苗栗區農業專訊

第115期



專題

蠶蜂專輯

農業部苗栗區農業改良場發行
中華民國 115 年 9 月出刊 ISSN：1561-2600
中華郵政苗栗雜字第 27 號登記證登記為雜誌交寄

苗栗區農業專訊
第 115 期 • 中華民國 115 年9月出刊



全球農業高度依賴蜜蜂等授粉媒介以維持果實與種子的產量。

目 錄

1	家蠶人工飼料研發趨勢	徐培修
4	家蠶高溫韌性種原選育之研究	廖久薰
7	蟲生線蟲防治蜂箱小甲蟲之潛力	潘其彥
10	促進蜂花粉加值化加工製程探討	陳本翰
13	生蜂蜜與脫水加工蜂蜜之品質與保存	黃子豪
17	氣候變遷對蜜源植物泌蜜機制與授粉生態之影響	吳姿嫻
20	氣候變遷對授粉蜂分布的影響	黃冠瑋 曾惠芸

發　行　人 / 施佳宏
總　編　輯 / 盧美君
審　　訂 / 吳姿嫻
編 輯 委 員 / 鍾國雄、劉建輝、朱盛祺、鐘珮哲
張雅玲、盧美君、吳姿嫻
執 行 編 輯 / 吳世垣

發　行　所 / 農業部苗栗區農業改良場
地　　址 / 363201 苗栗縣公館鄉館南村261號

電　　話 / (037) 222111
網　　址 / https：//www.mdares.gov.tw

本場單一窗口服務
電 子 郵 件 / mdares@mdares.gov.tw
農業諮詢服務 / (037) 236583
傳　　真 / (037) 221277 . 220651
展 售 書 局 / 國家書店 (02) 25180207
五南文化廣場 (04) 24378010

GPN：2008700208
ISSN：1561-2600

家蠶人工飼料研發趨勢

徐培修（副研究員）

前言

家蠶是取食桑葉吐絲結繭的農業經濟昆蟲，亞洲為蠶業發展的核心區域。中國是目前全球最大蠶絲生產國，生絲產量占全球比重高達七成至八成；印度則緊隨其後，位居全球第二，且因國內傳統服飾需求龐大，導致供不應求而成為全球最大的蠶絲消費與進口國；臺灣蠶絲生產版圖萎縮，現今以開發家蠶生技原料為主要目標。不論是集約式規格化生產的中國，力求提升小農收益的印度，還是轉型高階生技的臺灣，傳統的桑葉飼育模式都開始面臨嚴峻的考驗。冬季桑樹落葉的限制、都市化導致的桑園土地縮減、農村勞動力流失、氣候變遷及農藥飄散汙染等不確定環境因子，導致家蠶無法周年穩定量產。因此研發人工飼料與家蠶飼育技術，已成為各國蠶桑科學研究的共同趨勢。透過精準掌握人工飼料的化學成份與滅菌製程，不僅能徹底阻斷家蠶病害的傳播，更是讓家蠶生物反應器符合醫藥級潔淨規格的唯一途徑。

各國研發趨勢

回溯研發軌跡，各個國家與地區因應其特有的經濟背景，發展出截然不同的趨勢。最早在 1960 年，由於冬季桑葉短缺與家蠶病害肆虐，日本率先發表人工飼料配方，並在政府的資助下大面積推廣於稚蠶飼育，至今日本蠶農在稚蠶期採用人工飼料的普及率高達九成，例如日本農產工業株式會社（Nosan Corporation）販售的 SilkMate（圖一）。隨著絲綢產業逐漸萎縮，日本的人工飼料研究已轉向生技、藥妝與醫學領域，例如日本團隊在 2020 年發表的 MS-11 簡易飼料，其目的不再是追求商業化產繭，而是為全球實驗室提供極低成本、便於自行調製的無菌飼育平台，將家蠶推廣為篩選口服抗菌藥、評估新藥口服毒性以及模擬高血糖疾病的模式生物。



圖一、日本開發的 SilkMate 家蠶人工飼料 (https://www.nosan.co.jp/)。

身為第二大產絲國的印度，其研發趨勢則緊密貼合於解決小農土地有限、勞力危機與提升蠶農經濟收益。印度政府在 2003 年發表人工飼料配方，後續由 Sericare 公司在 2016 年開發出 SeriNutrid 人工飼料用於稚蠶飼育，不僅免除了早期即時採桑切桑的繁重體力勞動，更能有效預防病原體造成的早期感染，提升整體產值 5% 至 10%。

全球產量第一的中國，雖然人工飼料研究起步於 1970 年，但早期因勞動力充裕而發展受限，直到 2007 年研究團隊才建構出全齡人工飼料飼育技術的雛型。然而近年來研究蓬勃

發展已站穩龍頭地位，不但成功培育出對人工飼料適應性極佳的廣食性家蠶品系，飼料種類多元包括「熟化即食真空條裝（開袋即餵）」與「乾燥飼料粉（需自行加水用微波爐或蒸鍋加熱固化）」，許多研究團隊持續針對飼料營養成分進行改良，最具指標性的商業化里程碑則是浙江省巴貝集團於 2019 年建立全球首座自動化養蠶工廠。

臺灣在人工飼料領域的研發最早始於 1984 年，於 2010 年苗栗區農業改良場成功開發出專用人工飼料配方，並選育出適合本土全齡人工飼料飼育的家蠶品系 Bm-J10，其生產動物疫苗時的桿狀病毒接種成功率較高，亦能穩定達到量產目標，大幅提升生技疫苗的生產

表一、各國家蠶人工飼料乾粉配方比較表

國別	中國	印度	義大利	日本
飼料代號	M38	SeriNutrid	CERA 配方	MS-11
桑葉粉	38%	28%	25%	45%
脫脂大豆粉	30%	25%	36%	45%
小麥粉			15%	
玉米粉	24.3%		4%	
纖維粉		8%	5%	
檸檬酸	3%		4%	
複合無機鹽	2%	4%	3%	
複合維生素 B	0.3%			
維生素 C	2%			
複合維生素			0.399%	
植物固醇		0.3%		
β - 谷固醇			0.5%	
蔗糖		3%		
瓊脂		7%	4.2%	10%
抗壞血酸			2%	
山梨酸			0.2%	
丙酸			0.691%	
防腐劑	0.4%	3%		
氯黴素			0.01%	
未公開成分		21.7%		

效率與安全性，也讓我國家蠶生醫原料生產水準正式跨入國際規範。

各國配方化學成分與供應目的之差異

家蠶屬於寡食性昆蟲，主要以桑科植物為食。要誘發其產生連續攝食行為，飼料中必須包含引導其爬向食物的誘引因子、促使其開口啃咬的取食因子，以及維持吞嚥行為的吞嚥因子，並精確搭配優質蛋白質、碳水化合物、必需維生素與無機鹽（表一）。

首先介紹用於商業化全齡高繭絲產量的中國主流配方，以山東農業大學開發的 M38 蒸煮人工飼料為代表，其主成分為桑葉粉 38%、脫脂大豆粉 30%、玉米粉 24.3%，或蘇州大學使用的 35% 桑葉粉、35% 大豆粉、15% 桑綠枝粉等配比。這類型的配方，供應目的是透過高比例的桑葉粉提供充足的天然誘引與取食因子，確保量產飼育下的家蠶具有一致的攝食反應，並以高比例的大豆粉提供豐富粗蛋白源，用以轉化為大量的絲蛋白。

然而印度專為小農稚蠶飼育設計的人工飼料，其原料配比呈現有明顯環境適應性差異。SeriNutrid（圖二）配方的供應目的並非讓家蠶在全齡食用下吐出大量蠶絲，而是要在



圖二、印度開發的 SeriNutrid 家蠶人工飼料 (Mondal et al., 2016)。

便宜與易保存的前提下，協助家蠶安全渡過高死亡率的稚蠶期。因此減少高成本的大豆粉與桑葉粉占比，轉而調高纖維素粉與凝膠劑的比例，以優化飼料在熱帶高溫多濕環境下的物理硬度與保水性，並透過高達 3% 的防腐劑，確保稚蠶在高密度群飼下不被黴菌污染。

進一步對比義大利 CREA 蠶桑實驗室採用的配方則相當複雜，該配方的供應目的是進行科學試驗與生產醫療級生物材料，因此調整碳水化合物與多種非大豆植物蛋白的比例，並藉由添加高純度的 β - 谷固醇彌補低桑葉粉所導致的固醇源缺乏。

與上述所有旨在生產優質蠶繭、重組蛋白或蠶蛹的複雜配方不同，日本帝京大學研發的 MS-11 人工飼料則展現極致減法。僅需將純桑葉乾粉 10 克與黃豆粉 10 克混合，並在 100 毫升的水中加入 2.5 克的瓊脂作為凝固劑，再以高溫高壓滅菌及熱固化。MS-11 專供短期科學研究與給藥實驗，並不適用於長期家蠶飼育繁殖，幼蟲雖然能正常生長發育至五齡第 8 天，但無法吐絲結繭。其供應目的在於提供一種極低成本且標準化的給藥與飼育平台，藉此推廣家蠶在毒理學與藥理學上的應用。

