

2009 年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

編號： 050009

作品名稱

Lose Trail Pheromone ?

Application of adult transport to optimal feeding

strategy of the Asian needle ant, *Pachycondyla chinensis*.

得獎獎項

動物學科大會獎第二名

候補作品

學校名稱： 國立新莊高級中學

作者姓名： 許峰銓 陳澤君

指導老師： 鐘兆晉 李貞苡

關 鍵 字： 成體搬運行為 (adult transport)、搬運者
(porter)、儀式化行為 (ritualized behavior)

作者簡介



許峰銓，我從小生活在純樸的鄉村，徜徉在大自然的懷抱，在成長的過程中比一般人有更多機會接觸到許多形形色色、令我感到驚奇的動植物。也正因為如此，從小我便對於大自然各式各樣的生物有著強烈的興趣，尤其是昆蟲。平常也常閱讀相關領域的書籍以充實自己。很幸運的，上了國中之後能遇見鍾兆晉老師，在他的帶領之下進行科學研究，至今已有 6 年的時間了。從中，我學到的不僅僅是書中的平面知識，還有重要的科學精神以及許多寶貴的研究經驗。很感謝在研究期間，師長、父母以及同儕對我的支持與鼓勵。也非常感謝科教館的培育計畫，能讓我們和大學教授進行各項實驗，順利完成研究。

陳澤君，從小就對各項事物抱持著極大的好奇心，想了解、探索著每個我未知的領域，也因此廣泛涉獵各種資訊與知識，特別是對於動手操作的機械以及電腦軟體。升上國中後，很高興能接受鍾老師的指導，開始參與了原本較不擅長的生物領域，讓我發現生物的奧妙。在研究的過程當中，我學習到了團隊與分工合

作的重要性，讓我體悟到若僅憑一己之力，是無法有效率的完成各項實驗的。感謝國立彰化師範大學的林教授，以及實驗室的學長姐，面對無知的我們，能不厭其煩的解釋各項儀器的操作功能與實驗的操作技巧。在此由衷感謝科教館的培育計畫，能讓我們在高中就有這個機會使用大學的資源進行各項實驗。

摘要

華夏粗針蟻 (*Pachycondyla chinensis*) 偏好分佈於陰暗、潮濕且具大量落葉層之地表土壤環境。為了解華夏粗針蟻是否缺乏嗅跡費洛蒙 (trail pheromon)，本研究使用 ETHOM 行為紀錄軟體、電子顯微鏡 (SEM)、煙燻玻璃法 (sooted glass method)、氣象層析質譜儀 (GC-Mass)、與聚類分析 (cluster analysis) 等方法進行檢測。由行為譜 (ethogram) 分析得知，華夏粗針蟻聚落間職蟻分工嚴謹，且部分亞階級具有成體搬運行為 (adult transport)。經過觀察後，發現其將此行為應用於覓食過程中，並產生一特殊角色—搬運者 (porter)，搬運巢中同伴至食物旁覓食。結果顯示，當巢外食物量少，產生成體搬運行為比例較低。聚落於飢餓的情況下，搬運者數量增加，被搬運者 (portee) 成為搬運者之機率提升，說明其單態型職蟻之角色可迅速轉換。另外，當食物與蟻巢距離超過 25 公分，搬運者產生機率亦下降。若將搬運者於覓食過程中移除，其覓食職蟻數量減少，取食效率降低。藉由公式的推算，模擬其成體搬運行為，可縮短總體覓食距離，減少聚落總能量的消耗，以利其達成最佳化覓食。

abstract

The Asian needle ant, *Pachycondyla chinensis*, its colony usually exist in dark and damp surface soil with decayed defoliation. In order to realize *P. chinensis* lose trail pheromene whether or not, this research use methods include ETHOM behavior record software, SEM, sooted glass method, GC-Mass, cluster analysis. Analyzing the behavior of *P. chinensis* with the ethogram, we knew *P. chinensis* expressed strict division of labor in the colony, and some subcaste workers showed adult transport applied for feeding. As the result, a special character, porter, produced and transported the same nestmate to the food. The study shows that the less food outside the colony is, the lower proportion of adult transport will have. In starvation condition, with the increasing of porters, the proportion that porters change into porters will rise, which explains unitary roles of workers can be changed fast. Moreover, when the food is more than 25 cm away from the nest, the proportion of producing porters will reduce. If we move porters away from the process of feeding, the efficiency of getting food will decrease as well. We simulated adult transport expressed or non-expressed by the formula, discovering they could shorten all distances of feeding, and reduced the consumption of energy of the colony, which is beneficial to achieve optimal feeding strategy.

Lose Trail Pheromone?

Application of adult transport to optimal feeding strategy of the Asian needle ant, *Pachycondyla chinensis*.

前言

華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 廣泛分布於東亞地區，如中國大陸、朝鮮半島、日本、琉球、臺灣以及紐西蘭。華夏粗針蟻為肉食性，主要取食小型節肢動物。生活於林緣環境，於潮濕腐爛的朽木或土壤覆蓋的物體下築巢，如石塊、瓦礫等，偏好黑暗、潮濕的棲地。每個聚落的數量約數百隻至數千隻，可組成多后 (polygynous) 聚落。華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 體長約3.5mm，體軀呈黑色金屬光澤，步足則為棕色。具螫針，被螫傷時會產生劇烈的疼痛。在美國，華夏粗針蟻為入侵外來種。常見於維吉尼亞州 (Virginia)、北卡羅來納州 (North Carolina)、喬治亞州 (Georgia) 和南卡羅來納州 (South Carolina) 等距海較遠的區域。(Japanese Ant Image Database, 2003)

成體搬運行為 (adult transport) 又稱為社會搬運行為 (social carrying)。此行為散見於針蟻亞科 (Ponerinae)、牙針蟻亞科 (Myrmeciinae)、矛蟻亞科 (Dorylinae)、擬家蟻亞科 (Pseudomyrmecinae)、家蟻亞科 (Myrmicinae)、琉璃蟻亞科 (Dolichoderinae) 及山蟻亞科 (Formicinae) 的部分種類。前人的研究皆認為成體搬運行為僅出現於聚落移棲時，且搬運的對象通常限定在年長 (aged)、病弱的 (ailing)、初羽化的 (callow) 工蟻，及有性生殖蟻。(Wilson, E.O. and B.Hölldobler, 1990)



圖 1 華夏粗針蟻
(*P. chinensis*)
俯視圖



圖 2 華夏粗針蟻(*P. hinensis*)
成體搬運行為
(adult transport)

去年暑假，當我們著手進行華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 的研究，將野外採集之聚落移入觀察箱初期，意外發現其高階職蟻 (dominate worker) 表現出成體搬運行為 (adult transport)，作為聚落移棲時之用，此觀察結果也可印證於文獻之紀錄。不過，於接下來的養殖過程中，我們卻觀察到華夏粗針蟻竟可將成體搬運行為 (adult transport) 做進一步之推廣，運用於其覓食過程之中，這是文獻上對於成體搬運行為 (adult transport) 所沒有記載的新功用。華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 成體搬運行為不僅出現於聚落移棲時，更出現於每日之覓食，且其行為過程與覓食模式，較其他蟻種皆不相同，值得深入探討。

於本研究中，首先進行華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 基礎生物學探討，蒐集與其相關之文獻，並採集完整聚落攜回飼養，以利觀察與紀錄；將觀察到之行為數據製成行為譜 (ethogram)，並進行分析。針對記錄到其特殊之成體搬運行為 (adult transport) 以及聚落內搬運者 (porter) 做進一步的科學描述，有助於了解其行為完整過程；設計實驗，分析華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 運用成體搬運行為 (adult transport) 進行覓食之策略，了解其演化淵源與產生此現象之優點，並推導公式加

以印證；最後再探討影響華夏粗針蟻（*P. chinensis*）分工機制之因素，並對台灣之粗針蟻屬（*Pachycondyla*）作聚類分析（cluster analysis），推測其親源關係，以便深入了解華夏粗針蟻聚落內職蟻的覓食行為、分工模式及演化之路徑。

研究方法

一、研究設備及器材：

本研究使用之設備及器材詳如表 1 所示。

表 1 研究設備及其用途

編號	品名	數量	規格
一	相機	一台	FUJIFILM-FinePix F40fd
二	筆記本、筆	一本、一支	無
三	解剖顯微鏡	一台	倍率 20X
四	掃描式電子顯微鏡(SEM)	一台	JSM5600
五	電顯台	4 個	半徑 1 cm
六	氣象層析質譜儀	一台	GC3800-美商瓦里安科技
七	ETHOM 行為紀錄軟體	一套	無
八	NTSYS 形態分類系統軟	一套	無
九	木樁	一根	30×3 cm
十	肥皂水	1L (濃度 1/1000)	濃度 1/1000 倍
十一	鏟子	數支	長 28 cm 寬 8 cm 深 2 cm
十二	麵包蟲	數隻	無
十三	鑷子	二支	扁頭、尖頭
十四	酒精	一瓶	濃度 95%
十五	放大鏡	一個	倍率 15X
十六	昆蟲針	二根	00 號針
十七	竹筷	數支	無
十八	塑膠盒	數個	21×14×4.5 cm
十九	塑膠盤	二個	40×15×2 cm
二十	石膏粉	數包	1 kg
二十一	廣告顏料	數瓶	紅、黃、藍、綠、白
二十二	水彩筆	一支	尖型筆頭
二十三	珍珠板	一片	60×90 cm
二十四	夾鏈袋	一包	240×340mm
二十五	油性筆	一支	ZEBRA-黑

二、研究過程

（一）華夏粗針蟻（*P. chinensis*）基礎生物學探討。

1、華夏粗針蟻研究今昔：

搜尋華夏粗針蟻的相關文獻，有助於了解華夏粗針蟻的生活習性、鑑定特徵與過去相關之研究資料。

2、外觀形態：

利用解剖顯微鏡（20X）觀察，攝影、描繪華夏粗針蟻的外觀形態，並依據文獻提供之鑑定特徵與其他粗針蟻屬（*Pachycondyla*）蟻種進行分類判別與比較。

3、野外調查：

（1）設立樣區：

於林口鄉頂福村之頂福巖祖師廟旁和林口國民中學，各設立一研究樣區，並於樣區中進行觀察、採集和各項實驗等。

（2）掉落式陷阱：

在樣區（sample area）以鐵鎚敲擊直徑為 3 cm 之木樁，深入土中約 15 cm，埋設離心管，排列方式如圖三。陷阱於放入 24 小時後回收，鑑定蟻種並計算數量，以利調查樣區分佈之物種，如圖 3 所示。

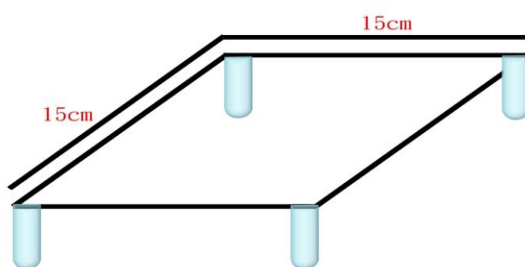


圖 3 掉落式陷阱法示意圖

(3) 目視觀察法：

至華夏粗針蟻棲地，實際觀察其棲地環境、覓食行為及分工情形，並紀錄華夏粗針蟻與其他物種之互動與利害關係。

(4) 生態區位 (niche)：

探討在樣區中的華夏粗針蟻族群與其他物種之相對關係，有助於了解華夏粗針蟻在樣區所佔之生態區位 (niche) 及生態上之重要性。

4、飼養觀察：

至華夏粗針蟻的野外棲地，搜尋並採集完整聚落攜回實驗室，以自製之觀察箱飼養，以利進行觀察。

(1) 採集華夏粗針蟻 (2007 年 8 月起，林口鄉頂福村及林口國民中學等地點)：

① 於樣區之落葉層、朽木及石塊下等棲地中，尋找華夏粗針蟻的地棲巢穴，華夏粗針蟻之自然棲地如圖 4 所示。

② 以鏟子、圓鋤進行挖掘，將完整之聚落連同泥土倒入夾鍊袋，若其聚落棲於朽木中，則將整段朽木放入夾鍊袋，攜回實驗室進行分解。

③ 將泥土靜置於塑膠容器一段時間後，待華夏粗針蟻聚落較為集中，將盒中其餘之泥土、落葉清除。

④ 將華夏粗針蟻之完整聚落移入人工蟻巢 (飼養觀察箱)。

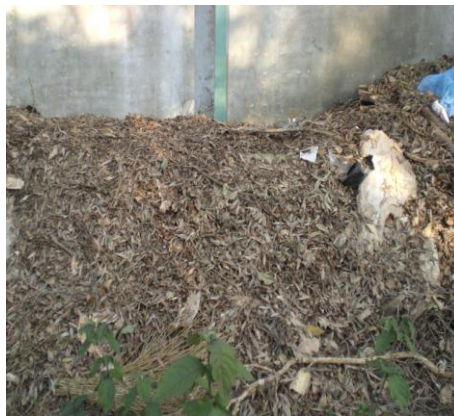


圖 4 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*)
之自然棲地，生活於落
葉堆下

(2) 製作飼養觀察箱：

- ①放入模板，將塑膠盒（20×20 cm）底部灌入 1 cm 高的石膏作為底層。
- ②待石膏硬化後，於凹陷處蓋上玻璃片，形成人工蟻巢，如圖 6 所示。
- ③利用鑽孔機在塑膠盒四周鑽出小孔，以利人工蟻巢之通風。



圖 5 原飼養觀察箱，紅色玻璃紙為
蟻巢區域

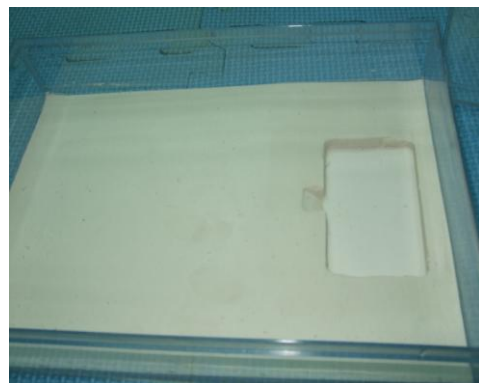


圖 6 改良版之飼養觀察箱

（二）華夏粗針蟻（*P. chinensis*）行為譜（ethogram）分析。

利用統計各行為發生之頻率，間接了解其社會分工行為。

1、行為譜（ethogram）概述：

了解行為譜（ethogram）實驗原理之依據、實驗過程之重點以及測量方法，並實際製作華夏粗針蟻之行為譜。

2、製作行為譜（ethogram）：

- ①觀察華夏粗針蟻在不同狀態下之各種行為，每筆紀錄觀察時間為一分鐘。
- ②重複做此實驗，不限次數。（此實驗為隨機取樣，觀察後不必進行標記。）
- ③將數據以 ETHOM 行為紀錄軟體（施習德，2000）製成行為譜，如圖 7 所示。



圖 7 ETHOM 行為紀錄軟體

（三）華夏粗針蟻（*P. chinensis*）聚落內搬運者（porter）科學描述。

1、成體搬運行為（adult transport）名詞意涵；發現搬運者（porter）。

查詢成體搬運行為（adult transport）文獻及相關之參考資料，並與華夏粗針蟻搬運者（porter）的成體搬運行為進行比較，詳細觀察並紀錄華夏粗針蟻進行成體搬運行為（adult transport）的流程及產生之各種行為，並進行科學描述。

