

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 動物與醫學科

(鄉土)教材獎

052012

蜂情萬種-探討五種蚜蟲寄生蜂與四種蚜蟲的交互關係

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者： 高二 陳柏睿 高二 曹 沁 高二 呂侑倫	指導老師： 謝佳昌
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：蚜蟲、寄生蜂、生物數量模擬

摘要

本研究主要了解(1)五種蚜蟲寄生蜂對蚜蟲的偏好(2)寄生蜂之間的競爭關係(3)寄生蜂與蚜蟲族群的動態。不同種類的寄生蜂對蚜蟲種類有不同的偏好，細長脛蚜繭蜂偏好棉蚜和稻麥蚜。岐阜蚜繭蜂偏好馬鈴薯蚜及偽菜蚜。廣三叉蚜繭蜂偏好棉蚜。異足蚜小蜂無明顯偏好。柯曼尼蚜繭蜂偏好棉蚜。同種蚜蟲中，寄生蜂偏好高齡期個體。不同種類寄生蜂演化出不同層次的競爭力以共存於自然界中，成蟲或幼蟲都可能出現競爭現象。競爭的結果使寄生蜂傾向利用不同寄主，亦演化出不同的寄主專一性。最後以 Nicholson-Bailey 模型為基準模擬寄生蜂與蚜蟲的數量關係。透過模擬結果能精確估計寄生蜂數量以達到最佳防治效率。寄生蜂數量充足時，可將寄生蜂分批施放以加速防治蚜蟲。

壹、前言

一、研究動機

蚜蟲為田間常見的害蟲之一，嚴重危害到植物的生長，現在一些農場漸漸朝有機的方式種植作物，利用天敵預病害蟲。國外早已有生物防治公司，例如荷蘭 Koppert 等，販售寄生蜂來抑制蚜蟲族群的生長，且針對不同種蚜蟲會使用不同種寄生蜂。我們觀察到不同種寄生蜂對不同蚜蟲會進行不同頻率的尋找、攻擊與寄生行為，寄生成功的機率及寄生蜂與蚜蟲族群之間的數量增減的週期也有所差異。另外，市面上也有販售兩種寄生蜂混合使用的生物防治產品，可用以探討寄生蜂間的相互關係。

二、文獻探討

寄生蜂產卵時會選擇寄主的齡期與大小，且當寄生蜂觸及蚜蟲時，蚜蟲有移動逃避或下落躲避攻擊的習性（劉，2010）。

在自然生態系統中，兩種寄生蜂以同一種昆蟲作為共同寄主的現象十分常見，因此寄生蜂之間更易於發生以搶佔資源為目的的種間競爭(Harvey et al., 2013)。此外，蚜蟲寄生蜂間存在競爭，且可發生在搜索寄主的成蜂之間的外競爭，亦可發生於同一寄主體內同時發育的幼蟲之間的內競爭（徐等，2014）。外競爭常被成蟲搜尋寄主蚜蟲的能力所影響（Godfray, 1994; Ardeh et al., 2005; Magdaraog et al., 2013; Feng et al., 2015）；內競爭則透過不同種寄生蜂幼蟲間的生理抑制及物理攻擊能力所主導（Harvey et al., 2013）。

貳、實驗目的

一、寄生蜂與蚜蟲間的關係為何？

(一) 探討寄生蜂對蚜蟲的寄生偏好

1. 寄生蜂的寄生偏好是否受蚜蟲種類影響？
2. 寄生蜂的寄生偏好是否受蚜蟲齡期影響？

(二) 探討寄生蜂的寄生成功率

二、不同寄生蜂間的競爭關係為何？

(一) 不同寄生蜂的外競爭（成蟲競爭）

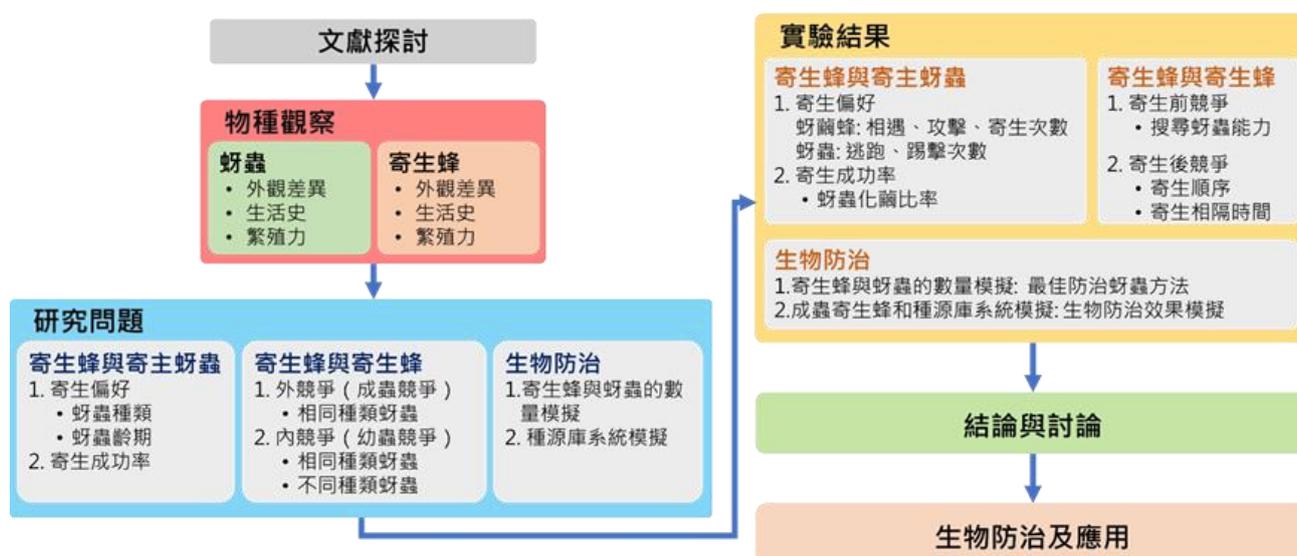
(二) 不同寄生蜂的內競爭（幼蟲競爭）

三、探討寄生蜂對於生物防治之應用

(一) 探討寄生蜂數量與蚜蟲數量週期之間的關係

(二) 種源庫系統模擬

參、 實驗架構



肆、 實驗物種介紹

一、蚜蟲

(一) 生活史

蚜蟲由 1 齡若蟲到成蟲需 5~6 天，過程中經過 4~6 個齡期，因種類不同而有差異。平均一年可生育 10~30 個世代，成蟲平均壽命約一個月，在族群密度過高時會產生有翅型蚜蟲以利遷徙。

(二) 繁衍方式

蚜蟲可行有性生殖及無性生殖，可在一年間輪流交替。有性生殖為雌蚜和雄蚜交配產卵，無性生殖為孤雌生殖，其後代皆為雌性。且胚胎在母體的卵巢中發育成熟，母體可直接生下一齡雌性若蟲。小蚜蟲體內的卵已開始發育，因此幼蟲長成成蟲，即可立即生下一代，使蚜蟲族群得以快速成長造成農業損失。

(三) 農業損失

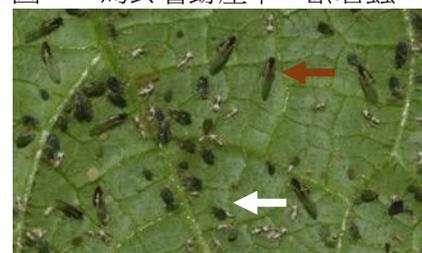
不同種類蚜蟲有不同寄主植物，有些蚜蟲甚至可以寄生多科植物。蚜蟲繁殖快速，且能吸食汁液分泌蜜露使黴菌容易在植物上孳生，且散播病毒，造成植物的生長狀況不佳。

(四) 實驗物種

實驗選用四種蚜蟲，棉蚜、馬鈴薯蚜、偽菜蚜、稻麥蚜，前三種為現在農業上嚴重之害蟲，稻麥蚜為目前種源庫系統常採用的蚜蟲。各蚜蟲從埔里地區農場取得，並使用黃瓜、小白菜、麥草等植物對應適合之蚜蟲飼養繁殖(圖一至三)。此四種蚜蟲之特徵簡介(表一)。



圖一、馬鈴薯蚜產下 1 齡若蟲



圖二、有翅型(紅)與無翅型(白)棉蚜



圖三、在黃瓜上大量繁殖的棉蚜

表一、實驗中使用的蚜蟲介紹

俗名	棉蚜	馬鈴薯蚜	偽菜蚜	稻麥蚜
學名	<i>Aphis gossypii</i>	<i>Aulacorthum solani</i>	<i>Lipaphis erysimi</i>	<i>Rhopalosiphum padi</i>
照片				
寄主植物	茄子、小黃瓜等	彩椒、馬鈴薯等	小白菜、高麗菜等	小麥、大麥等
簡介	體長為 1.0~1.5mm 觸角為身體一半長 腹管黑青色 尾片青色	體長為 1.5-2.5mm 觸角比身體稍長 腹管末端深褐色 尾片白色	體長為 1.4-2.4 mm 觸角為身體一半 尾片與腹管深色 背部白粉成網狀紋路	體長為 1.2-1.8mm 觸角為身體一半 尾片與腹管深色 腹部末端紅褐色

二、寄生蜂

(一) 生活史

寄生蜂於 4~6 天間化繭，10 天左右可完成整個幼期的發育並羽化成蜂，大多數種可活 5~22 天，其平均產出 200~900 粒卵，依種類有所差異（劉等，1989）。

(二) 寄生行為

蚜蟲本身及其所分泌之蜜露會吸引飛行之寄生蜂成蟲前來搜尋寄主蚜蟲（Bouchard and Cloutier, 1984; Budenberg, 1990; Budenberget al, 1992）。寄生蜂搜尋時，用觸角尋找蚜蟲。當找到寄主先以觸角敲擊蚜蟲背部，若發現蚜蟲合適，將產卵管插入蚜蟲腹部，產卵時間依種類而不同，蚜繭蜂大約 1 至 2 秒，蚜小蜂約需 30 秒至 5 分鐘。

(三) 生物防治應用

生物防治為利用自然界中的天敵把有害生物族群壓制在較低密度之下，使這些有害生物不致造成危害。寄生蜂是其中被用來使用的常見物種之一，國外許多生物防治公司也推出商品販售，利用不同寄生蜂偏好蚜蟲種類不同，使特定種類蚜蟲受到抑制(圖四)，農民即可按照其作物上的蚜蟲選擇不同種類的寄生蜂。

(四) 實驗物種

臺灣經濟作物上採得的蚜繭蜂種類約有四十餘種，以 *Aphidius*, *Ephedrus*, *Lipolexis*, *Lysiphlebus*, *Praon*, *Trioxys* 七屬為主（劉等，1975），而我們實驗使用之蚜繭蜂分屬其中三科。蚜繭蜂由田間採集蚜繭蜂之繭與成蟲，並帶回實驗室進行養殖(圖五)。臺灣已發現蚜小蜂科 (*Aphelinidae*) 有 10 屬，而實驗中使用的蚜小蜂物種屬於蚜小蜂屬 (*Aphelinus*) 的異足蚜小蜂 (*A. varipes*)。蚜小蜂由校園中採集，並帶回實驗室繁殖(圖六)。此五種寄生蜂之特徵簡介如(表二)。



圖四、蚜蟲木乃伊(箭頭處)



圖五、柯曼尼蚜繭蜂寄生棉蚜



圖六、異足蚜小蜂搜尋棉蚜

表二、實驗中所使用的五種寄生蜂簡介

俗名	細長脛蚜繭蜂	岐阜蚜繭蜂	廣三叉蚜繭蜂	異足蚜小蜂	柯曼尼蚜繭蜂
學名	<i>Lipolexis gracilis</i>	<i>Aphidius gifuensis</i>	<i>Trioxys communis</i>	<i>Aphelinus varipes</i>	<i>Aphidius colemani</i>
體型	約 2.2cm	約 2.9cm	約 1.5cm	約 0.8cm	約 2.3cm
成蟲					
特徵	體色呈亮橘色 背部有黑色斑 腹部橘褐相間 產卵管細長	體色呈暗橘色 胸部背側有暗 褐色斑塊 產卵管粗短	體色黑色 腹部有深淺條紋 末端為淺褐色 產卵管細短	體色黃色 頭胸部黑色 腹前半為淺黃 產卵管細長	體色黑色 腹部有明顯黃黑 相間的紋路 產卵管粗短

伍、 研究過程與方法

一、 蚜蟲飼養與繁殖

(一) 寄主植物：

1. 棉蚜：小黃瓜
2. 馬鈴薯蚜：小白菜
3. 偽菜蚜：小白菜
4. 稻麥蚜：小麥

(二) 飼養方式：以盆栽種植寄主植物(圖七)，將田間或野外採集到的蚜蟲放於植物上繁殖。



圖七、栽培盆種植寄主植物

二、 寄生蜂飼養與繁殖成蟲飼養及交配：

(一) 以栽培盆的植物養植寄主蚜蟲。

(二) 將野外採得寄生蜂與長有寄主蚜蟲的植物放入洗衣網，繁殖寄生蜂(圖八)。

(三) 每日確認寄生蜂幼蟲化繭狀況。

(四) 當寄生蜂羽化時，當日立即使用吸蟲管(圖九)收集成蟲。

(五) 將剛羽化出的成蟲，以吸蟲管集中於離心管內，並餵食 20% 糖水，經 1 天，確保其進行交配後，再取出進行實驗。



圖八、利用洗衣網保護植物，繁殖蚜蟲與寄生蜂

三、 蚜蟲生活史觀察(實驗設計如表三**蚜蟲生活史**所示)

(一) 取成蟲 5 隻於寄主植物葉片上，置於塑膠盒(11.6cm x 7.3cm x 4.6cm)中(每 1 盒 1 隻)。

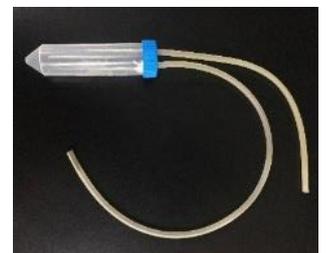
(二) 每日將出生的 1 齡若蟲取出，置於新的飼養環境(每 1 盒 1 隻)。

(三) 每日清理飼養環境，並適時更換寄主葉片。

(四) 觀察脫皮，記錄四種蚜蟲終齡齡期及每一齡所需天數(圖十)。

(五) 記錄成蟲每天產生的蚜蟲數量，記錄其繁殖力。

(六) 測量不同種類蚜蟲成蟲體長。



圖九、自製吸蟲管



圖十、馬鈴薯蚜及換齡時蛻下的皮(白色箭頭處)

四、寄生蜂生活史觀察(實驗設計如表三**寄生蜂生活史**所示)

- (一) 繁殖寄生蜂時，觀察其每日羽化數量。
- (二) 觀察蚜蟲體內的寄生蜂幼蟲在寄生後第幾日化繭並記錄。
- (三) 給予寄生蜂適當生存環境，觀察其存活天數。
- (四) 測量不同種類寄生蜂體長。

五、寄生蜂對蚜蟲的偏好(實驗設計如表三**寄生偏好前測實驗**、**寄生偏好實驗**所示)

(一) 蚜蟲準備

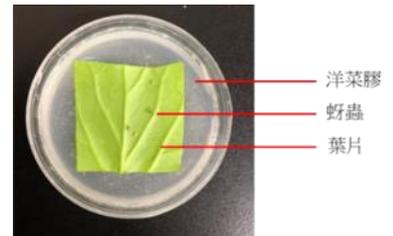
以洋菜膠(濃度 0.7%、厚 0.9cm)將寄主葉片(3cm×3cm)黏附於培養皿中(直徑 5.5cm、高 1.3cm)。將實驗蚜蟲放置於葉片上(圖十一)。

(二) 寄生蜂準備方式(每隻雌蜂只用於一次測試)

1. 將剛羽化的寄生蜂吸入吸蟲管中，使其交配。
2. 將 20%糖水滴滴至衛生紙上供寄生蜂吸食。
3. 隔天分離出交配後的雌蜂進行實驗。

(三) 實驗進行

1. 將寄生蜂放入放有蚜蟲之培養皿中 20 分鐘。
2. 觀察寄生蜂對不同蚜蟲的寄生行為，了解寄生蜂對不同蚜蟲之偏好。



圖十一、放有蚜蟲的培養皿

六、寄生蜂寄生成功率(實驗設計如表三**寄生成功率**所示)

(一) 蚜蟲與寄生蜂準備

取成蟲 5 隻於寄主植物葉片上，置於塑膠盒(11.6cm x 7.3cm x 4.6cm)中(圖十二)，寄生蜂準備如偏好實驗。

(二) 實驗進行

1. 將寄生蜂放入放有蚜蟲之塑膠盒中 120 分鐘。
2. 觀察數天後蚜蟲化繭的數量，了解不同寄生蜂的寄生成功率。



圖十二、塑膠盒中放置寄主植物

七、寄生蜂間的外競爭(實驗設計如表四所示)

(一) 蚜蟲與寄生蜂準備

準備方式與寄生成功綠實驗相同。

(二) 實驗進行

1. 將寄生蜂放入放有蚜蟲之塑膠盒中 30 分鐘。
2. 比較五種寄生蜂對三種蚜蟲在相同時間內的寄生成功數，了解寄生蜂的外競爭能力。

八、寄生蜂間的內競爭(實驗設計如表五所示)

(一) 蚜蟲與寄生蜂準備：準備方式與寄生偏好實驗相同。

(二) 實驗進行

1. 將 A 寄生蜂放入培養皿中，確認其寄生每一隻蚜蟲。
2. 將蚜蟲靜置 0 或 24 小時。
3. 將 B 寄生蜂放入培養皿中，確認其寄生每一隻蚜蟲。
4. 觀察蚜蟲化繭數量，分別計算 A 與 B 寄生蜂繭的數量，了解寄生蜂的內競爭能力。

九、Nicholson-Bailey 模型模擬結果與實際情況的比較

(一) 實驗物種準備：以 8 隻柯曼尼蚜繭蜂與 250 隻馬鈴薯蚜模擬以 1:30 施放的種源庫系統。

(二) 實驗進行：記錄每日的蚜蟲與寄生蜂數量，並與模擬結果比較。

表三、蚜蟲生活史、寄生蜂生活史、寄生偏好、寄生成功率實驗分組及實驗方法 (寄生成功率實驗採用寄生蜂偏好之蚜蟲進行實驗)

實驗項目	實驗物種		實驗時間	記錄項目	樣本數	每組樣本	實驗動物總數	統計分析	
蚜蟲生活史	稻麥蚜、馬鈴薯蚜、偽菜蚜、棉蚜		一週	脫皮時間、脫皮次數 繁殖力(k)、成蟲存活天數 蚜蟲體長	10 組	1 隻	40 隻		
寄生蜂生活史	柯曼尼蚜繭蜂、細長脛蚜繭蜂、 岐阜蚜繭蜂、廣三叉蚜繭蜂、 異足蚜小蜂		二週	存活天數、寄生能力(L) 化繭時間(L _i)、羽化時間(L _e) 寄生蜂體長	5 組	10 隻	250 隻		
寄生偏好 前測實驗	柯曼尼蚜繭蜂、 細長脛蚜繭蜂、 岐阜蚜繭蜂、 異足蚜小蜂	棉蚜、 馬鈴薯蚜、 偽菜蚜、 稻麥蚜	20 分鐘	相遇次數、攻擊次數、 寄生次數	5 組	● 蚜蟲：每種成蟲 2 隻 ● 雌蜂：1 隻	● 蚜蟲：40 隻 ● 雌蜂：20 隻	Kruskal-Wallis Mann-Whitney	
寄生偏好	柯曼尼蚜繭蜂	棉蚜	20 分鐘	1.相遇次數(E)： 雌蜂到處搜尋蚜蟲，利用觸角輕拍蚜蟲確認蚜蟲是否適合。 2.攻擊次數： 雌蜂嘗試寄生蚜蟲，但可能蚜蟲踢擊或逃跑而寄生失敗次數。 3.寄生次數(T)： 雌蜂將產卵管插入蚜蟲體內次數。 4.寄生時間： 從開始寄生蚜蟲至最終完成寄生所經歷的時間。 5.逃跑次數： 蚜蟲遇到寄生蜂而快速爬離的次數。 6.踢擊次數： 蚜蟲受到攻擊時，踢擊寄生蜂次數。	20 組	● 蚜蟲：各齡期(1-5 齡) 各 1 隻，共 5 隻 ● 雌蜂：1 隻	● 蚜蟲：2000 隻 ● 雌蜂：400 隻	ANOVA	
		馬鈴薯蚜			20 組			Tukey HSD	
		偽菜蚜			20 組				
		稻麥蚜			20 組				
	細長脛蚜繭蜂	棉蚜			20 組				
		馬鈴薯蚜			20 組				
		偽菜蚜			20 組				
		稻麥蚜			20 組				
	岐阜蚜繭蜂	棉蚜			20 組				
		馬鈴薯蚜			20 組				
		偽菜蚜			20 組				
		稻麥蚜			20 組				
	廣三叉蚜繭蜂	棉蚜			20 組				
		馬鈴薯蚜			20 組				
		偽菜蚜			20 組				
		稻麥蚜			20 組				
異足蚜小蜂	棉蚜	20 組							
	馬鈴薯蚜	20 組							
	偽菜蚜	20 組							
	稻麥蚜	20 組							
寄生成功率	柯曼尼蚜繭蜂	棉蚜	120 分鐘	化繭數量(c)	10 組	● 蚜蟲：10 隻成蟲 ● 雌蜂：1 隻	● 蚜蟲：1400 隻 ● 雌蜂：140 隻	計算比率	
		馬鈴薯蚜			10 組				
		稻麥蚜			10 組				
		偽菜蚜			10 組				
	細長脛蚜繭蜂	棉蚜			10 組				
		馬鈴薯蚜			10 組				
		稻麥蚜			10 組				
		偽菜蚜			10 組				
	岐阜蚜繭蜂	馬鈴薯蚜			10 組				
		偽菜蚜			10 組				
	廣三叉蚜繭蜂	棉蚜			10 組				
		棉蚜			10 組				
	異足蚜小蜂	棉蚜			10 組				
		馬鈴薯蚜			10 組				
		偽菜蚜			10 組				
		稻麥蚜			10 組				