近期研究摘要

雖然人工飼料具備無菌與規格化優勢，但多代餵食人工飼料的家蠶，其幼蟲發育速度平均延長 10% 以上，且最終的繭層率顯著低於全程食用桑葉的個體。代謝體學研究指出，飼料高溫蒸汽滅菌會導致複合維生素熱降解，且因桑葉粉中的尿素酶去活化而引發體內尿素與尿酸異常累積，伴隨糖解與三羧酸循環等能量通路生理性下調，此外，於飼料組家蠶排泄物中發現含有大量 D- 松醇及 N- 乙醯葡萄糖胺，其中 D- 松醇來自於大豆粉，是一種干擾營養吸收的物質；N- 乙醯葡萄糖胺為幾丁質水解產物，表示幼蟲中腸圍食膜發生幾丁質異常水解流失與結構受損。針對代謝障礙，研究發現在飼料中添加 4% 纈胺酸，能促使營養物質有效分配給蛹體，使健蛹率提升 25% 以上，可惜繭層率會減少約 10%。此外，針對防腐劑與滅菌製程造成腸道菌群多樣性降低、流失益生菌之問題，研究發現桑葉組家蠶腸道菌相以乳酸桿菌屬（*Lactobacillus*）與魏斯氏菌屬（*Weissella*）為主，因此未來在人工飼料中直接添加特定益生菌製劑，應可重建家蠶腸道微生態，提高營養吸收並增強抗病力。

結語

面對臺灣傳統蠶絲紡織產業萎縮、農地與農村勞動力流失的現實，我國家蠶研發方向已開始朝生技產業與食農教育轉型。在生技產業層面，利用人工飼料無菌規格化的優勢，將本土選育的優良家蠶品系，轉化為生產醫藥級重組蛋白、動物疫苗抗原與絲蛋白醫美材料的生物反應器，藉此跨入高附加價值的精密生醫版圖。在食農教育層面，飼養家蠶是許多臺灣人童年不可或缺的共同觀察記憶，然而桑葉採集困難成為學校教學與一般家庭體驗時難以跨越的門檻。透過開發平價便利的普及型家蠶人工飼料，才能徹底解除季節與空間對養蠶活動的束縛，為活化臺灣蠶業，提供堅實的後盾。

家蠶高溫韌性種原選育之研究

廖久薰（副研究員）

全球氣候變遷下蠶業的嚴峻挑戰

隨著全球氣候變遷所引發的極端高溫與熱浪，早已不再是未來的預測，而是現階段農業生產最具威脅性的常態課題。家蠶（*Bombyx mori*）是完全馴化的經濟昆蟲，面對環境溫濕度的變化極為敏感。具有優良生育及經濟特性的二化性家蠶，最適合發育的溫度為 25°C 至 28°C。然而，近年來全球主要產絲國家，如中國、印度及東南亞地區，在夏秋兩季頻頻出現 38°C 甚至 40°C 以上的極端高溫，這對傳統蠶業生產造成毀滅性的打擊。高溫逆境對家蠶的危害是嚴重且連鎖性的。以家蠶生理層面，持續高溫會破壞家蠶體內的酵素活性，引發代謝紊亂，導致幼蟲食慾減退、發育不均，進而使末齡期體重不足，直接影響熟蠶結繭的繭層率與單粒繭重表現（圖一）。更嚴重的是在極端高溫與高濕環境的雙重考驗，顯著降低家蠶的免疫力，極易感染軟化病、膿病或白殭病等流行性病害，造成大規模死亡。此外，高溫更是對家蠶製種業造成嚴重影響，例如家蠶羽化率差、每蛾產卵數與孵化率減少，直接影響蠶產業鏈的供應。因此，如何因應氣候變遷，透過遺傳育種培育出具備氣候韌性的耐熱新蠶種，已成為全球家蠶種原管理與產業轉型亟需面對的核心任務。

家蠶種原多樣性之維護管理

面對多變且未知的氣候挑戰，家蠶種原



圖一、家蠶在不同飼養環境的生育狀況，(A)35°C 飼養，耐受性差的種原幾乎死亡；(B)25°C 對照組的家蠶生育正常，順利吐絲結繭。

的多樣性是種原管理者最重要的資源。中國、日本、印度以及臺灣的農業試驗單位，皆建置有具規模的家蠶種原庫。家蠶種原依其地理起源與生理特性，分為溫帶的一化性、二化性與熱帶的多化性家蠶。一化與二化性蠶種具有繭大、絲質優良、粗細均勻且產絲量高的遺傳背景，但對高溫高濕的耐受力極低。相反地，

熱帶南亞與非洲地區的多化性蠶種，在長期自然與人工選擇下，演化出極強的抗病力與耐熱性，能在32°C以上的環境中順利完成生活史，並維持高健蛹率；然其缺點在於繭小、繭層薄及絲質較差。

在氣候逆境下的種原維護與管理策略，不再是傳統的「低溫保存與定期繼代」等被動維護，而必須朝向「精準數位化與功能基因組化」的主動管理升級。

一、基因型與表型大數據庫建立：利用高通量測序技術，對核心種原進行全基因組重測序，發掘並標記與耐熱或抗病相關的分子標記。

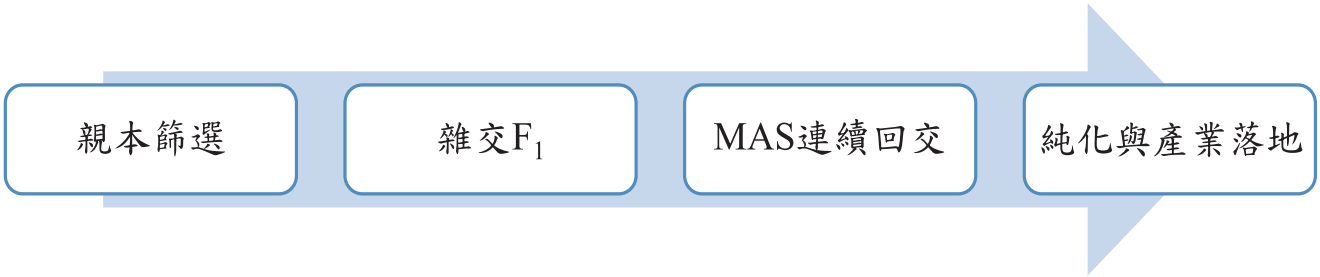
二、逆境壓力表型精準鑑定：針對現有種原進行精確的溫濕度梯度壓力測試，量化各品系在不同發育階段的熱休克蛋白表現情形，建立「遺傳型－環境型－表型」的整合數位檔案。透過健全種原庫的活化管理，將看似無商業價值的多樣性種原，轉化為抗逆境選育的「關鍵基因供應體」。

產業亟需改善之痛點與種原管理解決方向

在極端高溫下傳統蠶室控溫耗能，為了維持二化性家蠶的正常生長，蠶農必須高度依賴空調與機械通風。大幅拉高了電費與生產成本，削弱產業競爭力，更與全球推動的「2050淨零排放」及綠色減碳趨勢背道而馳。種原管理者透過選育可耐受32°C~35°C變溫環境的耐熱新品系，進而可調高蠶室空調設定溫度，甚至在夏秋交替之際實現「自然通風飼育」，減少能源消耗。

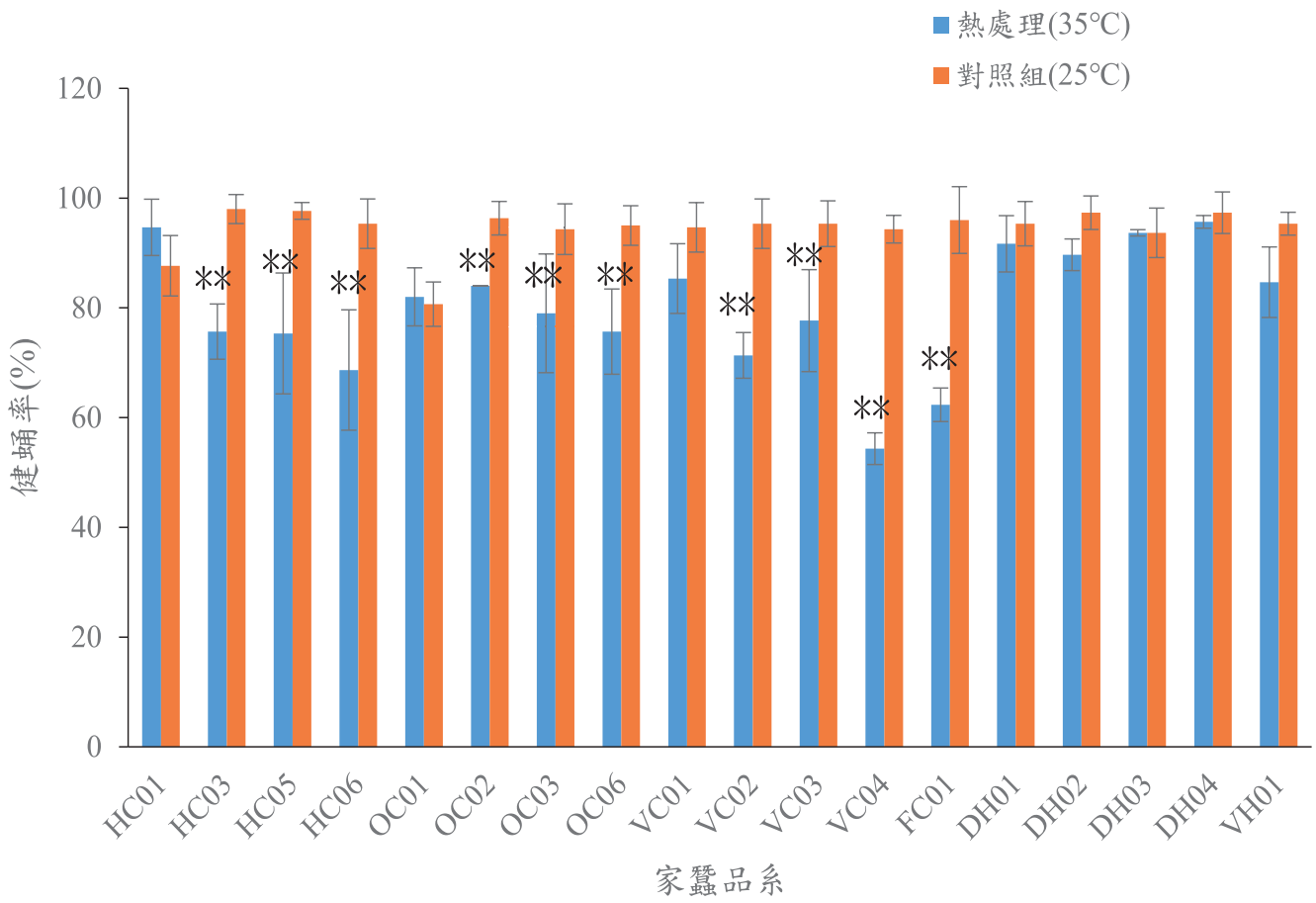
傳統製種效率低下與品系退化問題層出不窮，氣候暖化導致雄蠶精子活力下降、雌蠶產卵品質不佳，使得製種的失敗率攀升，優良蠶種供不應求。種原管理解決方向應將選育重點提早至「胚胎期與蛹期」，篩選在高溫下生殖系統發育依然健全、組合力高的種原，優化製種量產體系。