2、掃描式電子顯微鏡（SEM）觀察華夏粗針蟻（*P. chinensis*）進行成體搬運行為（adult transport），以大顎咬合被搬運者（portee）的確切位置：

以掃描式電子顯微鏡（SEM）觀察華夏粗針蟻，了解搬運者（porter）進行成體搬運行為時以大顎咬合被搬運者（portee）的確切位置，是否具有有別於其他粗針蟻屬（*Pachycondyla*）特殊之構造，以便咬合利於進行搬運。

- ①將完整之華夏粗針蟻個體以酒精浸泡，並清洗其體表之雜物。
- ②將標本進行展姿，並以恆溫箱設定 60℃ 進行烘烤。
- ③取半徑 1 cm，高度約 0.4 cm 的鋁製電顯台，將華夏粗針蟻已乾燥之標本以雙面膠黏貼於電顯台上。
- ④放入 coater 中進行 coating。
- ⑤將 coating 完成後之樣本放入掃描式電子顯微鏡（SEM）中進行觀察攝影。

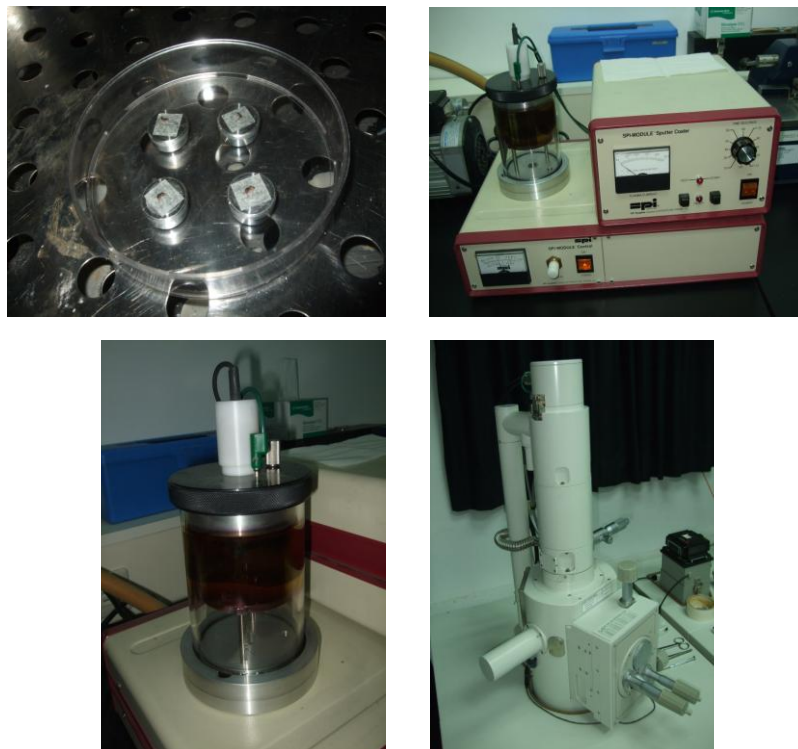


圖 8 掃描式電子顯微鏡（SEM）實驗照。
（攝於國立台灣大學農業昆蟲館）

3、高速攝影機（high-speed videocamera）紀錄華夏粗針蟻（*P. chinensis*）

進行完整的成體搬運行為（adult transport）之過程：

以高速攝影機（high-speed videocamera）彌補現有攝影器材之不足，紀錄其完整且清晰的成體搬運行為（adult transport）過程，有助於對此行為有更深一層的了解，並可提供學術界相關之研究進行參考。

4、搬運者（porter）與其他職蟻的階級體系（caste system）：

觀察華夏粗針蟻搬運者與其他職蟻間的互動模式及接觸後之行為，以便了解搬運者（porter）在華夏粗針蟻巢中之職蟻間的階級地位。

5、運兵時機與序列分析：

紀錄華夏粗針蟻搬運者（porter）進行成體搬運行為（adult transport）的時機與被搬運者（portee）被搬運之地點，並分析搬運者此階級之職蟻搬運之成體的階級地位，以便了解此行為對於巢中其他階級之職蟻的搬運序列。

6、成體搬運行為（adult transport）野外調查：

至華夏粗針蟻的棲地，觀察在自然環境中是否有成體搬運（adult transport）應用於覓食過程中之實例，證實此行為在野生族群亦具有其特殊之實用性。



圖9 移入觀察箱之華夏粗針蟻（*P. chinensis*）聚落

(四) 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 覓食策略分析。

觀察華夏粗針蟻的覓食方式和其覓食路徑，並檢驗搬運者 (porter) 此階級對於聚落的重要性；設計公式，了解運用成體搬運 (adult transport) 是否可達成最佳化之覓食方式。

1、空氣中氣味逸散：

① 氣味濃度梯度 (concentration gradient) 檢驗法一：

a. 覓食定位：

在箱中放入食物，以風扇將氣味吹往蟻巢反向，避免氣味散入巢中。觀察華夏粗針蟻的覓食情形，證明其是否以氣味進行定位，如圖 10、11 所示。

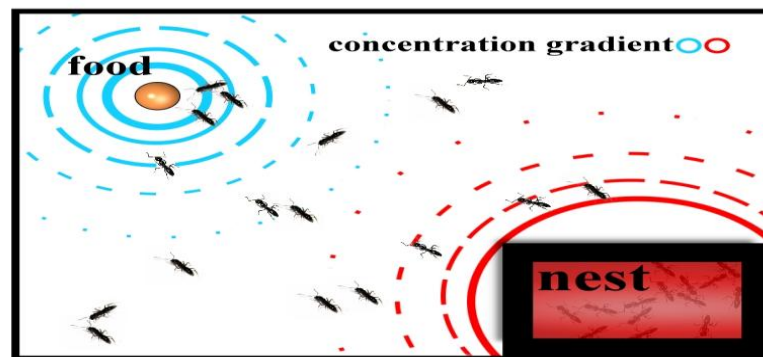


圖 10 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 覓食示意圖，蟻巢與食物之氣味濃度梯度 (concentration gradient) 皆為輻射狀平均擴散

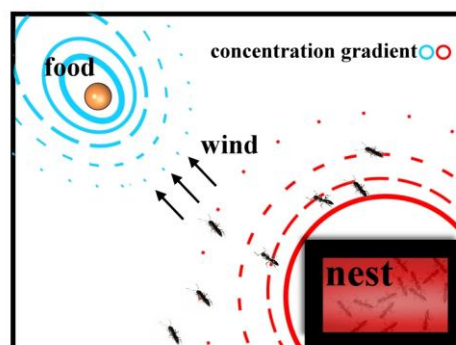


圖 11 覓食定位實驗示意圖

b. 返巢定位：

將食物放置於觀察箱中，待華夏粗針蟻離巢進行覓食，使用風扇將氣流吹散，阻止蟻巢的氣味逸散至覓食區，觀察其返巢路線，如圖 12 所示。

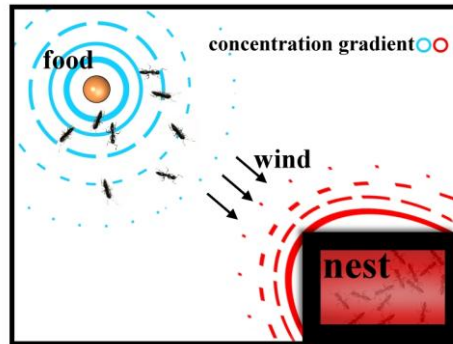


圖 12 返巢定位實驗示意

②氣味濃度梯度（concentration gradient）檢驗法二，如圖 13 所示：

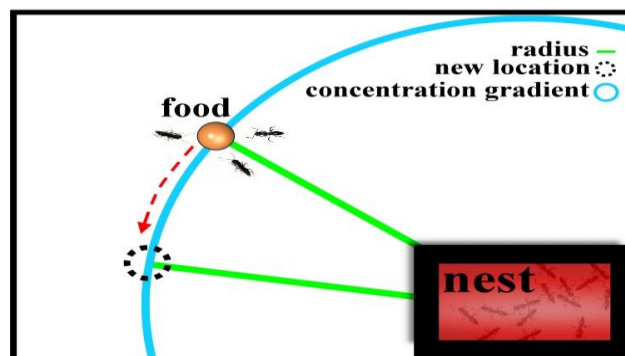


圖 13 濃度梯度（concentration gradient）
檢驗法示意圖。

- 放置食物並記錄華夏粗針蟻首次覓食之路線與覓食時間。
- 巢穴為圓心，食物和巢穴之距離為半徑畫圓，形成一等距假想圓。
- 將食物移動至不同位置、但位在相同圓周上之任一點。
- 紀錄其覓食路徑，並與首次覓食所得之數據進行分析。

2、分泌嗅跡費洛蒙 (trail pheromone)：

①嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 檢驗法一：

將食物放置於觀察箱中吸引華夏粗針蟻覓食，以油性筆紀錄其覓食路線，並將紙張平鋪於食物與蟻巢之間，紀錄其回巢路線，並與覓食路線進行分析，確認華夏粗針蟻是否使用嗅跡費洛蒙進行定位（如圖 14、15 所示）。

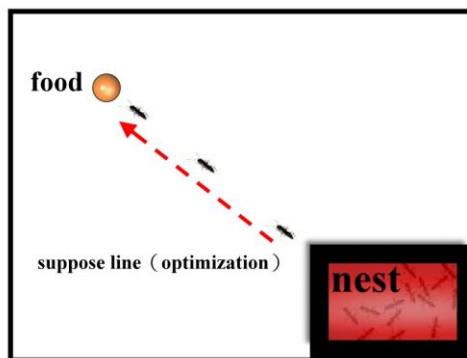


圖 14 華夏粗針蟻(*P. chinensis*) 預設之最佳化覓食行走路線。

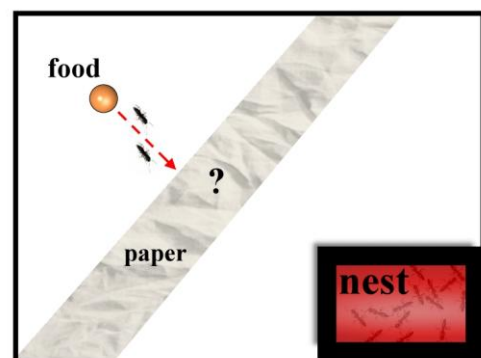


圖 15 返巢定位檢驗嗅跡費洛蒙(trail pheromone)實驗示意圖。

②嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 檢驗法二：

製作迷宮，置入華夏粗針蟻並記錄其行徑。將同巢之另一個體放入，觀察其路線是否相同，以驗證其是否會分泌嗅跡費洛蒙，如圖 16、17 所示。



圖 16 嗅跡費洛蒙(trail pheromone) 檢驗之實驗照。

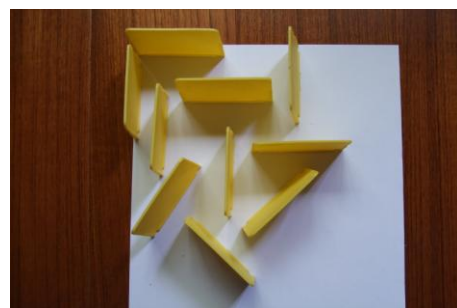


圖 17 迷宮實驗設置圖

③ 嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 檢驗法三 (煙燻玻璃法, sooted glass method) :

- a. 以蠟燭將玻璃片表面燒黑留下碳化物，並置於人工蟻巢中，如圖 18、圖 19 所示。
- b. 華夏粗針蟻行經玻璃面時，觀察玻璃面之碳層，有無使用除了六肢步足以外的身體部位接觸留下之痕跡，或跗節腺 (tarsal gland) 接觸地面之有無，用以判定華夏粗針蟻行走時是否有分泌嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 的可能性。

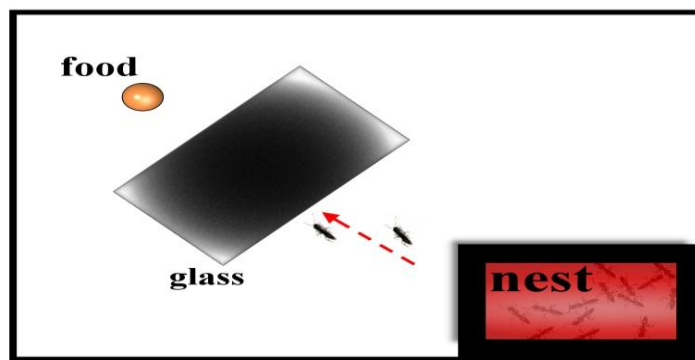


圖 18 燒黑玻璃片檢驗嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 示意圖。

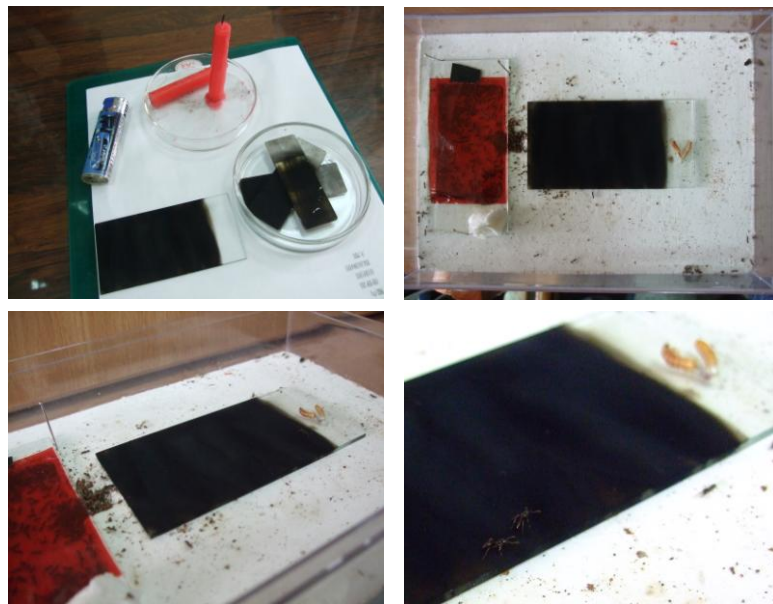


圖 19 煙燻玻璃法 (sooted glass method) 實驗照

④以氣象層析質譜儀（GC-Mass）檢驗嗅跡費洛蒙（trail pheromone）：

運用分子生物技術，以氣象層析質譜儀（GC-Mass）檢測空氣中揮發性有機化合物，了解華夏粗針蟻釋放之各腺體分泌物是否具嗅跡費洛蒙。

- a. 以鋁箔包覆玻璃瓶使內部不透光，並以吸注器吸取正己烷潤洗瓶內。
- b. 將樣本放入玻璃瓶中（實驗組：華夏粗針蟻個體 20 隻、人工蟻巢之石膏表層、棲地之土壤；對照組：正己烷溶劑）並加入正己烷（溶出化合物），以震盪器混合均勻後，靜待一個小時。
- c. 將樣本瓶以正己烷潤洗，並將靜置後之瓶內溶液放入樣本瓶。完成後，放入氣象層析質譜儀（GC-Mass）中。
- d. 將各項樣本之實驗結果進行比較，並探討其原因。