表四、外競爭實驗分組及實驗方法

實驗項目	寄生蜂種類		蚜蟲種類	實驗時間	記錄項目	樣本數	每組樣本	實驗動物總數	統計分析
外競爭	柯曼尼蚜繭蜂 細長脛蚜繭蜂 廣三叉蚜繭蜂 異足蚜小蜂		棉蚜	30 分鐘	化繭數量	10 組	● 蚜蟲：10 隻成蟲	● 蚜蟲：1200 隻	ANOVA Tukey HSD
						10 組			
						10 組			
						10 組			
						10 組			
						10 組			
	柯曼尼蚜繭蜂 細長脛蚜繭蜂 岐阜蚜繭蜂 異足蚜小蜂		馬鈴薯蚜			10 組	● 雌蜂：1 隻	● 雌蜂：120 隻	ANOVA Tukey HSD
						10 組			
						10 組			
	柯曼尼蚜繭蜂 細長脛蚜繭蜂 異足蚜小蜂		稻麥蚜			10 組	ANOVA Tukey HSD		
						10 組			
						10 組			

表五、內競爭實驗分組及實驗方法

實驗項目	寄生蜂種類		蚜蟲種類	時間間隔	紀錄項目	樣本數	每組樣本	實驗動物總數	統計分析			
內競爭	蚜繭蜂 VS 蚜小蜂	先：異足蚜小蜂 後：細長脛蚜繭蜂	稻麥蚜	相隔一天	化繭種類 化繭數量	10 組	● 蚜蟲：5 隻成蟲	● 蚜蟲：1200 隻	Mann-Whitney U test			
			棉蚜									
			馬鈴薯蚜									
		同時：異足蚜小蜂 同時：細長脛蚜繭蜂	稻麥蚜			10 組						
			棉蚜									
			馬鈴薯蚜									
		後：異足蚜小蜂 先：細長脛蚜繭蜂	稻麥蚜			10 組						
			棉蚜									
			馬鈴薯蚜									
		先：異足蚜小蜂 同時：異足蚜小蜂 後：異足蚜小蜂	後：岐阜蚜繭蜂 同時：岐阜蚜繭蜂 先：岐阜蚜繭蜂			馬鈴薯蚜				10 組	● 雌蜂：2 隻	● 雌蜂：240 隻
										10 組		
										10 組		
	蚜繭蜂 VS 蚜繭蜂	先：細長脛蚜繭蜂 同時：細長脛蚜繭蜂 後：細長脛蚜繭蜂	後：岐阜蚜繭蜂 同時：岐阜蚜繭蜂 先：岐阜蚜繭蜂			馬鈴薯蚜	10 組					
							10 組					
							10 組					
		先：細長脛蚜繭蜂 同時：細長脛蚜繭蜂 後：細長脛蚜繭蜂	後：柯曼尼蚜繭蜂 同時：柯曼尼蚜繭蜂 先：柯曼尼蚜繭蜂			馬鈴薯蚜	10 組					
							10 組					
							10 組					
		同時：細長脛蚜繭蜂 同時：柯曼尼蚜繭蜂	同時：柯曼尼蚜繭蜂 同時：柯曼尼蚜繭蜂			馬鈴薯蚜	10 組					
							10 組					
							10 組					
	後：細長脛蚜繭蜂 後：柯曼尼蚜繭蜂	先：柯曼尼蚜繭蜂 先：柯曼尼蚜繭蜂	馬鈴薯蚜			10 組						
						10 組						
						10 組						

九、統計方法

- (一) ANOVA 單因子變異數分析：比較各組常態分佈的樣本之間的平均數是否有差異，若檢驗出的 P 值 <0.05 則群體間有顯著差異，顯示變因是否會影響到實驗結果。
- (二) Tukey HSD Test：ANOVA 分析結果顯示各組樣本有顯著差異，進行 Tukey HSD 比較樣本兩兩間是否有差異。若分析結果具有顯著差異的組別，則以不同英文字母表示。
- (三) Mann-Whitney U test：此統計方法為無母數分析，可用於不符合常態分布的數據上。其先將兩組樣本排序，利用成對資料的中位數再進行統計，檢驗是否有顯著差異。

十、蚜蟲與寄生蜂族群動態變化模擬

以各實驗結果代入以 Nicholson-Bailey 模型為基礎的方程式，畫出蚜蟲與寄生蜂數量隨時間的族群變化圖。

(一) Nicholson-Bailey 模型：

Nicholson 和 Bailey 於 1930 年提出一模型解釋寄生生物與寄主間的族群變動關係，其模型如下所示。H 為寄主(在本實驗中為蚜蟲)，P 為寄生生物(在本實驗中為寄生蜂)。

$$\text{寄主數量(蚜蟲)}: H_{t+1} = k \times H_t \times e^{-aP_t}$$

$$\text{寄生生物數量(寄生蜂)}: P_{t+1} = c \times H_t \times (1 - e^{-aP_t})$$

1. H_{t+1} 為蚜蟲經過一天後的數量； k 為蚜蟲的繁殖率； H_t 為蚜蟲原本的數量； e^{-aP_t} 中， e 為自然對數、 a 為寄生蜂的蒐尋能力、 P_t 為寄生蜂數量， e^{-a} 代表在一隻寄生蜂存在時，一蚜蟲族群的存活比率； e^{-aP_t} 代表考量所有寄生蜂時，蚜蟲族群在一天內未被寄生的比例。
 2. P_{t+1} 為寄生蜂經過一天後的數量； c 為寄生蜂的繁殖率； P_t 為寄生蜂原本的數量； $(1 - e^{-aP_t})$ 為寄生蜂一天內寄生蚜蟲的比例。
- (二) 模型修改：經過實驗的觀察，我們需要將 Nicholson-Bailey 模型進行修改。

1. 蚜蟲方面

我們把每個齡期的蚜蟲分開計算，我們把 H_t 改成 $H(t, \text{齡期})$ ， H_{t+1} 改成 $H(t+1, \text{齡期})$ ，修改原因以及結果如下：

- (1) 蚜蟲僅在 5 齡蟲時才有生殖能力，只有 5 齡蟲會產下新的個體使族群變大，且產下 1 齡蟲。因此一日後的 1 齡蟲的個體數量由目前的 5 齡蟲數量決定。
 - 1 齡蟲數量： $H_{(t+1, 1)} = H_{(t, 5)} \times k$
- (2) 2~4 齡蟲是由前一齡期的若蟲長成，每一次的脫皮約需 1 日(表六)。因此這些齡期中蚜蟲的數量會和上一齡期在前一天的數量相同。
 - 2 齡蟲數量： $H_{(t+1, 2)} = H_{(t, 1)}$
 - 3 齡蟲數量： $H_{(t+1, 3)} = H_{(t, 2)}$
 - 4 齡蟲數量： $H_{(t+1, 4)} = H_{(t, 3)}$
- (3) 只有 5 齡蟲會因為寄生後，在特定的天數(I_p)後體內的寄生蜂化繭，出現死亡。例：棉蚜被細長脛蚜繭蜂寄生後，在第 5 天後死亡，出現寄生蜂的繭，因此 $I_p=5$ 。
例子 1：第 6 天時，棉蚜 5 齡蟲數量($H_{(6, 5)}$)為第 5 天存活的 4 齡蟲($H_{(5, 4)}$) 加上 5 齡 $H_{(5, 5)}$ 蟲數量，減掉第 1 天時(5 天前， $I_p=5$)成功被寄生的蚜蟲數量(P_{6-5})，因為這是在第 6 天時，會出現的寄生蜂繭數(P_1)。

例子 2：第 18 天時，棉蚜 5 齡蟲數量($H_{(18, 5)}$)為第 17 天存活的 4 齡蟲($H_{(17, 4)}$) 和 5 齡($H_{(17, 5)}$)蟲數量，減掉第 13 天時(5 天前， $I_p=5$)成功被寄生的蚜蟲數量 (P_{18-5})，因為這是在第 18 天時，會出現的寄生蜂繭數(P_{13})。

■ 5 齡蟲數量： $H_{(t+1, 5)} = H_{(t, 5)} + H_{(t, 4)} - P_{t-I_p}$

(4) 蚜蟲總量為： $H_t = \sum_{i=1}^5 H_{(t, i)}$

2. 寄生蜂方面

(1) e^{-a} 與寄生蜂的搜尋能力有關，因為我們沒有辦法得到 a ，因此我們將 e^{-a} 修改為 $(1 - L/H_t)$ 。其中 L 為寄生能力(單隻寄生蜂在實驗中一天可以寄生的蚜蟲數量)， L/H_t 代表一群蚜蟲被一隻寄生蜂寄生的比例， $(1 - L/H_t)$ 則代表一隻寄生蜂存在時，蚜蟲族群的存活比率； $(1 - L/H_t)^{P_t}$ 則代表在 t 天時，考量所有寄生蜂，蚜蟲族群的存活比率。 $1 - (1 - L/H_t)^{P_t}$ 則代表在 t 天時，所有寄生蜂對蚜蟲族群的寄生比例。

(2) 在實驗中寄生蜂對蚜蟲有明顯的偏好存在，因此針對每個齡期，我們將代入寄生蜂對該齡期蚜蟲的偏好，以「寄生次數(T)/相遇次數(E)」來作為表示(表三)。 $T_{齡期}$ 為寄生蜂對某一齡期蚜蟲的寄生次數， $E_{齡期}$ 為寄生蜂對某一齡期蚜蟲的相遇次數。

(3) 因為寄生蜂對蚜蟲齡期有明顯的偏好存在，因此把寄生蜂繭的數量依不同齡期的蚜蟲數量進行運算，因此我們把 P_t 以 $P_{(t, 齡期)}$ 表示：

寄生蜂寄生各齡蚜蟲的數量：

- $P_{(t, 1)} = H_{(t, 1)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_1/E_1$ 1 齡蟲
- $P_{(t, 2)} = H_{(t, 2)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_2/E_2$ 2 齡蟲
- $P_{(t, 3)} = H_{(t, 3)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_3/E_3$ 3 齡蟲
- $P_{(t, 4)} = H_{(t, 4)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_4/E_4$ 4 齡蟲
- $P_{(t, 5)} = H_{(t, 5)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_5/E_5$ 5 齡蟲

(4) 寄生蜂繭總數量： $P_t = \sum_{i=1}^5 P_{(t-I_e, i)}$

(5) 計算出寄生蜂繭數量(P)代表寄生蜂的數量，因為在蚜繭蜂的生活史中會出現繭的階段，因此 P 直接表示的是繭的數量，而寄生蜂則是在特定的天數(I_e)後出現，而數量與繭的數量相同。

(三) 模擬應用：

1. 寄生蜂種類對防治效果的影響：

比較施放不同數量的寄生蜂對三種蚜蟲(棉蚜、馬鈴薯蚜、偽菜蚜)的防治效果。

2. 寄生蜂施放方式與防治效果的關連性：

比較分批釋放與單批釋放寄生蜂在防治效果上的差異。

3. 種源庫系統(banker system)模擬：

有些蚜蟲種類對於宿主植物具有專一性，此特性可以用於建立種源庫系統。例：稻麥蚜僅利用單子葉植物(如麥草)，而細長脛蚜繭蜂會寄生稻麥蚜，也會寄生棉蚜。若有一生產茄子的農場，栽種者可利用麥草來建立細長脛蚜繭蜂的種源庫系統，防治棉蚜，茄子既不受稻麥蚜影響，也可產生寄生蜂達防治效果。比較不同種源庫系統，了解何種系統可以維持較長的作用或具有較高的防治效果。

陸、 研究結果

一、 蚜蟲的基本探究

(一) 蚜蟲生活史的觀察

觀察蚜蟲若蟲成長至成蟲間每次蛻皮所需天數，以了解蚜蟲的基本生活史和齡期。

表六、蚜蟲生活史：各蟲齡期之平均天數(n=10)

種類	齡期	1 st ~2 nd	2 nd ~3 rd	3 rd ~4 th	4 th ~5 th	總天數
棉蚜		1.2±0.4	1.0±0.0	1.4±0.2	1.6±0.2	5.2±0.4
馬鈴薯蚜		1.2±0.4	1.0±0.0	1.2±0.1	1.6±0.2	5.0±0.7
偽菜蚜		1.2±0.4	1.0±0.0	1.3±0.2	1.7±0.4	5.2±0.4
稻麥蚜		1.5±0.5	1.0±0.0	1.4±0.2	1.2±0.2	5.1±0.5

四種蚜蟲皆須經歷 5 個齡期才長為成蟲。依據本實驗結果，可以準備各齡期蚜蟲供寄生偏好實驗使用。此外，在程式模擬中，需將蚜蟲的族群成長依齡期分開討論，因為只有五齡蟲具有生殖能力，且需 5 日才可從一齡成長為五齡(表六)。

(二) 蚜蟲繁殖力及成蟲存活天數

藉由觀察蚜蟲成蟲每日生產的若蟲隻數，了解各種蚜蟲的繁殖力。再由成蟲平均存活天數乘上成蟲每日生產若蟲隻數，了解每種蚜蟲一生所產出的若蟲總數。

表七、蚜蟲繁殖力：各蟲存活平均天數、每日產若蟲數(n=10)

種類	每日產若蟲數(k)	成蟲存活天數	一生總產若蟲數
棉蚜	6.7±0.8	11.0 天±0.8	74.2±1.5
馬鈴薯蚜	4.5±0.5	12.6 天±0.9	56.9±1.2
偽菜蚜	5.0±0.4	17.4 天±0.8	88.3±1.8
稻麥蚜	5.7±0.3	8.9 天±0.5	51.4±1.3

四種蚜蟲成蟲每日平均產出的若蟲數量介於 4~6 隻之間。考慮一天所產若蟲數，棉蚜產出的子代最多，易在短時間內增大族群。考慮成蟲的存活天數，偽菜蚜可存活 17.40 天，其成蟲一生所生產的若蟲數高達 88 隻，其族群容易累積多隻成蟲個體，造成族群個體數急速上升(表七)。程式模擬中，每一種蚜蟲繁殖力(k)為每日產若蟲數量。

二、 寄生蜂的基本探究

(一) 寄生蜂生活史的觀察

觀察蚜蟲被寄生蜂寄生後化繭、寄生蜂羽化和死亡所需天數，了解寄生蜂生活史。

表八、寄生蜂生活史：化繭、羽化、死亡所需之平均天數(n=10)

種類	寄生~化繭(I _p)	化繭~羽化(I _e)	羽化~死亡
細長脛蚜繭蜂	5.1±0.5	7.0±0.0	3.7±0.2
岐阜蚜繭蜂	6.0±0.4	5.4±0.4	3.3±0.3
廣三叉蚜繭蜂	5.7±0.6	5.9±0.2	4.7±0.2
異足蚜小蜂	5.0±0.4	7.2±0.3	3.9±0.1
柯曼尼蚜繭蜂	6.4±0.3	7.1±0.4	6.0±0.0

五種寄生蜂從寄生到羽化約花費 11~12 天，羽化後存活天數約為 3~6 天(表八)。化繭所需時間(I_p)、化繭後羽化所需時間(I_e)代入程式，推測寄生蜂族群成長狀況。

(二) 寄生蜂的寄生能力

測試在 0.5 小時內，被寄生蜂成功寄生的蚜蟲隻數。假設一天有 12 小時光照(寄生蜂活躍)和 12 小時夜晚(寄生蜂休息)，因此將此數值乘 24，推測寄生蜂一天寄生能力。

表九、五種寄生蜂的寄生能力

種類	棉蚜	馬鈴薯蚜	偽菜蚜	稻麥蚜
細長脛蚜繭蜂	91.2±2.7	14.4±0.5	0.0±0.0	91.2±2.7
岐阜蚜繭蜂	0.0±0.0	86.4±1.5	0.0±0.0	0.0±0.0
廣三叉蚜繭蜂	81.6±2.4	0.0±0.0	0.0±0.0	0.0±0.0
異足蚜小蜂	69.6±1.5	62.4±1.3	67.2±1.5	48.0±0.5
柯曼尼蚜繭蜂	67.2±1.1	76.8±1.4	0.0±0.0	144.0±3.1

寄生不同蚜蟲時，同種寄生蜂的寄生能力會不同(表九)。對於棉蚜，寄生能力最佳的是細長脛蚜繭蜂；以馬鈴薯蚜為寄主時，是岐阜蚜繭蜂；對於偽菜蚜，僅異足蚜小蜂可對其寄生；稻麥蚜為寄主時，柯曼尼蚜繭蜂長現最佳的寄生能力。在實驗模擬中，寄生蜂的寄生能力(L)為寄生蜂一日可寄生的蚜蟲數量，了解寄生蜂族群成長速率。

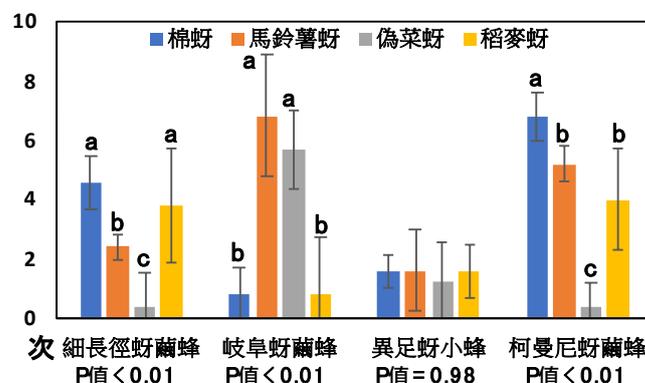
三、寄生偏好

(一) 前測實驗：同時面對四種蚜蟲的蚜蟲種類偏好

將四種蚜蟲成蟲各兩隻放入同個培養皿中，觀測四種寄生蜂對蚜蟲的相遇、攻擊、寄生次數，了解寄生蜂與蚜蟲相遇時的偏好差異。

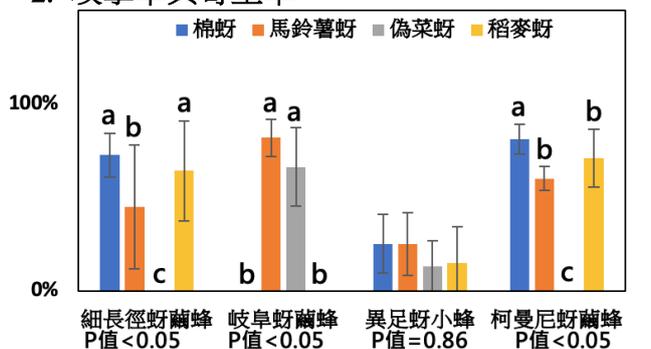
1. 相遇次數(E)

寄生蜂會主動搜尋特定種類蚜蟲(圖十三)。細長脛蚜繭蜂偏好尋找棉蚜及稻麥蚜；岐阜蚜繭蜂偏好馬鈴薯蚜與偽菜蚜；異足蚜小蜂不偏好特定蚜蟲；柯曼尼蚜繭蜂則偏好尋找棉蚜。

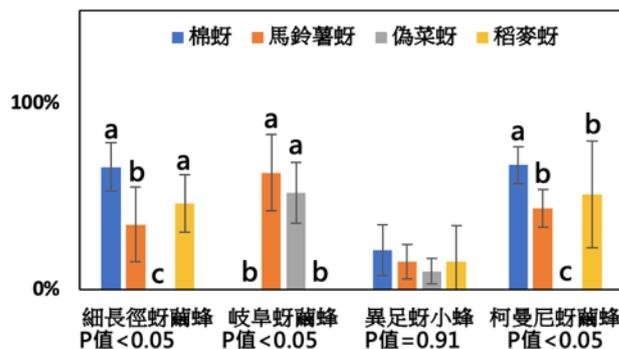


圖十三、寄生蜂對不同蚜蟲的相遇次數(n=5)
若 Kruskal-Wallis 分析 P 值<0.05 進行 Mann-Whitney U test(字母相異者有顯著差異)。

2. 攻擊率與寄生率



圖十四、寄生蜂對不同蚜蟲的攻擊率(n=5)
若 Kruskal-Wallis 分析 P 值<0.05 則進行 Mann-Whitney U test(字母相異者有顯著差異)。



圖十五、寄生蜂對不同蚜蟲的寄生率(n=5)
若 Kruskal-Wallis 分析 P 值<0.05 則進行 Mann-Whitney U test(字母相異者有顯著差異)。

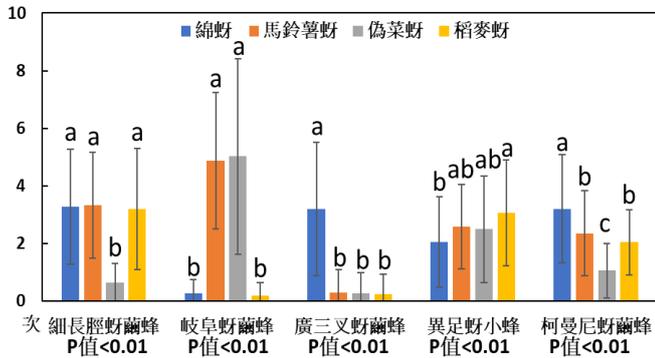
攻擊率與寄生率(圖十四、十五)兩者皆有顯著差異，代表寄生蜂會主動試探與寄生特定種類蚜蟲。且攻擊率及寄生率兩者趨勢相同，故合併討論。細長脛蚜繭蜂偏好尋找棉蚜及稻麥蚜；岐阜蚜繭蜂偏好馬鈴薯蚜與偽菜蚜；異足蚜小蜂不偏好特定蚜蟲；柯曼尼蚜繭蜂則偏好尋找棉蚜。

由於此方法無法考慮到不同的蚜蟲齡期可能影響寄生蜂的偏好，所以改以將同種蚜蟲的五個齡期放置在同一培養皿使寄生蜂得以進行選擇。

(二) 寄生蜂對蚜蟲種類的偏好

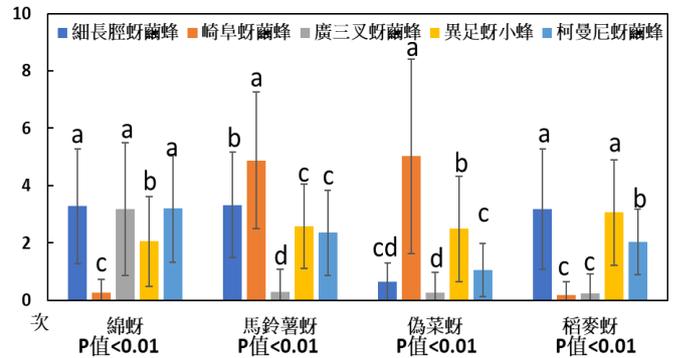
透過比較寄生蜂分別對四種蚜蟲的相遇次數、攻擊率和寄生率，了解各種寄生蜂對蚜蟲種類和蚜蟲齡期的偏好。再藉由單一種類蚜蟲遭受四種寄生蜂相遇、攻擊、寄生，以同一種蚜蟲而言，對何種寄生蜂有較大的吸引力。

