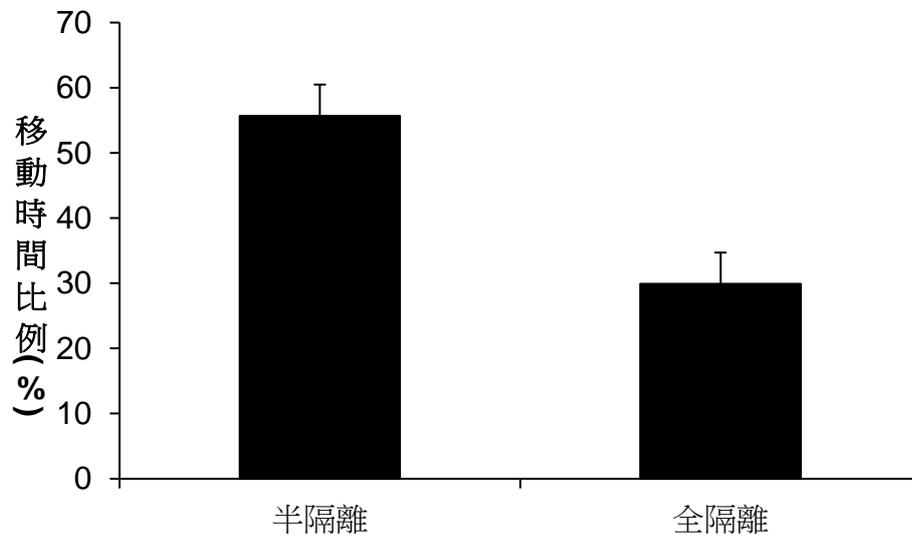
在相同的觀察時間內(20 分鐘)，半隔離組蟑螂的平均移動總和距離(62.20 公分)比全隔離組蟑螂的平均移動總和(36.15 公分)距離來得多(相差 26.05 公分)(圖十四)。



圖十四 全隔離組(n =20)與半隔離組(n=18)個體的移動總和距離(平均 ± 標準誤)。
兩組相比： $p = 0.0584$ (單尾 t 檢定)。

(二)、蟑螂的移動時間

在本實驗中發現，半隔離組的蟑螂會進行移動的時間比例(55.69%)比全隔離組(29.92%)更長，運動時間更持久(兩組相差 25.77%)(圖十五)，且達統計上的顯著差異。

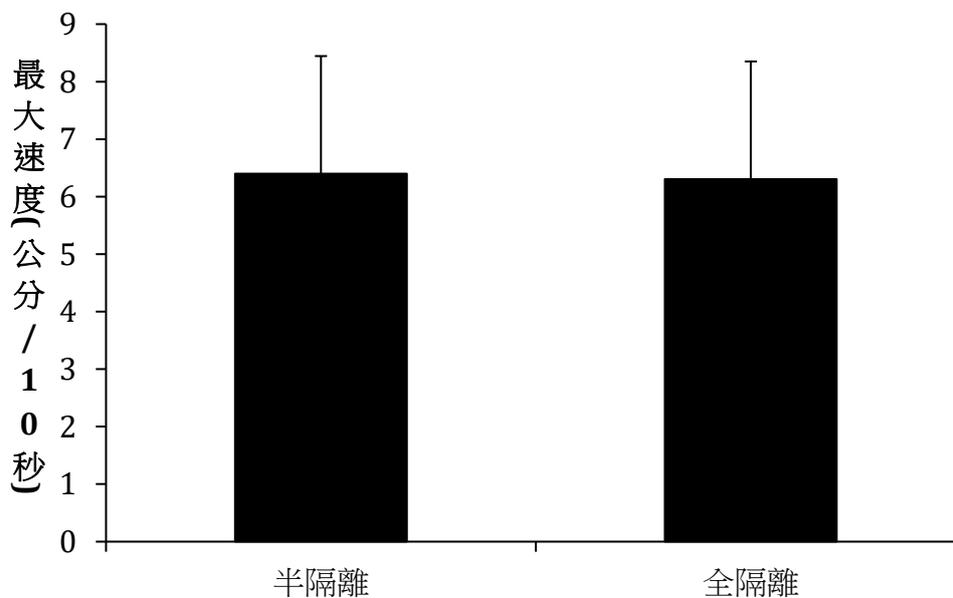


圖十五 全隔離組(n =20)與半隔離組(n=18)個體的移動時間比率(%，平均 ± 標準誤)。

兩組相比： $p = 0.001$ (單尾 t 檢定)。

(三)、蟑螂的最大速度

半隔離組蟑螂的在觀察期間進行移動的最大速度(6.40 公分/10 秒)與全隔離組蟑螂的最大速度(6.31 公分/10 秒)幾乎沒有差異(圖十六)。兩組相比，未達統計顯著標準。