圖 20 左：實驗器材。右：氣象層析質譜儀（GC-Mass）。
（攝於國立彰化師範大學）

3、華夏粗針蟻（*P. chinensis*）聚落中有無搬運者（porter）之影響：

比較同一聚落中有無搬運者（porter）的覓食情形，並分析其結果。

- ①將食物置於觀察箱吸引華夏粗針蟻覓食。
- ②紀錄 10 隻抵達覓食區之巢中職蟻的覓食時間及行走路線。

③取出進行成體搬運行為之搬運者 (porter)，並紀錄其巢中職蟻覓食時間。

④分析搬運者 (porter) 對於聚落之重要性。

4、影響華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 搬運者 (porter) 產生之因素。

紀錄華夏粗針蟻發生搬運者的食物量，並探討食物分割大小、多寡、距離遠近，是否為決定搬運者 (porter) 產生的因素。

①食物分割大小：0.1 mg、0.2 mg、0.5 mg、1 mg、2 mg。

②食物多寡：1~10 mg。

③覓食距離遠近：將食物分別放置於距蟻巢 5 cm、10 cm、20 cm 處。

5、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 覓食策略分析：

假說一、利用嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 覓食。

假說二、以食物之濃度梯度進行覓食定位。

假說三、搬運者 (porter) 進行之成體搬運 (adult transport) 提高覓食效率。

假說四、利用發音器 (stridulitrum) 傳訊覓食。

觀察華夏粗針蟻的覓食方式，與其他種類之螞蟻進行比較，並以推導之公式進行分析，何種覓食策略最有利於華夏粗針蟻，達成最佳化覓食。

6、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 運用成體搬運 (adult transport) 進行覓食之演化淵源：

藉由文獻資料、實地觀察、DNA 之檢測、外部形態及行為之差異，了解成體搬運行為 (adult transport) 出現於粗針蟻屬 (*Pachycondyla*) 的演化順序，將結果繪製成演化樹；接著探討華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 運用成體搬運行為 (adult transport) 進行覓食於演化上之成因，並與其他蟻種進行比較。

①形態變異：

顯微鏡觀察並配合相機紀錄。

②行為變異：

架設數位攝影機，找出具特定行為模式的華夏粗針蟻個體，並紀錄其行為。

③基因型的變異：

- a. 選取華夏粗針蟻成蟲數隻，將其磨碎並萃取 DNA。
- b. 將 Cell Lysis Solution 至於 1.5ml 離心管中冰浴冷卻後，置入華夏粗針蟻，利用小型輾槌將其均勻混合後，於 65°C 靜置培養。
- c. 加入 1.5μl RNase A Solution 翻轉離心管數次將其混合，並在 37°C 下靜置。
- d. 將樣本冷卻至室溫，加入 Protein Precipitation Solution，使其均勻混合後，以 14000xg 離心 3 分鐘。
- e. 把包含 DNA 的上層液倒入乾淨、包含 300 μl 100% 異丙酮的 1.5ml 離心管，翻轉 50 次以混合樣本。再度離心 1 分鐘。
- f. 將上層液倒掉然後在會吸收的紙上瀝乾管子，加 300μl 70%乙醇，然後翻轉管子數次以清洗 DNA。
- g. 13,000-16,000x g 離心 1 分鐘後，倒掉乙醇，並將離心管風乾。
- h. 加入 50μl 的 DNA Hydration。

(五) 探討影響華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 分工機制之因素。

將有后 (queenright) 聚落及缺后 (queenless) 聚落進行分析，了解何種狀態之蟻巢對華夏粗針蟻較具優勢，並繪製相關趨勢圖。

（六）華夏粗針蟻（*P. chinensis*）與其他粗針蟻屬（*Pachycondyla*）

之聚類分析。

利用 NTSYS 形態分類系統軟體，以二元性狀編碼對選取之行為進行分類，選取行為之同源性也經過社會昆蟲學家的確認，對華夏粗針蟻及台灣其他粗針蟻屬（*Pachycondyla*）作聚類分析（cluster analysis），檢測各種粗針蟻間之相似度，並推測其親源關係。

研究結果

一、華夏粗針蟻（*P. chinensis*）基礎生物學探討。

（一）華夏粗針蟻（*P. chinensis*）文獻探討：

1、華夏粗針蟻（*P. chinensis*）生態學相關文獻：

華夏粗針蟻（*P. chinensis*）廣泛分布於東亞地區，如中國大陸、朝鮮半島、日本、琉球、臺灣以及紐西蘭。華夏粗針蟻為肉食性，主要取食小型節肢動物。生活於林緣環境，於潮濕腐爛的朽木或土壤覆蓋的物體下築巢，如石塊、瓦礫等，偏好黑暗、潮濕的棲地。每個聚落的數量約數百隻至數千隻，可組成多后（polygynous）聚落。具螫針，被螫傷時會產生劇烈的疼痛。在美國，華夏粗針蟻為入侵外來種。常見於維吉尼亞州（Virginia）、北卡羅來納州（North Carolina）、喬治亞州（Georgia）和南卡羅來納州（South Carolina）等距海較遠的區域。（Japanese Ant Image Database,2003）

2、研究發現台灣產粗針蟻屬（*Pachycondyla*）共計 7 種（不含變種或亞種），詳細列表如表 2 所示。



圖 21 華夏粗針蟻
（*P. chinensis*）
俯視圖。

表 2 台灣產針蟻亞科（Ponerinae）針蟻族（Ponerini）粗針蟻屬（*Pachycondyla*）
列表

中名	體形大小	學名	參考資料
爪哇粗針蟻	12mm	<i>Pachycondyla javanus</i>	Mayr, 1867
邵氏粗針蟻	8mm	<i>Pachycondyla sauteri</i>	Forel, 1912
華夏粗針蟻	3.5mm	<i>Pachycondyla chinensis</i>	Emery, 1895
黃足粗針蟻	8mm	<i>Pachycondyla luteipes</i>	Mayr, 1862
達氏粗針蟻	4mm	<i>Pachycondyla darwinii</i>	Emery, 1893
烙印粗針蟻	4mm	<i>Pachycondyla stigma</i>	Fabricius, 1804
夏氏粗針蟻	4mm	<i>Pachycondyla sharpi</i>	Forel, 1901

(二) 華夏粗針蟻形態學：

1、華夏粗針蟻職蟻分類特徵簡述（林宗岐，2003）：

職蟻為單態型，具黑色金屬光澤。頭型亞三角型。觸角 12 節，無明顯錘節形成。觸角柄節較長，向後延伸超出後頭緣部分，大於觸角第 2 節的長度。前胸背板無突起，前中胸背板縫明顯。中胸背板明顯分離隆起。後胸背板縫明顯凹陷。前伸腹節刻紋明顯。腰節一節；在腹部第三、四節間有縊縮。具腹部發音構造（abdominal stridulatory system），發音器（stridulitrum）位於腹部第四節前背板上（pretergite），彈器（plectrum）則位於腹部第三節背板後緣。腹部第四節有前腹板（prosclerites）。臀板大，無臀板後緣小齒。螫針發達明顯，如圖 22 所示。

(三) 掉落式陷阱：

下表(如表 3 所示)為樣區中進行掉落式陷阱所記錄之蟻種，各族群數量在樣區中皆為優勢種，因此不另行標記。

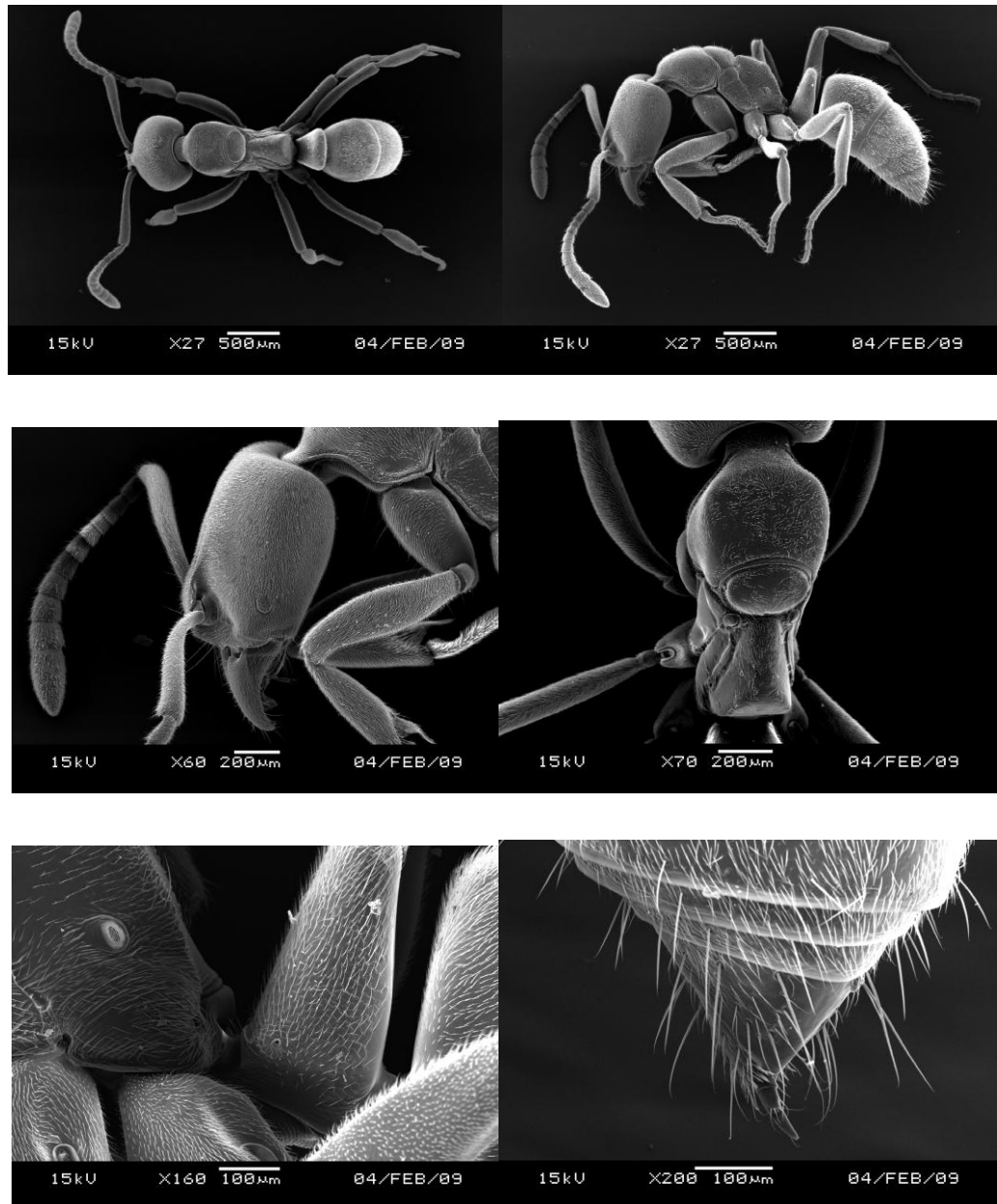


圖 22 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 各部位特寫

表 3 以掉落陷阱法記錄分布於樣區之蟻種

亞科名	學名	中名
Myrmicinae		
	<i>Aphaenogaster tipuna</i>	大林長腳家蟻
	<i>Crematogaster rogenhoferi</i>	懸巢舉尾家蟻
	<i>Monomorium chinense</i>	中華單家蟻
	<i>Monomorium pharaonis</i>	小黃家蟻
	<i>Pheidole noda</i>	寬節大頭家蟻
	<i>Pheidologeton diversus</i>	小紅蟻
	<i>Pristomyrmex pungens</i>	堅硬雙針家蟻
	<i>Tetramorium nipponense</i>	日本皺家蟻
Ponerinae		
	<i>Pachycondyla chinensis</i>	華夏粗針蟻
	<i>Pachycondyla javanus</i>	爪哇粗針蟻
Dolichoderinae		
	<i>Ochetellus glaber</i>	光滑管琉璃蟻
	<i>Tapinoma melanocephalum</i>	黑頭慌蟻
	<i>Technomyrmex albipes</i>	白足扁琉璃蟻
Formicinae		
	<i>Anoplolepis longipes</i>	長腳捷蟻

(四) 生活習性：

華夏粗針蟻為單獨覓食，且沒有一固定之行進路線。卵以子脾堆 (brood pile)、幼蟲及蛹在巢中皆呈集中分布，如圖 23 所示。

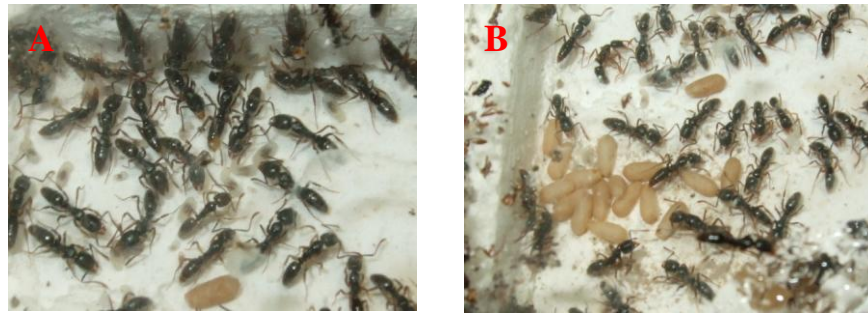


圖 23 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 巢中散狀放置的幼蟲及蛹的分布 A：集中分布的幼蟲 B：集中分布的蛹

可觀察到一種常見於螞蟻社會中職蟻之成體搬運行為 (adult transport)，如圖 24 所示。外勤職蟻於覓食中發現食物後，可發現一種特殊階級，專司進行成體搬運行為，將巢中職蟻搬至食物旁，暫將此特殊階級命為搬運者 (porter)，其他職蟻則負責將部份之食物採集回巢。其觸角相當敏感，碰觸如昆蟲內臟等具沾黏性之物體，皆會產生極強烈之梳理反應，如圖 25 所示。華夏粗針蟻繁殖力強，與軍蟻亞科 (*Dorylinaermp*) 會將異巢之婚飛雄蟻帶回巢穴中與未受精蟻后進行交配 (Wilson, E.O.and B.Hölldobler,1990) 具相同之行為 (如圖 26 所示)。



圖 24 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*)
成體搬運行為 (adult
transport)



圖 25 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*)
觸角遇沾黏性之物體
會產生強烈之梳理
反應。



圖 26 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 雄蟻 (male) 照片。
A：放大 10 倍之雄蟻側面圖。B：雄蟻在
巢中活動情形。

二、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 行為譜 (ethogram) 分析。

(一) 行為譜 (ethogram) 概述：

將行為所產生的反應數據化並驗證假說的正確性。須視觀察之行為進行紀錄，而非推測其內涵。對研究物種採隨機觀察，觀察後之個體不必特別標記。

(二) 華夏粗針蟻行為紀錄：如表 4 所示。

表 4 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 行為紀錄

行為	敘述
餵哺	將嗉囊 (craw) 中的食物吐餵給同伴，如圖 61 所示。
被餵哺	接受餵哺之職蟻，如圖 61 所示。
警戒	守衛巢穴，如圖 62 所示。
育幼	哺育行為，如圖 63 所示。
梳理	可分為自體梳理和梳理同伴，如圖 64、65 所示。
靜止	靜止不動。
行走	一種不知其目的之行走活動。
運屍	搬運屍體，如圖 66、68 所示。
接觸	不同個體進行溝通，如圖 67 所示。
成體搬運行為	一種搬運螞蟻成體之行為，如圖 69 所示。
覓食	尋找獵物。

(三) 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 行為譜 (ethogram):