1. 相遇次數(E)：



圖十六、寄生蜂對不同蚜蟲的相遇次數(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。



圖十七、蚜蟲受不同寄生蜂的相遇次數(n=20)

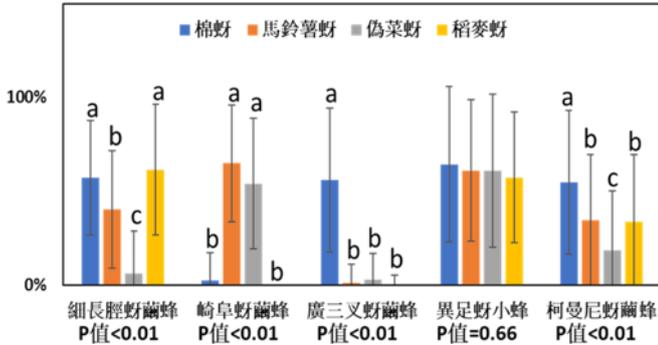
若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。

寄生蜂對不同蚜蟲的相遇次數皆有顯著差異(圖十六)，代表寄生蜂會主動尋找特定的蚜蟲。其中細長脛蚜繭蜂偏好尋找棉蚜、馬鈴薯蚜及稻麥蚜。岐阜蚜繭蜂則是馬鈴薯蚜及偽菜蚜。廣三叉蚜繭蜂僅尋找棉蚜。異足蚜小蜂最傾向尋找稻麥蚜但程度與偽菜蚜和馬鈴薯蚜沒有顯著差異。柯曼尼蚜繭蜂偏好尋找棉蚜。若以蚜蟲的吸引力而言(圖十七)，棉蚜對細長脛蚜繭蜂、廣三叉蚜繭蜂及柯曼尼蚜繭蜂最有吸引力。馬鈴薯蚜和偽菜蚜均最易吸引岐阜蚜繭蜂。稻麥蚜對細長脛蚜繭蜂及異足蚜小蜂有相同吸引力。

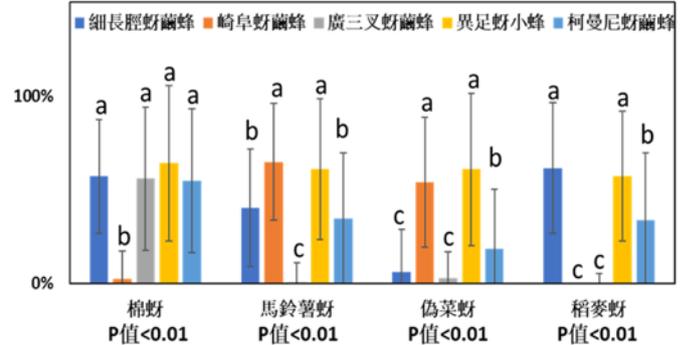
2. 攻擊率及寄生率

寄生蜂在找尋到蚜蟲後，可能會開始進行攻擊，甚至寄生。將「攻擊次數」和「寄生次數」除以「相遇次數」，以得到「攻擊率(攻擊次數/相遇次數)」和「寄生率(寄生次數/相遇次數)」，因為在相遇之後寄生蜂才會判斷是否攻擊或寄生，所以寄生蜂的攻擊、寄生次數與相遇次數相關。考慮寄生蜂對寄主的選擇，避免誤判所以用攻擊率寄生率。

(1) 攻擊率



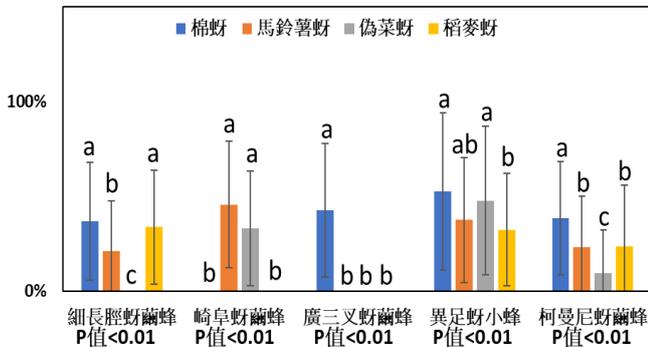
圖十八、寄生蜂對不同蚜蟲的攻擊率(n=20)
若 ANOVA 分析 P 值<0.05 則進行 Tukey HSD test(字母相異者有顯著差異)。



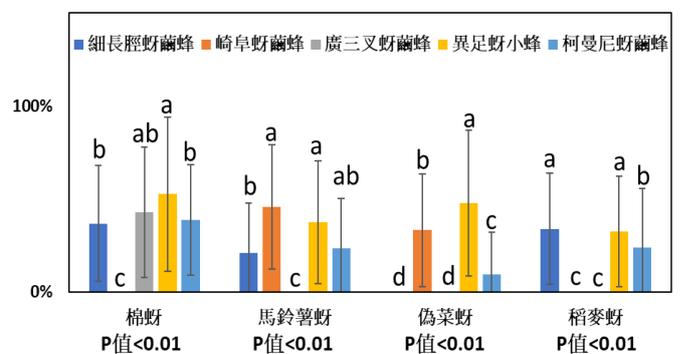
圖十九、蚜蟲受不同寄生蜂的攻擊率(n=20)
若 ANOVA 分析 P 值<0.05 則進行 Tukey HSD test(字母相異者有顯著差異)。

四種蚜繭蜂在對蚜蟲的攻擊率上有顯著差異(圖十八)，代表此幾種寄生蜂會挑選特定蚜蟲種類進行試探(攻擊行為)。細長脛蚜繭蜂最偏好試探稻麥蚜以及棉蚜。崎阜蚜繭蜂偏好試探馬鈴薯蚜及偽菜蚜。廣三叉蚜繭蜂僅試探棉蚜。和四種蚜繭蜂最不同的是，異足蚜小蜂在攻擊率上並無特定偏好，表示其相遇蚜蟲後即不分蚜蟲種類進行攻擊。柯曼尼蚜繭蜂偏好棉蚜。就不同蚜蟲吸引寄生蜂攻擊的吸引力而言(圖十九)，棉蚜吸引細長脛蚜繭蜂、廣三叉蚜繭蜂及異足蚜小蜂。馬鈴薯蚜及偽菜蚜最易吸引崎阜蚜繭蜂及異足蚜小蜂。稻麥蚜吸引細長脛蚜繭蜂及異足蚜小蜂。

(2) 寄生率



圖二十、寄生蜂對不同蚜蟲的寄生率(n=20)
若 ANOVA 分析 P 值<0.05 則進行 Tukey HSD test(字母相異者有顯著差異)。

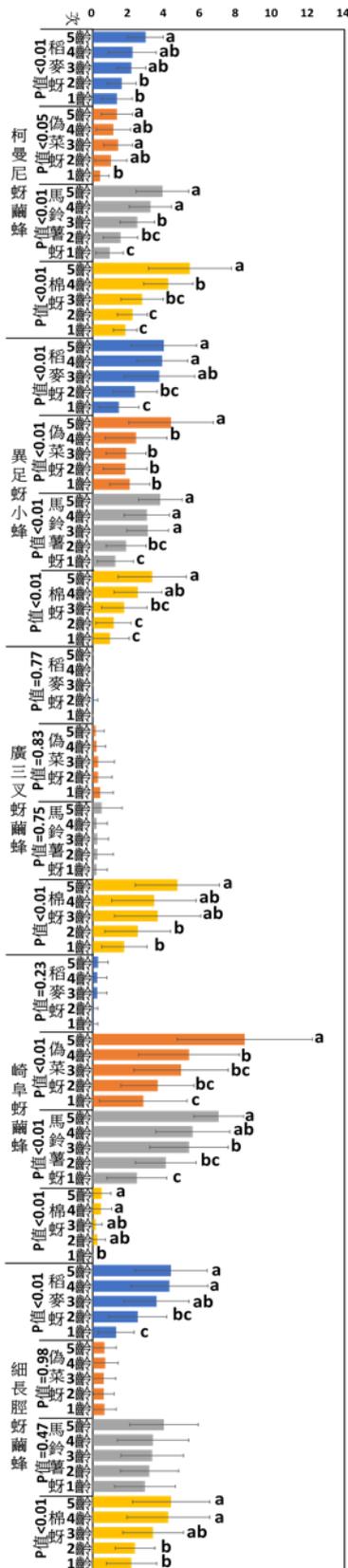


圖二十一、蚜蟲受不同寄生蜂的寄生率(n=20)
若 ANOVA 分析 P 值<0.05 則進行 Tukey HSD test(字母相異者有顯著差異)。

各寄生蜂對不同種蚜蟲的寄生率有顯著差異(圖二十)，表示寄生蜂會選擇適合的蚜蟲種類進行寄生並繁殖後代。細長脛蚜繭蜂偏好寄生棉蚜及稻麥蚜。崎阜蚜繭蜂偏好寄生馬鈴薯蚜及偽菜蚜。廣三叉蚜繭蜂僅偏好選擇棉蚜。異足蚜小蜂最傾向寄生棉蚜，但其數值與偽菜蚜及稻麥蚜間無顯著差異。柯曼尼蚜繭蜂偏好棉蚜。而就蚜蟲作為寄生蜂寄主之偏好程度而言(圖二十一)，棉蚜被異足蚜小蜂及廣三叉蚜繭蜂選擇為最偏好的寄主。馬鈴薯蚜則吸引崎阜蚜繭蜂以及異足蚜小蜂寄生。偽菜蚜則是異足蚜小蜂。而將稻麥蚜作為最偏好寄主者則是細長脛蚜繭蜂及異足蚜小蜂。

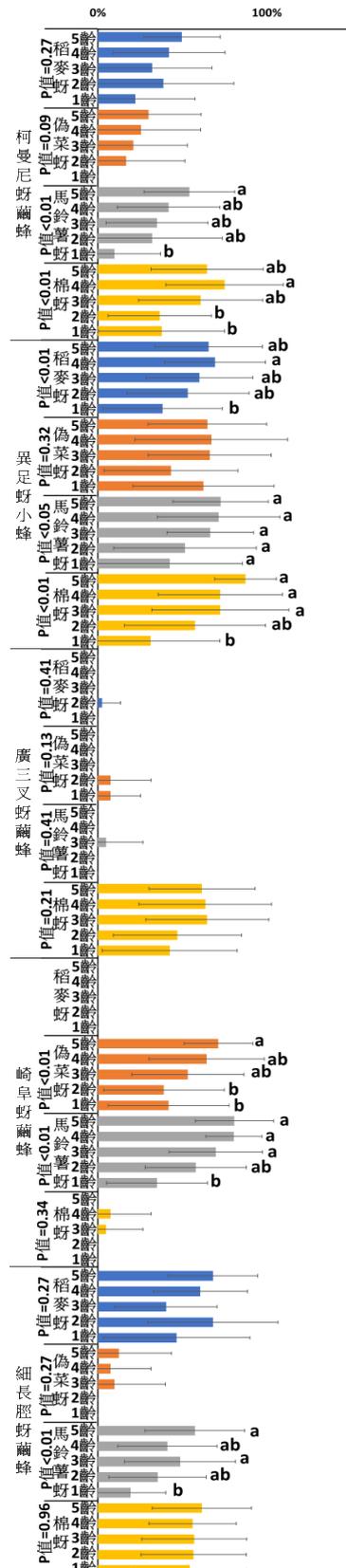
(二) 寄生蜂對蚜蟲齡期的偏好

利用寄生蜂對不同齡期蚜蟲的攻擊率和寄生率，比較寄生蜂對不同齡期蚜蟲的偏好，以了解寄生蜂對齡期偏好趨勢是否相同。



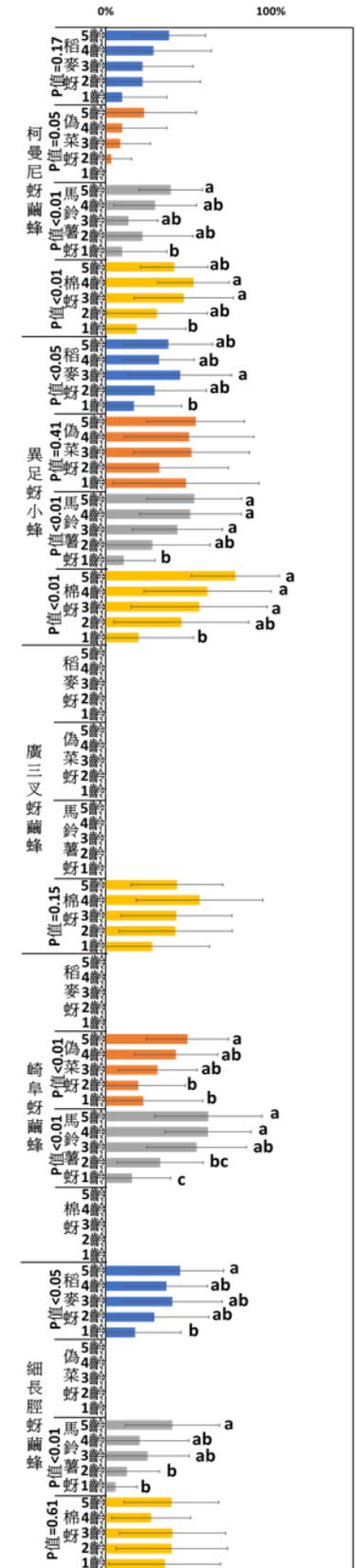
圖二十二、寄生蜂對不同齡期蚜蟲的相遇次數(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。



圖二十三、寄生蜂對不同齡期蚜蟲的攻擊率(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。



圖二十四、寄生蜂對不同齡期蚜蟲的寄生率(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。

1. 相遇次數(E)：

在相遇次數高的實驗組中(例如：柯曼尼蚜繭蜂對四種蚜蟲的相遇次數均高，廣三叉蚜繭蜂對稻麥蚜、偽菜蚜、馬鈴薯蚜的相遇次數較少)，可以發現寄生蜂會偏好尋找高齡期的蚜蟲(圖二十二)，且對於 4~5 齡會有顯著的偏好。推測寄生蜂可能仰賴視覺搜尋蚜蟲，因為愈高齡期的蚜蟲體型較大。

2. 攻擊率與寄生率(T)：

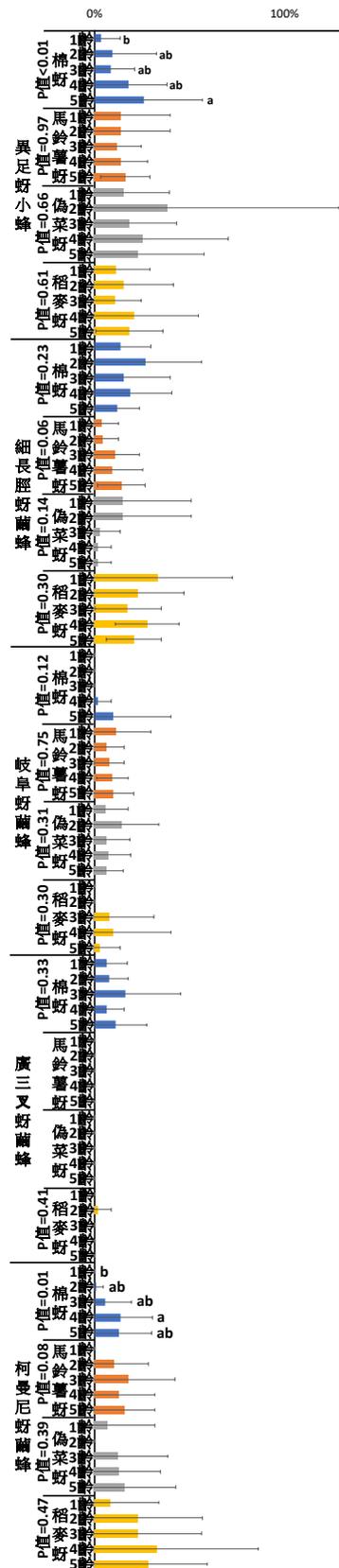
在大部分的寄生蜂與蚜蟲的關係中(除「細長脛蚜繭蜂對稻麥蚜」外，此組別將在討論部分再行探究)發現在攻擊率上有顯著齡期偏好的組別，在寄生率上也出現顯著的齡期偏好(圖二十三、圖二十四)；相對的，若沒有顯著攻擊偏好產生的組別，在寄生率上也不會有顯著偏好。例如：柯曼尼蚜繭蜂對馬鈴薯蚜的攻擊率有顯著差異，在寄生率也有顯著差異；柯曼尼蚜繭蜂對稻麥蚜的攻擊率沒有顯著差異，在寄生率也沒有顯著差異(圖二十三、二十四)。此外，在攻擊率和寄生率上有顯著差異的組中，寄生蜂皆偏好攻擊且寄生高齡期的蚜蟲(圖二十三、二十四)。這樣的現象代表寄生蜂會對蚜蟲的齡期和種類進行評估。另外，在沒有顯著齡期偏好的組別中，又可分為二類，一類為寄生蜂對所有齡期均不攻擊寄生，另一類是寄生蜂不選擇齡期(對所有齡期)均攻擊寄生。寄生蜂對不同齡期蚜蟲的寄生率有偏好，以在後續的程式模擬中應用，能預測蚜蟲和寄生蜂的族群數量。

比對相遇次數，發現寄生蜂寄生行為可分三類。(1)在相遇次數上偏好高齡蟲，且也偏好攻擊及寄生高齡蟲。代表此寄生蜂依靠視覺搜尋蚜蟲，再決定攻擊及寄生高齡蚜蟲。此可能因為高齡蚜蟲可提供更多營養供寄生蜂幼蟲生長(如：異足蚜小蜂對稻麥蚜)。(2)在相遇次數上偏好高齡期蟲，但在攻擊、寄生上無顯著偏好，此可能是受蚜蟲防禦行為影響(如：高齡期稻麥蚜、棉蚜對細長脛蚜繭蜂的防禦強，以致寄生蜂攻擊或寄生時失敗)。(3)在相遇次數上，不偏好任何齡期蚜蟲，但在攻擊及寄生時偏好高齡期。可能此寄生蜂在搜尋蚜蟲時不僅憑靠視覺，也許藉由氣味，但相遇後選擇高齡期蚜蟲攻擊並寄生。可能因高齡的蚜蟲可提供更多營養供寄生蜂幼蟲生長而造成其選擇行為。

(四) 蚜蟲的防禦與寄生蜂的寄生處理時間

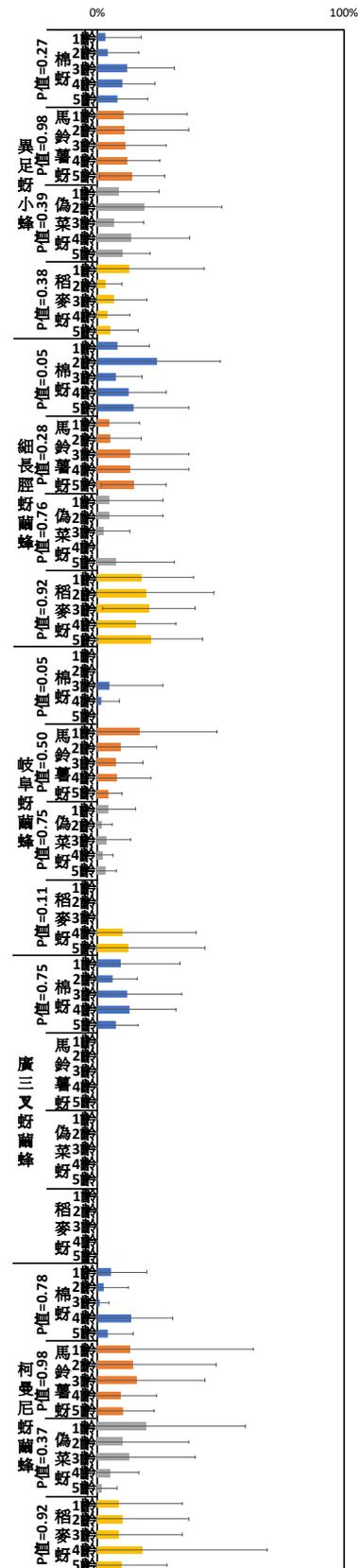
當寄生蜂進行攻擊或寄生時，蚜蟲可能產生防禦行為，如踢擊與逃跑。比較寄生蜂寄生蚜蟲的過程的處理時間及蚜蟲的防禦行為，可以了解寄生蜂的寄生行為是否與蚜蟲的防禦能力有關。蚜蟲只有在與寄生蜂相遇時才有防禦行為的出現，因此，比較蚜蟲的防禦能力時，將踢擊次數、逃跑次數除以相遇次數、攻擊次數和寄生次數的總合，得到踢擊率和逃跑率，進行合理的比較。

在踢擊率和逃跑率中，大部分組別沒有因為蚜蟲齡期而改變(圖二十五、圖二十六)，表示每種齡期蚜蟲被攻擊或寄生時踢擊和逃跑的頻率相同。在寄生蜂的處理時間上，出現齡期愈高，處理時間長的趨勢，但是蚜小蜂的平均處理時間(平均 60.2 秒)明顯高於其餘四種寄生蜂(平均 13.3 秒)許多(圖二十七)。



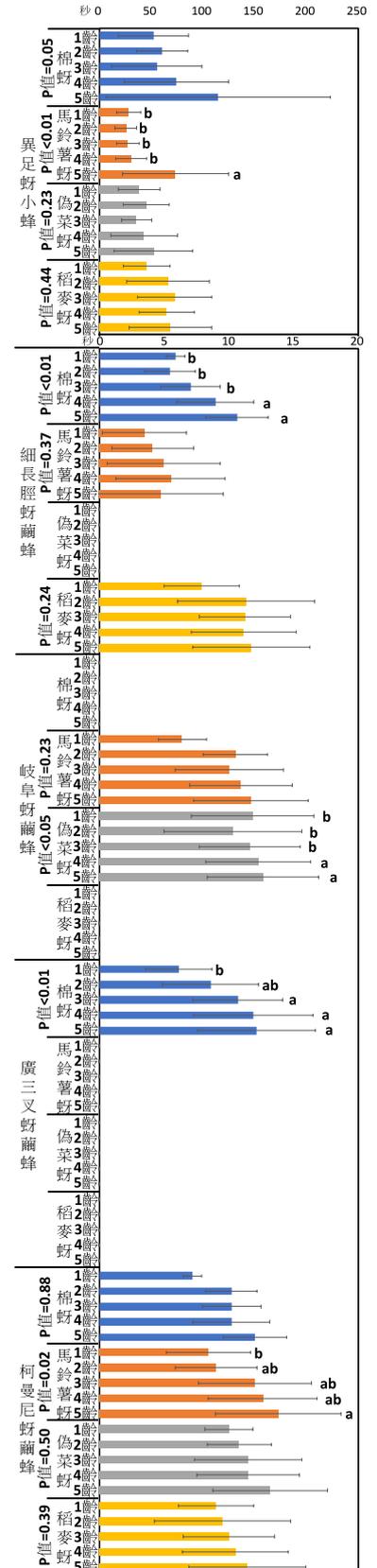
圖二十五、不同齡期蚜蟲對寄生蜂的踢擊率(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。