種原管理者從種原庫中的耐熱潛力品系轉化為產業實體效益，須採取分子標記輔助選拔（MAS）與回交育種相結合的精準操作路徑，具體執行的步驟如下：



一、親本篩選：自種原庫中挑選耐熱表現優異的5至8個潛力品系（圖二）。探討多化性親本熱休克蛋白表現模式，挑選出高溫下熱休克蛋白能「快速且大量啟動」的個體。二化性親本以產絲量及繭層率表現佳為主。

二、雜交F_1（第一子代）：擬定雜交組合進行F_1壓力測試。將孵化後的F_1幼蟲，置於「變溫壓力環境」中，日間模擬飼養室高溫33°C持續8小時，夜間降溫至25°C。評估F_1的存活率、五齡期長短以及健蛹率，篩選出最佳的黃金雜交組合2~3組。



圖二、不同家蠶品系幼蟲在 35° C 飼養室之健蛹率表現情形，25° C 飼養為對照組。誤差線是平均值標準差 (n=3)，** 分別代表 1% 顯著差異 (t test)。HC01、OC01、DH01、DH02、DH03、DH04 及 VH01 具選育親本的潛力。

三、MAS 連續回交：將 F1 優良個體重新與原本的二化性親本交配，連續回交 3 代或 4 代，利用 MAS 進行精準正向選拔「確實遺傳多化性耐熱標記」的個體，剔除多化性親本所帶有的「絲質不良」基因，同時完整保留其「耐熱」特性，使子代的基因組將有 90% 以上恢復為二化性的優質絲質表現，且增加多化性的耐熱機能。

四、純化與產業落地：將回交 4 代中表現最優異的個體進行同胞交配 2 至 3 個世代，使耐熱與經濟性狀基因達到「純合子」狀態，固定新品系。

結語

面對氣候變遷的衝擊，建構韌性種原是現今蠶業亟需進行的課題。透過現代分子生物學與種原管理的深度融合，高溫耐受性種原的選育有機會打破「耐熱」與「高產」難以兼得的結果。本項研究若達成選育目標，不僅實質保障農民在極端氣候下的經濟收益，亦可為蠶業後端高值化服務提供穩固的原料生產一條龍，使蠶業持續保有產業韌性、高附加價值與永續發展。

蟲生線蟲防治蜂箱小甲蟲之潛力

潘其彥（技佐）

前言

西方蜜蜂（*Apis mellifera*）是全球重要的授粉昆蟲，維持自然生態，也維繫全球重要作物的生產。然而，臺灣蜂群近年面臨多重環境與病蟲害威脅，其中「蜂箱小甲蟲」（*Aethina tumida*）的入侵已對產業造成衝擊。蜂箱小甲蟲幼蟲於蜂巢內大量啃食巢脾，造成蜂蜜與花粉變質發酵，並危害蜜蜂幼蟲及蜂蛹，受害嚴重時易導致蜂群棄巢逃亡。目前的防治策略常以油盒陷阱、毒餌誘引來減少蜂箱小甲蟲的成蟲數，對不進食的老熟幼蟲或蟲蛹缺乏防治手段。此外，長期施用毒餌容易誘發害蟲抗藥性。為落實環境友善與永續農業的理念，除了開發多元藥劑進行輪用外，導入天敵防治亦為可行策略。國外已有諸多利用「蟲生線蟲」（Entomopathogenic nematodes, EPNs）進行生物防治的研究與實例，能有效填補蜂箱小甲蟲於土壤化蛹期的防治空窗，同時降低化學藥劑用量，展現極佳的應用潛力。

蜂箱小甲蟲的危害與生活史

蜂箱小甲蟲原產於非洲撒哈拉沙漠以南，隨全球貿易入侵北美、歐洲與澳洲並於 2024 年入侵臺灣，對我國蜂產業造成經濟威脅。

蜂箱小甲蟲成蟲具備極佳的飛行能力與敏銳嗅覺，能偵測數公里外之蜜蜂費洛蒙與蜂箱氣味並伺機侵入，隨後於蜂箱縫隙或巢脾處產卵。幼蟲孵化後會大量取食花粉、蜂蜜及蜜蜂幼蟲，嚴重破壞巢內環境。最終導致蜂蜜、花粉變質發酵、產生黏液與腐敗酸味（俗稱史萊姆化 slime-out），迫使蜂群逃飛或滅群。



圖一、蜂箱小甲蟲幼蟲大量發生後之危害狀，會使蜂脾發酵充滿黏液，迫使蜂群逃飛或滅群。

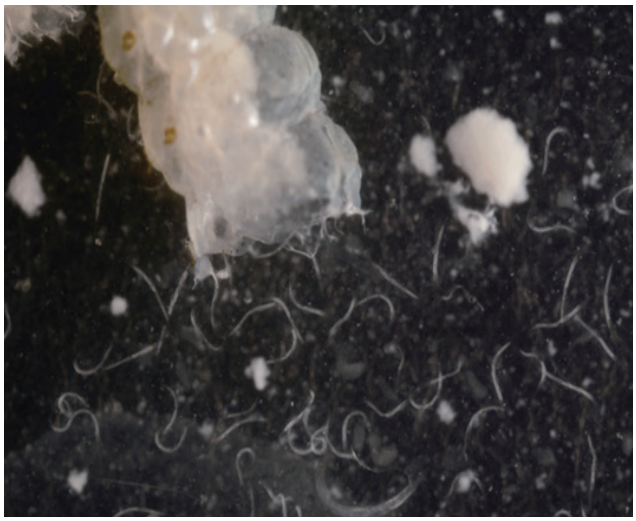
蜂箱小甲蟲於蜂箱內產卵孳生，幼蟲發育成熟後會進入「游移期」(Wandering Phase)，爬出蜂箱並掉落地面，鑽入深約 10 至 20 公分之土壤中化蛹。歷經數週羽化為成蟲後再飛返蜂巢產卵，形成危害循環。針對其土中化蛹的關鍵階段，目前國內尚無核准登記之防治藥劑或有效之防除技術，有效阻斷其生活史，亟需投入相關防治資材之研發，以填補防護缺口。

蟲生線蟲的殺蟲機制

蟲生線蟲是廣泛存在於土壤中的生物，在害蟲生物防治上主要應用斯氏線蟲屬（*Steinernema*）與異小桿線蟲屬（*Heterorhabditis*）。這類線蟲對哺乳動物、植物和作物均無毒、不具感染性，且無化學藥劑殘留的疑慮，被視為極具潛力的生物防治方法。

在線蟲的生活史中，能在土中存活並尋找寄主的階段是「侵染期幼蟲」。牠們能主動搜尋寄主，從寄主幼蟲或蛹的口器、肛門、氣孔等自然開口侵入，或利用頭部齒狀結構穿透寄主表皮進入體腔。

進入體腔後，線蟲會釋放出腸道內的專一性共生細菌。這些細菌在血腔中大量繁殖並分泌毒素，通常在 24 至 48 小時內導致害蟲死亡。線蟲在蟲屍內以細菌與分解的組織為食，發育、交配並繁殖 2 至 3 個世代。當蟲體養分耗盡時，成千上萬的新一代侵染期幼蟲會破蟲體而出，重新移行至土壤中尋找下一個寄主。這種天然的致死機制，幾乎不會引發害蟲產生化學抗藥性。



圖二、蜂箱小甲蟲幼蟲感染線蟲後，其屍體內可繁殖出更多線蟲。(來源：*Cuthbertson* 等人，2013；Cuthbertson, A.G.S., Wakefield, M.E., Powell, M.E., Marris, G., Anderson, H., Budge, G.E., Mathers, J.J., Blackburn, L.F., Brown, M.A., (2013). The Small hive beetle, Aethina tumida: a review of its biology and control measures. Current Zoology, 59: 644-653.)