如表 5 所示為華夏粗針蟻在餵食、未餵食及受干擾的狀態下產生之行為。

表 5 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 有后聚落，餵食（五分鐘後）

	次級職蟻 (subordinate worker)	高階職蟻 (dominant worker)	蟻后 (queen)
	n=435	n=327	n=75
餵哺	0.214	0.037	0
被餵哺	0.069	0.147	0.320
自體梳理	0.076	0.028	0.040
被梳理	0.021	0.092	0.120
梳理同伴	0.179	0.009	0
靜止	0.124	0.073	0.320
行走	0.131	0.193	0.080
警戒	0.007	0.128	0
成體搬運	0	0.147	0
育幼	0	0.037	0.120
覓食	0.179	0.110	0

備註：標有紅色之數據為較常發生之行為。

由表格之數據可發現華夏粗針蟻不同階層之職蟻於餵食狀態下產生之行為具相當之差異，僅高階職蟻 (dominant worker) 與蟻后被餵哺之行為發生頻率皆較高。

表 6 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 有后聚落，未餵食

	次級職蟻 (subordinate worker) n=375	高階職蟻 (dominant worker) n=282	蟻后 (queen) n=114
餵哺	0.064	0	0
被餵哺	0.024	0.021	0.079
自體梳理	0.136	0.117	0.053
被梳理	0.008	0.149	0.105
梳理同伴	0.144	0.011	0
靜止	0.312	0.170	0.368
行走	0.152	0.255	0.263
警戒	0.016	0.128	0
成體搬運	0	0.064	0
育幼	0.048	0	0.053
接觸	0.080	0.085	0.079
運屍	0.016	0	0

備註：標有紅色之數據為發生頻率較高之行為。

華夏粗針蟻聚落中不受干擾時，各階層較常發生之行為集中於靜止、行走，高階職蟻 (dominant worker) 與蟻后被梳理比例較高，接受次級職蟻 (subordinate worker) 梳理。

表 7 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 有后聚落，受干擾（五分鐘後）

	次級職蟻 (subordinate worker) n=76	高階職蟻 (dominant worker) n=124	蟻后 (queen) n=22
餵哺	0.024	0	0
被餵哺	0	0.011	0.016
自體梳理	0.213	0.123	0.210
被梳理	0.018	0.073	0
梳理同伴	0.085	0	0
靜止	0.037	0.045	0.419
行走	0.439	0.251	0.290
警戒	0.091	0.235	0
成體搬運	0	0.128	0
接觸	0.091	0.134	0.065

備註：標有紅色之數據為發生頻率較高之行為。

華夏粗針蟻受干擾後，次級與高階職蟻 (dominant worker) 比例較高之行為相似（行走、警戒、接觸）。次級職蟻 (subordinate worker) 與蟻后之自體梳理皆為比例較高之行為。



圖 27 受干擾後，高階職蟻 (dominant worker) 進行成體搬運 (adult transport)，將個體搬回巢



圖 28 左下角即為覓食過程之成體搬運行為 (adult transport)

三、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 聚落內搬運者 (porter) 科學描述。

(一) 成體搬運行為 (adult transport) 名詞意涵；發現搬運者 (porter)：

成體搬運行為 (adult transport) 又稱為社會搬運行為 (social carrying)。此行為散見於針蟻亞科 (Ponerinae)、牙針蟻亞科 (Myrmeciinae)、矛蟻亞科 (Dorylinae)、擬家蟻亞科 (Pesudomyrmecinae)、家蟻亞科 (Myrmicinae)、琉璃蟻亞科 (Dolichoderinae) 及山蟻亞科 (Formicinae) 的部分種類。前人的研究皆認為成體搬運行為僅出現於聚落移棲時，且搬運的對象通常限定在年長 (aged)、病弱的 (ailing)、初羽化的 (callow) 工蟻，以及有性生殖蟻。(Wilson, E.O. and B.Hölldobler, 1990)

華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 成體搬運行為不僅出現於聚落移棲時，更出現於每日之覓食，且其模式與其他蟻種皆不相同，值得深入探討。根據飼養紀錄，華夏粗針蟻的成體搬運行為 (adult transport)，成為儀式化行為 (ritualized behavior) 主要發生於蟻巢受到干擾以及應用於覓食過程中，且於覓食中產生一特殊階級，搬運者 (porter)。搬運者專司進行成體搬運行為，不負責搬運食物回巢。觀察期間，華夏粗針蟻的成體搬運行為 (adult transport) 被搬運者 (portee) 會以蛹狀 (pupal posture) 的姿態被搬運者 (porter) 搬運 (圖 29 所示)，並非常見於其他蟻種之合作活動 (cooperate activity)。合作活動泛指一切被搬運者 (portee) 施力、非蛹狀等非自然狀態下進行之行為。(Wilson, E.O. and B.Hölldobler, 1990)



圖 29 搬運者 (porter) A：搬運雄蟻 (male) B：職蟻 (worker)

(二) 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) :

經掃描式電子顯微鏡觀察後，發現華夏粗針蟻進行成體搬運行為 (adult transport) 時大顎咬合之位置，前胸腹面具有一佈滿刻痕之縱溝為大顎咬合之位置，如圖 30 所示。

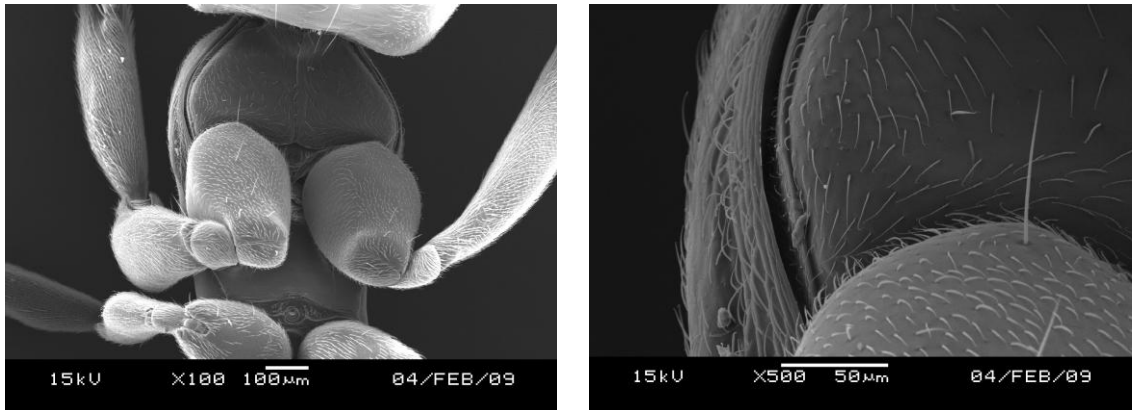


圖 30 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 拍攝之華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 前胸腹面之縱溝，可清楚看出其表面之紋路。

(三) 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 成體搬運行為 (adult transport) 儀式化步驟 (圖 31 所示) :

- a. 當搬運者 (porter) 在巢外發現食物後，回到巢中通知同伴。
- b. 揮動觸角以傳遞訊息。
- c. 搬運者 (porter) 以大顎咬著被搬運者 (portee) 的大顎前後拉動。
- d. 被搬運者 (portee) 蜷縮成蛹狀，搬運者 (porter) 順勢將被搬運者 (portee) 旋轉半圓，使其腹面朝上。
- e. 搬運者 (porter) 以大顎咬合被搬運者腹面之前胸，將其搬運至食物旁。

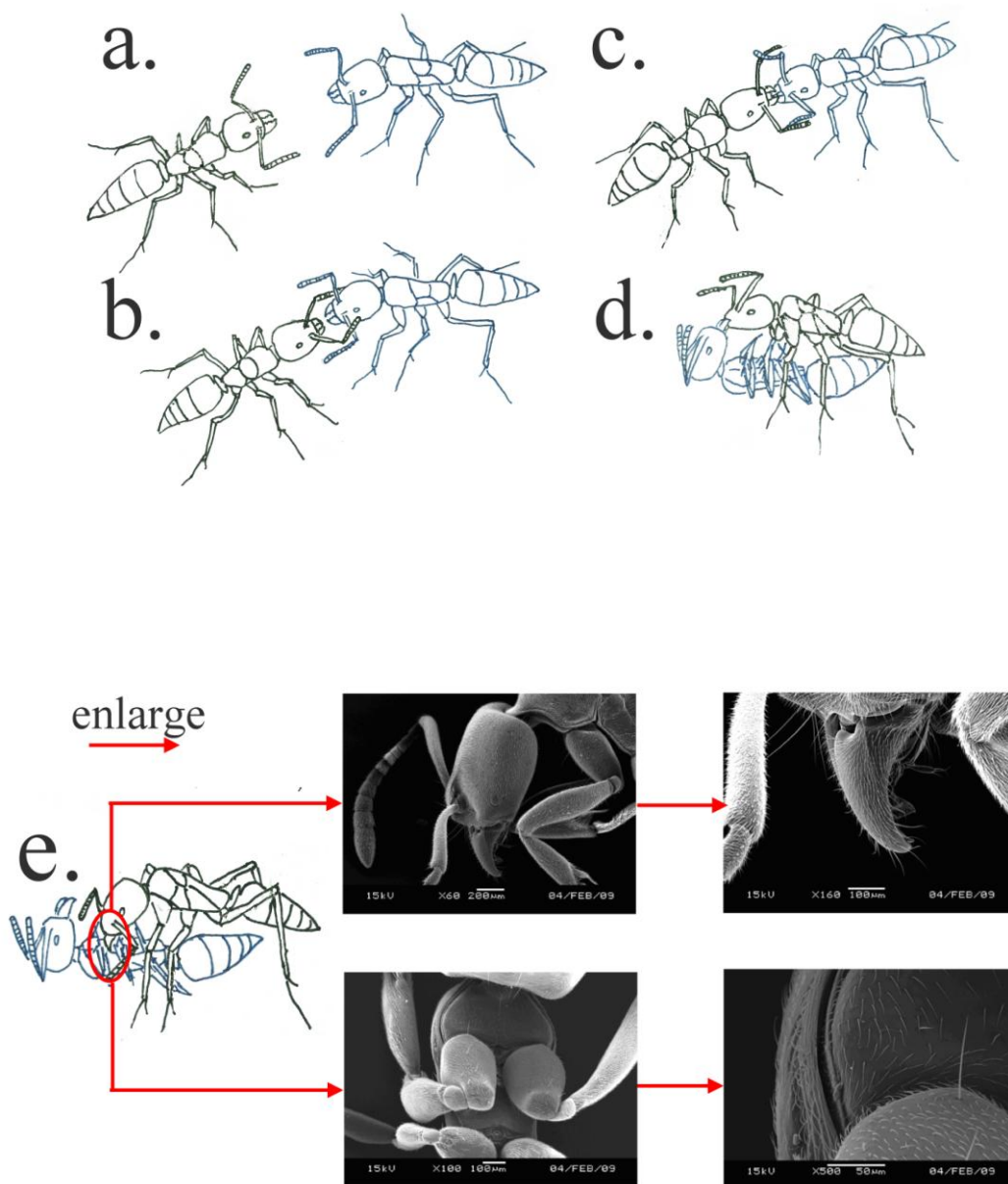


圖 31 成體搬運行為 (adult transport) 示意圖。黑：搬運者 (porter)，
藍：被搬運者 (portee)

搬運者與被搬運者 (portee) 在巢外被餵哺之機率如圖 32 所示，證明搬運者其行為高度專一化，不負責搬運食物回巢。

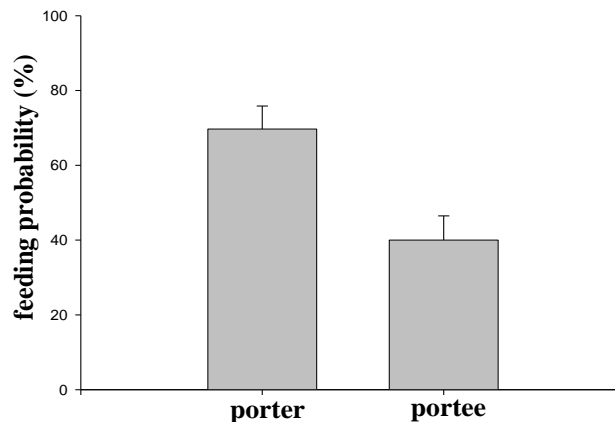


圖 32 搬運者 (porter) 與被搬運者 (portee) 被餵哺之機率比較 (Ttest<0.01)。

經過統計後，發現華夏粗針蟻高階職蟻較常將成體搬運行為 (adult transport) 運用於覓食中，是由於遷徙的次數並不若每日之覓食如此頻繁。低階職蟻則不生成體搬運行為 (adult transport)，詳如表 8 所示。

表 8 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 使用成體搬運行為 (adult transport) 百分比

	低階職蟻 (subordinate worker)	高階職蟻 (dominant worker)
以成體搬運行為 (adult transport) 遷徙(%)	0	14
以成體搬運行為 (adult transport) 覓食(%)	0	86

四、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 覓食策略分析。

(一) 空氣中氣味溢散：

1、覓食定位：

華夏粗針蟻腹部末端具發達之螫針，推測其毒腺 (poison gland) 分泌物可吸引同伴加入覓食行動。於迷宮實驗發現華夏粗針蟻不會依據前一個體行走之軌跡，初步印證華夏粗針蟻不具嗅跡費洛蒙 (trail pheromone)，但仍需要進一步以科學儀器檢測加以證實。

(二) 無風與有風狀態覓食情形：

結果顯示有風狀態確實會影響華夏粗針蟻進行覓食，如圖 33、34 所示。

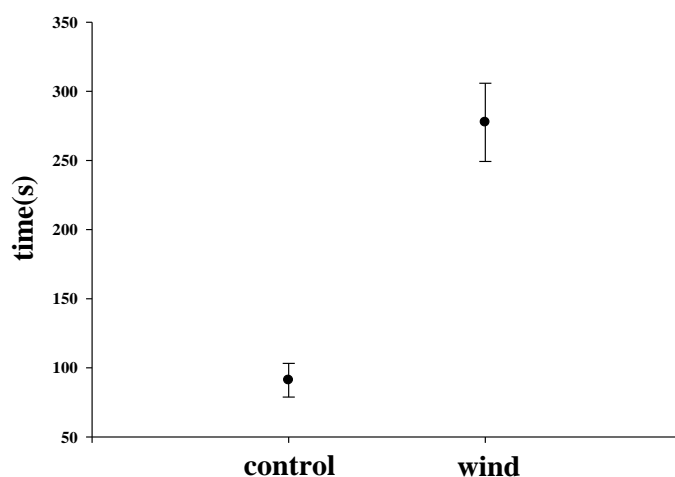


圖 33 華夏粗針蟻 (*P.chinensis*) 外勤職蟻無風與有風狀態之覓食時間比較。(T-test < 0.001, 有顯著差異)

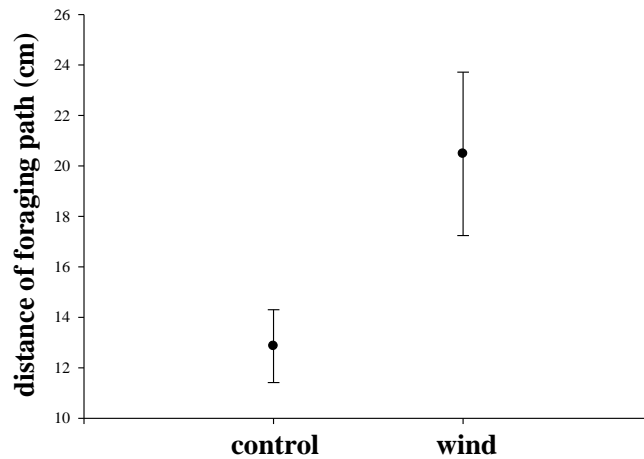


圖 34 華夏粗針蟻 (*P.chinensis*) 外勤職蟻無風與有風狀態之覓食距離比較。(T-test < 0.001, 有顯著差異)