圖二十六、不同齡期蚜蟲對寄生蜂的逃跑率(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。



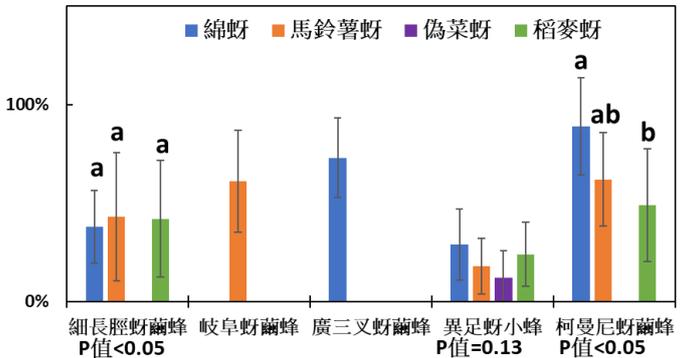
圖二十七、寄生蜂對蚜蟲不同齡期的處理時間(n=20)

若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test (字母相異者有顯著差異)。

四、寄生成功率

記錄同種寄生蜂對四種蚜蟲寄生後蚜蟲化繭的比率，可以得知寄生蜂對每種蚜蟲的寄生率(c)。同時可驗證寄生率高的組別是否會有高的寄生成功率。在後續程式中模擬寄生蜂的寄生成功率可協助預測寄生蜂的族群成長狀況。

除柯曼尼蚜繭蜂外，發現寄生廣泛度高的蜂，寄生成功率相對較低。異足蚜小蜂為寄生種類最廣泛的蜂，但其對每種蚜蟲的寄生成功率皆為最低(圖十七、圖二十八)。細長脛蚜繭蜂的寄生廣泛度次之，其對每種蚜蟲的寄生成功率也較低。只寄生棉蚜的廣三叉蚜繭蜂及只寄生馬鈴薯蚜的岐阜蚜繭蜂，其寄生成功率相對較高。



圖二十八、寄生蜂之寄生成功率(n=10)
若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test(字母相異者有顯著差異)。

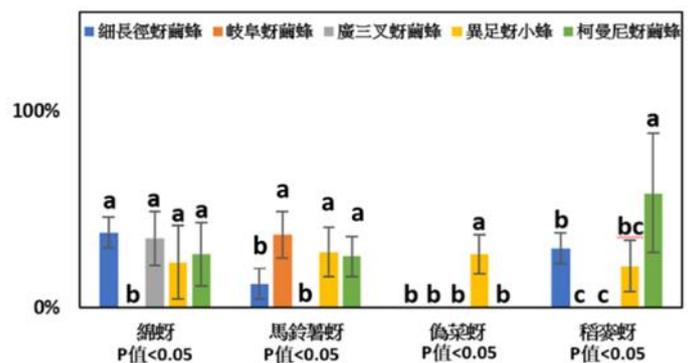
比較寄生率和寄生成功率，亦可發現大部分寄生率高的組別，其寄生成功率也較高(除「岐阜蚜繭蜂寄生偽菜蚜」外)。然而，在比較同一種寄生蜂對不同蚜蟲時，寄生率和寄生成功率會有差異出現(例如：細長脛蚜繭蜂、異足蚜小蜂)。岐阜蚜繭蜂在寄生偽菜蚜與馬鈴薯蚜的寄生率均高，但是沒有辦法利用偽菜蚜成功化繭，推測因為岐阜蚜繭蜂無法分辨馬鈴薯蚜與偽菜蚜。我們亦發現偽菜蚜也不會因為岐阜蚜繭蜂的寄生而死亡，因此我們認為岐阜蚜繭蜂的卵無法在偽菜蚜體內孵化或幼蟲無法成長。

五、寄生蜂間的競爭

(一) 外競爭：

比較相同時間內，不同寄生蜂對一種蚜蟲的寄生成功化繭數量。實驗中，因為寄生蜂無法在 30 分鐘內寄生完 10 隻蚜蟲，若化繭數量愈高，尋找和定位蚜蟲的能力較佳，競爭能力愈高(徐等，2014)。寄生蜂搜尋和定位寄主的能力是評價其可作為生物防治的重要參數之一(Lenteren et al., 1986; Roermund et al., 1997)。

寄主為棉蚜時，外競爭能力除岐阜蚜繭蜂外的寄生蜂競爭能力皆最好。為馬鈴薯蚜時，最優勢者為岐阜蚜繭蜂、異足蚜小蜂與柯曼尼蚜繭蜂。為偽菜蚜時異足蚜小蜂最佳。為稻麥蚜時則柯曼尼蚜繭蜂具優勢。寄主為不同蚜蟲時，寄生蜂間有顯著的競爭優勢(圖二十九)。推論寄生蜂的外競爭能力因寄主的種類不同而有差異，在演化過程中，寄生蜂可能因生態棲位的區分而演化出偏好以不同蚜蟲為寄主。



圖二十九、寄生蜂之外競爭能力(n=10)
若 ANOVA 分析 P 值 < 0.05 則進行 Tukey HSD test(字母相異者有顯著差異)。

(二) 內競爭

內競爭是在同一寄主體內發育的不同寄生幼蟲之直接或間接的相互作用(Godfray, 1994)。實驗中，我們讓一隻蚜蟲被二種寄生蜂寄生，最後藉由觀察最後化蛹，並比較兩種寄生蜂最後化繭的總數，以 Mann-Whitney U test 檢測是否有顯著差異，以了解何者具有競爭優勢。

1. 蚜繭蜂與蚜繭蜂的內競爭

表十、細長脛蚜繭蜂與柯曼尼蚜繭蜂的內競爭

組別	細長脛蚜繭蜂 (A 蜂)	柯曼尼蚜繭蜂 (B 蜂)	相隔時間 (hr)	蚜蟲種類	樣本數	平均數		中位數		標準差		P 值 (顯著性)
						A	B	A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	棉蚜	10 組	1.5	0.4	2.0	0.0	1.1	0.5	P<0.01
2	先寄生	後寄生	24	棉蚜	10 組	1.0	0.2	1.0	0.0	1.1	0.4	P<0.01
3	後寄生	先寄生	24	棉蚜	10 組	0.2	1.9	0.0	2.0	0.4	1.6	P<0.01
4	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	10 組	1.2	0.5	1.0	0.0	1.1	1.0	P=0.08
5	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	1.4	1.0	1.0	0.0	0.8	0.3	P<0.01
6	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	1.0	0.6	1.0	0.5	0.7	0.8	P=0.43
7	同時寄生	同時寄生	0	稻麥蚜	10 組	1.0	0.2	1.0	0.0	0.8	0.4	P<0.05
8	先寄生	後寄生	24	稻麥蚜	10 組	1.2	0.3	1.0	0.0	0.8	0.5	P<0.01
9	後寄生	先寄生	24	稻麥蚜	10 組	0.2	0.3	0.0	0.0	0.4	0.7	P=0.95

使用 Mann-Whitney U test 進行分析。

表十一、細長脛蚜繭蜂對崎阜蚜繭蜂的內競爭

組別	細長脛蚜繭蜂 (A 蜂)	崎阜蚜繭蜂 (B 蜂)	相隔時間 (hr)	蚜蟲種類	樣本數	平均數		中位數		標準差		P 值 (顯著性)
						A	B	A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	10 組	1.8	0.6	2.0	0.0	0.9	0.8	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	1.4	1.0	1.5	1.0	1.0	1.0	P=0.36
3	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	1.1	1.5	1.0	1.5	0.9	1.4	P=0.58

使用 Mann-Whitney U test 進行分析。

(1) 細長脛蚜繭蜂對柯曼尼蚜繭蜂(表十)

細長脛蚜繭蜂對柯曼尼蚜繭蜂同時可寄生多種蚜蟲，因此藉由比較此二種蜂的內競爭，可了解寄主種類是否影響寄生蜂的寄生能力。寄主為棉蚜時，兩寄生蜂同時寄生(組別 1)，細長脛蚜繭蜂具有優勢(P<0.01)；相隔一天寄生，細長脛蚜繭蜂先寄生時(組別 2)依然維持其優勢(P<0.01)，但先寄生的柯曼尼蚜繭蜂(組別 3)則逆轉取得競爭中的優勢(P<0.01)。寄主為馬鈴薯蚜時，兩寄生蜂同時寄生(組別 4)，兩種寄生蜂皆沒有優勢；相隔一天寄生，先寄生的細長脛蚜繭蜂(組別 5)得到優勢，先寄生的柯曼尼蚜繭蜂(組別 6)，沒有顯著優勢。寄主為稻麥蚜時，兩寄生蜂同時寄生(組別 7)，細長脛蚜繭蜂具有優勢(P<0.05)；相隔一天寄生，先寄生的細長脛蚜繭蜂(組別 8)佔有更大優勢(P<0.01)，先寄生的柯曼尼蚜繭蜂(組別 9)反而沒有顯著優勢。此二種蚜繭蜂的競爭優勢不受寄主種類影響，細長脛蚜繭蜂比柯曼尼繭蜂較佔有優勢；但是先寄生的蜂則佔有優勢。

(2) 細長脛蚜繭蜂對崎阜蚜繭蜂(表十一)

崎阜蚜繭蜂的寄生十分專一，僅寄生馬鈴薯蚜，藉由比較細長脛蚜繭蜂和崎阜蚜繭蜂的競爭結果，可以了解專一性高的寄生蜂是否在蚜繭蜂與蚜繭蜂科寄生蜂的競爭中會較佔有優勢。當同時寄生時(組別 1)，細長脛蚜繭蜂具有優勢；隔一天寄生，先寄生的細長脛蚜繭蜂(組別 2)沒有顯著優勢。崎阜蚜繭蜂先寄生時(組別 3)，細長脛蚜繭蜂較佔優勢，寄生專一性高的蜂不一定具有較高的競爭力。

2. 蚜繭蜂與蚜小蜂的內競爭

表十二、細長脛蚜繭蜂對異足蚜小蜂的內競爭

組別	細長脛蚜繭蜂 (A 蜂)	異足蚜小蜂 (B 蜂)	相隔時間 (hr)	蚜蟲種類	樣本數	平均數		中位數		標準差		P 值 (顯著性)
						A	B	A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	棉蚜	10 組	0.7	2.3	0.0	2.5	1.1	1.3	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	棉蚜	10 組	0.9	1.3	1.0	1.5	1.0	1.0	P=0.38
3	後寄生	先寄生	24	棉蚜	10 組	1.4	2.5	1.0	2.5	1.5	1.1	P=0.08
4	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	10 組	1.1	0.9	1.0	1.0	1.0	0.7	P=0.74
5	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	1.6	1.7	2.0	1.5	0.8	1.3	P=0.84
6	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	1.5	1.7	2.0	2.0	1.0	0.9	P=0.71
7	同時寄生	同時寄生	0	稻麥蚜	10 組	2.1	0.1	2.0	0.0	0.9	0.3	P<0.01
8	先寄生	後寄生	24	稻麥蚜	10 組	2.8	0.8	2.5	1.0	1.1	0.4	P<0.01
9	後寄生	先寄生	24	稻麥蚜	10 組	0.7	0.8	1.0	1.0	0.4	0.4	P=0.83

使用 Mann-Whitney U test 進行分析。

表十三、岐阜蚜繭蜂對異足蚜小蜂的內競爭

組別	岐阜蚜繭蜂 (A 蜂)	異足蚜小蜂 (B 蜂)	相隔時間 (hr)	蚜蟲種類	樣本數	平均數		中位數		標準差		P 值 (顯著性)
						A	B	A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	10 組	1.7	0.7	1.5	1.0	1.0	0.7	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	2.8	0.8	3.0	0.5	0.9	1.0	P<0.01
3	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	0.9	0.4	1.0	0.0	0.2	0.5	P=0.58

使用 Mann-Whitney U test 進行分析。

(1) 細長脛蚜繭蜂對異足蚜小蜂(表十二)：

細長脛蚜繭蜂對異足蚜小蜂同時可寄生多種蚜蟲，且兩種寄生蜂別屬於不同科，因此藉由比較此二種蜂的內競爭，可了解寄主種類是否影響寄生蜂的寄生能力。寄主為棉蚜時，兩寄生蜂同時寄生(組別 1)，異足蚜小蜂具有優勢(P<0.05)。相隔一天寄生(組別 2)，先寄生的細長脛蚜繭蜂沒有顯著優勢。先寄生的異足蚜小蜂(組別 3)雖沒有顯著差異，但 P=0.08 接近 0.05，此組別的標準差比其他組別略大，若將樣本數增加，推測此組應可能出現顯著差異；因此，推論當寄主為棉蚜時，異足蚜小蜂較佔優勢。寄主為馬鈴薯蚜(組別 4~6)，兩寄生蜂不論是同時寄生或相隔一天寄生，都沒有顯著差異。寄主為稻麥蚜時，同時寄生(組別 7) 時，細長脛蚜繭蜂具有優勢(P<0.01)；相隔一天寄生，先寄生的細長脛蚜繭蜂(組別 8)具有優勢(P<0.01)，先寄生的異足蚜小蜂(組別 9)無顯著優勢。在稻麥蚜體內，細長脛蚜繭蜂較有優勢，且若給予異足蚜小蜂先寄生一天，仍不足以競爭得過細長脛蚜繭蜂。總言之，決定何者具有競爭優勢的因子主要為蚜蟲的種類、產卵順序和間隔時間，產卵愈早愈佔有優勢。

(2) 岐阜蚜繭蜂對異足蚜小蜂(表十三)：

岐阜蚜繭蜂的寄生十分專一，僅寄生馬鈴薯蚜，藉由比較細長脛蚜繭蜂和岐阜蚜繭蜂的競爭結果，可以了解專一性高的寄生蜂是否在蚜繭蜂與蚜小蜂科寄生蜂競爭中會較佔有優勢。寄主為馬鈴薯蚜，兩寄生蜂同時寄生(組別 1)，異足蚜小蜂具有優勢(P<0.05)；相隔一天寄生，先寄生的岐阜蚜繭蜂(組別 2)具有顯著優勢(P<0.01)，然而，先寄生的異足蚜小蜂(組別 3)沒有顯著差異。由此實驗中，可以見到寄生專一的岐阜蚜繭蜂有顯著的競爭優勢。

3. 改變產卵間隔的內競爭比較

寄生蜂雌蜂產卵的順序和產卵間隔時間是影響內競爭結果的關鍵因素(徐等, 2014)。改變兩種寄生蜂間隔產卵時間(24 vs 48 小時)及順序, 再比較兩種寄生蜂最後化繭總數了解產卵時間先後及產卵間隔時間是否影響寄生蜂內競爭。

表十四、岐阜蚜繭蜂與異足蚜小蜂的內競爭

組別	岐阜蚜繭蜂 (A 蜂)	異足蚜小蜂 (B 蜂)	相隔時間 (hr)	蚜蟲種類	樣本數	平均數		中位數		標準差		P 值 (顯著性)
						A	B	A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	10 組	1.7	0.7	1.5	1.0	1.0	0.7	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	2.8	0.8	3.0	0.5	1.3	0.9	P<0.01
3	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	10 組	0.9	0.4	1.0	0.0	0.7	0.5	P=0.12
4	後寄生	先寄生	48	馬鈴薯蚜	10 組	0.8	2.2	1.0	2.0	0.8	1.3	P<0.01

使用 Mann-Whitney U test 進行分析。

兩寄生蜂同時寄生時(組別 1), 岐阜蚜繭蜂具有優勢(P<0.05); 相隔一天寄生時, 先寄生的岐阜蚜繭蜂(組別 2)的優勢更為顯著(P<0.01), 但是先寄生的異足蚜小蜂(組別 3)沒有競爭上的優勢。這個結果和組別 2 不同, 因此我們推測有可能是因異足蚜小蜂的幼蟲需要較多天生長, 所以我們設計組別 4 測試此推論是否正確。結果顯示, 相隔兩天寄生(組別 4), 先寄生的異足蚜小蜂便具有顯著優勢, 故推論兩寄生蜂的產卵順序和產卵間隔時間會影響寄生蜂幼蟲的內競爭(表十四)。

六、蚜蟲與寄生蜂族群動態變化模擬

(一) 寄生蜂種類比較：

將各實驗所得的數據導入程式中, 使用 C++ 程式語言進行程式撰寫, 模擬寄生蜂與蚜蟲的族群關係(表十五)。

表十五、五種寄生蜂對棉蚜和馬鈴薯蚜的寄生參數列表

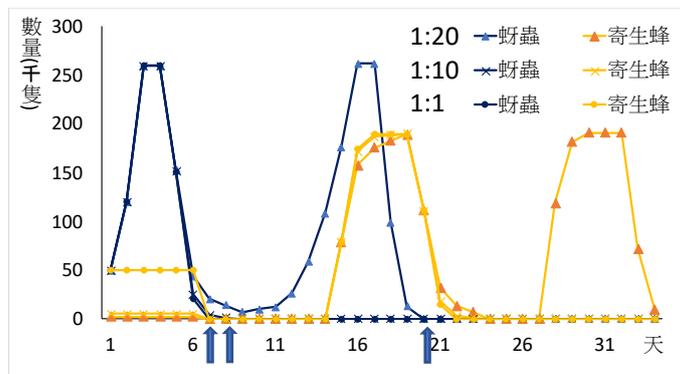
寄生蜂種類	異足蚜小蜂			細長脛蚜繭蜂		柯曼尼蚜繭蜂		廣三叉蚜繭蜂	岐阜蚜繭蜂
	棉蚜	偽菜蚜	馬鈴薯蚜	棉蚜	馬鈴薯蚜	棉蚜	馬鈴薯蚜	棉蚜	馬鈴薯蚜
寄生~化繭(I_p)	5 天	5 天	5 天	5 天	5 天	6 天	6 天	6 天	6 天
寄生~羽化(I_e)	12 天	12 天	12 天	12 天	12 天	13 天	13 天	12 天	12 天
羽化~死亡(I_d)	4 天	4 天	4 天	4 天	4 天	6 天	6 天	5 天	5 天
寄生成功率(c)	29%	12%	18%	38%	43%	89%	62%	73%	61%
每天寄生數量(L)	57 隻	67 隻	62 隻	91 隻	14 隻	67 隻	82 隻	82 隻	86 隻
1 齡寄生偏好(T_1/E_1)	0.39	0.46	0.20	0.16	0.10	0.42	0.07	0.46	0.22
2 齡寄生偏好(T_2/E_2)	0.49	0.33	0.32	0.32	0.22	0.38	0.14	0.58	0.36
3 齡寄生偏好(T_3/E_3)	0.69	0.54	0.43	0.37	0.21	0.45	0.24	0.47	0.53
4 齡寄生偏好(T_4/E_4)	0.74	0.67	0.50	0.46	0.33	0.35	0.22	0.69	0.63
5 齡寄生偏好(T_5/E_5)	0.73	0.59	0.55	0.46	0.46	0.45	0.37	0.47	0.64

(二) 寄生蜂與蚜蟲的數量比例與蚜蟲歸零時間的關係：

到農友的溫室中觀察後, 我們以每一棵小黃瓜長 10 片葉片時始會開花結果為前提。在蚜蟲長到葉片產生蜜露和煙黴時開始算是嚴重危害植物。經我們實際估算約有 5000 隻蚜蟲, 一整棵植物約會有 50000 隻蚜蟲的存在。因此模擬蚜蟲數量有五萬隻, 以廣三叉蚜繭蜂寄生棉蚜為例, 依寄生蜂: 蚜蟲為 1:1、1:10、1:20 三個不同比例來改變施放的寄生蜂數量(50000、5000、2500 隻), 以了解蚜蟲與寄生蜂的族群動態變化。將蚜蟲數量歸零的天數視為成功防治的所需天數。

1. 寄生蜂與蚜蟲歸零所需天數(圖三十)：

廣三叉蚜繭蜂數量在 50000 隻、5000 隻和 2500 隻時，成功防治蚜蟲的天數為 7、9、20 天(圖中藍色箭頭所指)。在數量比為 1:1 及 1:10 時，防治的效果僅相差二天，但是 1:10 與 1:20 就相差了 11 天。寄生蜂數量增加將可加快防治蚜蟲。



圖三十、廣三叉蚜繭蜂在三種比例下的族群波動

2. 寄生蜂與蚜蟲比例與族群波動關係：

蚜蟲與寄生蜂數量比 1:1 和 1:10 時蚜蟲族群只會出現一次高峰，但當數量比達到 1:20 時，蚜蟲族群波動達到兩次高峰，意思是蚜蟲會先被壓制一陣子，但是又會東山再起。理想中的防治應該是不要讓蚜蟲族群再出現第二次的高峰，以免造成農作物的損失。但是在施放寄生蜂的經濟考量上，施放比例在 1:1 與 1:10 之間沒有太大的差異，1:10 應是一個比較好的施放比例。

3. 不同寄生蜂比例在成功防治不同蚜蟲上所需的天數：

表十六、棉蚜與四種寄生蜂的數量比例與蚜蟲歸零時間的關係

寄生蜂：蚜蟲數量	1:1	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60	1:70	1:80	1:90	1:100
異足蚜小蜂	7 天	33 天	失控								
細長脛蚜繭蜂	6 天	19 天	21 天	21 天	32 天	34 天	38 天	失控	失控	失控	失控
柯曼尼蚜繭蜂	7 天	20 天	20 天	20 天	23 天	26 天	33 天	36 天	失控	失控	失控
廣三叉蚜繭蜂	6 天	8 天	19 天	19 天	19 天	21 天	21 天	23 天	32 天	32 天	38 天

表十七、馬鈴薯蚜與四種寄生蜂的數量比例與蚜蟲歸零時間的關係

寄生蜂：蚜蟲數量	1:1	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60	1:70	1:80	1:90	1:100
細長脛蚜繭蜂	7 天	失控									
異足蚜小蜂	7 天	19 天	43 天	失控							
柯曼尼蚜繭蜂	8 天	8 天	21 天	21 天	21 天	21 天	25 天	26 天	34 天	34 天	34 天
岐阜蚜繭蜂	7 天	8 天	19 天	19 天	19 天	19 天	22 天	23 天	24 天	31 天	31 天