不同線蟲種類與特性

根據國內外試驗篩選，不同種類的蟲生線蟲的搜尋策略與環境適應力有所差異，目前被認為可應用於防治蜂箱小甲蟲的線蟲有斯氏線蟲（*Steinernema carpocapsae*）及異小桿線蟲（*Heterorhabditis indica*），2 種線蟲的搜尋方法雖不同但都具應用潛力：

一、斯氏線蟲

屬於坐等型線蟲，常停留在表土等待寄主逢機靠近。由於蜂箱小甲蟲幼蟲的老熟幼蟲會在土表游移尋找化蛹地點，因此容易與斯氏線蟲接觸並遭到感染。在土壤測試中，斯氏線蟲對蜂箱小甲蟲老熟幼蟲展現出極高的致死率。此外，大部分斯氏線蟲對於乾燥環境及紫外線的忍受度相對較高，因此適合施用於容易乾燥的土表。

二、異小桿線蟲

屬於主動出擊型線蟲，具有在土壤中移動及大範圍搜尋寄主的能力。當小甲蟲老熟幼蟲潛入土層造蛹室化蛹，異小桿線蟲能沿著害蟲產生的化學氣味，定位並侵入寄生，可有效壓制潛伏在土中的蛹。異小桿線蟲對於高溫環境的耐受性極佳，特別適合在亞熱帶或熱帶等環境使用。

可能的安全疑慮

蟲生線蟲對人類與環境較為安全，但由於其寄主範圍廣泛，對同屬於節肢動物的蜜蜂，可能具潛在感染風險。近期有研究專家進行實驗確認，顯示在實驗室將線蟲液直接接觸蜜蜂幼蟲、封蓋蛹與新羽化工蜂，皆可觀察到蜜蜂受到感染，並能在蜜蜂遺體中自我繁殖。此外，若蜜蜂幼蟲受到蜂蟹蟎（*Varroa destructor*）寄生，在體液流失、免疫力低的情況下，會顯著提高被線蟲感染的機率。

因此，應用蟲生線蟲等生物防治資材時，務必落實正確之標準操作流程，嚴禁將線蟲直

接噴灑於蜂箱內部、巢脾、巢框或蜜蜂正訪花的植物上，施作時應嚴格阻絕線蟲與蜜蜂接觸的途徑，以有效降低蜜蜂遭受感染之風險。

由於蜜蜂的日常活動主要在蜂箱內部和空中，並不會主動接觸土壤；而蟲生線蟲高度依賴土壤水膜活動，在空氣中極易脫水死亡，無法在地表外游動。因此，只要限制施用區域在「蜂箱外四周地面」或是改良蜂箱裝置，應可透過空間隔離確保蜜蜂的安全。



圖三、經實驗測試，在巢內噴灑線蟲液後部分蜂蛹受到線蟲感染，圖左為健康蜂蛹、圖右為受感染的蜂蛹。(來源：Katlav 等人，2025；https://doi.org/10.1016/j.jip.2025.108524)

蟲生線蟲應用可能遭遇的問題

儘管蟲生線蟲在實驗條件下展現出極高的殺蟲潛力，然而在田間應用中，仍面臨許多挑戰。由於田間環境變化大，土壤酸鹼度、溫度、紫外線及土壤含水量等變數極大，容易降低線蟲活性與存活率，導致防治成效不穩定。因此目前各國政府與學術單位對線蟲使用的態度仍較為保守，尚未將其正式納入蜂箱小甲蟲防治的主力推薦方法中。

然而在實務上，仍有廠商開發蟲生線蟲商品進行販售，並標榜可用於防治蜂箱小甲蟲。例如美國的農業資材商 Bugs for Growers，仍有販售針對土壤處理的異小桿線蟲（*H. indica*）與斯氏線蟲（*S. carpocapsae*）商品，提供蜂農作為替代高毒性土壤化學殺蟲劑（如 GardStar 百滅寧）的防治方案。

以我國產業發展與生物安全的立場，仍建議持續開發「本土」的蟲生線蟲及建立使用方法。目前我國已記錄的蟲生線蟲種類雖少（如 *Steinernema abbasi*、*Heterorhabditis brevicaudis*、*Steinernema taiwanensis*），但部分線蟲種類經實驗證實對地下害蟲具有優異的防治潛力。因此相關單位仍應持續投入資源，以開發屬於本土的蟲生線蟲資材。

結語

面對蜂箱小甲蟲此類來勢洶洶的新入侵有害生物，蜂產業急需安全、高效的防治技術。儘管蟲生線蟲在田間實際應用中仍有穩定性與氣候瓶頸等實務挑戰待克服，但其對環境友善、無殘留的優點，符合現代農業「化學藥劑減量」與「永續發展」的政策目標。除了增加非農藥防治資材的多樣性，並可擴張生物防治產業的範圍，提供一條兼顧生產安全與自然和諧的永續道路。

促進蜂花粉加值化加工製程探討

陳本翰（助理研究員）

前言

蜂花粉是蜜蜂採集花粉並混合少許花蜜和唾液，揉壓成團由工蜂後足「花粉籃」攜回蜂巢，是蜜蜂生長發育與維繫蜂群發展不可或缺的營養來源。根據研究，早在西元前七千年前人類社會就有蜂蜜、蜂花粉和蜂蛹作為食物來源的紀錄。在中藥醫典「神農本草經」紀錄蒲黃(香蒲花粉)味甘、無毒、久服輕身、益氣力；「新修本草」記載松黃(松花粉)正爾酒服輕身，具有能輕身強健等功效。現代研究顯示蜂花粉營養豐富，含有蛋白質、維生素、碳水化合物，以及鉀、鐵、鋅等微量元素與具有機能性的酚類化合物。本場研究光臘樹蜂花粉，發現蛋白質含量達到 21%，比同重量雞蛋高約 10%，並含有組胺酸、白胺酸與苯丙胺酸等 9 種人體必需胺基酸，而豐富的多酚類具有極佳清除自由基抗氧化的功效，顯示蜂花粉是天然全功效的營養保健食品，非常適合茹素與各年齡層國人補充營養。

然而，花粉具有雙層細胞壁，外層由堅固的孢粉素 (sporopollenin) 組成，孢粉素具有酯鍵與縮醛鍵與其他複雜的化學結構，幫助花粉抵抗酸鹼環境與紫外線傷害，內壁由纖維素、半纖維素和果膠組成，Alcalá-Orozco 等人 (2024) 指出，未處理或僅簡單浸泡的花粉，人體僅吸收 10%-15% 營養，而經過研磨或其他處理弱化花粉壁，能促進人體營養吸收至 60%-80%。為了提升蜂花粉的利用價值，許多學者研究萃取機能性物質的製程，使花粉變成營養添加物，讓消費者有更多健康選擇。本文整理近年蜂花粉機能性萃取製程研究，供國內蜂花粉產品開發參考。

溶劑攪拌萃取法

Lawag 等人 (2021) 以乙醇、水與甲醇浸漬原產於澳洲的紅柳桉 (*Eucalyptus marginata*) 與馬里樹 (*Corymbia calophylla*) 與花粉，發現 70% 乙醇為最佳溶劑，以 7 毫升 70% 乙醇浸漬 0.5g 花粉，培養箱以 40°C 1500 rpm 搖晃攪拌 2 小時後換新溶劑，重複三次能萃取出之總酚等同 20.86 mg 沒食子酸，並顯著優於水萃，而萃取物清除自由基與抗氧化力功效，同樣以 70% 乙醇為最佳。Lawag 等人 (2021) 進一步研究粉碎蜂花粉前處理，以及後續超音波處理並分別溶於乙醇、水與甲醇等溶劑，結果顯示處理方法無法有效提升萃取蜂花粉總酚含量，以及清除自由基與抗氧化力功效，並進一步指出溶劑是提升萃取蜂花粉總酚的關鍵。

超音波萃取法

超音波處理是利用高頻聲波在液態介質中產生大量微小氣泡產生空穴效應，當氣泡破裂向內塌陷產生的衝擊波會破壞花粉外層細胞壁結構。Alcalá-Orozco 等人 (2024) 彙整相關研究指出，蜂花粉粒徑顯著影響超音波處理效果，花粉粒徑介於 100-500μm 之間有利於超音波傳導與穿透，提升破壞細胞壁效果，倘能使用花粉篩選技術，確保粒徑的一致性，亦能提升超音波破壁效果。超音波頻率會影響穿透深度與生物效應，80 kHz 高頻率適合用於表面處理、花粉壁瓦解及降低花粉表面微生物