(三) 食物量與成體搬運 (adult transport) 比例變化之關聯：

食物量多寡，產生成體搬運的頻率亦產生差異性，由結果得知，食物量太小，成體搬運的發生次數較小，甚至不產生成體搬運，如圖 35 所示。

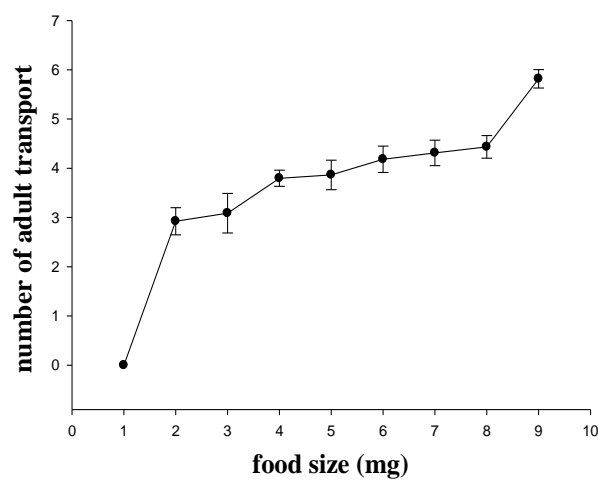


圖35 成體搬運行為 (adult transport) 產生次數與食物大小之關連。

(四) 食物分割大小與搬運者 (porter) 產生比例變化：

將等量之食物 (2mg) 分割為不同之大小，結果顯示華夏粗針蟻會因分割塊狀小、可搬回巢而不產生搬運者，如圖 36 所示。

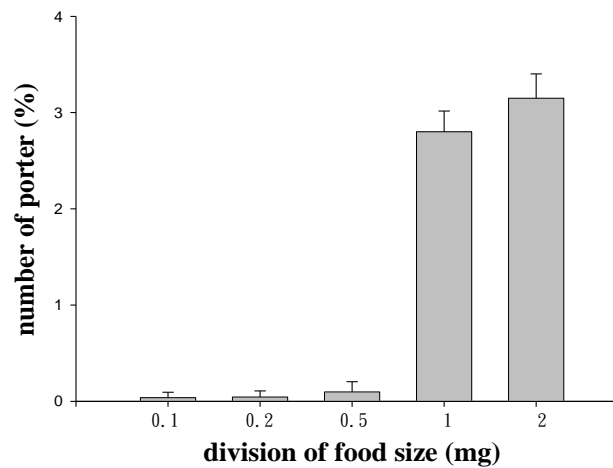


圖 36 食物分割大小與搬運者 (porter) 產生數量變化。

(五) 食物距離遠近之影響：

將食物置於距蟻巢 3 cm、18 cm 之處五分鐘後，紀錄華夏粗針蟻巢中職蟻抵達覓食區之方式。結果顯示，食物距蟻巢較近，以成體搬運 (adult transport) 前往之比例愈小；距離較遠以成體搬運行為抵達之比例提昇至 50%，如圖 37 所示。推測距離較遠，單獨前往會增加其行走距離，利用搬運者 (porter) 可減少總能量之消耗。

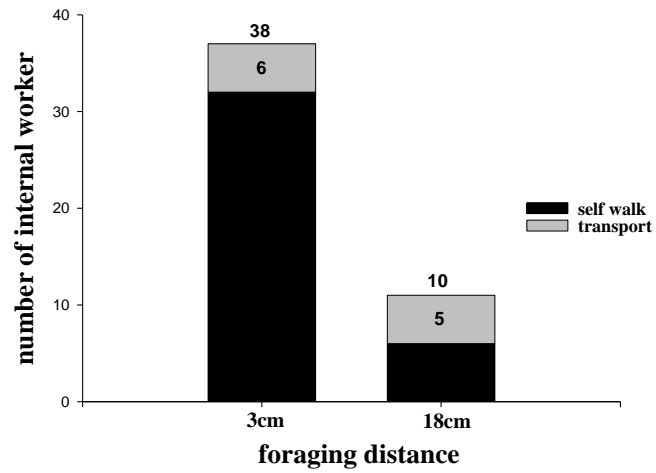


圖 37 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 巢中職蟻
抵達不同距離之覓食區使用方式
比例變化圖

圖 38 所示為食物與蟻巢間距離和搬運者產生之機率變化圖，從結果得知，距離超過 25 公分後，產生搬運者之機率隨之下降，推測為其路程過長，不符合其利益。

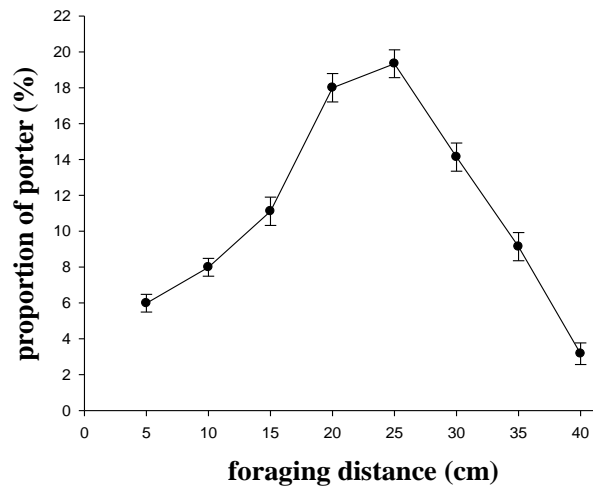


圖 38 食物與蟻巢間距離及華夏粗針蟻
(*P. chinensis*) 搬運者 (porter)
佔外勤職蟻比例變化圖

（六）餵食間隔與搬運者（porter）數量變化量之關聯：

將餵食之間隔時間從原本的 24hr 延長至 72hr，減少食物之供應頻率，原先搬運者（porter）數量僅佔外勤職蟻的 33.5%，後提升至 75%，如圖 39 所示。

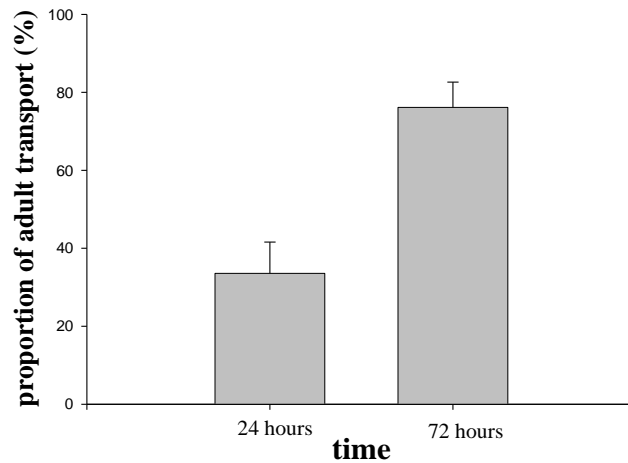


圖 39 不同之餵食間隔（24hr 與 72hr）與產生體搬運行為（adult transport）比例變化圖

（七）被搬運者（portee）行為變化比較：

在食物充足的情況下，華夏粗針蟻的被搬運者（portee）被搬運後又成為搬運者的比例小於 1%。食物缺乏時，成為搬運者之比例提昇至 33%，可加強巢中職蟻之覓食效率，如圖 40 所示。

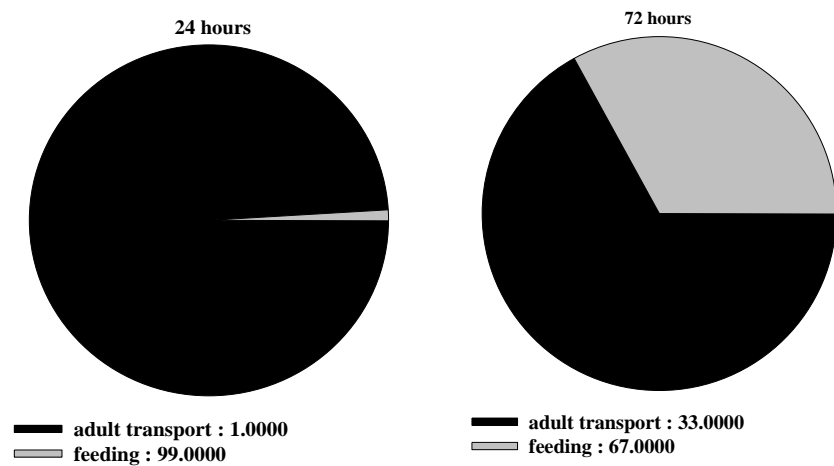


圖 40 不同之餵食間隔（24hr 與 72hr）被搬運者（portee）行為發生比例之變化

（八）搬運者（porter）有無：

根據觀察，華夏粗針蟻聚落之搬運者（porter）相當具重要性，於不同距離（3、15cm）放置食物五分鐘後，皆會產生搬運者（porter），相關數據如下圖（圖 41 所示）。

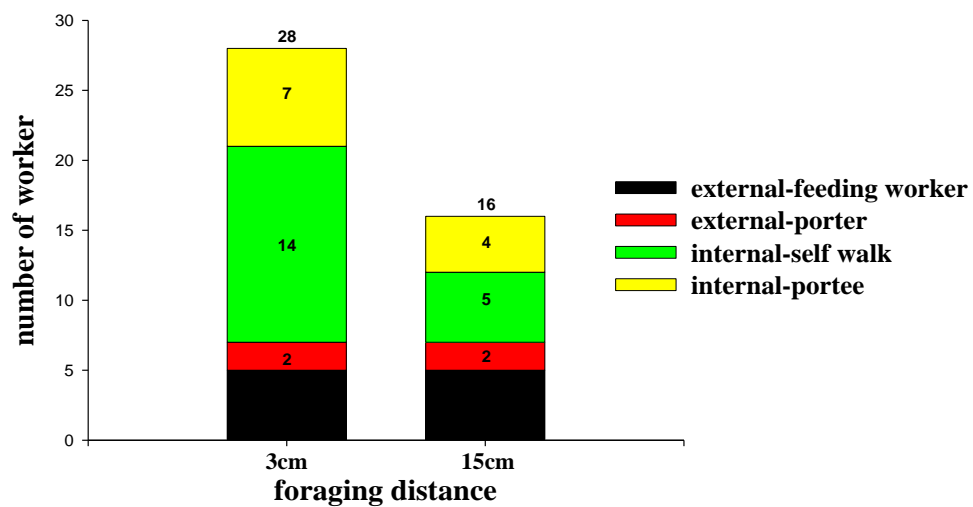


圖 41 食物與巢穴間不同距離（3、15 cm）職蟻覓食方式分析

將搬運者（porter）於覓食過程中移除，並將被搬運者（portee）放置回巢，發現其覓食之內勤職蟻數量大幅減少，如圖 42 所示。並比較未移除搬運者（porter）與移除搬運者（porter）之覓食職蟻數量、覓食效率變化，如圖 43、44 所示。

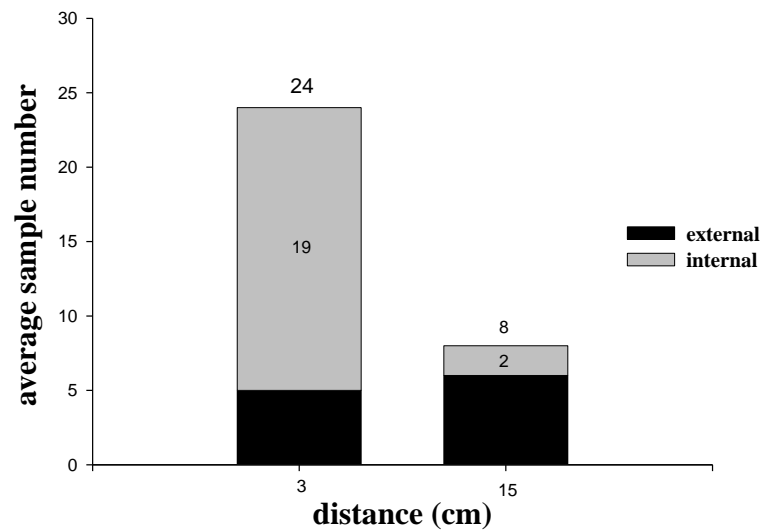


圖 42 無搬運者（porter）之聚落於不同覓食距離覓食職蟻組成比例

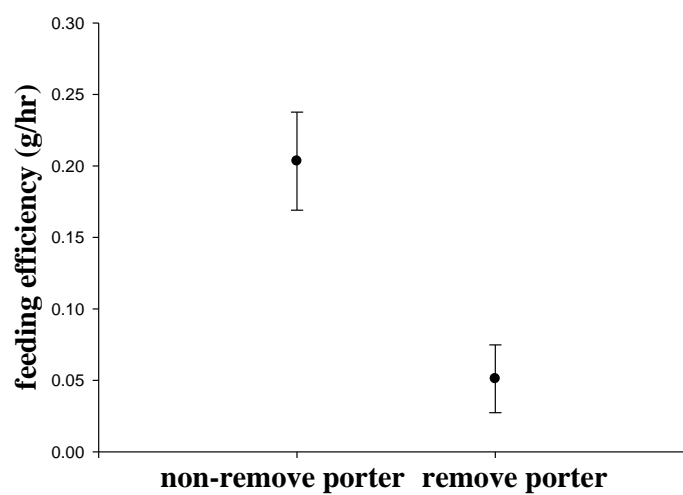


圖 43 未移除搬運者（porter）與移除搬運者（porter）之覓食職蟻數量變化

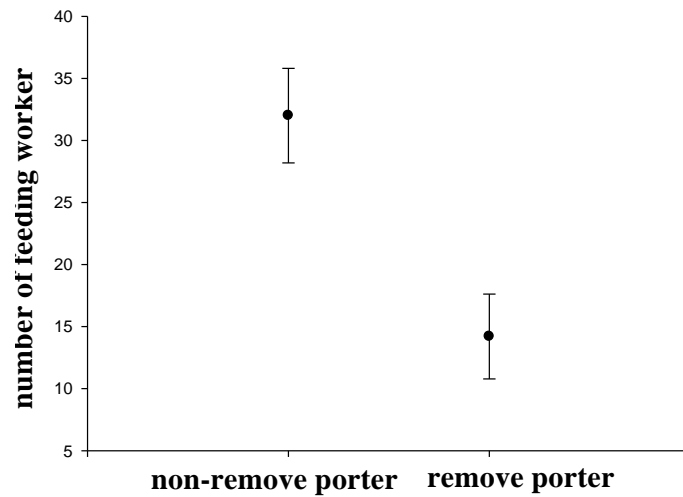


圖 44 未移除搬運者 (porter) 與移除搬運者 (porter) 之覓食效率 (mg / hr) 變化

(九) 搬運者 (porter) 路線分析：

實驗結果顯示，外勤職蟻發現食物後，同一隻搬運者進行之成體搬運行為 (adult transport) 隨著次數的增加，旋轉次數、旋轉角度、路徑皆縮短 (行走速率無顯著差異)，尋求最佳化之覓食路線，數據如圖 45 所示。