表十八、偽菜蚜與異足蚜小蜂的數量比例與蚜蟲歸零時間的關係

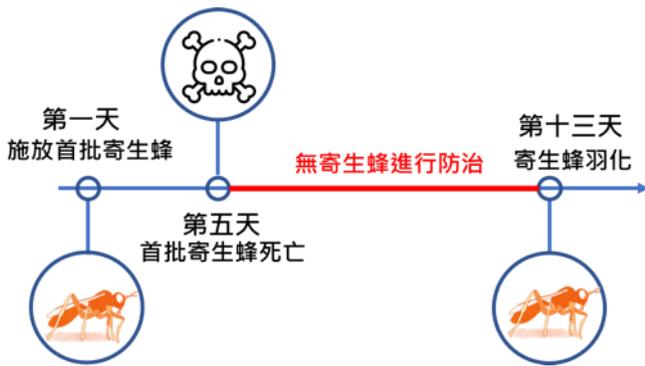
寄生蜂：蚜蟲數量	1:1	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60	1:70	1:80	1:90	1:100
異足蚜小蜂	7 天	19 天	31 天	失控							

- (1) 模擬中蚜蟲數量的族群波動從一次高峰、兩次高峰、三次高峰到四次高峰，且相同高峰數所需成功防治蚜蟲時間相近，依序將以紅色、黃色、綠色、藍色底色表示，所以這些比例施放可以達到接近的效果。
- (2) 寄主為棉蚜(表十六)時，廣三叉蚜繭蜂能最有效防治，因為可以 1:10 的比例在最短的天數(8 天)內成功防治；寄主為馬鈴薯蚜(表十七)岐阜蚜繭蜂能最有效防治(1:10，8 天)；寄主為偽菜蚜(表十八)，只有異足蚜小蜂能防治，但需要較高的施放比例。
- (3) 廣三叉蚜繭蜂在第一批成功防治棉蚜的最佳比例為 1:10，第二批為 1:70；岐阜蚜繭蜂成功防治馬鈴薯蚜在第一批的最佳比例為 1:10，第二批為 1:80；異足蚜小蜂成功防治偽菜蚜在第一批的比例只有在 1:1，第二批在 1:10。若無法大量施放在第一高峰時就把蚜蟲壓制下來時，可以考慮把目標放在第二高峰時壓制下來，且使用較低的比例施放，此比例就有重要的參考價值。

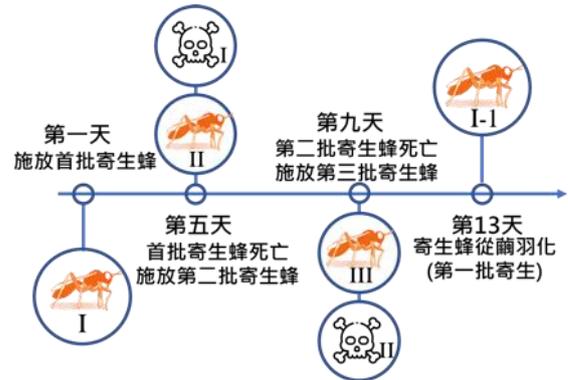
(三) 寄生蜂分批釋放與蚜蟲歸零時間的關係：

1. 寄生蜂釋放次數：

在進行數量模擬時，發現寄生蜂族群會呈現週期性波動(圖三十)，當族群在低峰時，蚜蟲會有死灰復燃的跡象，可能造成蚜蟲肆虐農作物。因此，為了避免此狀況的出現，將原本單批釋放的寄生蜂改為多批釋放，使每一天都有寄生蜂防治蚜蟲。以細長脛蚜繭蜂為例(圖三十一)，因其自羽化至死亡的天數為 4 天，而被寄生到羽化的週期為 12 天，單批釋放將導致第 5 天至第 13 天無寄生蜂成蟲可防治蚜蟲。為解決此問題，將寄生蜂分為三批釋放(圖三十二)，採取隔 4 天釋放一次的策略，即可確保每一日都有寄生蜂可防治蚜蟲。另外，柯曼尼蚜繭蜂可存活 6 天，從寄生到羽化需花費 13 天。因此將相同數量寄生蜂分為兩批釋放，採取隔 6 天釋放一次的策略。



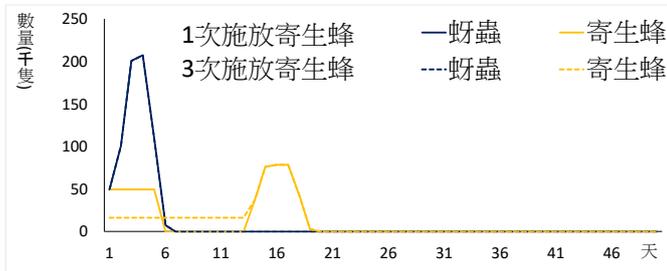
圖三十一、單次釋放寄生蜂(以細長脛蚜繭蜂為例)



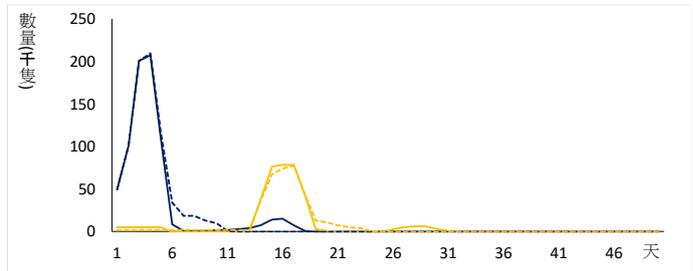
圖三十二、分批釋放寄生蜂(以細長脛蚜繭蜂為例)

2. 分批釋放寄生蜂對族群動態的影響：

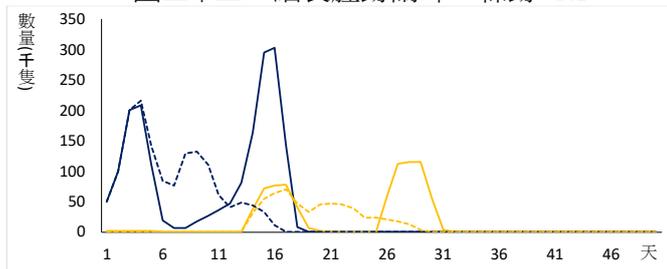
(1) 細長脛蚜繭蜂：



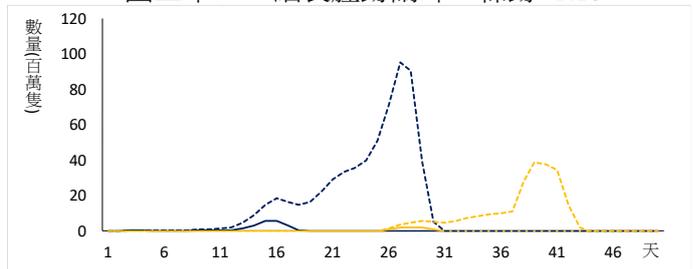
圖三十三、細長脛蚜繭蜂：棉蚜=1:1



圖三十四、細長脛蚜繭蜂：棉蚜=1:10



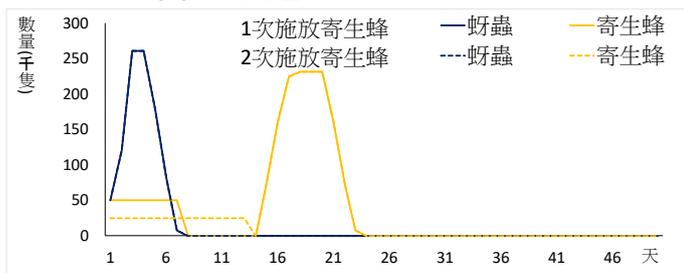
圖三十五、細長脛蚜繭蜂：棉蚜=1:20



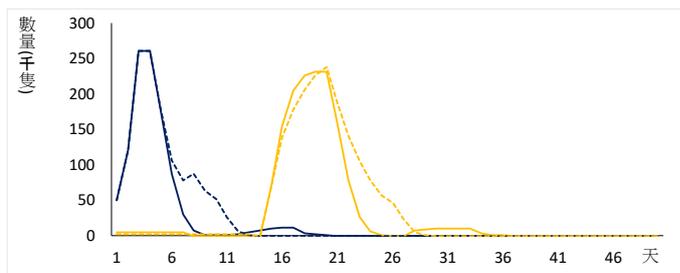
圖三十六、細長脛蚜繭蜂：棉蚜=1:30

與蚜蟲比例為 1:1(圖三十三)，寄生蜂一次釋放時，可完全消滅蚜蟲，因此分次釋放並無明顯差異，皆於第六日成功防治蚜蟲。比例為 1:10 與 1:20(圖三十四、圖三十五)，寄生蜂分次釋放時，在第六天最初蚜蟲下降趨勢較緩，但可以有效避免蚜蟲再次上漲，因此分次釋放寄生蜂可以有效提高防治蚜蟲的效率。比例為 1:30(圖三十六)且寄生蜂分次釋放時，因單日內寄生蜂總數不足，導致蚜蟲數量據增，反而使防治效率降低。

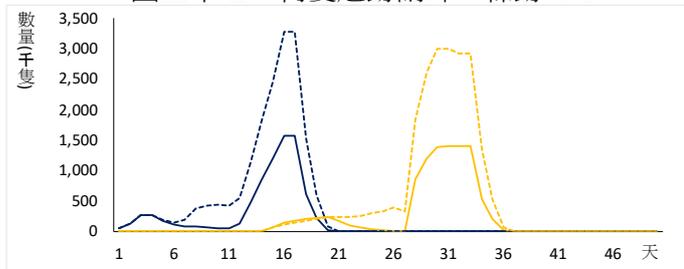
(2) 柯曼尼蚜繭蜂：



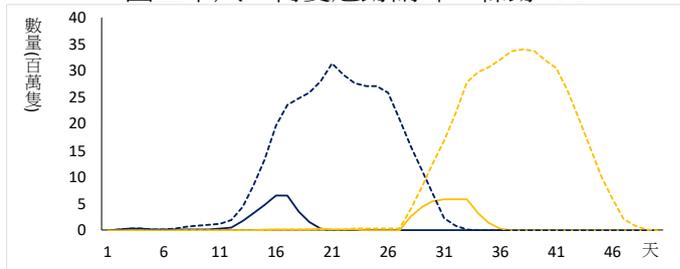
圖三十七、柯曼尼蚜繭蜂：棉蚜=1:1



圖三十八、柯曼尼蚜繭蜂：棉蚜=1:10



圖三十九、柯曼尼蚜繭蜂：棉蚜=1:20



圖四十、柯曼尼蚜繭蜂：棉蚜=1:30

比例為 1:1 時(圖三十七)，因寄生蜂數量足以完全消滅蚜蟲，因此分次釋放的效果與單次釋放相同。比例為 1:10(圖三十八)，寄生蜂分次釋放時，在最初蚜蟲下降趨勢較緩；但得以避免蚜蟲再次上漲，因此分次釋放寄生蜂可以有效提高防治效率比例。比例為 1:20 與 1:30(圖三十九、圖四十)且寄生蜂分次釋放時，因單日內寄生蜂總數不足，導致蚜蟲數量據增，反而使防治效率降低。

七、種源庫系統模擬：

(一) 寄生蜂種類比較：

因為細長脛蚜繭蜂與柯曼尼蚜繭蜂皆可以寄生棉蚜、馬鈴薯蚜(寄主植物多為雙子葉植物)和稻麥蚜(寄主植物多為單子葉植物)，並且有較高的寄生成功率，因此模擬兩者作為防治棉蚜的種源庫系統，比較兩者的優劣(表十九)。

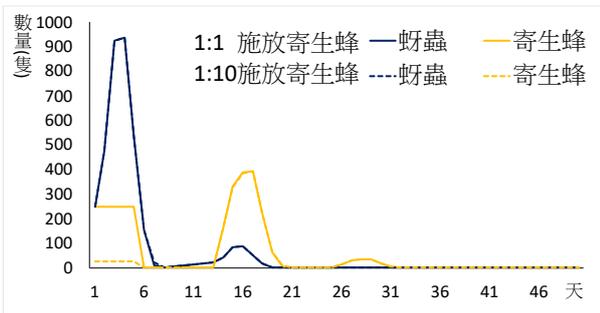
表十九、細長脛蚜繭蜂和柯曼尼蚜繭蜂對馬鈴薯蚜和稻麥蚜的寄生參數列表

寄生蜂種類	細長脛蚜繭蜂		柯曼尼蚜繭蜂	
	馬鈴薯蚜	稻麥蚜	馬鈴薯蚜	稻麥蚜
蚜蟲種類				
寄生~化繭(I_p)	5 天	5 天	6 天	6 天
寄生~羽化(I_e)	12 天	12 天	13 天	13 天
羽化~死亡(I_d)	4 天	4 天	6 天	6 天
寄生成功率(c)	43%	42%	62%	49%
每天寄生數量(L)	14 隻	91 隻	82 隻	144 隻
1 齡寄生偏好(T_1/E_1)	0.10	0.27	0.07	0.10
2 齡寄生偏好(T_2/E_2)	0.22	0.36	0.14	0.16
3 齡寄生偏好(T_3/E_3)	0.21	0.45	0.24	0.18
4 齡寄生偏好(T_4/E_4)	0.33	0.36	0.22	0.24
5 齡寄生偏好(T_5/E_5)	0.46	0.44	0.37	0.25

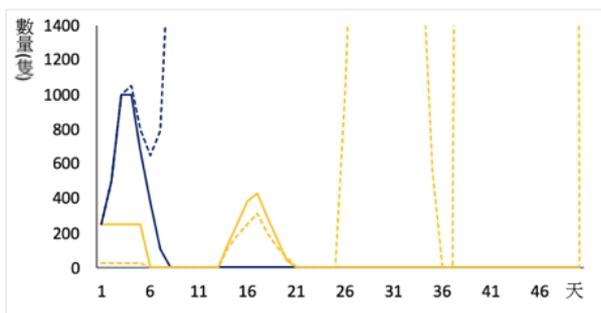
(二) 不同寄生蜂對種源庫系統的影響：

假設種源庫植株能乘載 1000 隻蚜蟲，使用 250 隻馬鈴薯蚜與稻麥蚜分別以 1:1、1:10 施放寄生蜂，比較第二代寄生蜂的個體數量。

1. 細長脛蚜繭蜂：



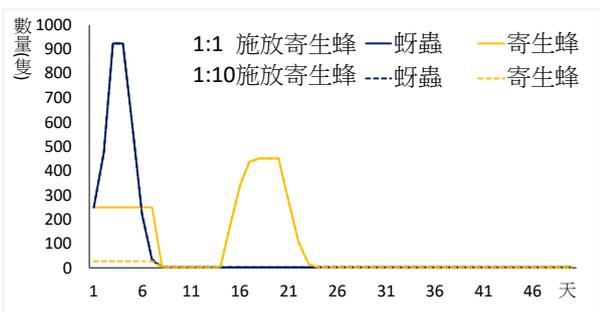
圖四十一、以稻麥蚜養殖細長脛蚜繭蜂



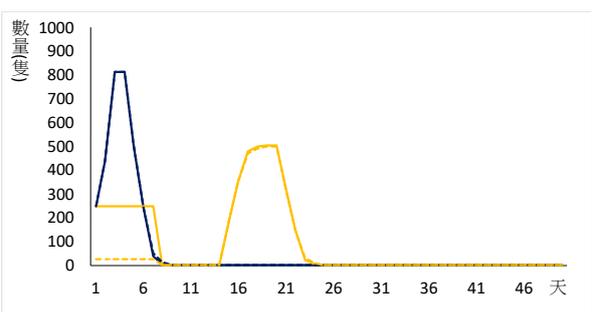
圖四十二、以馬鈴薯蚜養殖細長脛蚜繭蜂

以稻麥蚜養殖的種源庫，1:10 施放的寄生蜂能在第三代產出較多後代(約 200 隻，見圖四十一中第 26 天)。以馬鈴薯蚜養殖種源庫時，因細長脛蚜繭蜂對馬鈴薯蚜的每日寄生數量較少，在寄生蜂數量 1:10 時，蚜蟲數量的繁殖速度將大於寄生蜂的繁殖速度，使寄生蜂有充足的蚜蟲寄生，讓第三代寄生蜂數量大增(見圖四十二中第 26 天)，長期防治具較良好功效。

2. 柯曼尼蚜繭蜂：



圖四十三、以稻麥蚜養殖柯曼尼蚜繭蜂

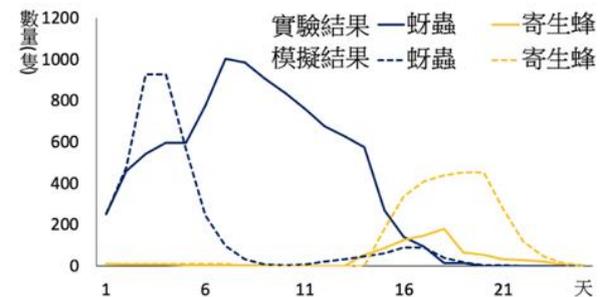


圖四十四、以馬鈴薯蚜養殖柯曼尼蚜繭蜂

無論以稻麥蚜或馬鈴薯蚜養殖的種源庫，因柯曼尼蚜繭蜂寄生成功率高，快速將種源庫植株上的蚜蟲消滅，無法達到長期的防治功效(只持續 23 天，圖四十三、圖四十四)，但產出較細長脛蚜繭蜂多的寄生蜂數量。柯曼尼蚜繭蜂對棉蚜的寄生成功率(89%)較細長脛蚜繭蜂(38%)高，但以馬鈴薯蚜作細長脛蚜繭蜂的種源庫系統能有較長的防治效果(50 天以上)(圖四十二)。

(三) 種源庫實驗結果與模擬結果的比較(圖四十五)：

以帳篷放入柯曼尼蚜繭蜂 8 隻與馬鈴薯蚜 250 隻(比例為 1:30)，實際觀察每天的蚜蟲與寄生蜂數量並與模擬結果比較。實際的實驗結果中蚜蟲族群成長速率較慢，並持續更久的時間。而寄生蜂的羽化時間與模擬結果相近，但數量只約有模擬結果的二分之一。推測在模擬中高估了寄生蜂的寄生成功率，才導致此結果。



圖四十五、實驗結果與模擬結果的數量關係

柒、 討論

一、 蚜繭蜂的種類偏好及寄生成功率之比較：

表二十、五種寄生蜂之種類偏好及寄生成功率排名

寄生蜂	蚜蟲	相遇次數/20 分鐘	攻擊率排行(攻擊率)	寄生率排行(寄生率)	寄生成功率
細長脛蚜繭蜂	棉蚜	1 (3.3 次)	1 (57%)	1 (37%)	1 (38%)
	馬鈴薯蚜	1 (3.3 次)	2 (40%)	2 (21%)	1 (43%)
	偽菜蚜	2 (0.6 次)	3 (6%)	3 (0%)	(0%)
	稻麥蚜	1 (3.2 次)	1 (61%)	1 (34%)	1 (42%)
岐阜蚜繭蜂	棉蚜	2 (0.3 次)	2 (3%)	2 (0%)	(0%)
	馬鈴薯蚜	1 (4.9 次)	1 (65%)	1 (46%)	1 (61%)
	偽菜蚜	1 (5.0 次)	1 (54%)	1 (33%)	(0%)
	稻麥蚜	2 (0.2 次)	2 (0%)	2 (0%)	(0%)
廣三叉蚜繭蜂	棉蚜	1 (3.2 次)	1 (56%)	1 (43%)	1 (73%)
	馬鈴薯蚜	2 (0.3 次)	2 (1%)	2 (0%)	(0%)
	偽菜蚜	2 (0.3 次)	2 (3%)	2 (0%)	(0%)
	稻麥蚜	2 (0.2 次)	2 (1%)	2 (0%)	(0%)
異足蚜小蜂	棉蚜	3 (2.1 次)	無顯著差異(約 60%)	1 (53%)	1 (29%)
	馬鈴薯蚜	2 (2.6 次)		2 (37%)	1 (18%)
	偽菜蚜	2 (2.5 次)		1 (48%)	1 (12%)
	稻麥蚜	1 (3.1 次)		2 (32%)	1 (24%)
柯曼尼蚜繭蜂	棉蚜	1 (3.4 次)	1 (50%)	1 (44%)	1 (86%)
	馬鈴薯蚜	2 (2.5 次)	2 (33%)	2 (25%)	1 (52%)
	偽菜蚜	3 (0.8 次)	3 (17%)	3 (7%)	(0%)
	稻麥蚜	2 (2.1 次)	2 (34%)	2 (29%)	2 (45%)

細長脛蚜繭蜂最偏好棉蚜及稻麥蚜，其次為馬鈴薯蚜，而牠對此三種蚜蟲的寄生成功率也都在 40% 上下。岐阜蚜繭蜂最偏好馬鈴薯蚜及偽菜蚜，但牠可寄生成功的僅馬鈴薯蚜。推測牠對偽菜蚜偏好行為的出現是因偽菜蚜的體色及體型大小與馬鈴薯蚜類似。廣三叉蚜繭蜂最偏好棉蚜，對其餘蚜蟲的偏好皆趨近零。且可以寄生成功的蚜蟲只有棉蚜。異足蚜小蜂對四種蚜蟲無明顯偏好，對棉蚜的寄生成功率最高，其次是稻麥蚜。柯曼尼蚜繭蜂較偏好棉蚜，且對棉蚜及稻麥蚜的寄生成功率高。另外牠對棉蚜的成功率高達 86%，所以常被選為商業用蜂(表二十)。

二、 五種寄生蜂對四種蚜蟲之種類偏好行為比較

多數寄生蜂會以視覺或化學訊號來確認遠距離的寄主方位，再以聽覺、嗅覺確認寄主的確切位置(Wang and Yang, 2008)。比較五種寄生蜂對四種蚜蟲的相遇次數、攻擊率、寄生率可以發現，細長脛蚜繭蜂對棉蚜與稻麥蚜有較大的偏好；岐阜蚜繭蜂對馬鈴薯蚜與偽菜蚜有較大偏好；廣三叉蚜繭蜂及柯曼尼蚜繭蜂較偏好棉蚜；異足蚜小蜂則對這四種蚜蟲沒有顯著偏好。