活性。此外，空穴效應會使處理基質升溫，為避免高溫影響花粉的營養與機能性，20-48°C為最佳處理條件。

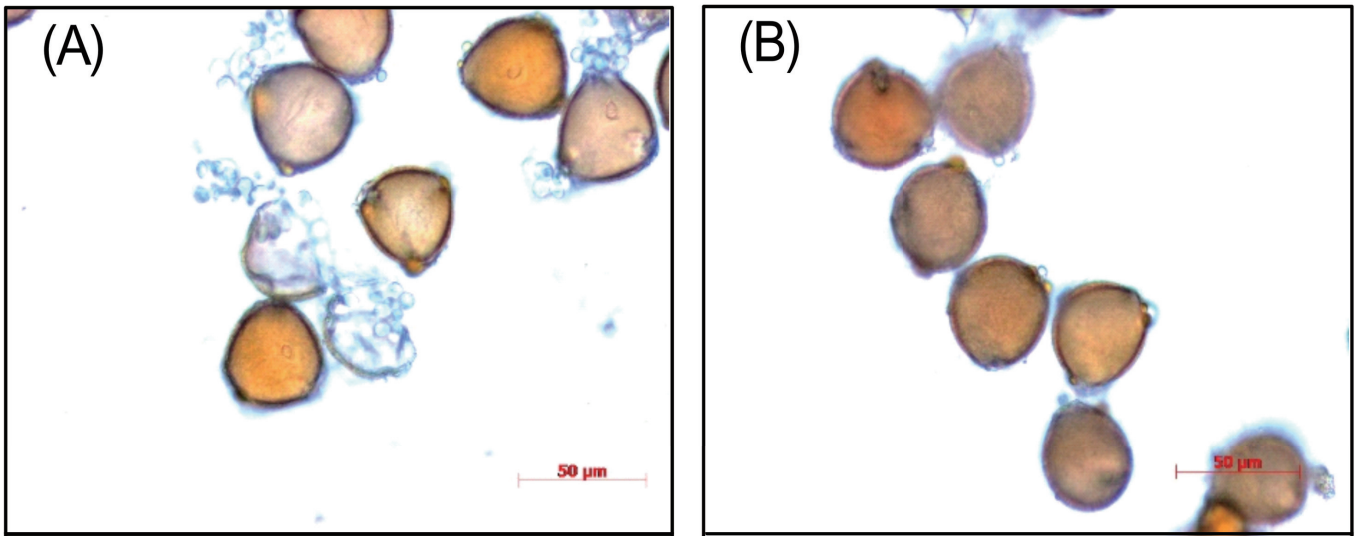
Aylanc 等人 (2022) 進一步比較超音波與攪拌法萃取機能性成分確效，發現超音波萃取葡萄牙萊里亞（Leiria）蜂花粉總酚達 26.7±7mg，比攪拌處理高約 42.8%，自由基清除效率 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) 達 95%，清除率比攪拌處理約高出 20%，但與 Lawag 等人 (2021) 研究超音波處理不影響萃取蜂花粉總酚的結果不同，推測花粉種類、超音波功率與處理時間差異亦可能會影響萃取效率。

微波輔助萃取法

微波輔助萃取是利用高頻率微波穿透內含有的水分子的蜂花粉產生高頻率震動與升溫，使細胞內部壓力驟增並引發瞬間爆裂，節省傳統溶劑攪拌萃取法所需溶劑量、時間、人力並提升效率。Aylanc 等人 (2022) 將 2g 葡萄牙萊里亞地區（Leiria）蜂花粉浸漬在 40 毫升 80% 乙醇，攪拌同時使用功率 200W 微波 10 分鐘，並控溫低於 80°C，萃取總酚與總黃酮分別達 28.0 mg 與 8.0 mg，顯著優於攪拌 6 小時萃取總酚 18.7 mg、總黃酮 5.6 mg，此外，蜂花粉微波萃取物的抗氧化力 (DPPH) 與自由基清除 (ABTS) 亦優於攪拌萃取。Aylanc 等人亦使用葡萄牙東部尼薩地區 (Nisa) 的蜂花粉進行相同的攪拌、超音波與微波等處理，發現不同處理萃取物的總酚、總黃酮含量與抗氧化力並無顯著差異，顯示蜂花粉種類不影響萃取結果。

微生物發酵法

微生物發酵法是透過接種菌株於蜂花粉與特定比例無菌水混合成之基質，在溫度控制下進行發酵，達到分解花粉細胞壁的目的。菌種選擇包含乳酸菌株 (例如：鼠李糖乳桿菌 *Lactobacillus rhamnosus* GG)、(植物乳桿菌 *L. plantarum*、嗜酸乳桿菌 *L. acidophilus*、及用於蜂產品的 *L. kunkeei*) 或酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae*)，可接種單一或混合多種菌株。接種菌量達到 10^7-10^9 colony-forming units (CFU)/mL) 形成優勢菌叢可減少汙染風險。發酵溫度依菌株特性維持 25-37°C，於厭氧條件發酵 3-7 天。微生物生長過程分泌多種水解酶（包括纖



圖一、酵母菌發酵處理蜂花粉。(A) 茶花粉接種菌株處理組，箭頭顯示花粉呈空泡狀以及殘留的細胞壁結構。(B) 茶花粉無接種菌株對照組，箭頭顯示細胞壁雙層結構。

維素酶、果膠酶及蛋白酶）降解花粉壁結構，使花粉破裂並釋放花粉中的生物活性物質與營養成分。本場研究酵母菌發酵打破茶花粉細胞壁確效，35°C 3 天酵母菌處理組花粉呈空泡狀或造成細胞壁破裂 (圖一 A)，無接種對照組花粉雙層結構細胞壁保持完整 (圖一 B)。

以酵母菌接種茶花粉後，茶花粉在不同溫度發酵 24 小時，35°C 接種組 (T) 總酚達 273.8 mg/mL，比無接種對照組 (CK) 提升約 16.1%，接種組 (T) 總黃酮 24.9 mg/mL，比 CK 提升約 15.8%（表一），與 Li 等人 (2026) 研究結果相似。Li 等人 (2026) 在油菜花粉分別單獨接種嗜酸乳桿菌（*L. acidophilus*）與複數菌株，菌株處理組游離胺基酸比無接種組增加 1.3-2.2 倍，總黃酮增加 1.2-2 倍，最高達 15.39 mg/g，混合多種菌株組接種組花粉試驗 DPPH 抗氧化力與玻尿酸酶抑制率 (Hyaluronidase inhibition) 分別達 77.46% 與 37.38%，顯示蜂花粉加工後具有應用於抗老化的潛力。

結語

臺灣豐富的植物資源能生產多種蜂花粉，但市面上除了茶花粉與羅氏鹽膚木花粉等主要商品，其餘百 (雜) 花粉多半作為蜜蜂飼料用，產品價值不如主要商品。如能活用蜂花粉含有豐富的多酚類、類黃酮等生物活性物質，具有優異的抗氧化與清除自由基功效特性，開發具成本優勢、食用安全且高產的製程，將蜂花粉萃取物應用於保健、美妝或伴侶動物保健飼料等產品上，可提升蜂花粉生產價值，進一步促進養蜂業永續發展。

表一、酵母菌接種茶花粉 24 小時發酵液總酚與總黃酮濃度

	總酚		
°C	對照組 (mg/mL)	酵母菌 (mg/mL)	增加率 %
35°C	235.8±6.0	273.8±6.8	16.1%
30°C	237.9±8.4	266.4±5.9	12.0%
25°C	240.0±2.3	251.4±8.1	4.8%
	總黃酮		
°C	對照組 (mg/mL)	酵母菌 (mg/mL)	增加率 %
35°C	21.8±0.8	22.9±0.1	5.0%
30°C	21.6±0.5	23.6±0.8	9.3%
25°C	21.5±0.5	24.9±0.6	15.8%

生蜂蜜與脫水加工蜂蜜之品質與保存

黃子豪（助理研究員）

前言

蜂蜜是一種天然的甜味食品，主要由葡萄糖與果糖等碳水化合物組成（佔 70% 至 85%），並含有少量的蛋白質、胺基酸、維生素、微量元素、有機酸以及多種生物活性酵素與酚類物質。自然成熟的蜂蜜是蜜蜂採集花蜜後，在蜂巢中透過不斷吸吐釀蜜與搧風，將水分降至適當標準並分泌酵素轉化而成。然而，臺灣地處亞熱帶，具有高溫多濕的氣候特性，加上主要經濟蜜源花期極短，蜂農常在蜂蜜未完全封蓋成熟時即進行採收。這類未成熟的「生蜂蜜」含水量偏高，為耐糖性酵母菌提供了絕佳的生長環境，極易引起發酵作用，將糖分轉化為酒精與二氧化碳，導致蜂蜜產生酸味與酒氣而劣變。

為了所生產的蜂蜜符合國際標準與國內法規（水分含量低於 20%），並延長貨架與保存期，臺灣高溫高濕的環境下，蜂蜜的「脫水加工」成為產業中不可或缺的環節。然而，脫水加工與後續的長期儲存，皆會對蜂蜜的理化性質與生物活性產生深遠影響。本文將深入探討生蜂蜜與脫水加工蜂蜜在品質上的差異，並解析不同加工技術與儲存條件對蜂蜜品質的影響。

生蜂蜜與脫水蜂蜜之定義

生蜂蜜（Raw Honey）指的是未經加熱或過度加工處理的天然蜂蜜，其優點在於保留了最原始的揮發性芳香物質與天然酵素活性。但若其水分高於 20% 或水活性（Water Activity, aw）偏高，在常溫下保存極易發酵變質。

脫水加工蜂蜜則是透過物理或熱力學方法，強制抽離蜂蜜中多餘的水分。脫水加工過程可同時利用加溫降低蜂蜜黏度，以利於過濾，更能將水活性壓低至抑制微生物生長的安全防線以下，同時溶解潛在的結晶核以延緩結晶發生。

脫水蜂蜜加工技術

為了解決生蜂蜜水分過高的問題，發展出多種脫水技術。不同的加工方法對蜂蜜的微觀品質有著截然不同的影響：

一、傳統熱處理：透過加熱（通常在 50°C 至 90°C 之間）來蒸發水分並殺滅酵母菌。熱處理的優點在於操作簡便、設備成本低，並能有效降低黏度。然而，長時間或過高溫度的熱處理會破壞熱敏性物質，導致天然酵素（如澱粉酶或轉化糖酶）失去活性，並加速梅納反應（Maillard reaction），使蜂蜜顏色變深及產生過量副產物羥甲基糠醛（Hydroxymethylfurfural, HMF）。

二、真空低溫乾燥與蒸發：此技術是在低壓環境下進行，使水的沸點大幅降低。蜂蜜只需在較低的溫度（如 40°C 至 60°C）即可讓水分沸騰蒸發。這種方法能高效率地將水分降低，且由於溫度較低，能大幅減少對熱敏性營養物質的破壞，是目前臺灣蜂產業最主要的蜂蜜脫水方式。缺點是設備成本較高，且真空抽氣過程可能帶走部分花香揮發物。