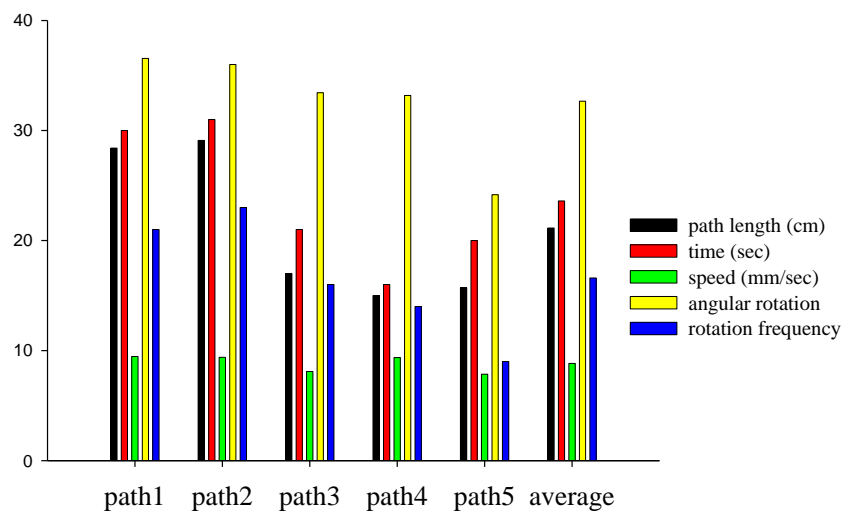


圖 45 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 同一隻搬運者 (porter) 於紀錄中進行五次成體搬運行為 (adult transport) 的數據統計圖。

圖 46 所示為華夏粗針蟻覓食行走距離與其轉折之角度之關係分布，
 $R^2=0.1348 < 0.5$ ，不具有明顯之關聯性。

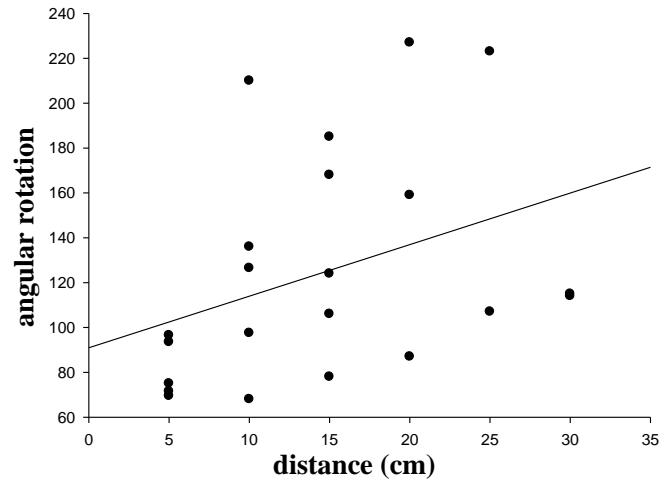


圖 46 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 同一隻搬運者
 (porter) 成體搬運行為 (adult transport)
 轉折角度與覓食距離關係圖

圖 47 所示為華夏粗針蟻覓食行走距離與其轉折次數之關係分布，
 $R^2=0.004 < 0.5$ ，不具有明顯之關聯性。

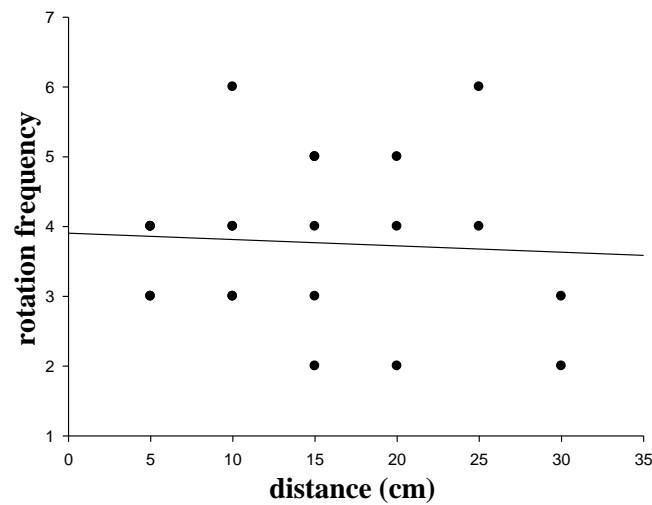


圖 47 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 同一隻搬運者
 (porter) 成體搬運行為 (adult transport)
 轉折次數與覓食距離關係圖

(十) 煙燻玻璃法 (sooted glass method) 檢測嗅跡費洛蒙 (trail pheromen) :

以煙燻玻璃法 (sooted glass method) 檢測華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 是否以身體構造接觸地面並分泌嗅跡費洛蒙 (trail pheromen)，可能出現之情形為正常行走 (normal walking) 及分泌嗅跡費洛蒙 (trail laying)，嗅跡費洛蒙又可分為後腸腺 (hindgut gland)、跗節腺 (tarsal gland) 及二種腺體皆分泌，以下為幾種預設結果圖。

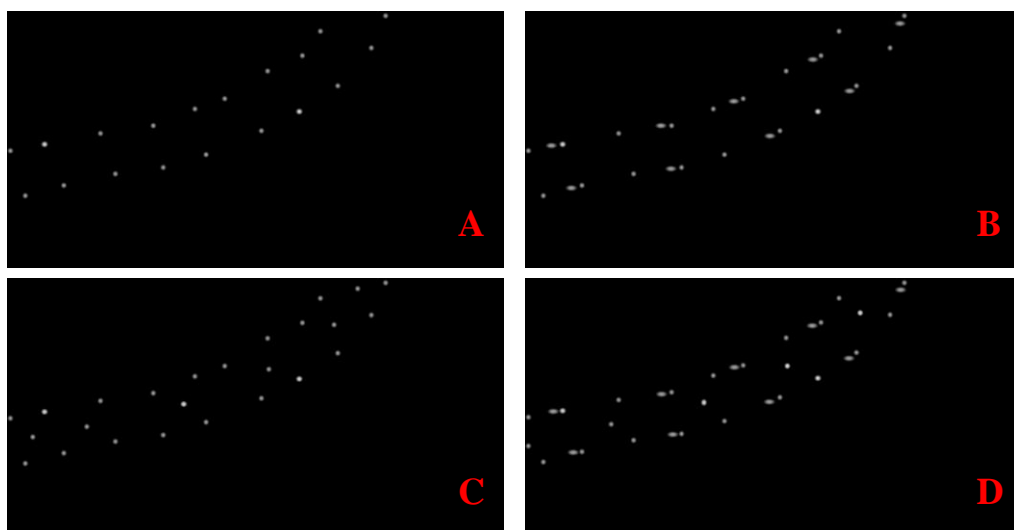


圖 48 煙燻玻璃法 (sooted glass method) 預設圖。A：正常行走 (normal walking)；B：分泌跗節腺 (tarsal gland) 之嗅跡費洛蒙 (trail laying) C：分泌後腸腺 (hindgut gland) 之嗅跡費洛蒙 (trail laying)；D：二種腺體皆分泌

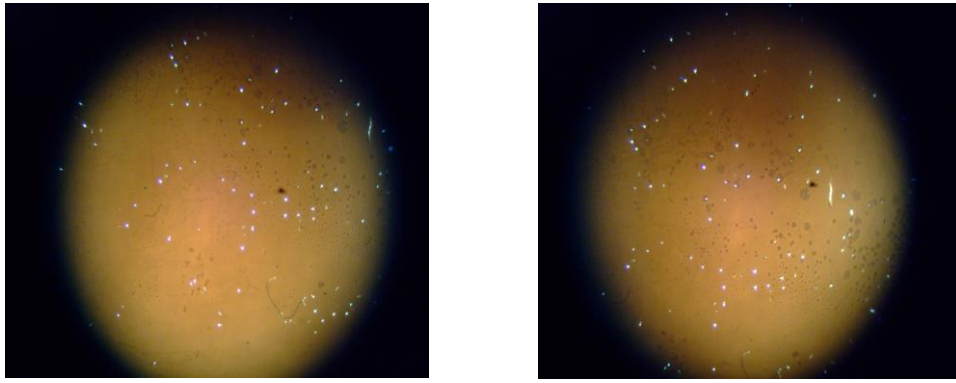


圖 49 煙燻玻璃法（sooted glass method）實驗結果圖。此兩張圖顯示在解剖顯微鏡下的華夏粗針蟻（*P.chinensis*）足跡

（十一）以氣象層析質譜儀（GC-Mass）檢驗嗅跡費洛蒙（trail pheromone）：

將對照組（正己烷）及實驗組（華夏粗針蟻）進行比較，結果顯示圖譜中並未含有文獻中証實同屬種類已知之嗅跡費洛蒙（9-heptadecanone），如圖 50 所示。

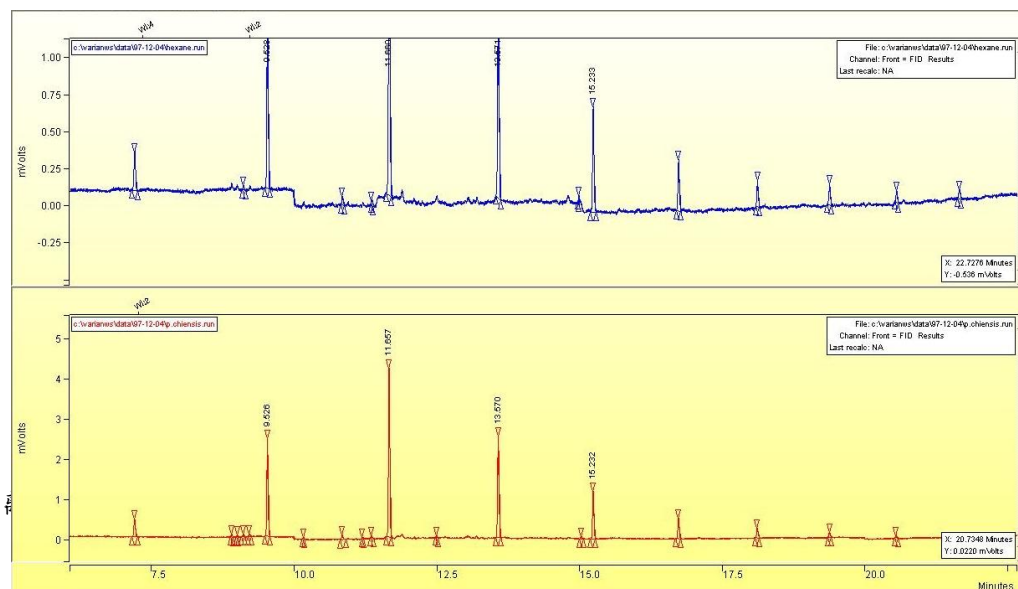


圖 50 氣象層析儀（GC）檢驗正己烷（上圖）及華夏粗針蟻（下圖）之圖譜。

迴歸線公式，並將華夏粗針蟻（*P. chinensis*）實際覓食時間與覓食距離關係圖與其對照。

假設 x 為時間， y 為距離， a 為食物至巢口距離， b 為次數， c 為螞蟻體長， d 則為嗅跡費洛蒙（trail pheromone）之擴散系數

螞蟻覓食隨時間愈長，距離愈短，可用公式第（11.1）式表示之：

$$y = \frac{a}{x} + b, \quad (11.1)$$

但已知螞蟻覓食距離不可能短於食物至巢口距離，改修正公式第（11.1）式為公式第（11.2）式表示之：

$$y = \frac{a + bx}{x}, \quad (11.2)$$

又知，螞蟻體長會影響覓食距離，且體長又與覓食時間成反比，可將公式第（11.2）式修改成公式第（11.3）式表示之：

$$y = \frac{a + bx}{1 + cx}, \quad (11.3)$$

然而最重要的效應是嗅跡費洛蒙與距離的平方成反比，將 d 代入嗅跡費洛蒙擴散公式 $x^2 = \left(\frac{2q}{k}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{2\pi e}\right)$ 中的嗅跡費洛蒙擴散系數（ $2q/k$ ）即可得知，故形成公式第（11.4）式，此公式第（11.4）式為理論值(如圖 51、52 所示)。

$$y = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2}, \quad (11.4)$$

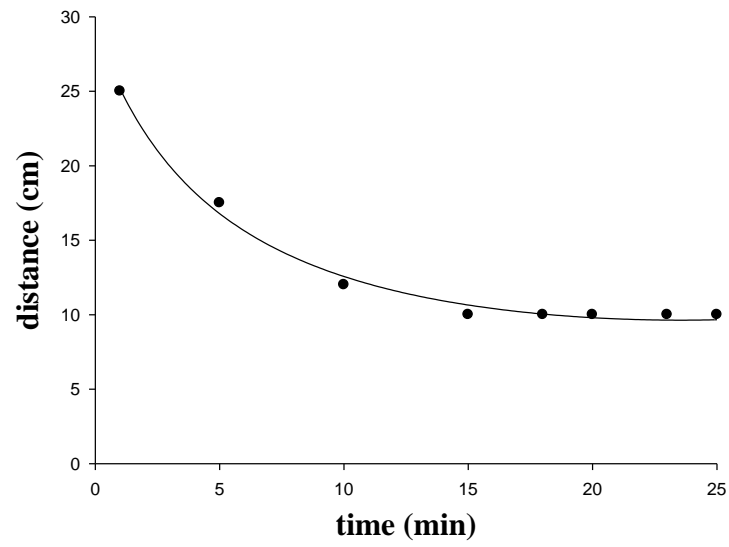


圖 51 使用嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 之理想覓食時間與覓食距離關係圖

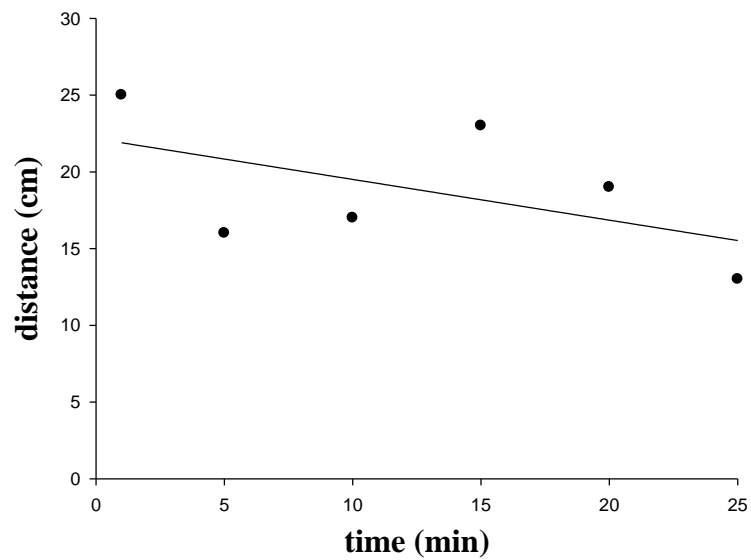


圖 52 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 實際覓食時間與覓食距離關係圖。

(十二) 覓食公式：

若以嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 進行覓食，則每隻螞蟻行走之路徑長會逐漸縮短，達到最佳覓食路線後，覓食路徑將等長，假設 N 等於總螞蟻隻數， n 等於覓食路徑長不同之螞蟻總隻數， m 等於單趟覓食路徑長，而 L_1 則等於覓食路線的總長，公式第 (12.1) 式表示之：

$$\text{因 } m_1 > m_2 > m_3 \dots > m_n > m_{n+1} \doteq m_{n+2} \doteq m_{n+3}, \quad (12.1)$$

$$\text{由第 (12.1) 式可知 } 2 \left(\sum_{k=1}^n m_k + (N - n) \cdot m_{n+1} \right) = L_1, \quad (12.2)$$