圖十六 全隔離組(n =20)與半隔離組(n=18)個體的最大速度(平均 ± 標準誤)。

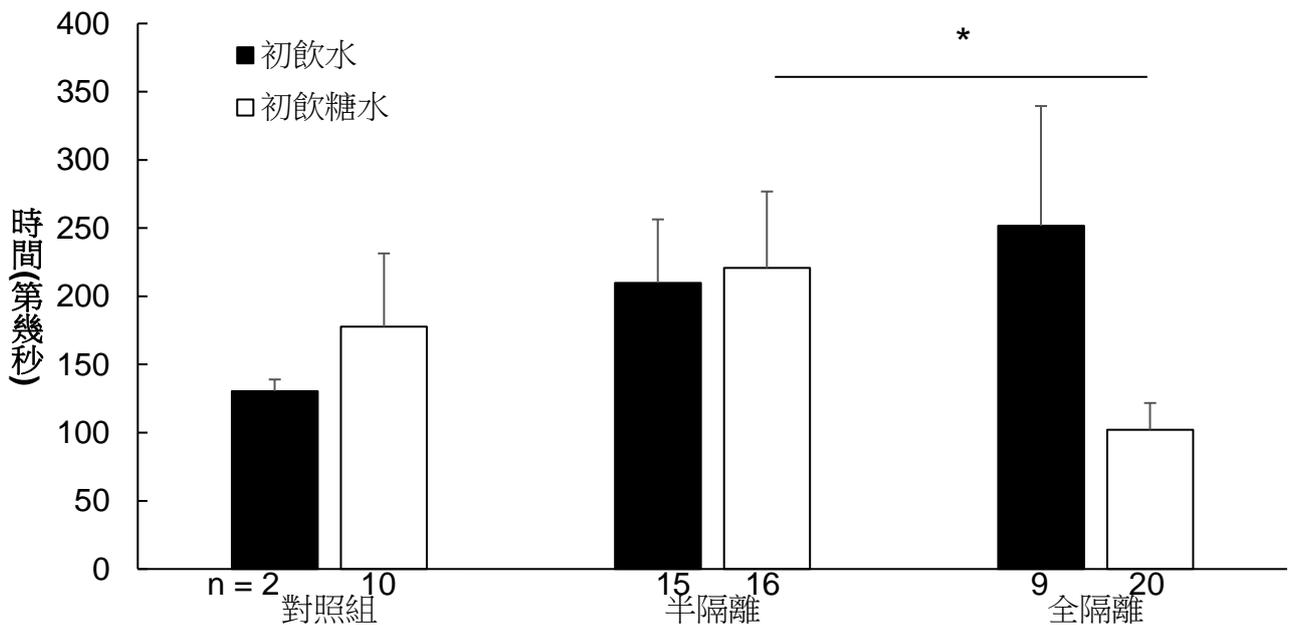
兩組相比：未達統計顯著標準 ($p > 0.05$ ，單尾 t 檢定)。

(四)、不同隔離程度的蟑螂對不同資源的攝取選擇的急迫性

以初飲水或飲糖水的時刻早晚，代表對於飲水或飲糖水需求的急迫性。飲水的急迫性在全隔離組與半隔離組間、全隔離組與對照組間、半隔離組與對照組間皆無明顯的差異，但隨著隔離程度增加而減少(圖十七)。而對於飲用糖水需求急迫性以全隔離組為最高，全隔離組與對照組間和半隔離組與對照組間並無明顯的差異，但全隔離組與半隔離組間對於飲用糖水的急迫性便相差甚多(圖十七)。

初飲水時刻：對照組：130.50 秒，半隔離組 209.87 秒，全隔離組 251.67 秒

初飲糖水時刻：對照組：177.60 秒，半隔離組 220.75 秒，全隔離組 102.15 秒



圖十七 半隔離組與全隔離組(n=23)初次飲水或飲糖水時間(秒，平均 ± 標準誤)。

初飲水的各組相比：皆未達統計顯著差異(單尾 t 檢定， $\alpha = 0.05$)。

初飲糖水的各組相比：*： $p < 0.05$ 。

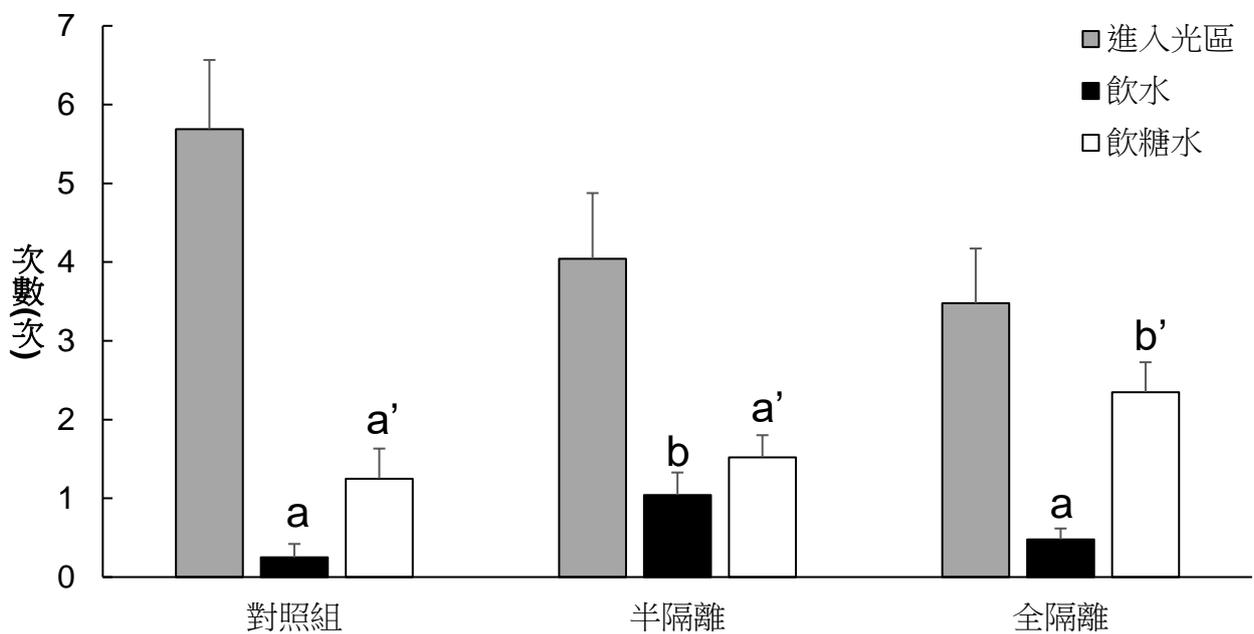
(五)、不同隔離程度的蟑螂在進入光區後所做的行為

在蟑螂進入光區以後，全隔離組與對照組進行的飲水次數沒有顯著差異，半隔離組與對照組進行的飲糖水次數也沒有顯著差異(圖十八)，半隔離組的飲水次數大於對照組/全隔離組，而全隔離組的飲糖水次數大於對照組/半隔離組(圖十八)。此外，進入光區的次數隨著隔離程度的增加而減少，飲糖水的次數則隨著隔離程度的增加而上升，飲水次數則以半隔離組為最多(圖十八)。