三、冷凍乾燥：冷凍乾燥是將蜂蜜在極低溫

（如 -40°C 至 -54°C）與高度真空下，讓冰晶直接昇華為水蒸氣。此過程完全無高溫熱傷害，能極致保留酵素活性、抗氧化物質與酚類化合物。然而，其耗能極大且乾燥時間極長（可達 24 至 72 小時），通常僅用於開發高附加價值的乾燥蜂蜜產品（粉末或錠劑）。

四、微波加熱：微波能穿透物質，利用水分子的偶極旋轉產生摩擦熱，達到瞬間加熱的效果。微波加熱速度極快，能在數十秒內殺滅酵母菌並降低水分。但若控制不當，容易造成局部過熱，導致糖分焦糖化與 HMF 快速飆升。

生蜂蜜和脫水蜂蜜品質差異之影響因子

將生蜂蜜進行脫水加工，不僅是水分的減少，蜂蜜內部的理化指標與生物活性亦會發生劇烈變化：

一、水分與水活性：水分百分比雖然是法規標準，但在科學上，真正決定微生物能否繁殖的指標是「水活性（aw）」。生蜂蜜的水活性通常較高（約 0.76 至 0.80），容易引發耐糖酵母菌發酵。研究指出，透過真空乾燥或冷凍乾燥，可將水活性壓低至 0.3 至 0.4 之間。當水活性低於 0.6 時，幾乎所有的微生物均無法生長，這使脫水蜂蜜具微生物穩定性。

二、羥甲基糠醛（HMF）與澱粉酶（Diastase）：HMF 與澱粉酶是國際上判定蜂蜜是否過度加熱或失去新鮮度的兩大核心指標。新鮮生蜂蜜的 HMF 極低（通常小於 5

表一、常見蜂蜜脫水加工技術之原理與優缺點比較

加工技術	作用原理	優點與產業應用價值	對品質的潛在缺點與代價
傳統熱處理	利用常壓高溫蒸發水分並殺滅酵母菌。	成本低、操作易、能快速溶解結晶核延緩結晶。	易破壞天然酵素，導致 HMF 大幅上升與香氣流失。
真空乾燥	降低環境氣壓使水沸點降至 40~60°C 低溫蒸發。	脫水效率高，能避免高溫熱傷害，保留多數營養。	設備成本較高，抽氣過程可能散失揮發性芳香物質。
冷凍乾燥	極低溫與高度真空下，使固態冰直接昇華為水蒸氣。	幾乎無熱傷害，能保留酵素並提升抗氧化力。	設備昂貴、耗能大，乾燥時間長達 24-72 小時。
微波加熱	利用高頻電磁波使水分子震盪產生內部摩擦熱。	處理時間極短（數十秒），能快速殺滅酵母菌。	溫度均勻性較難控制，局部過熱易引發焦糖化。

表二、生蜂蜜與不同脫水加工蜂蜜之核心品質指標差異

品質檢測指標	天然生蜂蜜（水分偏高）	脫水蜂蜜（傳統熱處理）	脫水蜂蜜（真空乾燥 / 冷凍乾燥）
水活性 (aw)	較高 (0.76 - 0.80)	中等（依製程而定）	極低 (0.30 - 0.45)
HMF 含量	極低 (<5 mg/kg)	顯著上升（易超標）	微幅上升（約 9-16 mg/kg）
澱粉酶活性	活性最高	顯著下降	活性部分下降
總酚含量 (TPC_S)	一般基礎值	下降或受高溫破壞	顯著上升（提升約 1.5-2 倍）
綜合抗氧化力	一般基礎值	衰退	顯著提升（受多酚釋放影響）

mg/kg）且澱粉酶活性高。經過傳統熱處理後，HMF 會顯著升高，而熱敏性的澱粉酶則會大量失去活性。然而，若採用低溫真空乾燥或冷凍乾燥，雖然 HMF 會微幅上升（約 9 至 16 mg/kg），但仍能安全控制在法規標準（小於 40 mg/kg）內，且澱粉酶活性的下降幅度亦較小。

三、總酚含量（TPCs）與抗氧化活性：蜂蜜富含多種酚酸（如沒食子酸、咖啡酸）與類黃酮（如槲皮素、芸香苷），是其具備抗氧化與抗炎功效的來源。一項針對龍眼蜜與泰國香澤蘭蜜的研究發現，經過「冷凍乾燥」與「真空乾燥」處理的蜂蜜，其總酚含量與綜合抗氧化能力（如 DPPH、FRAP、ORAC）顯著「高於」未處理的生蜂蜜（提升約 1.5 至 2 倍）。這是由於低溫脫水避免了酚類在高溫與氧氣中降解，且乾燥過程改變蜂蜜的結構矩陣，促使原本結合在結構中的多酚物質被大量釋放出來，從而強化了抗氧化活性。

儲存條件對蜂蜜品質之影響

蜂蜜即使經過妥善的脫水加工，在長期的存放過程中，其品質仍會受到時間與環境的嚴峻考驗。研究指出，長期常溫儲存會引發一系列化學與感官上的變化：

一、常溫長期儲存的化學降解：即使將蜂蜜保存在陰暗的室溫環境（約 22°C 至 25°C）中，時間本身就會驅動蜂蜜成分改變。一項針對葵花蜂蜜儲存 18 個月的研究指出，存放一年半後，蜂蜜中的 HMF 含量增加了將近 17 倍（從平均 2.08 mg/kg 提升至 34.67 mg/kg，逼近標準上限的 40 mg/kg）。同時，澱粉酶活性減半（從 17.35 DN 降至 8.18 DN）。這代表無論蜂蜜出廠時多麼新鮮，常溫兩年以上的儲存都可能面臨 HMF 超標與酵素失去活性的風險。另外，蜂蜜中的胺基酸與還原糖在儲存期間會持續發生梅納反應，導致游離胺基酸與糖分濃度下降。維生素群（如維生素 C、B 群）也會因氧化而顯著降解，且光照會大幅加速此降解過程。

二、酸度增加與 pH 值下降：在長期儲存過程中，蜂蜜中的內酯（lactones）會緩慢水解為羥基羧酸，或者糖類經過酵素氧化產生有機酸（如葡萄糖酸），這會導致蜂蜜的游離酸度（Free acidity）上升，並使 pH 值顯著下降變得更酸。若游離酸度超過 40 meq/kg，不僅會改變蜂蜜的原有風味，也是蜂蜜開始劣變的警訊。

三、結晶的改變與感官影響：蜂蜜是否容易結晶，取決於其內部的果糖／葡萄糖比（F/G）與葡萄糖／水比（G/W）。儲存期間糖分比例的微幅變動，以及水分的蒸散，都會改變蜂蜜的質地，使其變得濃稠且帶有顆粒感。同時，由於糖分降解與芳香揮發物的散失，儲存過久的蜂蜜在甜度與香氣上的感官接受度會隨之降低。

表三、蜂蜜於常溫長期儲存（18-24 個月）之品質變化趨勢

品質參數	儲存前 / 新鮮狀態	儲存 18-24 個月後之變化	科學機制與影響原因
HMF 含量	符合法規 (< 5 mg/kg)	暴增約 17 倍 (逼近 40 mg/kg)	糖分在酸性環境中持續脫水降解。
澱粉酶活性	活性高 (> 15 DN)	衰退逾 50% (接近法規底線)	蛋白質酵素隨時間與室溫發生變性失去活性。
pH 值	約 3.66	顯著下降變酸 (約 3.56)	內酯水解與糖分分解生成更多有機酸。
維生素群	微量存在	顯著降解流失	受自然氧化破壞，光照會加劇流失速度。

總結

在臺灣氣候高溫多濕的養蜂環境下，生蜂蜜的高水分與高水活性使其面臨極大的發酵與變質風險。將生蜂蜜進行脫水加工，是確保品質穩定與延長保存期限的必要手段。然而，加工技術的選擇至關重要。傳統高溫處理會犧牲天然酵素與產生過量 HMF 為代價；相反地，低溫真空乾燥或冷凍乾燥技術不僅能將水活性安全壓低，更能釋放多酚物質，強化抗氧化活性。此外，蜂蜜的品質並非在加工後就永遠定型，長期常溫儲存依然會使 HMF 顯著上升與酵素衰退。因此，結合科學的加工技術與嚴格的儲存管理，才是臺灣蜂產業維持蜂蜜高品質與市場競爭力的不二法門。

氣候變遷對蜜源植物泌蜜機制與授粉生態之影響

吳姿嫻（研究員兼科長）

前言

植物與授粉昆蟲之間的互利共生關係，是維持陸域生態系統穩定與全球糧食安全的重要基礎。研究顯示，全球高達 35% 的農作物生產高度依賴蟲媒進行授粉與繁衍。然而，隨著全球氣候變遷加劇，極端天氣事件（如極端高溫、乾旱及強降雨）發生的頻率與強度顯著增加，已對精細的生態互動機制造成嚴重威脅。氣候變遷所引發的環境逆境，不僅直接改變了蜜源植物的生理機制（如花蜜分泌量、糖分濃度與開花物候），亦顯著影響授粉者的覓食行為與族群存續。當植物作為報酬的「花蜜資源」因氣候壓力而減少時，植物與授粉者間的連結將面臨崩解風險，進而引發農業產量衰退與糧食安全危機。本文旨在回顧近期科學文獻，探討極端氣溫與降雨對蜜源植物泌蜜特性的影響，並評估其對整體授粉生態之連鎖效應。