由此推論不同種寄生蜂有不同的偏好，細長脛蚜繭蜂、岐阜蚜繭蜂、廣三叉蚜繭蜂、柯曼尼蚜繭蜂為小繭蜂科(Braconidae)，異足蚜小蜂則是蚜小蜂科(Aphelinidae)。在各種行為綜合比較下，小繭蜂科的寄生蜂對蚜蟲種類的偏好較明顯，而蚜小蜂科的寄生蜂則對蚜蟲種類無明顯偏好，顯示不同科的寄生蜂在選擇蚜蟲寄生的策略可能不同。

寄生蜂對蚜蟲的種類偏好行為可能與寄生成功率有關。其中寄生蜂的偏好選用攻擊率作為比較標準，因攻擊率較符合寄生蜂主動選擇蚜蟲的概念。比對寄生蜂對蚜蟲的攻擊行為和寄生成功率的結果後發現，寄生蜂均偏好牠寄生成功率最高的蚜蟲。例

如，柯曼尼蚜繭蜂最偏好棉蚜，而牠對棉蚜的寄生成功率也最高。而異足蚜小蜂對四種蚜蟲寄生成功率無顯著差異，所以牠對蚜蟲沒有種類上的偏好。

三、五種寄生蜂對不同齡期蚜蟲的寄生行為與蚜蟲防禦比較

寄生蜂在搜尋行為上，除了以視覺定位寄主之外，有時亦會利用寄主取食植物寄主所產生的揮發物質進行定位 (Fellowes et al., 2005)。體型較大的蚜蟲分泌更多的化學誘因(Losey and Denno, 1998)。五種寄生蜂對蚜蟲齡期有明顯偏好的組別中，皆呈現蚜蟲齡期增加，相遇次數、攻擊率、寄生率也增加的趨勢。推論寄生蜂可能是透過視覺與嗅覺選擇寄生高齡蟲。此外，寄生蜂偏好選擇齡期較高的蚜蟲，可能是因為高齡蟲體型大，能提供的營養較為充足，以便寄生蜂幼蟲成長。

觀察不同齡期蚜蟲的防禦行為，發現蚜蟲踢擊與逃跑的頻率均不因齡期增加而改變。但寄生蜂寄生單隻蚜蟲的處理時間隨著蚜蟲齡期增加而增多，推測此可能是因高齡期蚜蟲的踢擊力道較強導致。此外，在蚜蟲的防禦行為頻率無太大改變下，異足蚜小蜂的寄生時間明顯高於其他四種小繭蜂科的寄生蜂，所以推測除了蚜蟲的防禦外，寄生蜂本身的因素會影響寄生蜂寄生蚜蟲所需要的處理時間。

四、五種寄生蜂對四種蚜蟲的寄生成功率比較

在五種寄生蜂中，寄生較廣泛的蚜蟲寄生蜂寄生成功率較低，而專一性較高的寄生蜂的寄生成功率則較高。推測寄生蜂在演化上可能發展出不同的模式，寄主選擇較專一的寄生蜂成功率較高，以適應寄主單一的環境。而寄生成功率較低則可寄生的蚜蟲種類多，適合在寄主種類多，多樣性高的環境生存。

除細長脛蚜繭蜂外，考慮到寄生成功率代表寄生蜂幼蟲的存活能力，我們推測寄生蜂幼蟲在蚜蟲體內存活的能力將是寄生蜂產生寄生偏好(圖十六)的原因。假設原始的岐阜蚜繭蜂族群中，同時存在對偏好不同蚜蟲種類的寄生蜂，但因寄生蜂幼蟲只在馬鈴薯體內存活，使偏好馬鈴薯蚜的岐阜蚜繭蜂族群得以繁殖擴大，導致岐阜蚜繭蜂對馬鈴薯蚜的寄生專一性。但細長脛蚜繭蜂較偏好寄生棉蚜與稻麥蚜，卻在馬鈴薯蚜上具有較高的寄生成功率。推論因為馬鈴薯蚜的體型較棉蚜與稻麥蚜大，因此具有較高的防禦能力，導致細長脛蚜繭蜂較不容易寄生成功，從而尋找較易寄生的兩種蚜蟲。

五、寄生蜂外競爭與內競爭的比較

表二十一、寄生蜂的外競爭與內競爭

蚜蟲種類	外競爭能力	內競爭能力		較優勢寄生蜂
棉蚜	細長脛蚜繭蜂 =異足蚜小蜂 =柯曼尼蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂	異足蚜小蜂	異足蚜小蜂
		細長脛蚜繭蜂	柯曼尼蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂
馬鈴薯蚜	岐阜蚜繭蜂 >柯曼尼蚜繭蜂 >異足蚜小蜂 >細長脛蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂	異足蚜小蜂	無顯著差異
		岐阜蚜繭蜂	異足蚜小蜂	岐阜蚜繭蜂
		細長脛蚜繭蜂	岐阜蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂
		細長脛蚜繭蜂	柯曼尼蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂
稻麥蚜	柯曼尼蚜繭蜂 =細長脛蚜繭蜂 =異足蚜小蜂	細長脛蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂	柯曼尼蚜繭蜂
		異足蚜小蜂	細長脛蚜繭蜂	細長脛蚜繭蜂

在外競爭中，五種寄生蜂中，外競爭能力會因為寄主蚜蟲種類不同而有改變。可以發現不同蚜蟲種類會改變寄生蜂的外競爭能力。觀察內競爭，可分成小繭蜂科不同種之間的競爭和小繭蜂科和蚜小蜂科不同種的競爭，在小繭蜂科中的競爭中可以發現蚜蟲種類並不影響內競爭，且專一性較高的寄生蜂也沒有在內競爭有優勢，但是產卵時間和產卵順序會影響內競爭的結果(表二十一)。在觀察小繭蜂科和蚜小蜂科之間的競爭，此時，蚜蟲種類會影響寄生蜂內競爭，且較專一的寄生蜂在內競爭時就有顯著的優勢，產卵順序和間隔也同樣影響到內競爭。綜合上述，可以發現寄生蜂的產卵順序和時間會是影響寄生蜂內競爭的重要因素，而蚜蟲種類的影響只存在部分科的寄生蜂中，推測是不同科的寄生蜂在內競爭有不同策略。

六、不同寄生蜂間的競爭關係

寄生蜂的種間競爭可分成外競爭與內競爭，在外競爭中較為優勢的寄生蜂在野外可以快速地搜尋到蚜蟲。發現蚜蟲的機率較高，因此寄生的機會較多。所以當作為寄主的蚜蟲種類不同時，需挑選特定寄生蜂才能在外競爭中佔有優勢。在選用生物防治的寄生蜂時，因施放地點大，需要較會搜尋與定位蚜蟲的寄生蜂，就得挑選外競爭能力較高者。而影響內競爭的最主要因素為寄生蜂產卵的順序、間隔時間與蚜蟲種類。在宿主較為專一的環境中(如農場中的蚜蟲)，因寄主相同，寄生蜂有可能會寄生在同一隻蚜蟲體內，造成內競爭的現象。實際應用在進行生物防治時，可能面臨施放的寄生蜂被野外競爭能力高但寄生成功率低的寄生蜂在競爭中取代，造成防治效果不彰。所以選擇生物防治的寄生蜂時需考慮其外競爭與內競爭能力。

七、生物防治效果模擬：

(一) 寄生蜂種類對防治效果的影響：

對蚜蟲的防治效果主要受到寄生成功率和每日寄生數量影響，寄生成功率越高、每日寄生數量較多者，將可以更快速防治蚜蟲。自模擬中得知，廣三叉蚜繭蜂能最有效防治棉蚜；岐阜蚜繭蜂能最有效防治馬鈴薯蚜；異足蚜小蜂能最有效防治偽菜蚜。

(二) 寄生蜂施放方式與防治效果的關聯性：

當寄生蜂數量足以在第二代成功防治蚜蟲時，將寄生蜂分批施放，能確保每一日都有寄生蜂成蟲可進行防治，能有效加速壓制蚜蟲。當寄生蜂數量不足以使第二代寄生蜂成供防治蚜蟲時，將寄生蜂分批施放，反而會使單日寄生蜂數量不足以防治蚜蟲，導致蚜蟲數量據增。

(三) 種源庫系統模擬：

對棉蚜的防治模擬中，柯曼尼蚜繭蜂的寄生成功率最高(89%)，與細長脛蚜繭蜂與異足蚜小蜂相比，可以在較短的時間控制棉蚜數量。但因柯曼尼蚜繭蜂對稻麥蚜的每日寄生數量較多(82 隻、144 隻)，導致種源庫系統上的蚜蟲快速受到防治，因此較不適合以種源庫系統形式施放。

細長脛蚜繭蜂對棉蚜的寄生成功率較低(38%)，但對於馬鈴薯蚜的每日寄生數量也較低(14 隻)，以稻麥蚜養殖細長脛蚜繭蜂的種源庫系統能持續較長時間(以 1:10 施放約可維持 50 天以上，圖四十二)，較適合以種源庫系統的形式預防施放。

在選擇寄主作為寄生蜂的種源時，應同時考量該寄生蜂對種源蚜蟲與被防治蚜蟲的寄生成功率。若對種源蚜蟲的寄生成功率高，則寄生蜂將在短時間內將種源植株上

的蚜蟲族群消滅，無法達到長期防治的效果。若對被防治蚜蟲的寄生成功率低，則透過種源庫產生之寄生蜂也效果有限。

八、寄生蜂用於生物防治的不同方法

利用程式模擬蚜蟲與寄生蜂的數量動態關係，改變寄生蜂的種類、寄生蜂與蚜蟲數量的比例，可發現蚜蟲族群出現的高峰次數介於一至四次。選用最合適的寄生蜂比例與適當的寄生蜂可以減少蚜蟲族群的高峰次數，降低防治時間也減少作物所受傷害。

再考慮改變寄生蜂的施放方法，將總數相同的寄生蜂配合寄生蜂生活史決定施放的間隔天數，分成不同天施放。寄生蜂與蚜蟲數量比 1:1、1:10、1:20、1:30 時皆可以有效地將蚜蟲消滅。另外，建立種源庫系統時，藉由調控蚜蟲與寄生蜂的數量及選擇不同寄生蜂與蚜蟲可達到不同防治效果。對於專一性較高且寄生成功率較高的寄生蜂可選擇直接施放寄生蜂進行防治，而對於寄生宿主較廣但寄生成功率較低，可以使用種源庫系統的方法進行長時間的預防。

捌、 結論

一、寄生蜂與蚜蟲間的關係

寄生偏好中，五種寄生蜂皆有其偏好的蚜蟲種類，且有偏好較高齡期蚜蟲的趨勢。其中小繭蜂科的寄生蜂有明顯偏好的蚜蟲；蚜小蜂科則無明顯偏好。而在蚜蟲防禦行為上，發現蚜蟲踢擊與逃跑的頻率均不因齡期增加也不會對寄生蜂種類而改變。但推測因高齡蟲踢擊力道強導致寄生蜂寄生單隻蚜蟲的處理時間隨著蚜蟲齡期增加而增多。在寄生成功率中，發現不論小繭蜂科或者蚜小蜂科，寄生種類較少的寄生蜂其寄生成功率較高，適合在有大量單一種類寄主蚜蟲的環境下生存。

二、寄生蜂間的競爭關係

在寄主密度較低的環境下，外競爭能力較高的寄生蜂能快速搜尋蚜蟲，增加繁殖機會。寄主種類較單一或寄主較少需搶占資源時，內競爭能力高者佔有優勢。在五種寄生蜂中，外競爭能力受寄主蚜蟲種類影響。而內競爭中，主要影響的因素為產卵的順序和間隔時間，且寄主較為專一的寄生蜂其內競爭能力較強，蚜蟲種類在蚜小蜂科和小繭蜂科不同種寄生蜂競爭時才發生，推論不同的寄生蜂在面對內競爭時有不同的策略。進行生物防治時，需考慮蚜蟲狀況、寄生蜂特性選擇適合的寄生蜂。

三、寄生蜂在生物防治上的應用

模擬蚜蟲與寄生蜂族群動態變化，可以發現寄生蜂種類和施放比例會大幅影響成功防治時間。透過模擬，能精確了解需使用多少寄生蜂達到最佳的防治效果。進一步改變施放寄生蜂的次數，發現只有在寄生蜂比例恰當時，才有較好的防治效果。若要建立種源庫系統，最初不宜施放過高寄生蜂比例，才能具有長期的防治效果。

四、五種寄生蜂綜合比較

五種寄生蜂大約可分成三大類，(1)小繭蜂科寄生蜂，偏好較多，寄主較廣，寄生成功率較低，內競爭能力較弱，(2)小繭蜂科寄生蜂，偏好較少，寄主較窄，寄生成功率較高，內競爭能力較強，(3)蚜小蜂科寄生蜂，偏好不明顯，寄主較廣，內競爭能力會因為蚜蟲種類而改變，所以在選擇寄生蜂進行生物防治時，應該依情況考慮寄生蜂的綜合能力選擇適當之寄生蜂，以達到最有效率的防治效果。

玖、參考資料

一、參考文獻

- Bouchard Y., Cloutier C.(1984). Honeydew as a source of host searching kairomones for the aphid parasitoid *Aphidius nigripes* (Hymenoptera: Aphidiidae). *Canadian Journal of Zoology* 62(8):1513-1520.
- Budenberg W.J.(1990). Honeydew as a contact kairomone for aphid parasitoids *Entomologia Experimentalis et Applicata* 55: 2139-2148
- Budenberg W.J. Powell W. (1992) The role of honeydew as an ovipositional stimulant for two species of syrphids. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 64: 157-61
- Cloutier C., Mackauer M. (1979) The effect of parasitism by *Aphidius smithi* (Hymenoptera: Aphidiidae) on the food budget of the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum* (Homoptera: Aphididae). *Can. J. Zool.* 57: 1605 - 1611.
- Fellowes, M. D. E., J. J. M. van Alphen, and M. A. Jervis. 2005. Foraging behaviour. p.1 - 17. in: *Insects as Natural Enemies: A Practical Perspective*. (Jervis, M.A., ed.) Springer. Dordrecht, the Netherlands. 748pp.
- Godfray H C.J.(1994). *Parasitoids: Behavioral and Evolutionary Ecology*. New Jersey: Princeton University Press.
- Heimpel GE, Mills NJ. (2017). *Biological Control: Ecology and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press;
- Harvey J.A., Poelman E.H., Tanaka T.(2013). *Annual Review of Entomology*, 58: 333-351.
- Hassell MP. (2000) Host - parasitoid population dynamics. *J Anim Ecol.*;69:543 - 566.
- Japoshvili, G. & Abrantes, I. (2006) .*Aphelinus* species (Hymenoptera: Aphelinidae) from the Iberian Peninsula, with the description of one new species from Portugal. *Journal of Natural History*, 40, 855 - 862.
- Kraft L.J., Kopco J., Harmon J.P., Oliver K.M. (2018). Correction: Aphid symbionts and endogenous resistance traits mediate competition between rival parasitoids. *PLOS ONE* 13(1): e0190763.
- Larval competition between *Aphidius colemani* and *Lysiphlebus testaceipes* after multiparasitism of the host *Aphis gossypii*. *Bulletin of Insectology*, 59, 147 - 151.
- Sanchez J.A., La-Spina M., Michelena J.M., Lacasa A., Hermoso de Mendoza A..(2011). Ecology of the aphid pests of protected pepper crops and their parasitoids. *Biocontrol Science and Technology* 21:2, pages 171-188.
- Tazerouni, Z., Talebi, A. A., Fathipour, Y. and Soufbaf, M. (2016). Interference Competition between *Aphidius matricariae* and *Praon volucre* (Hymenoptera: Braconidae) Attacking two Common Aphid Species. *Biocontrol Sci. Techn.*, 26: 1552-1564.
- van Lenteren, J.C.(1986). Parasitoids in the Greenhouse: Successes with Seasonal Inoculative Release System. *Insect Parasitoids*, 13th Symposium of the Royal Entomological Society of London. London: Academic Press, 342-374.
- van Roermund H J W, van Lenteren J.C, Rabbinge R.(1997). *Biological Control*,9(1): 25-47.
- van Roermund H J W, van Lenteren J C, Rabbinge R.(1997). *Biocontrol Science and Technology*[J], 7(1): 131-151.
- Wang, X. and Z. Yang. 2008. Behavioral mechanisms of parasitic wasps for searching concealed insect hosts. *Acta. Ecol. Sin.* 28:1257 - 1269.
- 巫鵬翔，馬寶旭，徐婧，張蓉，何嘉，張潤志 (2017)沙地木蠹跳小蜂對枸杞木蠹的寄生生物學特性。 *昆蟲學報*，60(4): 431-440。
- 何餘容，呂利華，陳科偉 (2005)。兩種赤眼蜂對小菜蛾卵的寄生能力和種間競爭。 *生態學報*,2005,25(4):837~841。
- 徐海雲、楊念婉、普遍浩 (2014)。寄生蜂的外競爭和內競爭作用。 *中國生物防治學報*，30(4): 546-551。
- 耿淑影 (2011)。中國蚜小蜂屬系統分類研究 (膜翅目：蚜小蜂科) 東北林業大學
- 陳業 (2017)。中國蚜小蜂科部分屬的分類研究 (膜翅目：小蜂總科)
- 曾經洲，高穗生(1995)。殺蟲劑對銀葉粉蝨之寄生蜂—東方蚜小蜂及淺黃恩蚜小蜂之毒性。 *植保會刊* 37: 271-279。
- 梁啟富，劉冬冬，劉同先 (2018)。煙蚜繭蜂種內寄主識別與內部競爭。 *植物保護學報* 45(2): 187-193。
- 劉清淳 (2010)。臺灣蚜蟲寄生蜂及其繁殖。 *中華農業研究*，24(3): 62-84。
- 錢景秦，張淑貞 (2012)。寄主與溫度對臺灣潛蠅繭蜂 (*Opius caricivora*) (膜翅目：小繭蜂科) 族群增長與寄生能力之影響。 *臺灣農業研究* 61: 172-185。
- 錢景秦，古琇芷 (2001)。五種非洲菊斑潛蠅寄生蜂 (膜翅目：繭小蜂科、小繭蜂科) 對寄主齡期之偏好性。 *臺灣昆蟲* 21: 89-97。

二、參考書籍

- 金慧通、陶家駒。1989。臺灣省常見蚜蟲彩色圖說。台中：興農雜誌社。
- 陶家駒。1990。臺灣省蚜蟲誌。台北：臺灣省立博物館出版部。

三、參考網路資料

- https://www.baphiq.gov.tw/files/web_articles_files/baphiq/10326/2307.pdf
- https://www.mdais.gov.tw/files/mdais/web_structure/5408/A01_1.pdf

【評語】 052012

本研究主要了解(1)五種蚜蟲寄生蜂對蚜蟲的偏好(2)寄生蜂之間的競爭關係(3)寄生蜂與蚜蟲族群的動態。不同種類的寄生蜂對蚜蟲種類有不同的偏好，同種蚜蟲中，寄生蜂偏好高齡期個體。不同種類寄生蜂演化出不同層次競爭力以共存於自然界中，成蟲或幼蟲都可能出現競爭現象。最後以 Nicholson-Bailey 模型為基準模擬寄生蜂與蚜蟲的數量關係。透過模擬結果能精確估計寄生蜂數量以達到最佳防治效率。寄生蜂數量充足時，可將寄生蜂分批施放以加速防治蚜蟲。學生觀察到不同種寄生蜂對不同蚜蟲，會經歷不同頻率的尋找，攻擊和寄生行為，寄生成功的機率及寄生蜂與蚜蟲族群之間的數量增減的週期也有所差異，另外市面上也有販售兩種寄生蜂混合使用的生物防治產品可以利用探討寄生蜂之間的相互關係。

1. 研究的方向已經有很多類似的報告，應該找到蚜蟲和寄生蜂之間，沒有報導過的方向來進行，比較有潛力。
2. 你的最重要發現和別人有何不同呢？應該有一個比較表來顯示比較清楚！
3. 數據非常的多，應該選擇最重要的幾個 data 呈現即可，可以表示你跟別人不一樣的地方？否則短時間不易理解。

作品海報

摘要

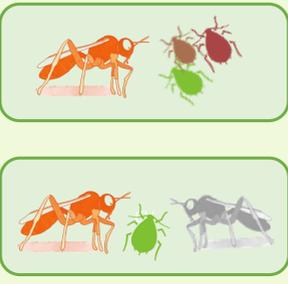
本研究主要了解(1)五種蚜蟲寄生蜂對蚜蟲的偏好(2)寄生蜂之間的競爭關係(3)寄生蜂與蚜蟲族群的動態。不同種寄生蜂對蚜蟲種類偏好不同，細長脛蚜繭蜂偏好棉蚜和稻麥蚜。岐阜蚜繭蜂偏好馬鈴薯蚜及偽菜蚜。廣三叉蚜繭蜂偏好棉蚜。異足蚜小蜂無明顯偏好。柯曼尼蚜繭蜂偏好棉蚜。同種蚜蟲中，寄生蜂偏好高齡期個體。不同種類寄生蜂演化出不同競爭力以共存於自然界中，成蟲幼蟲都可能出現競爭現象。競爭結果使寄生蜂傾向利用不同寄主，亦演化出不同的寄生專一性。最後以Nicholson-Bailey模型為基準模擬寄生蜂與蚜蟲的數量關係，透過模擬能精確估計寄生蜂數量以達到最佳防治效率。寄生蜂數量充足時，可將寄生蜂分批施放以加速防治蚜蟲。

研究動機

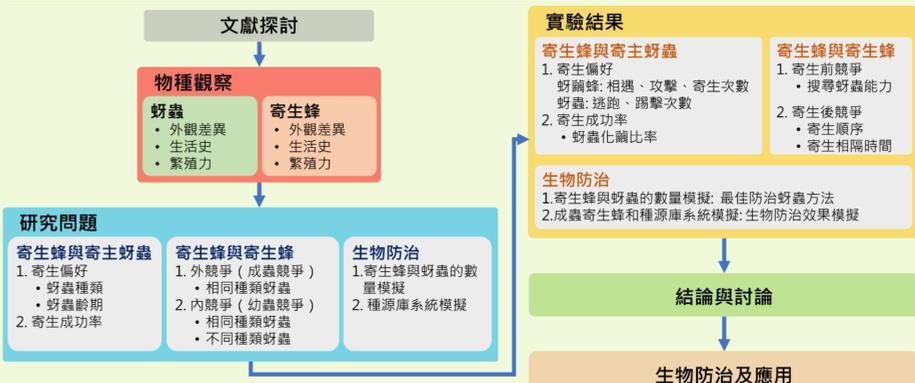
蚜蟲為田間常見的害蟲之一，嚴重危害到植物的生長，現在一些農場漸漸朝有機的方式種植作物，利用天敵預防害蟲。國外早已有生物防治公司，例如荷蘭 Koppert 等，販售寄生蜂來抑制蚜蟲族群的生長，且針對不同種蚜蟲會使用不同種寄生蜂。我們觀察到不同種寄生蜂對不同蚜蟲會呈現不同程度的行為，寄生成功的機率及寄生蜂與蚜蟲族群之間的數量增減的週期也有所差異。另外，市面上也有販售兩種寄生蜂混合使用的生物防治產品，於是進而探討寄生蜂間的相互關係。