如果是無嗅跡費洛蒙之螞蟻，且此種螞蟻可依賴食物的濃度梯度來覓食，每隻螞蟻所行走的覓食路徑長大約相同，所以總螞蟻隻數乘上每隻螞蟻每一次行走之覓食路徑長，就等於覓食路線的總長，假設 N 等於總螞蟻隻數， m 等於單趟覓食路徑長，而 L_1 則等於覓食路線的總長，公式第 (12.3) 式表示之：

$$\text{因 } m_1 \doteq m_2 \doteq m_3 \doteq m_4 \doteq m_5 \dots \doteq m_n, \quad (12.3)$$

$$\text{由第 (12.3) 式可知 } N \cdot 2m = L_1. \quad (12.4)$$

如果此種螞蟻可藉搬運者 (porter) 所進行之成體搬運 (adult transport) 提高覓食效率，則除了搬運者 (porter) 外，其餘被搬運者 (portee) 皆只有單趟的路徑長，一隻搬運者 (porter) 行走一趟的距離，加上搬運隻數乘以搬運者 (porter) 一趟所需之距離，再加上將食物搬回巢的被搬運者 (portee) 次數乘以單趟的距離，就等於覓食路線的總長，當搬運者 (porter) 為一隻時，假設 n 等於被搬運者 (portee) 隻數， m 等於單趟覓食路徑長，而 L_3 則等於覓食路線的總長，公式第 (12.5) 式表示之：

$$2m + 2m \cdot n + m \cdot n = L_3, \quad (12.5)$$

$$\text{由第(12.5)式化簡為 } 2m + 3m \cdot n = L_3, \quad (12.6)$$

$$\text{由第(12.6)式化簡為 } m(2 + 3n) = L_3, \quad (12.7)$$

經過公式的推導，並實際的觀察華夏粗針蟻其生活習性（即單獨覓食、覓食範圍小）與棲地形態（潮濕之地表與落葉層中），可證實其覓食路程若以單程之路程進行計算，發現路徑長 $L_1 > L_2 > L_3$ ，使用搬運者進行覓食確為最佳化之覓食模式。

五、探討影響華夏粗針蟻（*P. chinensis*）分工機制之因素。

（一）有后（queenright）聚落職蟻（worker）分工情形：

在觀察過程中，華夏粗針蟻之正常聚落分工嚴謹，外勤工蟻的數量與巢內之個體比值約為 1/10。

（二）缺后（queenless）聚落職蟻（worker）分工情形：

華夏粗針蟻之缺后聚落職蟻間的階級不明確，結構鬆散，且常有虐殺（eliminate）之情形（圖 47 所示）。外勤與內勤職蟻的比值接近 1，覓食發生成體搬運（adult transport）次數亦明顯降低。觀察紀錄中，缺后聚落職蟻已產卵並成為幼蟲。



圖 53 華夏粗針蟻（*P. chinensis*）
缺后（queenless）聚落
中，受虐殺之職蟻

六、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 與其他粗針蟻屬 (*Pachycondyla*) 之聚類分析。

利用 12 種行為上之差異做為分類單元 (OTU)，以二元性狀編碼進行分類，對華夏粗針蟻 (*P. chinensis*)、黃足粗針蟻 (*P. luteipes*)、達氏粗針蟻 (*P. darwinii*) 和爪哇粗針蟻 (*P. javanus*) 作聚類分析，如表 9 所示。

表 9 12 種行為分類單元 (OTU) 列表

	爪哇粗針蟻	華夏粗針蟻	黃足粗針蟻	達氏粗針蟻
單獨搬運	1	1	1	1
協同搬運	0	0	0	0
成體搬運運用於覓食	0	1	0	0
成體搬運運用於遷徙	0	1	1	0
引導 (temden running)	1	0	0	0
唧唧鳴聲運用於育幼	0	0	1	0
唧唧鳴聲運用於覓食	1	0	1	1
形成覓食蟻道	1	0	0	0
群體攻擊	1	0	1	1
單獨攻擊	1	1	1	1
日行性	0	0	0	1
假死	1	0	0	0

備註：1 為具有此行為，0 則為無此行為。

圖 54 所示為利用 NTSYS 做行為上之聚類分析所繪出之系統樹狀圖，發現華夏粗針蟻在其行為上與其他四種粗針蟻有相當之差別。

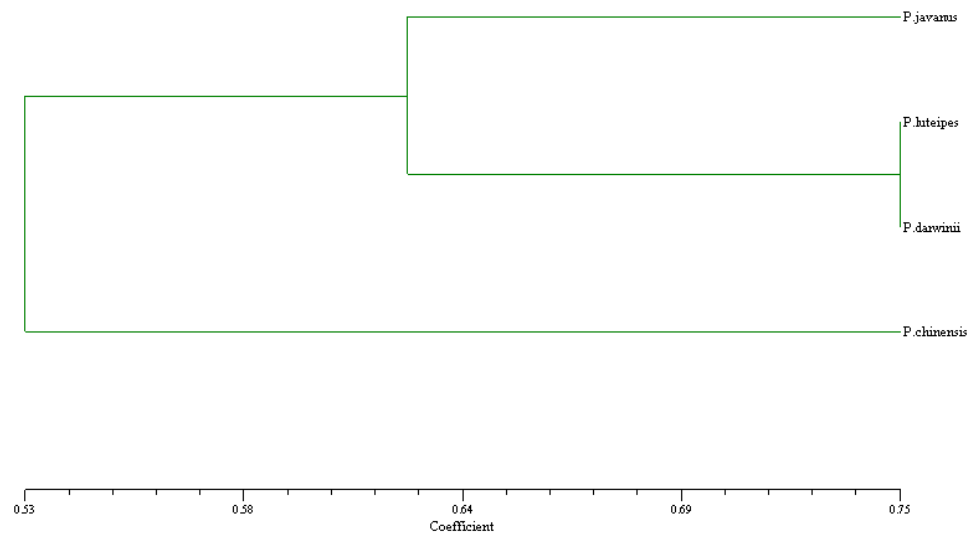


圖 54 以 12 種行為差異為分類單元 (OTU) 做聚類分析所繪出之樹狀圖

華夏粗針蟻 (*P. chinensis*)、黃足粗針蟻 (*P. luteipes*)、達氏粗針蟻 (*P. darwini*) 和爪哇粗針蟻 (*P. javanus*) 作聚類分析，如表 10 所示。

表 10 9 種形態分類單元 (OTU) 列表

	爪哇粗針蟻	華夏粗針蟻	黃足粗針蟻	達氏粗針蟻
後胸背板縫明顯	0	1	1	0
中胸背板明顯分離隆起	0	1	1	0
觸角柄節較長	0	1	0	0
前伸腹節刻紋明顯	0	1	0	0
TL>7 mm	1	0	0	0
體呈黃褐色	0	0	0	1
中胸側溝	1	1	1	0
大顎基孔	1	1	1	0
具 7 個大顎突齒	0	0	0	1

圖 55 所示為利用 NTSYS 做形態上之聚類分析所繪出之系統樹狀圖，發現華夏粗針蟻在其形態上與黃足粗針蟻 (*P. luteipes*) 較為相近。

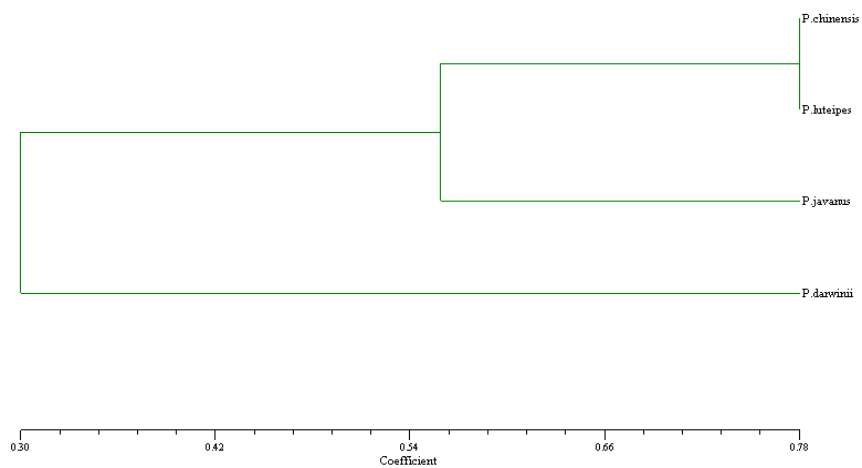


圖 55 以 9 種形態差異為分類單元 (OTU) 做聚類分析所繪出之樹狀圖。

討論

一、飼養過程：

因在人工飼養下的環境無法有正常且穩定之照明來源，很可能改變其生活方式與習性，因此我們以 12 小時為一光照週期，作為其固定之光源，如圖五十六。由於螞蟻對於紅色光較不敏感，因此人工觀察箱之蟻巢區域以紅色塑膠片、紅色玻璃紙遮蓋，以便觀察其職蟻於巢內之活動。且華夏粗針蟻在野外之棲地陰暗且潮濕，於飼養的過程中對水分的需求量也相當高，需每天於石膏底層上灑水，維持環境之濕度。



圖 56 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*)
飼於人工環境下穩定之
照明來源

二、華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 野外之覓食定位方式：

在飼養中我們證實華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 可以利用濃度梯度 (concentration gradient) 來進行覓食，我們推測是由於棲地環境之因素，而導致華夏粗針蟻以震動波及氣味之濃度作為野外之覓食定位方式。在其生活之落葉及表土層環境，常因遭受其他物種之影響而改變結構，無法以嗅跡費洛蒙 (trail pheromone) 作為有

效之增援傳訊方式。但在野外時覓食區域較廣，利用氣味定位或許不適用。經過觀察，華夏粗針蟻在野外運用成體搬運（adult transport）的時機為氣味較濃烈之死屍。（圖 57、58 所示）。



圖 57 華夏粗針蟻（*P. chinensis*）
圖中央於覓食中，應用
成體搬運行為（adult
transport）



圖 58 華夏粗針蟻（*P. chinensis*）
成體搬運行為（adult
transport）特寫

三、華夏粗針蟻（*P. chinensis*）產生成體搬運行為（adult transport）

條件因素：

由行為譜（ethogram）的結果可發現蟻巢於未受干擾之情況下亦會產生成體搬運行為（adult transport），事後查詢文獻得知，次級職蟻（subordinate worker）會臣服於高階職蟻（dominant worker），並接受其搬運。蟻巢受干擾後，進行成體搬運（adult transport）的高階職蟻（dominant worker）不會同時進行警戒，會專一進行成體搬運行為。當華夏粗針蟻搬運者（porter）與另一隻個體產生接觸之行為，即揮動觸角傳遞訊息，有時會發生僵持不下的情形，原因為其皆為搬運者（porter）或此為正進行警戒之守衛蟻（guard），並非逃逸之個體。經過觀察，華夏粗針蟻的成體搬運行為（adult transport）被搬運者（portee）搬運的次序並無一定之順序。

四、掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) :

經掃描式電子顯微鏡觀察後，發現華夏粗針蟻進行成體搬運行為 (adult transport) 時大顎咬合之位置，前胸腹面具有一佈滿刻痕之縱溝，推測可增加大顎與前胸之摩擦力，有利於進行成體搬運行為。

五、覓食公式推導比較：

在公式的推導中，我們只推導出有嗅跡費洛蒙 (trail pheromone)、無嗅跡費洛蒙，和利用搬運者 (porter) 進行之成體搬運 (adult transport) 三種覓食公式，至於利用發音器 (stridulitrum) 傳訊覓食之公式，因與濃度梯度公式相同，所以不另外推導。

六、煙燻玻璃法 (sooted glass method) 檢測嗅跡費洛蒙 (trail pheromen) :

以煙燻玻璃法 (sooted glass method) 檢測華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 是否分泌嗅跡費洛蒙 (trail pheromen)，可能出現之情形為正常行走 (normal walking) 及分泌嗅跡費洛蒙 (trail pheromen)，嗅跡費洛蒙又可分為後腸腺 (hindgut gland)、跗節腺 (tarsal gland) 及二種腺體皆分泌。實驗中，玻璃上雖留有華夏粗針蟻其跗節碰觸之痕跡，但經過文獻之查詢後了解，僅 *Amblyopone* 此屬之成員具有跗節腺 (tarsal gland)，因此可得知華夏粗針蟻不可能以跗節腺 (tarsal gland) 分泌嗅跡費洛蒙 (trail pheromen)。

七、以分子生物技術檢測：

在本研究中，我們運用了掃描式電子顯微鏡（SEM）和氣象層析質譜儀（GC-Mass）來進行實驗，以掃描式電子顯微鏡觀察華夏粗針蟻個體，可觀察之倍率較解剖顯微鏡更高，且解析度較佳。

在時間有限的情況下，氣象層析質譜儀（GC-Mass）目前僅完成 GC 的部份，樣本包括了華夏粗針蟻、棲地之土壤、人工蟻巢之石膏層，各樣本之有機溶劑正己烷亦採樣一瓶進行對照。進行採樣的過程中需細心且謹慎，以免汙染了樣本使實驗數據出現較大的誤差。不過目前因 Mass 的實驗尚未完成，我們無法得知華夏粗針蟻其嗅跡費洛蒙（trail pheromone）確切之化合物為何。

八、華夏粗針蟻（*P. chinensis*）與其他粗針蟻屬（*Pachycondyla*）之聚類分析：

生物遭遇天擇時，較易產生行為上之差異。我們利用 NTSYS 進行形態以及行為之聚類分析，由結果可發現此 2 種樹狀圖不盡相同，由行為差異為分類單元（OTU）所製成之樹狀圖明顯衝擊了現有以形態差異進行之分類。我們推測由於華夏粗針蟻的成體搬運行為（adult transport）已形成儀式化行為（ritualized behavior），其演化時間應相當漫長，造成華夏粗針蟻之演化路徑較為特別。但華夏粗針蟻與其他同屬之粗針蟻間確切之親緣關係仍須以電泳等分子生物技術進行檢測。

九、成果發表：

於研究期間，觀察到華夏粗針蟻（*P. chinensis*）將一種常見於螞蟻社會中職蟻的成體搬運行為（adult transport）運用於覓食過程中，且發展出一特殊階級搬運者（porter），此學術新發現已於 2008 年第二十九屆台灣昆蟲學會年會上發表。

結論

經由行為譜 (ethogram) 的分析得知，華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 之有后聚落 (queenright) 職蟻間分工嚴謹，且具有成體搬運行為 (adult transport)，於其覓食過程中，產生一特殊階級—搬運者 (porter)，其被餵哺機率高於被搬運者 (portee)，專司進行成體搬運，行為高度專一化，以氣味進行食物之定位。食物量較少，成體搬運行為比例較小；食物與蟻巢距離超過 25 公分，搬運者 (porter) 產生之機率亦隨之下降。成體搬運 (adult transport) 在食物缺乏時較為顯著。於飢餓狀態下，搬運者 (porter) 佔外勤職蟻比例明顯提高，且被搬運者 (portee) 成為搬運者 (porter) 的比例亦明顯提升。將搬運者 (porter) 於覓食過程中移除，覓食效率降低。經過公式的推導，證實其成體搬運行為 (adult transport) 可縮短覓食中行走之距離，減少總能量的散失與消耗，以利其達成最佳化覓食。