進入光區次數：對照組 5.69 次，半隔離組 4.04 次，全隔離組 3.48 次。

飲水次數：對照組 0.25 次，半隔離組 1.04 次，全隔離組 0.48 次。

飲糖水次數：對照組 1.25 次，半隔離組 1.52 次，全隔離組 2.35 次。



圖十八 對照組(n =16)、半隔離組(n =23)與隔全離組(n=23)個體進入光區、飲水與飲糖水次數(次，平均 ± 標準誤)。

各組相比：a 與 b 之間、a'與 b'之間達統計顯著差異(單尾 t 檢定， $\alpha= 0.05$)。

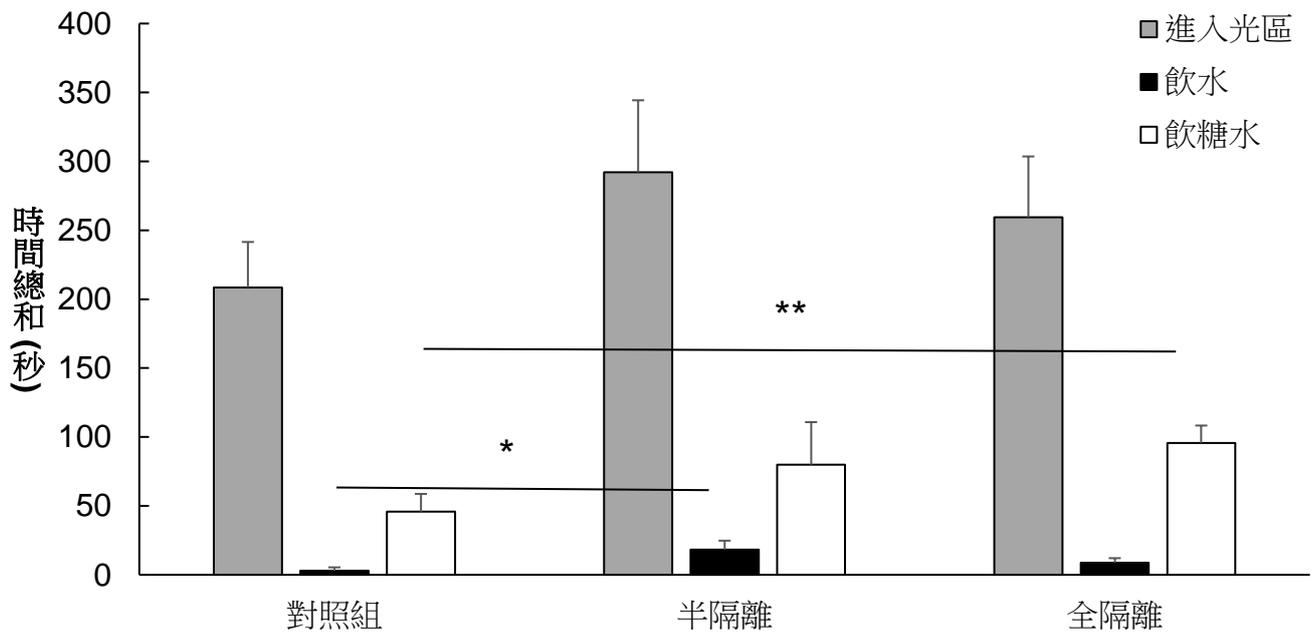
(六)、不同隔離程度的蟑螂在光區內攝取清水或糖水的時間

比較各組蟑螂在光區內進行攝取清水或糖水的總時間，在飲水的總時間指標中發現半隔離組多於對照組(兩組相差 15.28 秒)，而與全隔離組的飲水時間相差較小(兩組相差 9.93 秒)；對於飲糖水的總時間，全隔離組多於對照組(兩組相差 49.93 秒)，而與半隔離組相差較小(兩組相差 15.83 秒)(圖十九)。

進入光區時間：對照組 208.50 秒，半隔離組 292.04 秒，全隔離組 259.43 秒。

飲水時間：對照組 2.94 秒，半隔離組 18.22 秒，全隔離組 8.83 秒

飲糖水的時間：對照組 45.81 秒，半隔離組 79.91 秒，全隔離組 95.74 秒



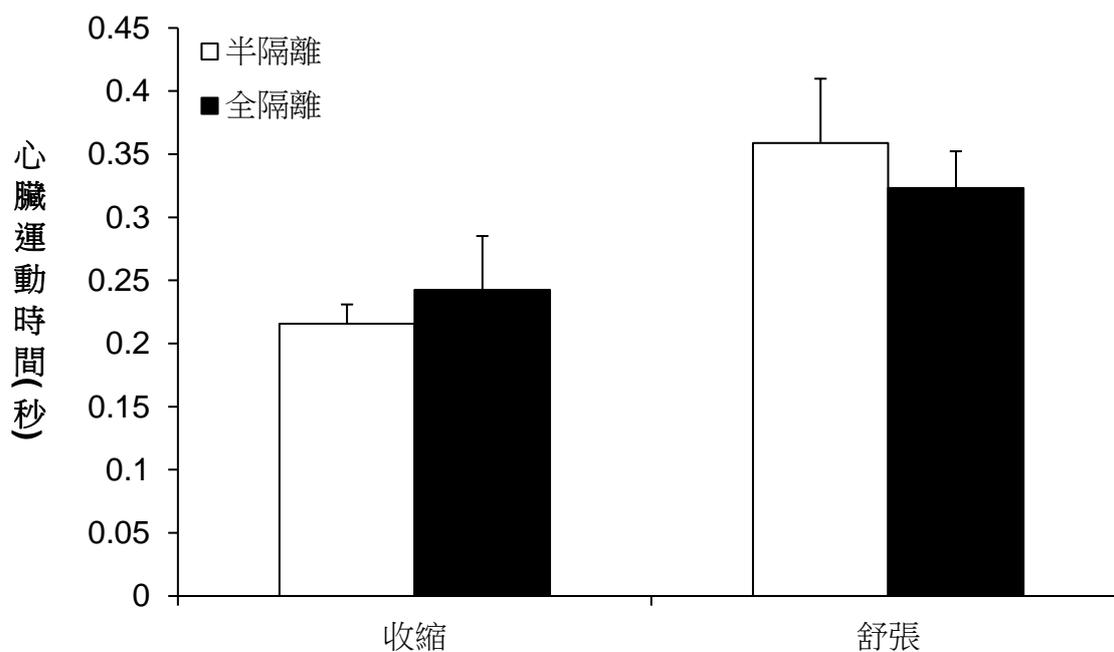
圖十九 對照組(n =16)、半隔離組(n =23)與隔全離組(n=23)個體進入光區、飲水與飲糖水總合時間(秒，平均 ± 標準誤)。

各組相比(單尾 t 檢定)：*： $p < 0.05$ 、**： $p < 0.01$ 。

三、不同隔離程度對蟑螂生理的效應

(一)、心臟運動的時間週期

全隔離與半隔離組蟑螂的心臟運動在收縮指標與舒張指標皆沒有明顯的差別，而兩組的心臟舒張時間皆長於收縮的時間(圖二十)。收縮時的心臟運動時間：半隔離組 0.22 秒，全隔離組 0.24 秒，兩組相差 0.2 秒；舒張時的心臟運動時間：半隔離組 0.36 秒，全隔離組 0.32 秒，兩組相差 0.4 秒。