研究目的

- 寄生蜂與蚜蟲間的關係為何？
 - 探討寄生蜂對蚜蟲的寄生偏好
 - 寄生蜂的寄生偏好是否受蚜蟲種類影響？
 - 寄生蜂的寄生偏好是否受蚜蟲齡期影響？
 - 探討寄生蜂的寄生成功率
- 不同種寄生蜂間的競爭關係為何？
 - 不同寄生蜂的外競爭（成蟲競爭）
 - 不同寄生蜂的內競爭（幼蟲競爭）
- 探討寄生蜂對於生物防治之應用
 - 探討寄生蜂數量與蚜蟲數量週期之間的關係
 - 種原庫系統模擬



研究架構



實驗物種介紹

一、蚜蟲

(一) 生活史

◆ 幼蟲長成成蟲可立即生下一代若蟲，繁殖速率快。
◆ 造成植物營養不良、分泌蜜露使黴菌生長。
◆ 可產生有翅型蚜蟲，更易於散播植物病毒。

(二) 實驗蚜蟲種類

棉蚜 <i>Aphis gossypii</i> 寄主植物: 茄子、小黃瓜	馬鈴薯蚜 <i>Aulacorthum solani</i> 寄主植物: 彩椒、馬鈴薯	偽菜蚜 <i>Lipaphis erysimi</i> 寄主植物: 小白菜、高麗菜	稻麥蚜 <i>Rhopalosiphum padi</i> 寄主植物: 小麥、大麥
--	--	--	--

二、寄生蜂

(一) 生活史

◆ 一隻寄生蜂可寄生數隻蚜蟲，可以防治農場中的蚜蟲。
◆ 受寄生蚜蟲在數日後會形成蚜繭mummy(寄生蜂繭)。
◆ 蚜小蜂科與蚜繭蜂科寄生蜂的寄生方式不同。

(二) 實驗寄生蜂種類

細長脛蚜繭蜂 <i>Lipolexis gracilis</i>	岐阜蚜繭蜂 <i>Aphidius qifuensis</i>	廣三叉蚜繭蜂 <i>Trioxys communis</i>	柯曼尼蚜繭蜂 <i>Aphidius colemani</i>	異足蚜小蜂 <i>Aphelinus varipes</i>
--	---	--	---	--

研究過程及方法

一、蚜蟲飼養及生活史

(一) 蚜蟲飼養與繁殖

- 以栽培盆種植寄主植物。
- 將蚜蟲放入栽培盆中繁殖。

(二) 蚜蟲生活史觀察(n=10)

- 將1齡若蟲置於塑膠盒中(每盒1隻)，置於植物生長箱中。
- 記錄四種蚜蟲終齡齡期數、換齡所需天數及成蟲每天產出若蟲數量。

二、寄生蜂飼養及生活史

(一) 寄生蜂飼養與繁殖

- 同寄主蚜蟲裝入洗衣網繁殖。
- 以吸蟲管集中羽化的成蟲。
- 放置1天確保交配後進行實驗。

(二) 寄生蜂生活史觀察(n=10)

- 觀察其每日羽化數量。
- 記錄幼蟲在寄生後第幾日化繭。
- 觀察成蟲存活天數。

三、寄生偏好

一、多種蚜蟲實驗(n=10)

- 在培養皿中放入四種蚜蟲成蟲各2隻。
- 將寄生蜂放入有蚜蟲之培養皿20分鐘。
- 記錄寄生蜂對蚜蟲的寄生行為次數。

二、單一蚜蟲實驗(n=20)

- 培養皿中放入單種蚜蟲五種齡期各1隻。
- 將寄生蜂放入有蚜蟲之培養皿20分鐘。
- 記錄寄生蜂對蚜蟲的寄生行為次數，以了解寄生蜂對蚜蟲種類與齡期的偏好。

四、寄生成功率(n=10)

- 在塑膠盒中放入10隻成蟲。
- 將寄生蜂放入有蚜蟲之培養皿中120分鐘。
- 觀察蚜蟲化繭的數量，了解寄生蜂的寄生成功率。

五、外競爭(n=10)

- 在塑膠盒中放入10隻成蟲。
- 將寄生蜂放入有蚜蟲的塑膠盒中30分鐘。
- 計算不同寄生蜂在相同時間內寄生成功的蚜蟲數量(化繭數量)，以了解寄生蜂的外競爭能力。

六、內競爭(n=10)

- 將A寄生蜂放入培養皿中，確認其寄生每一隻蚜蟲。
- 將蚜蟲靜置0或24小時。
- 將B寄生蜂放入培養皿中，確認每一隻蚜蟲皆被寄生。
- 計算A與B寄生蜂繭的數量，了解寄生蜂的內競爭能力。

七、蚜蟲與寄生蜂族群動態變化模擬

Nicholson-Bailey模型：解釋寄生物與寄主的族群關係

$$H_{t+1} = k \times H_t \times e^{-aP_t}$$

$$P_{t+1} = c \times H_t \times (1 - e^{-aP_t})$$

模型修改：將寄生能力(a)修改為寄生蜂對不同蚜蟲齡期的偏好。

蚜蟲數量：
 $H_{(t+1,1)} = H_{(t,5)} \times k$
 $H_{(t+1,2)} = H_{(t,1)}$
 $H_{(t+1,3)} = H_{(t,2)}$
 $H_{(t+1,4)} = H_{(t,3)}$
 $H_{(t+1,5)} = H_{(t,5)} + H_{(t,4)} - P_{t-l_p}$
 總數： $H_t = \sum_{i=1}^5 H_{(t,i)}$

寄生蜂數量：
 $P_{(t,1)} = H_{(t,1)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_1/E_1$
 $P_{(t,2)} = H_{(t,2)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_2/E_2$
 $P_{(t,3)} = H_{(t,3)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_3/E_3$
 $P_{(t,4)} = H_{(t,4)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_4/E_4$
 $P_{(t,5)} = H_{(t,5)} \times [1 - (1 - L/H_t)^{P_t}] \times c \times T_5/E_5$
 $P_t = \sum_{i=1}^5 P_{(t-l_e,i)}$

研究結果

一、蚜蟲與寄生蜂的基本特性

(一) 蚜蟲

表四、四種蚜蟲生活史平均天數(n=10)

	1st~2nd	2nd~3rd	3rd~4th	4th~5th	總天數
棉蚜	1.2天	1.0天	1.4天	1.6天	5.2天
馬鈴薯蚜	1.2天	1.0天	1.2天	1.6天	5.0天
偽菜蚜	1.2天	1.0天	1.3天	1.7天	5.2天
稻麥蚜	1.2天	1.0天	1.4天	1.2天	4.8天

表五、四種蚜蟲產平均若蟲數(n=10)

	每日產若蟲數(k)	蚜蟲存活天數	一生總產若蟲數
棉蚜	6.72隻	11.0天	74.25隻
馬鈴薯蚜	4.52隻	12.6天	56.95隻
偽菜蚜	5.08隻	17.4天	88.39隻
稻麥蚜	5.78隻	8.9天	51.44隻

(二) 寄生蜂

表六、寄生蜂生活史實驗結果(n=5)

	寄生~化繭(l _p)	化繭~羽化(l _e)	羽化~死亡	總天數
細長脛蚜繭蜂	5.1天	7.0天	3.7天	15.8天
岐阜蚜繭蜂	6.0天	5.4天	3.3天	14.7天
廣三叉蚜繭蜂	5.7天	5.9天	4.7天	16.3天
異足蚜小蜂	5.0天	7.2天	3.9天	16.1天
柯曼尼蚜繭蜂	6.4天	7.1天	6.0天	19.5天

表七、五種寄生蜂的寄生能力(L)(n=5)

	棉蚜	馬鈴薯蚜	偽菜蚜	稻麥蚜
細長脛蚜繭蜂	91.2隻	14.4隻	0隻	91.2隻
岐阜蚜繭蜂	0隻	86.4隻	0隻	0隻
廣三叉蚜繭蜂	81.6隻	0隻	0隻	0隻
異足蚜小蜂	69.6隻	62.4隻	67.2隻	48.0隻
柯曼尼蚜繭蜂	67.2隻	76.8隻	0隻	144.0隻

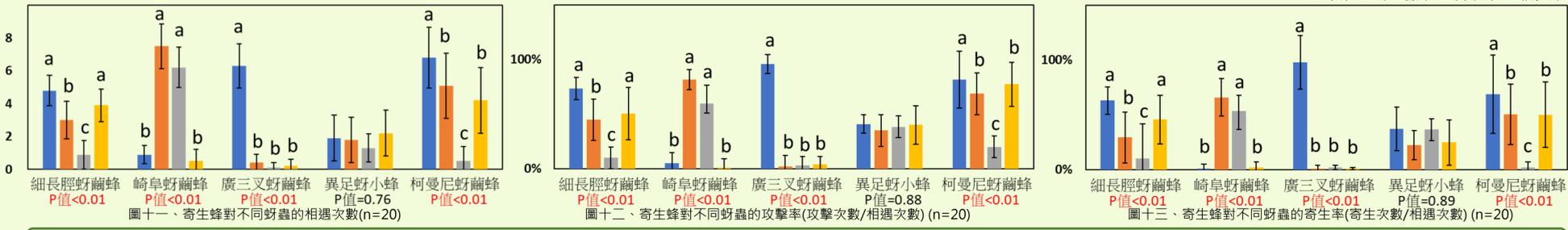
- 寄生到化繭約5~6天，化繭到羽化約6~7天，羽化後約存活3~6天。
- 在模型中模擬寄生蜂族群的狀況。寄生蜂的寄生能力(L)用於模擬蚜蟲被寄生蜂寄生的隻數。

一、寄生蜂的寄生偏好



(一) 寄生蜂同時面對四種蚜蟲的蚜蟲種類偏好

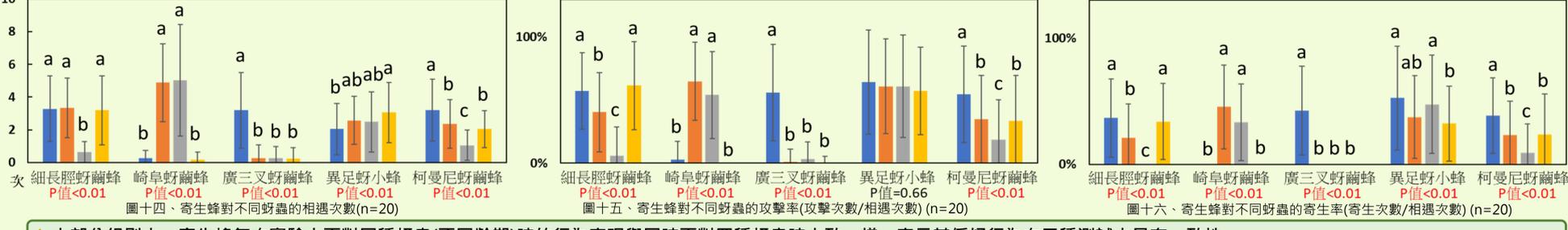
一培養皿放入四種蚜蟲的成蟲



◆寄生偏好分別為：細長脛蚜繭蜂：棉蚜=稻麥蚜>馬鈴薯蚜>偽菜蚜。崎阜蚜繭蜂：馬鈴薯蚜=偽菜蚜>棉蚜=稻麥蚜。廣三叉蚜繭蜂：棉蚜>馬鈴薯蚜=偽菜蚜=稻麥蚜。異足蚜小蜂不偏好特定蚜蟲。柯曼尼蚜繭蜂：棉蚜>馬鈴薯蚜=稻麥蚜>偽菜蚜。
 ◆觀察寄生蜂對蚜蟲的相遇次數、攻擊率及寄生率，發現同種寄生蜂中三種行為頻率的趨勢相同。蚜繭蜂科的四種寄生蜂對不同種蚜蟲的行為頻率皆有顯著差異，代表牠們會偏好特定種類的蚜蟲。蚜小蜂對不同種蚜蟲的行為頻率無顯著差異，代表牠對不同蚜蟲種類無特別的偏好。

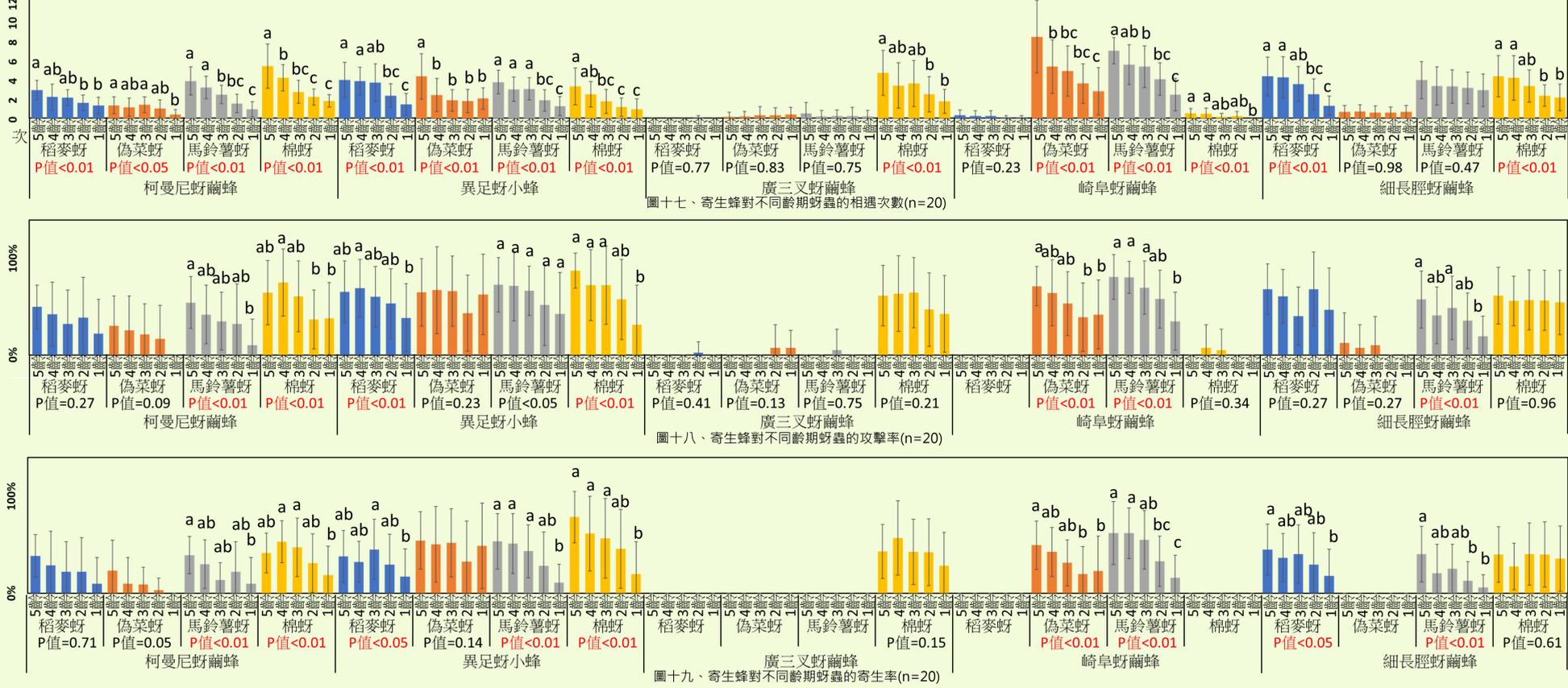
(二) 寄生蜂面對單一蚜蟲時對蚜蟲種類的偏好

一培養皿中放入單一種類蚜蟲的蚜蟲(五種齡期各一)



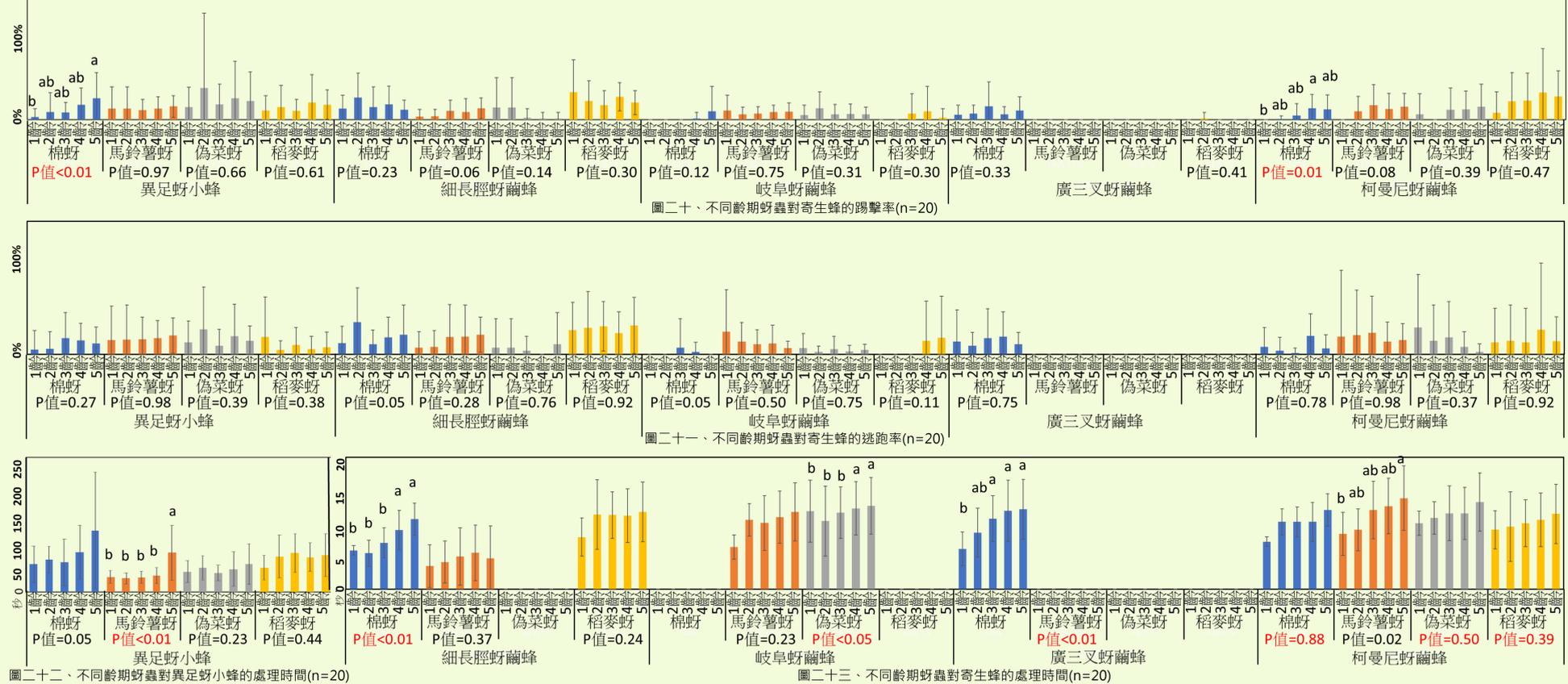
◆大部分組別中，寄生蜂每次實驗中面對同種蚜蟲(不同齡期)時的行為表現與同時面對四種蚜蟲時大致一樣，表示其偏好行為在二種測試中具有一致性。
 ◆例外：(1)細長脛蚜繭蜂在只有馬鈴薯蚜的環境下搜尋馬鈴薯蚜的效率較高。(2)異足蚜小蜂在只有單一蚜蟲的狀態下，對各種蚜蟲搜尋及寄生效率出現差異，但將蚜蟲兩兩比較時差異不大。

(三) 寄生蜂對蚜蟲齡期的偏好



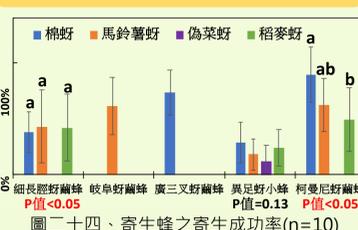
◆相遇次數高的實驗組中皆發現寄生蜂會偏好尋找高齡期的蚜蟲(圖十七)，推測此類寄生蜂使用視覺搜尋蚜蟲。
 ◆在攻擊上偏好高齡蟲的組別，在寄生率上也會偏好高齡蚜蟲。且寄生蜂對蚜蟲齡期的攻擊率及寄生率有顯著差異的組別中，皆偏好高齡期的蚜蟲。推論大多數寄生蜂會偏好高齡蚜蟲是因為高齡期的蚜蟲能提供其後代較多養分。
 ◆比對三資料可大致將寄生蜂對蚜蟲的齡期偏好分為三類：(1)在相遇次數上偏好高齡蟲，且也偏好攻擊及寄生高齡蟲。例：柯曼尼蚜繭蜂與棉蚜。(2)在相遇次數上偏好高齡蟲，但在攻擊、寄生上無顯著偏好。例：廣三叉蚜繭蜂與棉蚜。(3)在相遇次數上不偏好任何齡期蚜蟲，但在攻擊及寄生時偏好高齡蟲。例：細長脛蚜繭蜂與馬鈴薯蚜。

(四) 蚜蟲的防禦與寄生蜂的寄生處理時間



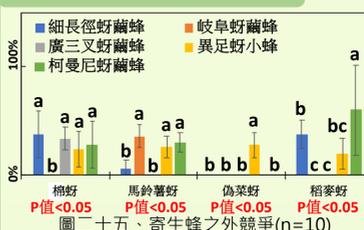
◆在踢擊率和逃跑率中，大部分組別中不同齡期蚜蟲被攻擊或寄生時，踢擊和逃跑的頻率相同。推論寄生蜂攻擊同種蚜蟲時，其齡期偏好不受蚜蟲的齡期不同而影響。
 ◆但例外為柯曼尼蚜繭蜂與異足蚜小蜂，受到高齡期的棉蚜較高的踢擊次數。推測蚜小蜂因為處理時間較其他蜂久(平均60.2秒)，造成在單次相遇中，蚜蟲踢擊較多次。而柯曼尼蚜繭蜂在寄生蚜蟲時會用觸角持續不斷碰觸蚜蟲，可能造成較大的刺激，因此引起蚜蟲較多踢擊反應。
 ◆寄生蜂的處理時間方面，均呈現蚜蟲齡期愈高，處理時間長的趨勢，推測這是因為高齡期的蚜蟲踢擊力道較強所導致。