溫度逆境對花蜜分泌之影響

氣溫是調控植物開花與花蜜分泌的關鍵環境因子。植物的生理反應對環境溫度極為敏感，過高的溫度將引發熱逆境（heat stress），進而抑制植物的繁殖投入。

一、植物泌蜜量與溫度的關係

Takkis 等人於 2018 的研究指出，植物的花蜜分泌量與環境溫度之間呈現顯著的單峰關係（Unimodal relationship），即植物具備一最適的溫度區間以進行泌蜜。一旦氣溫超過此生理閾值，植物的泌蜜效率即大幅下降。以全球重要蜜源與油料作物向日葵（*Helianthus annuus*）為例，其最佳泌蜜溫度介於 24°C 至 27°C 之間。當環境溫度高於 27°C 時，向日葵的泌蜜量即顯著衰退；若氣溫達到 33°C 甚至更高，為減少水分散失並降低生理損耗，植物將完全停止分泌花蜜。此外，極端高溫亦會加速花朵老化與脫落，造成授粉期縮短。

二、季節性開花植物之營養錯位

氣候暖化對不同花期的植物具有差異性影響。Takkis 根據地中海氣候區的模擬研究，夏季（晚開花）植物面臨的熱逆境尤為嚴峻。由於夏季本身處於高溫期，暖化將使其輕易突破光合作用與泌蜜的最佳溫度範圍，導致單株花蜜總量面臨極大的衰退風險。另一方面，春季（早開花）植物則面臨「物候錯位」（Phenological mismatch）或「營養錯位」（Trophic mismatch）的風險。暖冬現象常誘發植物提早開花，但授粉者（如蜜蜂）的羽化與活動喚醒可能依賴不同的環境線索（如日照長度），導致花期與授粉者活動期脫節。此時間上的錯置不僅使植物流失授粉機會，亦造成珍貴花蜜資源的浪費。

三、授粉者覓食行為之溫度限制

蜜蜂的飛行與採集行為具有嚴格的氣象條件限制，最適飛行溫度通常介於 20°C 至 30°C 之間。當氣溫超過 35°C 時，蜜蜂的熱調節（thermoregulation）負擔急遽增加，迫使其

減少覓食頻率，或將勞動力轉向採水以冷卻蜂巢。此種勞動分配的轉變，將直接導致花蜜採集量大幅降低，溫度的極端化同步限制了蜜蜂的活動力。

極端降雨對蜜源植物與授粉效率之衝擊

除了溫度變遷，長期乾旱與極端暴雨等極端氣候型態亦是干擾花蜜生產的重要因子。

一、乾旱逆境對資源分配與花蜜產量之負面效應

水分缺乏會促使植物關閉氣孔以降低蒸散作用，此舉雖能保水，卻會同步抑制光合作用速率，迫使植物減少對開花與泌蜜等繁殖過程的碳資源投入。Frigero 於 2025 年針對蟲媒作物南瓜（*Cucurbita pepo*）的模擬實驗顯示，極端乾旱會導致單花泌蜜體積、糖分濃度以及單株開花數量全面下降。將數據放大推算至田間尺度，極端乾旱情境下，每公頃農田可提供給蜜蜂的花蜜熱量（總糖分）從正常的 1,325.2 公斤銳減至 71.4 公斤，降幅高達 95%。即便是中度乾旱（或降雨量僅微幅減少），亦會造成 34% 的花蜜熱量損失，對依賴此資源的授粉者構成生存威脅。

二、暴雨與極端降雨之物理性破壞與覓食阻礙

雖然充沛的水分刺激單株植物增加糖分分泌，但在實際生態環境中，暴雨對授粉效率的影響卻是負面的。高強度的降雨會直接沖刷花朵，稀釋或流失花蜜，並可能對花器造成物理性損傷。此外，降雨會嚴重阻礙蜜蜂飛行；Solovev 學者研究指出，中度降雨（每日 4 至 8 毫米）即可導致蜂群單日採蜜量驟降 60%。

授粉危機對農業生產與糧食安全之連鎖效應

花蜜供給量的劇烈波動，將沿著生態食物鏈引發廣泛的連鎖效應（*Cascading effects*）。花蜜是蜜蜂等授粉昆蟲賴以維持生命與飛行動力的主要碳水化合物來源。當環境中花蜜的質量下降，蜜蜂的「能量投資報酬率」（Energy return on investment）將轉為負值。長期的能量匱乏會導致蜂群發育遲緩、免疫力降低，進而引發整個族群的崩潰。當蜜蜂無法從特定作物獲取足夠熱量時，其覓食行為將改變，進而放棄造訪該作物。全球農業高度依賴蜜蜂等授粉媒介以維持果實與種子的產量和品質，依據聯合國政府間氣候變遷專門委員會（IPCC）的預測模型，若碳排放未獲控制，至 2075 年，遭受乾旱侵襲的農業產區其花蜜資源預計將減少約 23%。授粉資源的短缺將導致作物結果率低下、畸形果比例增加，對全球糧食供應鏈與農業經濟構成嚴峻挑戰。

結論與展望

綜合近期科學實證，氣候變遷（包含極端氣溫與極端降水）對蜜源植物與授粉者的互利共生關係具有深遠且破壞性的影響。從單一花朵花蜜分泌量下降、單株開花數量的減少，乃至農業生態的授粉機能衰退，皆顯示出維繫農業生產的基礎生態服務正處於脆弱狀態。為減緩此一衝擊，未來的農業政策與生態保育策略必須納入蜜粉源植物氣候韌性（climate resilience）的考量。農業試驗研究單位應致力於選育具耐旱與耐熱特性之蜜源植物或作物，並於農業生態系中建立多樣化

且能適應環境變遷的緩衝帶，以確保在極端氣候事件中，授粉昆蟲仍能獲取穩定的能量來源，從而保障全球農業生產力與生態系統的永續發展。



圖一、氣溫過高可能影響植物花蜜分泌量減少。



圖二、全球農業高度依賴蜜蜂等授粉媒介以維持果實與種子的產量。

氣候變遷對授粉蜂分布的影響

黃冠瑋（農業試驗所約僱人員）
曾惠芸（臺大昆蟲系副教授）

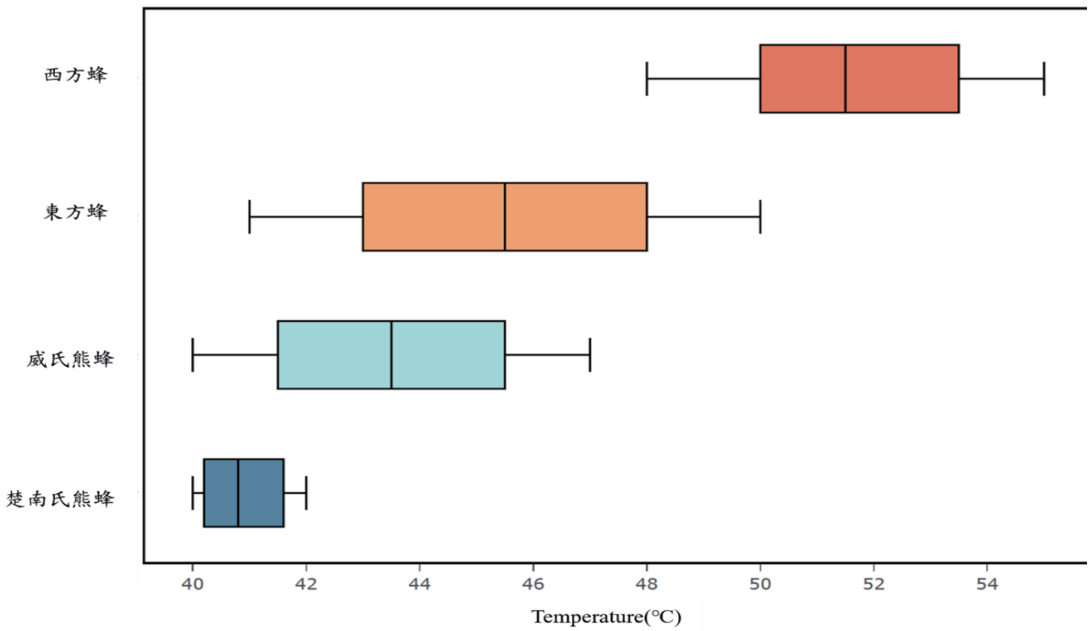
前言

在自然環境與農業環境中，有許多的植物與作物都仰賴昆蟲授粉，包括雙翅目、鱗翅目、鞘翅目與膜翅目等昆蟲，其中膜翅目可以說是最重要的授粉者之一。膜翅目的花蜂類群（Anthophila）以花粉及花蜜為主要食物來源，必須不斷在開花植物間飛行覓食，間接或直接的幫助植物授粉。目前全世界商業授粉以花授粉蜂群為主，包括台灣較常使用的西方蜂（*Apis mellifera*）和熊蜂（*Bombus spp.*），以及亞洲尚未普及的切葉蜂（*Megachile spp.*），這些物種所提供的授粉服務對維持生態系統穩定、保護植物多樣性及支持農業生產皆具有不可替代的重要性。

近年全球授粉媒介衰退已引起高度關注，研究顯示這並非隨機滅絕，而是受氣候變遷與土地利用變化影響。溫度是決定物種分布的關鍵因素，隨全球暖化加速，變溫動物分布普遍出現向極地或高海拔遷移的趨勢，適合棲地面積因此擴張或縮小。此現象在垂直梯度明顯的山區地形更為明顯，物種可能因應暖化逐漸往高海拔移動，長期將改變區域內的物種組成與族群結構。臺灣山區海拔的垂直梯度變動大，然而目前國內對氣候暖化如何影響本土授粉蜂分布與遷移的研究仍相對有限。因此，本文將呈現臺灣山區的物種生理耐受度與分布模型預測，探討氣候暖化對授粉蜂棲地分布的具體衝擊，期望能為後續本土授粉蜂保育與研究提供參考依據。