圖二十 全隔離組(n = 8)與半隔離組(n = 8)個體心臟運動過程中收縮與舒張的時間(秒，平均 ± 標準誤)。

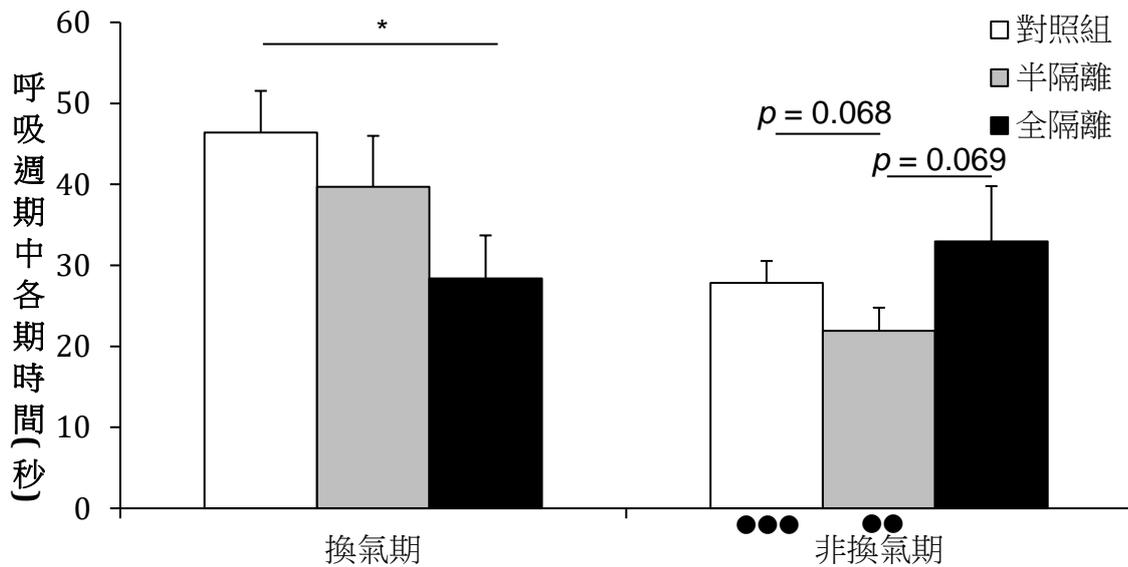
兩組相比：未達統計顯著標準 ($p > 0.05$ ，單尾 t 檢定)。

(二)、呼吸週期中換氣與非換氣期的時間

觀察各組蟑螂間換氣期與非換氣期的時間，除了全隔離組外，對照組與半隔離組的換氣期皆長於非換氣期；全隔離組的換氣期比對照組短；半隔離組的非換氣期長於對照組(圖二十一)。隨著隔離程度的增加，換氣期有逐漸下降的趨勢，而非換氣期在全隔離組達最長。

換氣期長度：對照組 46.38 秒，半隔離組 39.71 秒，全隔離組 28.38 秒。

非換氣期長度：對照組 27.82 秒，半隔離組 21.91 秒，全隔離組 32.96 秒。



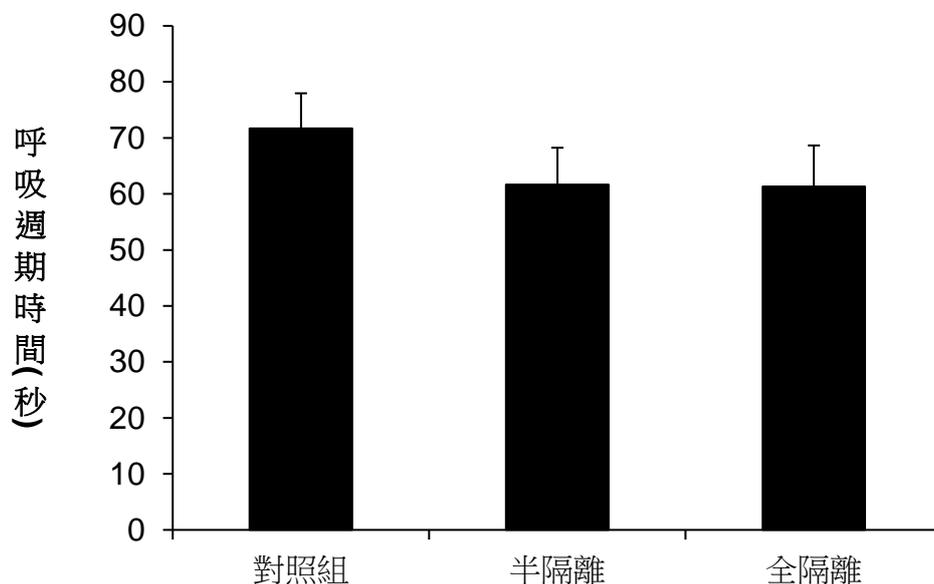
圖二十一 對照組(n = 8)、半隔離組(n = 8)與全隔離組(n = 8)呼吸週期中換氣期與非換氣期的時間(秒，平均 ± 標準誤)。

各組間相比：*： $p < 0.05$ (單尾 t 檢定)。

與換氣期相比：●●： $p < 0.01$ 、●●●： $p < 0.005$ (單尾配對 t 檢定)。

(三)、呼吸週期長度

計算蟑螂各組的呼吸周期，發現無論全隔離組與半隔離組間、全隔離組與對照組間，半隔離組與對照組間皆沒有明顯的差異(圖二十二)。對照組的呼吸周期為 71.67 秒；半隔離組的呼吸周期為 93.91 秒；全隔離組 72.95 秒。