圖 59 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 職蟻之成體搬運行為 (adult transport)



圖 60 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 聚落，飼養觀察之裝置圖

參考文獻

- Billen, J. , B. Thijs, F. Ito and B. Gobin. 2005. The pretarsal footprint of the ant *Amblyopone reclinata* (Hymenoptera, Formicidae) and its role in nestmate recruitment. *Arthropod Structure&Development* 34:111~116.
- Dahbi, A. , X. Cerdá, A. Hefetz and A. Lenoir. 1997. Adult transport in the ant *Cataglyphis iberica*:A means to maintain a uniform colonial adooour in a species with multiple nests. *Physiol. Entom.* 22:13~19.
- Dahbi, A. , J. Retana, A. Lenior and X. Cerdá. 2008. Nest-moving by the polydomous ant *Cataglyphis iberica*. *J. Ethol.* 26:119~126.
- Fourcassie, V. , A. Dahbi and X. Cerdá. 2000. Orientation and navigation during adult transport between nests in the ant *Cataglypis iberica*. *Naturwissenschaften* 87:355~359.
- Gibb, H. and D. F. Hochuli. 2003. Nest relocation in the golden spiny ant,*Polyrhachis ammon*:environmental cues and temporal castes. *Insect. Soc.* 50:323~329.
- Hölldobler, B. 1984. A new exocrine gland in the slave-raiding ant genus *Polyergus*. *Psyche* 91 : 225-236.
- Marcio, R. P. 2002. Behavioral repertoire,age polyethism and adult transport in *Ectatomma opaciventre* (Formicidae:Ponerinae).*Ins. Beh.*15:25~35.
- Möglich, M. and B. Hölldobler. 1974. Social carrying behavior and division of labor during nest moving in ants. *Psyche* 81:219~236.
- Mercier, J. L. and A. Dejean. 1996. Ritualized behavior during competition for food between two Formicinae. *Ins. Soc.*43 :17~29.
- Ruano, F. and A. Tinaut. 2004. The assault process of the slave-making ant *Rossomyrmex minuchae* (Hymenoptera,Formicidae) *Sociobiology*43 :201~209.
- Wilson, E.O. and B. Hölldobler. 1986. Ecology and behavior of the neotropical cryptobiotic ant *Basicros manni* (Hymenoptera:Formicidae:Basicerotini). *Ins. Soc.* 33:70~84.
- 盧忠煌。2001。福山植物園區螞蟻相的研究。初版，台北市，國立台灣大學昆蟲學研究所碩士論文。P.126~P.131。
- 尚玉昌。2003。行為生態學。初版，台北市，五南出版社。P.59~64。
- 張永仁。1998。昆蟲入門。初版，台北市，遠流出版社。

霍德·伯勒與威爾森。1996。螞蟻·螞蟻。初版，台北市，遠流出版社。

紀凱容。2008。第二十九屆台灣昆蟲學會年會手冊。初版，台灣昆蟲學會。P.72。

林宗歧與吳文哲。2003。台灣螞蟻相（膜翅目：蟻科）。國立台灣博物館年刊。初版，台北市。國立台灣博物館 P.5~P.68。

徐克學。1996。數量分類學。初版，台北縣，水產出版社。

Hölldober, B. and E.O. Wilson. 1990. The ants. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.

無脊椎動物監測模式之建立

http://bc.zo.ntu.edu.tw/conf_2005082526/pdf/06.pdf

以螞蟻群聚做為保留區監測的目標物種—掉落式陷阱

<http://www.tfri.gov.tw/cht/files/%B1M%C3D6-1433970534.pdf>

增援傳訊行為

<http://elearning.qcobass.edu.hk/~bio/ant/a4.htm>

台灣生物多樣性資訊網

<http://taibnet.sinica.edu.tw/home.asp>

Japanese Ant Image Database

<http://ant.edb.miyakyo-u.ac.jp/E/Taxo/F10701.html>

Subfamily PONERINAE Tribe PONERINI *Pachycondyla chinensis* (Emery)

<http://www.msstate.edu/org/mississippiantmuseum/Researchtaxapages/Formicidaepages/genericpages/Pachycondyla.chinensis.htm>

Pachycondyla chinensis (Emery) An Emerging Ant Pest of Medical Importance

<http://entweb.clemson.edu/cuentres/eiis/pdfs/mv18.pdf>

The Ethogram: quantifying behavior and testing hypotheses

<http://biology.kenyon.edu/courses/biol261/Ethogram/EthoBody.htm>

附錄



圖 61 餵哺行為，由嗦囊 (crop) 具食物之職蟻吐餵給同伴



圖 62 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 正進行警戒之行為



圖 63 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 育幼行為，其大顎之間為幼蟲



圖 64 (a.b.c.) 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 各種梳理行為 (自體梳理)



圖 65 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 梳理行為 (梳理同伴)

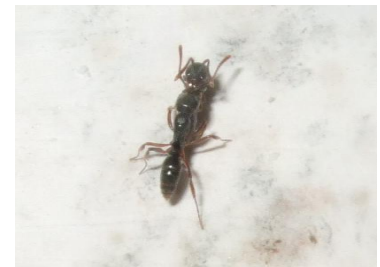


圖 66 (a.b.) 搬運屍體 (上圖左) 與成體搬運行為 (adult transport) 以蛹狀 (pupal posture) 搬運時 (上圖左) 皆以大顎咬合被搬運者 (portee) 之前胸



圖 67 (a.b.) 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 接觸之行為照。進行此行為時，其觸角會快速揮動，鞭打對方的頭部



圖 68 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 棄屍行為所堆疊之墳場



圖 69 華夏粗針蟻 (*P. chinensis*) 成體搬運 (adult transport)

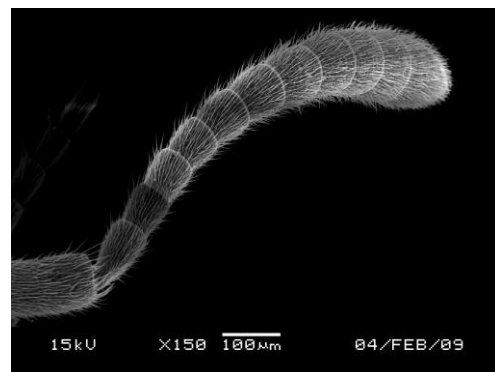
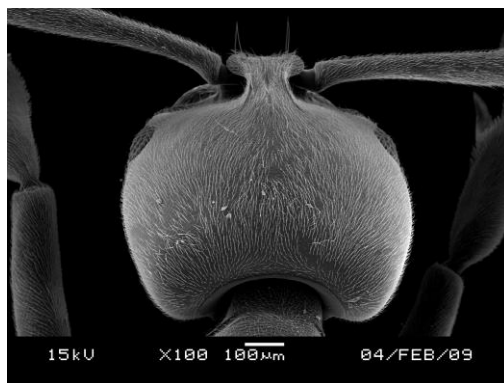


圖 70 左為頭部特寫；右為觸角特寫

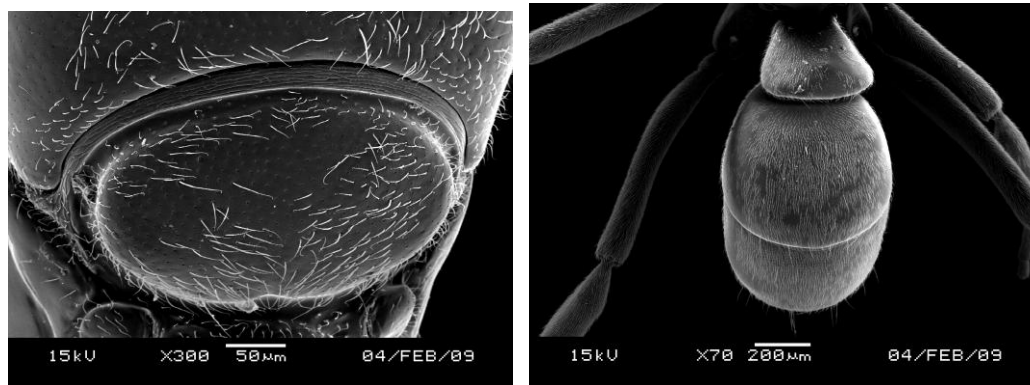


圖 71 左為中胸之發音器特寫；右為腹部特寫

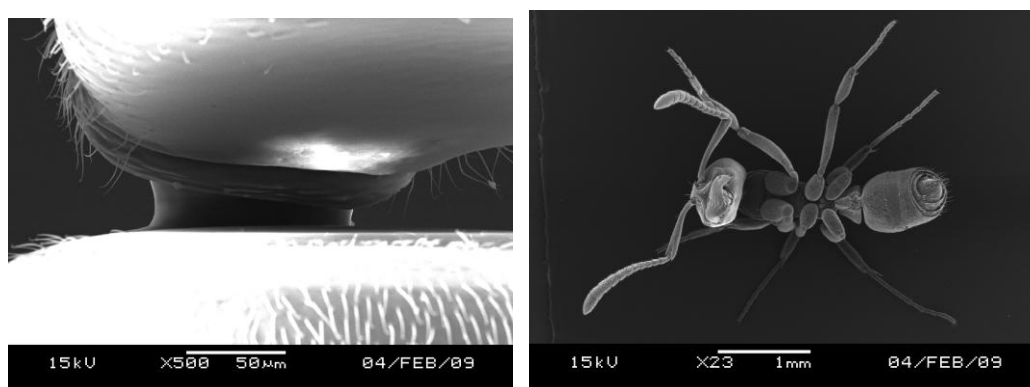


圖 72 左為俯視腰節發音器特寫；右為華夏粗針蟻腹面特寫

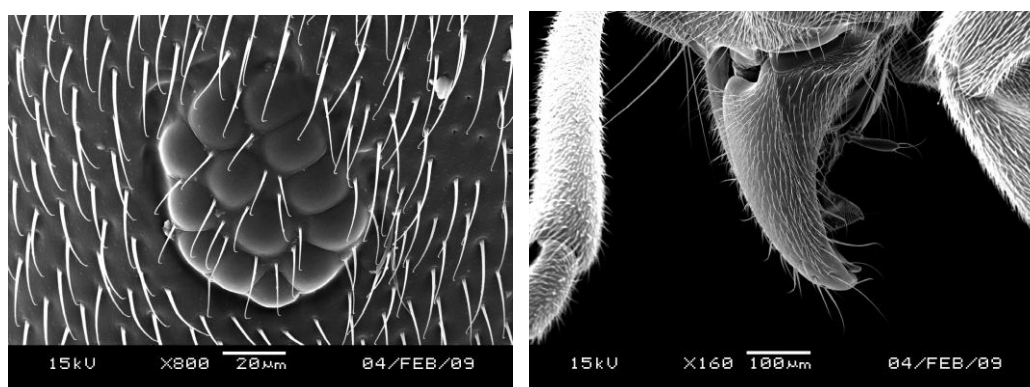


圖 73 左為複眼特寫；右為大顎側面特寫

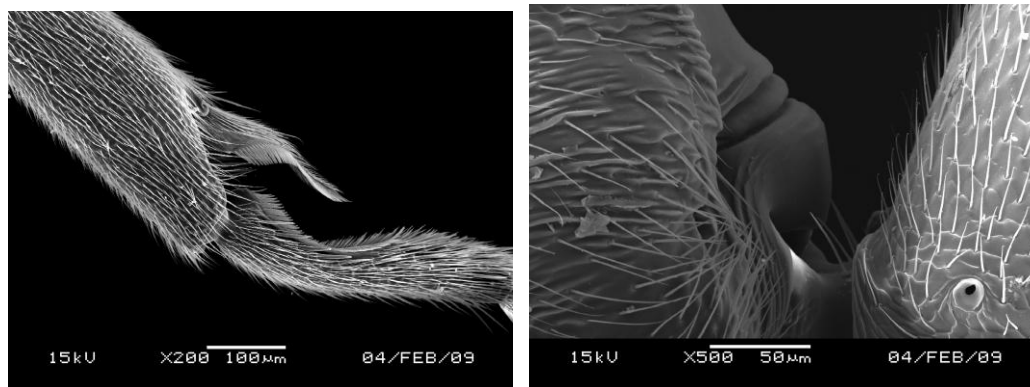


圖 74 左為脛節齒毛特寫；右為腰節發音器側面特寫

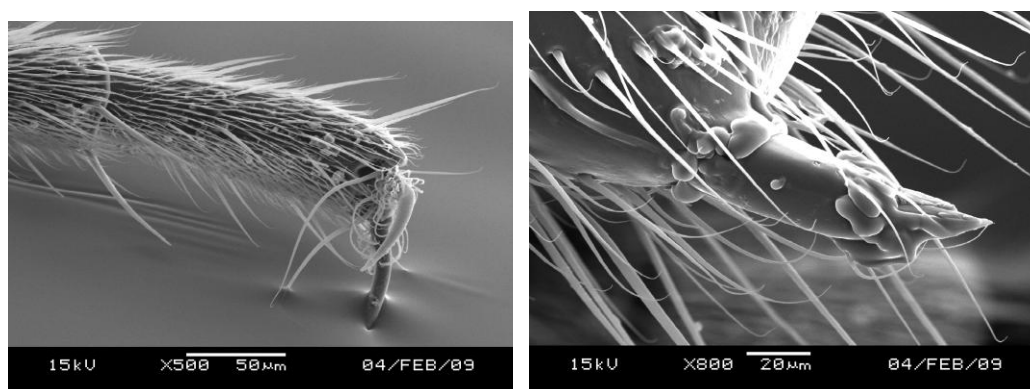


圖 75 左為跗節特寫；右為螯針特寫

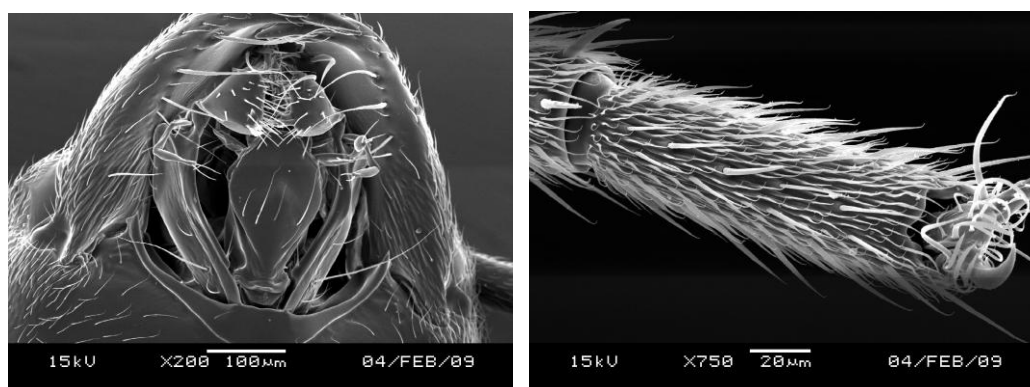


圖 76 左為大顎腹面特寫；右為跗節特寫

評語

二位作者對針刺蟻的研究前後投入許多心力，且每次接受評審建議而增加數據，研究精神值得鼓勵。

建議可多去瞭解 Trail Pheromone 的知識。

建議可就 evolution 的 cost/benefit 做一些討論，採用 Pheromone 是否較省力。