三、寄生蜂的寄生成功率



- ◆ 細長徑蚜繭蜂：棉蚜=馬鈴薯蚜>稻麥蚜>偽菜蚜
 - ◆ 岐阜蚜繭蜂：馬鈴薯蚜>棉蚜=稻麥蚜=偽菜蚜
 - ◆ 廣三叉蚜繭蜂：棉蚜>馬鈴薯蚜=稻麥蚜=偽菜蚜
 - ◆ 異足蚜小蜂：馬鈴薯蚜=棉蚜=稻麥蚜=偽菜蚜
 - ◆ 柯曼尼蚜繭蜂：棉蚜>馬鈴薯蚜>稻麥蚜=偽菜蚜
- 寄生專一性較低的蜂，寄生成功率較低(柯曼尼蚜繭蜂例外)。由結果可知寄生單種蚜蟲的岐阜蚜繭蜂、廣三叉蚜繭蜂寄生成功率皆較高。

四、寄生蜂的外競爭



- ◆ 棉蚜：細長徑=廣三叉=蚜小蜂=柯曼尼>岐阜
 - ◆ 馬鈴薯蚜：岐阜=蚜小蜂=柯曼尼>細長徑=廣三
 - ◆ 偽菜蚜：蚜小蜂>細長徑=廣三叉=柯曼尼=岐阜
 - ◆ 稻麥蚜：柯曼尼>細長徑=蚜小蜂>廣三叉=岐阜
- 寄生不同蚜蟲時，皆有顯著的競爭優劣。

五、寄生蜂的內競爭

表八、細長徑蚜繭蜂與柯曼尼蚜繭蜂的內競爭(n=10)

組別	細長徑蚜繭蜂(A蜂)	柯曼尼蚜繭蜂(B蜂)	相隔時間(hr)	蚜蟲種類	平均數		中位數		P值(顯著性)
					A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	棉蚜	1.5	0.4	2.0	0.0	P<0.01
2	先寄生	後寄生	24	棉蚜	1.0	0.2	1.0	0.0	P<0.01
3	後寄生	先寄生	24	棉蚜	0.2	1.9	0.0	2.0	P<0.01
4	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	1.2	0.5	1.0	0.0	P=0.08
5	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	1.4	1.0	1.0	0.0	P<0.01
6	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	1.0	0.6	1.0	0.5	P=0.43
7	同時寄生	同時寄生	0	稻麥蚜	1.0	0.2	1.0	0.0	P<0.05
8	先寄生	後寄生	24	稻麥蚜	1.2	0.3	1.0	0.0	P<0.01
9	後寄生	先寄生	24	稻麥蚜	0.2	0.3	0.0	0.0	P=0.95

表九、細長徑蚜繭蜂對異足蚜小蜂的內競爭(n=10)

組別	細長徑蚜繭蜂(A蜂)	異足蚜小蜂(B蜂)	相隔時間(hr)	蚜蟲種類	平均數		中位數		P值(顯著性)
					A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	棉蚜	0.7	2.3	0.0	2.5	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	棉蚜	0.9	1.3	1.0	1.5	P=0.38
3	後寄生	先寄生	24	棉蚜	1.4	2.5	1.0	2.5	P=0.08
4	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	1.1	0.9	1.0	1.0	P=0.74
5	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	1.6	1.7	2.0	1.5	P=0.84
6	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	1.5	1.7	2.0	2.0	P=0.71
7	同時寄生	同時寄生	0	稻麥蚜	2.1	0.1	2.0	0.0	P<0.01
8	先寄生	後寄生	24	稻麥蚜	2.8	0.8	2.5	1.0	P<0.01
9	後寄生	先寄生	24	稻麥蚜	0.7	0.8	1.0	1.0	P=0.83

表十、細長徑蚜繭蜂對岐阜蚜繭蜂的內競爭(n=10)

組別	細長徑蚜繭蜂(A蜂)	岐阜蚜繭蜂(B蜂)	相隔時間(hr)	蚜蟲種類	平均數		中位數		P值(顯著性)
					A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	棉蚜	1.8	0.6	2.0	0.0	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	1.4	1.0	1.5	1.0	P=0.36
3	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	1.1	1.5	1.0	1.5	P=0.58

- ◆ 寄主為棉蚜與稻麥蚜時，細長徑蚜繭蜂較佔優勢，但先寄生的柯曼尼蚜繭蜂(組別3)則逆轉取得競爭中的優勢(P<0.01)。
- ◆ 兩種蚜繭蜂的競爭優勢不受寄主種類影響，細長徑蚜繭蜂比柯曼尼蚜繭蜂較佔有優勢；先寄生的蜂則佔有優勢。

- ◆ 寄主為棉蚜時(組別1~3)，異足蚜小蜂佔優勢。寄主為馬鈴薯蚜(組別4~6)，兩寄生蜂不論是同時寄生或相隔一天寄生，都沒有顯著差異。在稻麥蚜中，細長徑蚜繭蜂較有優勢(組別7~9)。
- ◆ 決定優勢的因子為蚜蟲的種類、產卵順序和間隔時間，產卵愈早愈佔有優勢。

表十一、岐阜蚜繭蜂對異足蚜小蜂的內競爭(n=10)

組別	岐阜蚜繭蜂(A蜂)	異足蚜小蜂(B蜂)	相隔時間(hr)	蚜蟲種類	平均數		中位數		P值(顯著性)
					A	B	A	B	
1	同時寄生	同時寄生	0	馬鈴薯蚜	1.7	0.7	1.5	1.0	P<0.05
2	先寄生	後寄生	24	馬鈴薯蚜	2.8	0.8	3.0	0.5	P<0.01
3	後寄生	先寄生	24	馬鈴薯蚜	0.9	0.4	1.0	0.0	P=0.58

- ◆ 兩蜂同時寄生的實驗組中，細長徑蚜繭蜂較佔優勢。寄生專一性高的蜂不一定具有較高的競爭力。
- ◆ 兩蜂同時寄生的實驗組中，寄生專一性高的岐阜蚜繭蜂具有優勢。推論在蚜繭蜂科與蚜小蜂科的競爭中，寄生專一性高的寄生蜂具優勢。

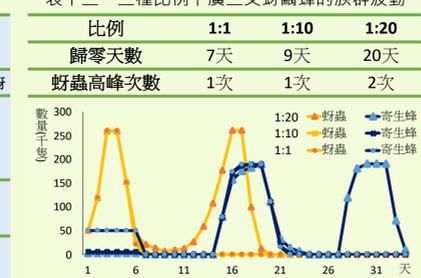
六、蚜蟲與寄生蜂族群動態變化模擬

(一)寄生蜂&蚜蟲數量比例與防治時間的關係

表十二、五種寄生蜂對蚜蟲的寄生參數列表

寄生蜂種類	異足蚜小蜂		細長徑蚜繭蜂		柯曼尼蚜繭蜂		廣三叉蚜繭蜂		岐阜蚜繭蜂	
	棉蚜	偽菜蚜	馬鈴薯蚜	棉蚜	馬鈴薯蚜	棉蚜	馬鈴薯蚜	棉蚜	馬鈴薯蚜	
寄生~化繭(T ₁ /E ₁)	5天	5天	5天	5天	5天	6天	6天	6天	6天	
寄生~羽化(T ₂ /E ₂)	12天	12天	12天	12天	12天	13天	13天	12天	12天	
羽化~死亡(T ₃ /E ₃)	4天	4天	4天	4天	4天	6天	6天	5天	5天	
寄生成功率(c)	29%	12%	18%	38%	43%	89%	62%	73%	61%	
每天寄生數量(L)	57隻	67隻	62隻	91隻	14隻	67隻	82隻	82隻	86隻	
1.寄生備好(T ₁ /E ₁)	0.39	0.46	0.20	0.16	0.10	0.42	0.07	0.46	0.22	
2.寄生備好(T ₂ /E ₂)	0.49	0.33	0.32	0.32	0.22	0.38	0.14	0.58	0.36	
3.寄生備好(T ₃ /E ₃)	0.69	0.54	0.43	0.37	0.21	0.45	0.24	0.47	0.53	
4.寄生備好(T ₄ /E ₄)	0.74	0.67	0.50	0.46	0.33	0.35	0.22	0.69	0.63	
5.寄生備好(T ₅ /E ₅)	0.73	0.59	0.55	0.46	0.46	0.45	0.37	0.47	0.64	

表十三、三種比例下廣三叉蚜繭蜂的族群波動



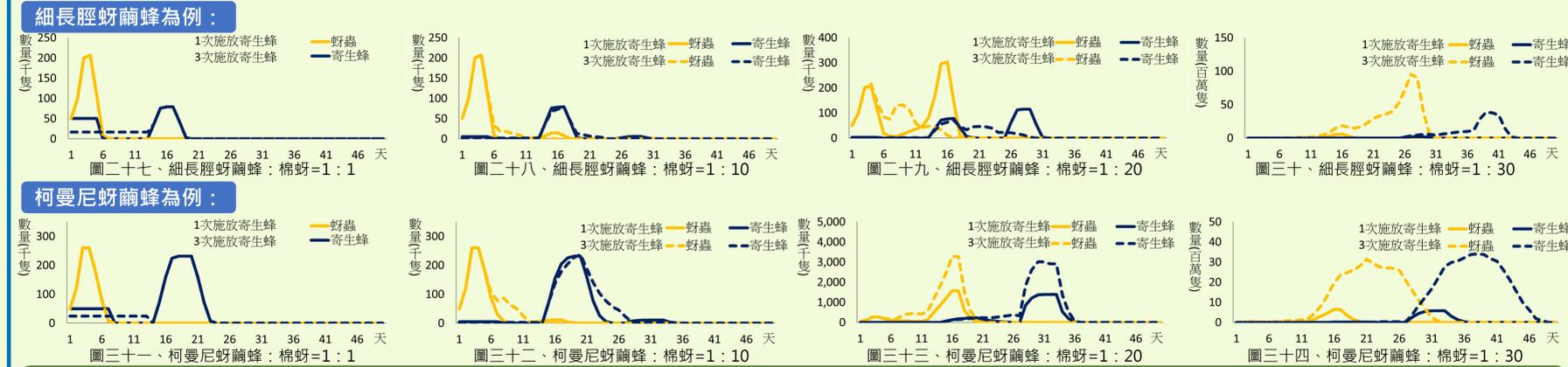
表十四、寄生蜂與蚜蟲的數量比例與蚜蟲歸零時間的關係

寄生蜂:蚜蟲數量	1:01	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60	1:70	1:80	1:90	1:100
異足蚜小蜂	7天	33天	失控								
棉蚜	6天	19天	21天	21天	32天	34天	38天	失控	失控	失控	失控
細長徑蚜繭蜂	7天	20天	20天	20天	23天	26天	33天	36天	失控	失控	失控
廣三叉蚜繭蜂	6天	8天	19天	19天	19天	21天	21天	23天	32天	32天	38天
寄生蜂:蚜蟲數量 <th>1:01</th> <th>1:10</th> <th>1:20</th> <th>1:30</th> <th>1:40</th> <th>1:50</th> <th>1:60</th> <th>1:70</th> <th>1:80</th> <th>1:90</th> <th>1:100</th>	1:01	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60	1:70	1:80	1:90	1:100
細長徑蚜繭蜂	7天	失控									
異足蚜小蜂	7天	19天	43天	失控							
馬鈴薯蚜	8天	8天	21天	21天	21天	25天	26天	34天	34天	34天	34天
柯曼尼蚜繭蜂	8天	8天	21天	21天	21天	25天	26天	34天	34天	34天	34天
岐阜蚜繭蜂	7天	8天	19天	19天	19天	19天	22天	23天	24天	31天	31天
寄生蜂:蚜蟲數量 <th>1:01</th> <th>1:10</th> <th>1:20</th> <th>1:30</th> <th>1:40</th> <th>1:50</th> <th>1:60</th> <th>1:70</th> <th>1:80</th> <th>1:90</th> <th>1:100</th>	1:01	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60	1:70	1:80	1:90	1:100
偽菜蚜	7天	19天	31天	失控							
異足蚜小蜂	7天	19天	31天	失控							

圖二十六、三種比例下廣三叉蚜繭蜂的族群波動

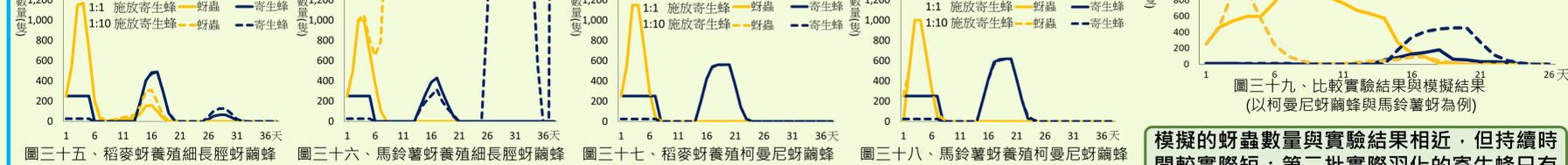
寄生蜂與蚜蟲的數量比為1:1及1:10時，防治的效果僅相差二天，但是1:10與1:20就相差了11天。推論在一定範圍的比例內，會有相近的防治效果。而在防治效能相同的範圍內應選擇較經濟的方式施放寄生蜂。

(二)分批施放寄生蜂



- ◆ 比較單批施放與多批施放寄生蜂寄生蜂的成效。發現比例為1:10與1:20時，分次施放可以有效避免蚜蟲再次上漲。比例為1:30且寄生蜂時，因單日內寄生蜂總數不足，反而使防治效率降低。
- ◆ 將寄生蜂分批施放時需考慮寄生蜂蚜蟲比例與寄生蜂特性以達最佳防治效果。

(三)種源庫實驗結果與模擬結果比較



- ◆ 以馬鈴薯蚜作細長徑蚜繭蜂(1:10)的種源庫系統能有較長的防治效果(50天以上)。
- ◆ 建立種源庫系統，須考慮寄生蜂的特性改變施放比例，且最初不宜施放過高寄生蜂比例才能具有長期的防治效果。

討論與結論

- ### 一、五種寄生蜂對四種蚜蟲之種類偏好行為比較
1. 多數寄生蜂會以視覺或化學訊號來確認遠距離的寄主方位，再以聽覺、嗅覺確認寄主的確切位置(Wang and Yang, 2008)。
 2. 小繭蜂科(Braconidae)寄生蜂對蚜蟲種類的偏好明顯，而蚜小蜂科(Aphelinidae)寄生蜂則無明顯偏好，顯示不同科的寄生蜂在選擇蚜蟲寄生的策略可能不同。
 3. 寄生蜂對蚜蟲的種類偏好行為可能與寄生成功率有關。其中寄生蜂的偏好選用攻擊率作為比較標準，因攻擊率較符合寄生蜂主動選擇蚜蟲的概念。比對寄生蜂對蚜蟲的攻擊行為和寄生成功率的結果後發現，寄生蜂均偏好牠寄生成功率最高的蚜蟲。例如，柯曼尼蚜繭蜂最偏好棉蚜，而牠對棉蚜的寄生成功率也最高。
- ### 二、五種寄生蜂對不同齡期蚜蟲的寄生行為與蚜蟲防禦比較
1. 寄生蜂在搜尋行為上，除了以視覺定位寄主之外，有時亦會利用寄主取食植物寄主所產生的揮發物質進行定位。體型較大的蚜蟲分泌更多的化學誘因。推論寄生蜂可能是透過視覺與嗅覺選擇寄生高齡蟲。寄生蜂偏好選擇齡期較高的蚜蟲，可能是因為高齡蟲體型大，能提供的營養較為充足，利於寄生蜂幼蟲的發育。
 2. 觀察不同齡期蚜蟲的防禦行為，發現蚜蟲踢擊與逃跑的頻率均不因齡期增加而改變。但寄生蜂寄生單隻蚜蟲的處理時間隨著蚜蟲齡期增加而增多，推測此可能是因高齡期蚜蟲的踢擊力道較強導致。

- ### 三、五種寄生蜂對四種蚜蟲的寄生成功率比較
1. 寄生較廣泛的寄生蜂寄生成功率較低，適合在寄主種類多，多樣性高的環境生存。而專一性較高的寄生蜂的寄生成功率則較高則利於適應寄主單一的環境。推論此為演化上發展出的不同模式。
 2. 寄生成功率代表寄生蜂幼蟲的存活能力。比對寄生偏好與成功率，我們推測寄生蜂幼蟲在蚜蟲體內存活的能力是寄生蜂產生寄生偏好的原因。唯一的例外為細長徑蚜繭蜂較偏好寄生棉蚜與稻麥蚜，但對馬鈴薯蚜卻具有較高的寄生成功率。推論因馬鈴薯蚜的體型較棉蚜與稻麥蚜大，具較高的防禦能力。導致細長徑蚜繭蜂較難寄生成功，從而尋找較易寄生的兩種蚜蟲。
- ### 四、不同寄生蜂間的競爭關係
1. 外競爭較優勢的寄生蜂可以快速搜尋到蚜蟲，發現蚜蟲的機率較高、寄生的機會較多。且當作寄主的蚜蟲種類不同時，需挑選不同在外競爭中佔有優勢的寄生蜂。在選用生物防治的寄生蜂時，適合應用在施放區域大且蚜蟲較少的情況。
 2. 內競爭較優勢的寄生蜂在需競爭寄主時能使族群較易存活。若實際應用在生物防治時沒有考慮到寄生蜂的內競爭能力，則可能面臨原本用於防治的寄生蜂被其他外來競爭能力高但寄生成功率低的寄生蜂在競爭中取代，造成防治效果不彰。所以選擇生物防治的寄生蜂時需考慮其外競爭與內競爭能力。

參考資料

Bouchard Y., Cloutier C.(1984). Honeydew as a source of host searching kairomones for the aphid parasitoid Aphidius nigripes (Hymenoptera: Aphididae). Canadian Journal of Zoology 62(8):1513-1520.

Budenberg W.J.(1990). Honeydew as a contact kairomone for aphid parasitoids Entomologia Experimentalis et Applicata 5 2 139-148

Budenberg W.J., Powell W. (1992) The role of honeydew as an ovipositional stimulant for two species of syrphids. Entomologia Experimentalis et Applicata 64 1 57-61

Cloutier C., Mackauer M. (1979) The effect of parasitism by Aphidius smithi (Hymenoptera: Aphididae) on the food budget of the pea aphid, Acyrthosiphon pisum (Homoptera:Aphididae). Can. J. Zool. 57: 1605 - 1611.

Fellowes, M. D. E., J. J. M. van Alphen, and M. A. Jervis.2005. Foraging behaviour. p.1 - 17. in: Insects as Natural Enemies: A Practical Perspective. (Jervis, M.A., ed.) Springer, Dordrecht, the Netherlands. 748pp.

Geoffroy H.C.J.(1994). Parasitoids: Behavioral and Evolutionary Ecology. New Jersey: Princeton University Press.

Hempfling GE, Mills NJ. (2017).Biological Control: Ecology and Applications. Cambridge: Cambridge University Press;

Harvey J.A., Poelman E.H., Tanaka T.(2013). Annual Review of Entomology, 58: 333-351.

Hassell MP. 2000) Host - parasitoid population dynamics. J Anim Ecol.,69:543 - 566.

Japostivili, G. & Abrantes, I. (2006). Aphelinus species (Hymenoptera: Aphelinidae) from the Iberian Peninsula, with the description of one new species from Portugal. Journal of Natural History, 40, 855 - 862.

Kraft L.J., Kopco J., Harmon J.P., Oliver K.M. (2018). Correction: Aphid symbionts and endogenous resistance traits mediate competition between rival parasitoids. PLOS ONE 13(1): e0190763.

Larval competition between Aphidius colemani and Lysiphlebus testaceipes after multiparasitism of the host Aphis gossypii. Bulletin of Insectology, 59, 147 - 151.

Sanchez J.A., La-Spina M., Michelena J.M., Lacasa A., Hermoso de Mendoza A..(2011). Ecology of the aphid pests of protected pepper crops and their parasitoids. Biocontrol Science and Technology 21:2, pages 171-188.

van Lenteren, J.C.(1986). Parasitoids in the Greenhouse: Successes with Seasonal Inoculative Release System. Insect Parasitoids, 13th Symposium of the Royal Entomological Society of London. London: Academic Press,342-374.

van Roermund H J W, van Lenteren J.C, Rabbinge R.(1997). Biological Control,9(1): 25-47.

巫騰翔, 馬寶旭, 徐瑋, 張蓉, 何嘉, 張潤志 (2017)沙地木蠹跳小蜂對枸杞木蠹的寄生生物學特性。昆蟲學報, 60(4): 431-440.

何餘容, 呂利華, 陳科偉 (2005). 兩種赤眼蜂對小菜蛾卵的寄生能力和種間競爭。生態學報,2005,25(4):837-841.

徐海雲、楊念婉、曹瀟浩 (2014). 寄生蜂的外競爭和內競爭作用。中國生物防治學報, 30 (4) : 546-551.

歐淑影 (2011). 中國蚜小蜂屬系統分類研究 (綱目目: 蚜小蜂科) 東北林業大學

陳業 (2017). 中國蚜小蜂科部分屬的分類研究 (綱目目: 小蜂總科)

曾經洲, 高德生(1995). 殺蟲劑對銀葉粉蝨之寄生蜂—東方蚜小蜂及淺黃蚜小蜂之毒性。植保會刊37: 271-279.

梁啟富, 古秀廷 (2001). 五種非洲菊斑潛蠅寄生蜂 (綱目目: 細小蜂科、小繭蜂科) 對寄生齡期的偏好性。臺灣昆蟲 21: 89-97.

金慧蓮、陶家駒. 1989. 臺灣省常見蚜蟲彩色圖說. 台中: 興農雜誌社.

陶家駒. 1990. 臺灣省蚜蟲誌. 台北: 臺灣省立博物館出版部.

https://www.baphiq.gov.tw/files/web_articles_files/baphiq/10326/2307.pdf

https://www.mdais.gov.tw/redirect_files.php?id=2474&file_name=QQOoMGJdZnK7mYsWGx70du2dn0l0LDc9dEKDqWGEqWlEgEqlJ2wWGSllast2wEAOaWT0iXZjC8rUCOg8aaQ6ur6HS2ZA3LQaQJZL