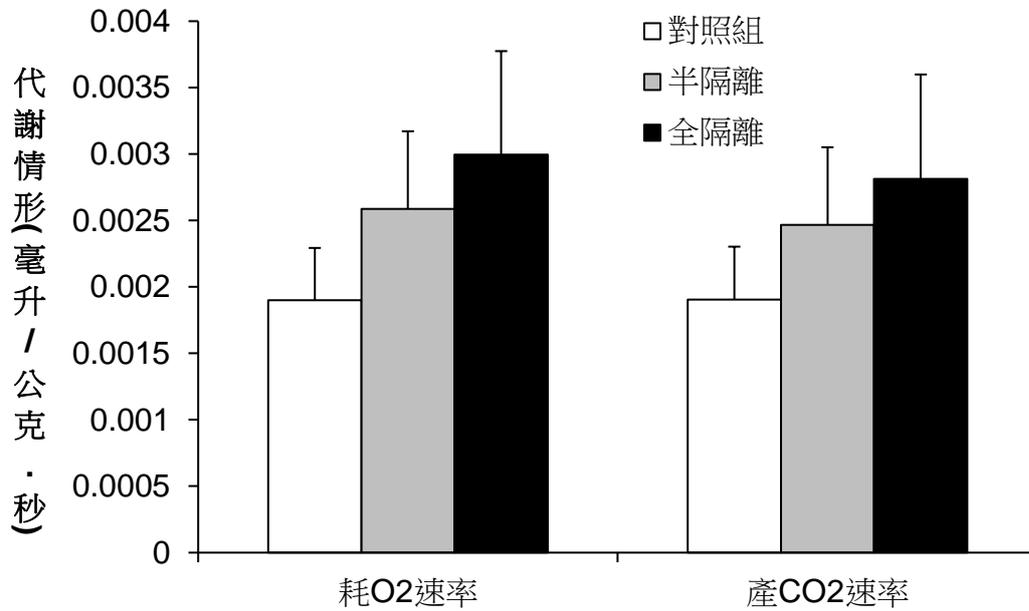


圖二十二 對照組(n = 8)、半隔離組(n = 8)與全隔離組(n = 8)呼吸週期時間(秒，平均 ± 標準誤)。

全隔離組與半隔離組相比：未達統計顯著標準 ($p > 0.05$ ，單尾 t 檢定)。

(四)、不同隔離程度的蟑螂代謝率

無論是蟑螂的耗氧速率，或者是產二氧化碳速率，在各組蟑螂間皆沒有達到統計上的顯著差異，耗氧速率分別為：對照組 0.0019 毫升公克·秒，半隔離組 0.0023 毫升公克·秒，全隔離組 0.0041 毫升公克·秒；產二氧化碳速率分別為：對照組 0.0019 毫升公克·秒，半隔離組 0.0022 毫升公克·秒，全隔離組 0.0040 毫升公克·秒(圖二十三)。

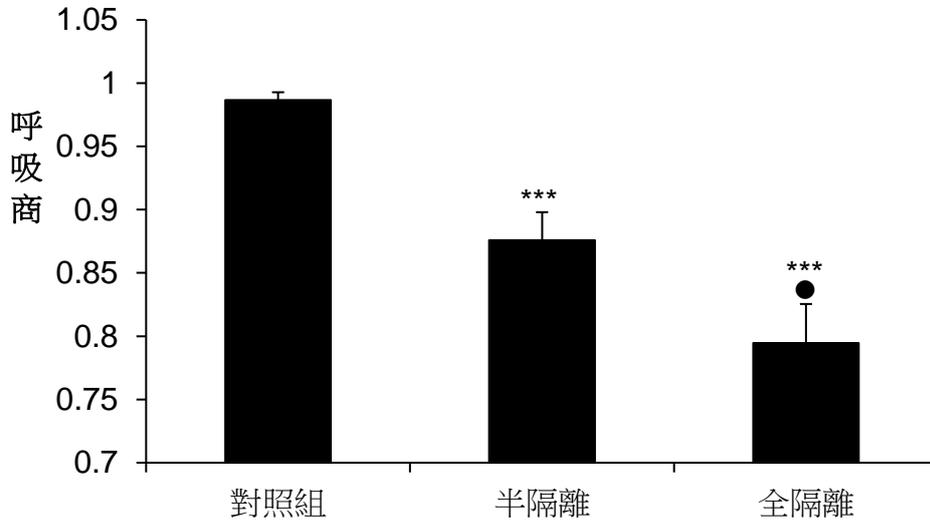


圖二十三 對照組(n = 8)、半隔離組(n = 8)與全隔離組(n = 8)耗 O₂ 與產 CO₂ 速率 (毫升公克.秒，平均 ± 標準誤)。

全隔離組與半隔離組相比：未達統計顯著標準 ($p > 0.05$ ，單尾 t 檢定)。

(五)、不同隔離程度之蟑螂的呼吸商

各組蟑螂的呼吸商的比較，半隔離組與對照組、全隔離組與對照組間皆達到統計上的顯著差異(圖二十四)，對照組的呼吸商為 0.99，半隔離組的呼吸商為 0.88，全隔離組的呼吸商為 0.79；並且隨著隔離程度的增加，美洲蟑螂的呼吸商逐漸下降。



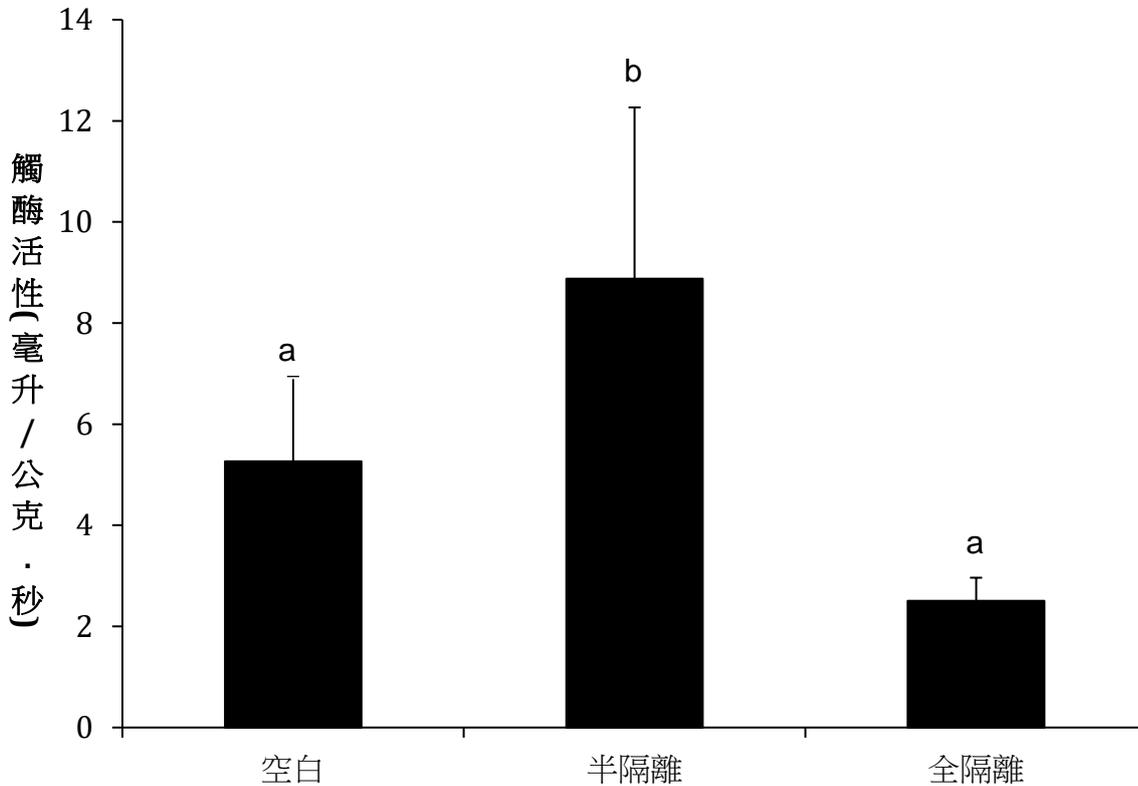
圖二十四 對照組(n = 8)、半隔離組(n = 8)與全隔離組(n = 8)的呼吸商比較(平均 ± 標準誤)。

與對照組相比：***：p < 0.005 (單尾 t 檢定)。

與半隔離組相比：•：p < 0.05 (單尾 t 檢定)。

(六)、不同隔離程度之蟑螂的脂肪體觸酶活性

比較蟑螂的脂肪體觸酶活性，全隔離組(2.50 毫升/公克·秒)與空白對照組(5.26 毫升/公克·秒)相差較少(相差 2.76 毫升/公克·秒)，未達統計上的顯著差異。而半隔離組(8.88 毫升/公克·秒)的脂肪體觸酶活性大於全隔離組(半隔離組高出全隔離組 6.38 毫升/公克·秒)與空白對照組(半隔離組高出空白對照組 3.62 毫升/公克·秒)(圖二十五)。

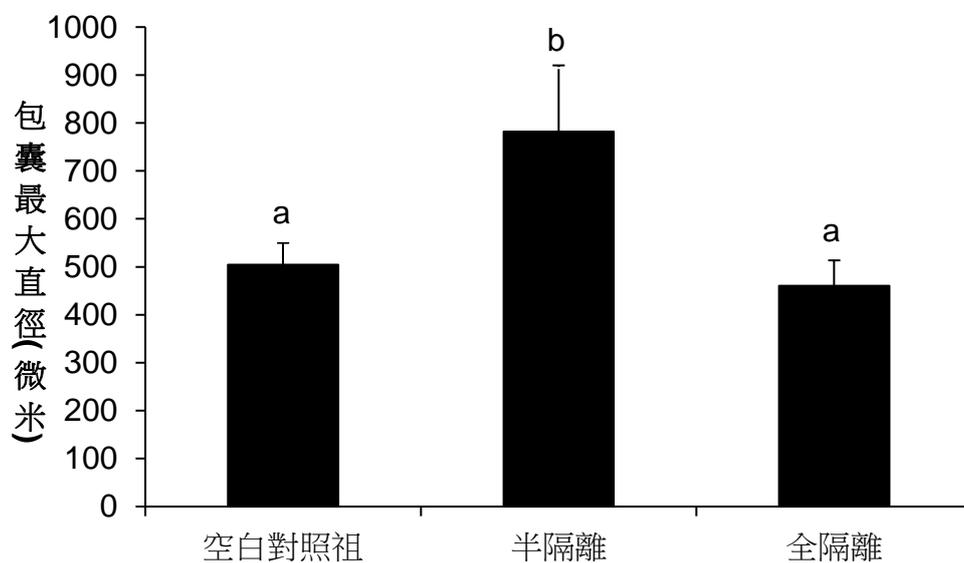


圖二十五 空白對照組(n = 13)、全隔離組(n = 13)與半隔離組(n = 10)蟑螂脂肪體的脂肪體觸酶活性比較(平均 ± 標準誤)。

各組相比：a 與 b 之間達統計顯著差異(單尾 t 檢定， $\alpha = 0.05$)。

(七)、不同隔離程度之蟑螂的包囊作用程度

對於蟑螂的免疫反應作用後包囊的直徑比較，全隔離組平均(460.46 微米)與空白對照組平均(504.37 微米)相差較小(相差 43.91 微米)。而半隔離組的平均包囊直徑(781.81 微米)大於全隔離組(高出 321.35 微米)與對照組(高出 277.44 微米)(圖二十六)。



圖二十六 空白對照組(n = 27)、全隔離組(n = 20)與半隔離組(n = 12)的包囊作用比較(平均 ± 標準誤)。

各組相比：a 與 b 之間達統計顯著差異(單尾 t 檢定， $\alpha = 0.05$)。

(八)、討論

本研究建立昆蟲的社會孤立動物模式，並發現社會孤立對美洲蟑螂的死亡率、行為表現(表二)與生理表現(表三)皆具有影響，證明了社會孤立的處置對非社會性昆蟲亦會產生效應。另，本研究也發現個體間的費洛蒙交流可減少社會孤立所帶來的效應，代表個體間的費洛蒙交流在昆蟲的社交互動中，扮演重要角色。

表二 全隔離與半隔離在與死亡率與行為指標的比較。

指標	死亡率	行為指標			
		移動距離	移動時間比例	飲水次數	飲糖水次數
全隔離 的效應 (與半隔離比)	↑	↓	↓	↓	↑

表三 全隔離與半隔離在生理指標的比較。

指標	生理指標				
	換氣期	非換氣期	呼吸商	脂肪體的 脂肪體觸酶 活性	包囊作用
全隔離 的效應 (與半隔離比)	↓	↑	↓	↓	↓

1. 社會隔離使昆蟲的死亡率增加

社會孤立是死亡的危險因素(Holt-Lunstad, 2015)，而在本實驗中亦發現即便對在非社會性昆蟲中，社會孤立可增加其死亡率，代表對昆蟲可產生負面的影響。

2. 社會隔離增加昆蟲對能量的消耗

經過完全性隔離(無法透過氣味與同伴相互溝通、交流)的蟑螂，會比能夠以靠氣味與同伴溝通、交流的蟑螂減少移動的距離，且移動的時距也比較短，盡量減少能量的耗損，但即便全隔離的蟑螂耗損的能量比較少，全隔離的蟑螂仍會比半隔離的蟑螂有更高的糖水需求。

並且經過完全性隔離的蟑螂會更有效率的取得資源，也會在最快的時間內取得糖水(表四)；而隨著隔離程度的增加，蟑螂會更善用在光區的時間，進行更多的有效資源的攝取行為(表四)，此舉動更顯著表示隔離壓力會提高蟑螂對能量的需求。

表四 全隔離、半隔離與對照組昆蟲在資源攝取行為的趨勢。

	對照組	半隔離	全隔離
進光區次數	↑	—	↓
飲糖水次數	↓	—	↑
飲糖水時間 進入光區時間	0.22	0.27	0.37

我們已知從飲食中獲得的葡萄糖會以支鏈多醣糖原或甘油三酯的形式儲存在體內以滿足未來的能量需求，且昆蟲會以脂肪細胞中的糖原和甘油三酯的形式作為主要能量儲備方式 (Estela, 2011)。從而發現社會孤立會增加蟑螂的能量消耗，所以蟑螂會減少需要消耗到能量的行為，且增加對能量的攝取。

由蟑螂的呼吸週期變化與探索行為之趨勢(表五)，我們更進一步的猜測，蟑螂只需要透過氣門呼吸，就能夠感受到同伴的存在，但又因為受到阻擋而看不見同類的存在，故蟑螂會增加其換氣期的時間，進而減少其非換氣期的時間，並且半隔離的蟑螂會相對增加他的探索行為試圖找到同類；而全隔離蟑螂在長期孤身一隻的情況下，社會孤立使牠的身體進入長期的備戰模式，所以全隔離的蟑螂需要儲存更多的能量以度過社會孤立的逆境。

表五 全隔離與半隔離蟑螂在呼吸週期與探索行為變化的趨勢

	換氣期	非換氣期	移動時間量	移動距離
全隔離	↓	↑	↓	↓
半隔離	↑	↓	↑	↑

3. 社會隔離使昆蟲較不利於長期生存

由全隔離的蟑螂之呼吸商變化，顯示此時蟑螂所代謝的主要物質為脂質，而半隔離的呼吸商表示其代謝葡萄糖與脂質。脂質對昆蟲而言是長期的代謝物質，產生的能量能夠長期提供，通常是在昆蟲準備進行長久的飛行時才會代謝脂質以貯備能量，而代謝脂質對受到社會孤立的蟑螂而言，揭示昆蟲正面對長期壓力，故需要貯備能量以面對高強度的逆境。再次證明社會孤立對昆蟲而言屬於逆境，會造成負面影響。且脂質轉變蛋白，當這些蛋白質轉變為逆境反應系統的一部分時，會導致抗病性降低(Adamo, 2016、2017)。已有科學家做實驗證明，社會隔離的刺激會使肝癌小鼠的免疫力，較沒有隔離的肝癌小鼠下降，死亡時間更快(Hui, 2005)。

在本實驗中發現全隔離組與半隔離組的脂肪體觸酶活性與包囊作用的免疫反應具有相同的趨勢(表六)。脂肪體觸酶活性的強度代表著昆蟲體內氧化反應的強弱，而氧化反應是昆蟲在進行免疫反應時體內常見的化學反應。在無脊椎動物中，先天免疫系統的運動細胞使高能的活性氧產生是一種對抗病原體的通用方法，此反應最常由巨噬細胞作用(Chainy, 2016)。活性氧也是由許多吞噬細胞針對膜擾動而產生的物質，例如：受體—配體相互作用和吞噬作用，吞噬細胞憑藉其抗菌特性保護這些細胞免受傳染病的侵害。免疫系統會受到氧化應激能力的限制(Jacqueline, 2015)，全隔離組的蟑螂氧化壓力之脂肪體觸酶活性相對半隔離組下降，而使象徵免疫反應的包囊作用相對半隔離組蟑螂下降，揭示受到社會隔離的蟑螂在未來面對疾病的威脅時，會更不利於戰勝病原體。

表六 全隔離與半隔離組昆蟲在脂肪體觸酶活性與免疫反應指標的趨勢。

	觸媒活性	免疫反應
全隔離	↓	↓
半隔離	↑	↑

4. 昆蟲的社會隔離與哺乳動物之社會隔離比較

在 2018 年風靡全台，導致交通亂象的手機遊戲「Pokemon Go」，最初設計的目的是為了幫助社會隔離的宅男女們，軟體開發商 Niantic 的執行長 John Hanke 在接受採訪時提到 Pokemon 的三大設計理念：運動、用新的視野看世界以及與人互動。由此可知，在人類的社會隔離現象中，也會減少運動和與其他同類互動的行為，正與本實驗所做的探索行為指標呈現的結果相同，表示無論是在昆蟲或是哺乳動物中，社會隔離對於其運動的行為指標都有相同的效果。

人類和其他社會性哺乳動物體驗到與群體隔離是一種壓力，對他們的總體福祉和身體健康產生負面影響。被孤立的人變得孤獨、抑鬱和焦慮，並遭受免疫系統的削弱和整體健康受損(Scharf, et al., 2021)。而在本研究中表明，社會孤立也會使蟑螂的免疫能力下降、更容易受到病原體的侵害，這與對其他社會性動物的研究結果一致，社會隔離後免疫系統會減弱。

5.由全隔離與半隔離組蟑螂行為與生理指標反應的差異看如何減緩社會孤立帶來的影響

根據本實驗的結果，在受到隔離壓力的情況下，半隔離組蟑螂的負面反應會較輕，代表即使個體間無法直接進行社會互動，但若有其他個體費洛蒙的刺激，可減緩社會孤立的逆境效應。故本實驗認為，以人類生活為例，在不能接觸朋友、家人的情況，給予氣味的輔助(如人的體香、嬰兒的奶香)能夠減緩隔離壓力的負面影響。例如，可透過提供受社會隔離者、或者罹患分離焦慮症(Separation Anxiety Disorder, SAD)者能散發體香之擬真玩偶、機器人，以協助其面對社會孤立所造成的生理負擔。或是尋找其他人類社會互動的刺激物，以產生類似蟑螂間的費洛蒙刺激，以減緩社會隔離逆境所造的傷害。

肆、結論與應用

一、本研究建立昆蟲的社會孤立動物模式，並發現社會孤立對美洲蟑螂的死亡率、行為表現與生理表現皆具有影響。

二、社會孤立使蟑螂的死亡率上升

三、社會孤立改變蟑螂的行為表現

(一)、社會孤立會減少蟑螂的探索行為，使蟑螂運動的時間與距離降低，但不影響每單位時間內蟑螂的速度

(二)、社會孤立使蟑螂增加對能產生較高能量之食物的需求

四、社會孤立改變蟑螂的生理表現

(一)、社會孤立不影響蟑螂的心跳率

(二)、社會孤立不影響蟑螂的呼吸週期、耗氧速率與產二氧化碳速率

(三)、社會孤立使蟑螂的呼吸商降低，且社會隔離的強度與蟑螂呼吸商的大小呈負相關

(四)、社會孤立使蟑螂代謝脂質作為能量來源，進入長期備戰狀態

(五)、社會孤立使蟑螂的脂肪體觸酶活性下降

(六)、社會孤立使蟑螂的免疫反應下降

五、無論是否為社會性動物，社會孤立皆會造成生存上的負面影響。

伍、參考資料

- Abbott A. 2021. COVID's mental-health toll: how scientists are tracking a surge in depression. *Nature*. 590(7845): 194-195.
- Adamo S. A. 2017. Stress responses sculpt the insect immune system, optimizing defense in an ever-changing world. *Dev. Comp. Immunol.* 66: 24-32.
- Adamo, S. A. 2016. Stress responses sculpt the insect immune system, optimizing defense in an ever-changing world. *Dev. Comp. Immunol.* 66:24-32.
- Begni, V., Sanson, A., Pfeiffer, N., Brandwein, C., Inta, D., Talbot, S. R., Riva, M. A., Gass, P., & Mallien, A. S. 2020. Social isolation in rats: Effects on animal welfare and molecular markers for neuroplasticity. *PloS one*, 15(10), e0240439.
- Boulay, R, Quagebeur, M, Godzińska, E. and Lenoir, A. 1999. Social isolation in ants: evidence of its impact on survivorship and behavior of the ant *Camponotus fellah* (Hymenoptera: Formicidae). *Sociobiology*. 33: 111-124.
- Boulay, R. and Lenoir, A. 2001. Social isolation of mature workers affects nestmate recognition in the ant *Camponotus fellah*. *Behav. Processes*. 55(2): 67-73.
- Chainy, G. B., Paital, B. and Dandapat, J. 2016. An Overview of Seasonal Changes in Oxidative Stress and Antioxidant Defence Parameters in Some Invertebrate and Vertebrate Species. *Scientifica*. 2016: 6126570.
- Estela, L. and Jose, L. 2011. Insect fat body: energy, metabolism, and regulation. *Annu. Rev. Entomol.* 55: 207-225.
- Holt-Lunstad, J., Smith, T. B., Baker, M., Harris, T. and Stephenson, D. 2015. Loneliness and social isolation as risk factors for mortality: a meta-analytic review. *Perspect. Psychol.Sci.* 2015;10(2):227-237.
- Hui, L. and Zhun, W. 2005. Effects of social isolation stress on immune response and survival time of mouse with liver cancer. *World J Gastroenterol.* 11(37): 5902-5904.
- Jaqueline, B., Leonardo, T., Fábio, M. and Elisabeth U. 2015. The immune system is limited by oxidative stress: Dietary selenium promotes optimal antioxidative status and greatest immune defense in pacu *Piaractus mesopotamicus*. *Fish Shellfish Immunol.* 47(1):360-7.
- Koto A, Mersch D, Hollis B, Keller L. 2015. Social isolation causes mortality by disrupting energy homeostasis in ants. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 69: 583-591.
- Krishnan, V. and Nestler, E. J. 2011. Animal models of depression: molecular perspectives. *Curr. Top Behav. Neurosci.* 7: 121-147.
- Li, Y., Wang, S., Liu, Y., Lu, Y., Zhou, M., Wang, S. and Wang, S. 2020. The Effect of Different Dietary Sugars on the Development and Fecundity of *Harmonia*

axyridis. *Front. Physiol.* 11: 574851.

- Lihoreau, M., Brepson, L. and Rivault, C. 2009. The weight of the clan: even in insects, social isolation can induce a behavioural syndrome. *Behav. Processes.* 82(1): 81-84.
- Pham-Huy, L. A., He, H., & Pham-Huy, C. 2008. Free radicals, antioxidants in disease and health. *International journal of biomedical science. I. JBS.* 4(2): 89-96.
- Qingzhong, W., Matthew, A., Kevin, P. and Yogesh, D. 2018. The Recent Progress in Animal Models of Depression. *ScienceDirect.* 77(3): 99-109.
- Scharf, I., Stoldt, M., Libbrecht, R., Höpfner, A. L., Jongepier, E., Kever, M. and Foitzik, S. 2021. Social isolation causes downregulation of immune and stress response genes and behavioural changes in a social insect. *Mol. Ecol.* 30(10): 2378-2389.
- Sherman, B. L. 2008. Separation anxiety in dogs. *Compend Contin Educ Vet.* 30(1): 27-42.
- Stevenson, P. A. and Rillich, J. 2013. Isolation associated aggression--a consequence of recovery from defeat in a territorial animal. *PloS one.* 8(9): e74965.
- Teo, A. R., Markwardt, S. and Hinton, L. 2019. Using Skype to Beat the Blues: Longitudinal Data from a National Representative Sample. *Am. J. Geriatr. Psychiatry.* 27(3): 254-262.
- Yan Li, Shasha Wang, Yongkang Liu, Yuting Lu, Min Zhou, Su Wang, and Shigui Wang. 2020. The Effect of Different Dietary Sugars on the Development and Fecundity of *Harmonia axyridis*. *Front Physiol.* 2020; 11: 574851.
- 吳季昫、蔡 OO，2017。認識身旁的小傢伙(19)探討昆蟲免疫系統之敵我辨識與記憶效應等性質的實驗方法。科學教育月刊，398，25-38。
- 張家銘，2009。正視憂鬱症所造成的社會經濟負擔。台灣憂鬱症防治協會。
- 黃瑜緹、施雯文、蔡 OO，2019。認識身旁的小傢伙(23)－觸酶在維持昆蟲之氧化還原恆定的生理角色，科學教育月刊，418，30-44
- 趙事柔、吳雨璇、蔡 OO，2019。認識身旁的小傢伙(22)－利用免疫抑制藥物探討昆蟲包囊作用的分子機制。科學教育月刊，416，29-45。
- 劉茲妤、陳郁婷、蔡 OO，2016。認識身旁的小傢伙(21)－酒精對蟑螂行為與生理之 Hormesis 與其他效應的探討。科學教育月刊，415，14-33。
- 蔡 OO，2014。認識身旁的小傢伙(14)－昆蟲包囊作用的觀察。科學教育月刊，371，41-47。

【評語】 050004

1. 以美洲蟑螂為實驗模式物種，以隔絕費洛蒙交流方式進行社會孤立動物模式，來研究行為與生理的反應。本研究研究主題明確，清楚聚焦，且具原創性。
2. 實驗設計流程佳，惟在量測移動距離部分，因為不論是全隔離或是半隔離狀態，活動空間皆有限，是否足夠代表宜確認。
3. 每次試驗 N 值都不同，應說明如何選擇實驗樣本數，死亡率為包含對照組須說明。
4. 在蟑螂死亡率部分，全隔離和半隔離組間存在差距為 7.4%，如何評估此數據是否具有顯著性。
5. 報告相關統計顯著性資訊須一致，如圖十四的 p 值以 0.0584 顯示，圖十七、二十五、二十六的部分，出現「單尾 t 檢定， $\alpha = 0.05$ 」。
6. 實驗結果二的(一)至(三)的實驗設計皆為二組(全隔離和半隔離組)，(四)至(六)的實驗設計則為三組(對照組、全隔離和半隔離組)，請說明此處實驗設計的原因，實驗結果三的部分有上述相同情形。

7. 在死亡率的實驗部分，缺乏對照組實驗，此部分宜在實驗設計時規劃設計。