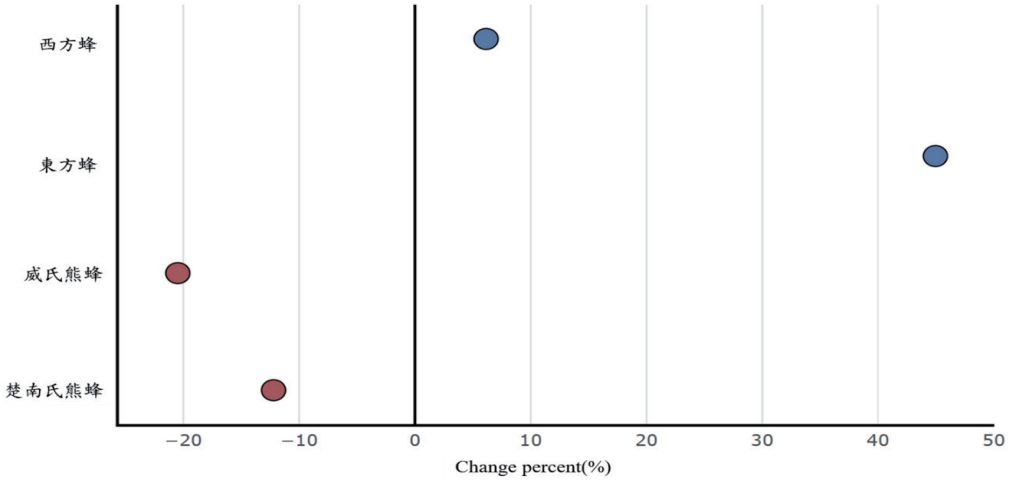
氣候變遷對授粉蜂分布的影響

除了外在環境的影響外，不同物種對環境的敏感度也是影響分布的因素之一。溫度耐受性（Thermal tolerance）是指生物對溫度的適應能力，透過了解臨界最高溫（Critical thermal maximum, CT_{max}）的範圍有助於了解哪些物種需要透過移動來適應氣候變遷的趨勢，而哪些物種可以忍受較高的溫度。我們透過臨界最高溫的試驗發現，不同海拔授粉蜂的熱耐受能力有顯著差異（圖一）。分布於低海拔的西方蜂具有四種授粉蜂中最高的耐熱上限（48°C~55°C），面臨氣候暖化時，不僅能承受氣溫升高，還能順勢向高海拔山區擴張棲地。而廣泛分布於低、高海拔的東方蜂（*A. cerana*）耐熱上限雖略低於西方蜂，介於 41°C~50°C 之間，仍屬四種授粉蜂中耐熱性較佳者。僅分布於高海拔的楚南氏熊蜂（*B. sonani*）與威氏熊蜂（*B. trifasciatus*）的臨界最高溫較低（40°C~42°C 和 40°C~47°C），在未來，生理上可能會難以適應持續上升的氣溫，導致其原有的適宜棲地範圍縮減。



圖一、四種授粉蜂之臨界最高耐熱溫度（CTmax）分布。西方蜂（*Apis mellifera*）、東方蜂（*Apis cerana*）、威氏熊蜂（*Bombus trifasciatus*）與楚南氏熊蜂（*Bombus sonani*）之耐熱臨界溫度範圍。

近年來許多學者利用物種分布模型（Species distribution model, SDM）模擬在氣候變遷的情況下，潛在棲地的變化。我們透過模擬可推測在未來 2070 年高溫高碳排（SSP5-8.5）氣候情境下 (圖二)，低海拔的西方蜂，其分布面積預估將增加 6.15%；然而高海拔物種卻面臨嚴重的棲地喪失，僅分布於中高海拔地區的威氏熊蜂的分布面積將減少 20.48%，楚南氏熊蜂則減少了 12.21%；而在高海拔及低海拔都有分布的東方蜂的分布增加了 44.96%。此模型數據與溫度耐受性試驗的結果相符，證明了高山授粉蜂因生理上的侷限，在氣候變遷的情況下將面臨更大的衝擊。



圖一、四種授粉蜂之臨界最高耐熱溫度（CT_{max}）分布。西方蜂（*Apis mellifera*）、東方蜂（*Apis cerana*）、威氏熊蜂（*Bombus trifasciatus*）與楚南氏熊蜂（*Bombus sonani*）之耐熱臨界溫度範圍。

氣候變遷所造成的物種地理分布改變，不僅僅是對單一物種產生影響，也可能會對高山生態系帶來連鎖效應。海拔越高，可供生物生存的土地面積則越少，而當低海拔授粉蜂因暖化而不斷向上遷移，將導致高低海拔物種的活動區域產生重疊。高山授粉蜂在山區的地形限制下，不僅面臨高溫的生理壓力，還必須與從低海拔擴張而來的蜂種，競爭有限的開花植物與築巢資源。高溫環境也可能導致高山授粉蜂剩餘的適宜棲地破碎化，進而威脅其族群的基因交流與繁衍。

保育與調適策略

雖然氣候變遷對授粉蜂分布帶來嚴峻的挑戰，但透過野外調查與預先防範，期望能盡早擬定因應策略，降低生態衝擊並保護珍貴的授粉資源。首先，在棲地保護方面，分布於高海拔的授粉蜂對高溫耐受力較差，且未來適宜棲息地將面臨縮減的危機。面對高山蜂種可移動範圍有限的困境，保育工作應優先針對中高海拔的自然棲地加強保護，減少人為過度開發與棲地破壞，為氣候敏感物種保留穩定的生存空間。其次，氣溫上升可能造成植物開花與授粉昆蟲出現的時間產生落差，形成物候學不匹配現象。因此應在不同海拔山區建立長期的野外調查計畫，持續追蹤授粉蜂的多樣性變化及其與當地蜜源植物的互動關係，作為提早預防氣候變遷的基礎資訊。

自然界的授粉工作並非只仰賴常見的花蜂類群 (圖三)，我們的調查發現，如隧蜂科（Halictidae）、銀口蜂科（Crabronidae）與胡蜂科（Vespidae）等其他蜂類 (圖四)，在野外數量眾多且同樣會有訪花活動，能間接提供授粉功能。這些蜂類一樣面臨分布改變的壓力，但卻缺乏長期監測資料，導致其實際的分布現況與變化趨勢難以掌握。未來不論在生態保育或農業推廣應用上應將這些野生授粉昆蟲一併納入考量，透過宣導棲地友善管理，共同維護整體自然生態與授粉網絡的穩定。



圖三、 淡脈隧蜂 (*Lasioglossum sp.*) 廣泛分布於低至高海拔地區，除了西方蜂、東方蜂和熊蜂等較常被關注的授粉者外，這類小型花蜂同樣扮演重要的授粉角色。



圖四、僅分布於高海拔的楚南氏熊蜂（*Bombus sonani*），未來將面臨氣候變遷導致的棲地縮減，連帶可能影響依賴其授粉的高山植物。

結語

氣候變遷正逐漸改變臺灣山區授粉蜂的分布狀況。氣溫上升不僅促使低海拔授粉蜂向較高海拔區域遷移與擴張，也讓受限於生理耐受度的高山授粉蜂，面臨適宜棲地縮減的處境。這不僅是單一物種生存空間縮減的問題，也可能進一步影響整個高山生態系與植物授粉網絡的穩定。

儘管氣候變遷為授粉蜂帶來挑戰，但只要正視這群野生授粉昆蟲的重要性，並積極推動自然棲地的保護，同時建立長期的生態監測，便能提早掌握氣候變遷的趨勢並提早做規劃。未來若能以科學實證作為保育決策基礎，並落實高山棲地的保護，期望可降低氣候暖化帶來的空間壓力，確保授粉蜂群的棲地完整性及其生態系服務功能。

本場重要紀事(115年6月1日～115年8月30日)

日 期	重　　要　　紀　　事
6月1日	於本場辦理「115年上半年度自衛消防編組訓練課程」，由台灣防災避難逃生協會講授自衛消防編組介紹、CPR+AED訓練、消防警報系統介紹、消防栓水帶使用、滅火器使用及實際滅火訓練，計83人參加。
6月2日至4日	於本場辦理115年農民學院草莓育苗研習班，由施場長佳宏開訓，研習內容包含草莓育苗產業概況、草莓育苗期土壤肥培管理、草莓育苗方式及期程等，計23名學員參加，課程滿意度為95.7%。
6月4日	於三灣鄉農會辦理「柑橘果園經營管理技術講習會」，由盧科長美君主持，內容包括柑橘栽培管理、減碳增匯及土壤管理等，計35人參加。
6月9日	於飛牛牧場辦理「循環農業及減碳增匯工作坊」，由盧科長美君主持，研習內容包含循環農業法規解析、農業剩餘資源再利用方法說明及示範、乳牛糞尿應用黑水虻生物處理循環利用說明及示範、農產品碳足跡介紹、減碳增匯技術、資源再利用-神奇種子球DIY等，計51人參加。
6月12日	於本場辦理「生成式AI工作坊–MaiAgent AI平台應用與Google AI實作」活動，由史助理研究員晴講授RAG(檢索增強生成)觀念與MaiAgent AI平台操作；吳嘉璟工程師講授Gemini與NotebookLM(註：2026年7月整合為Gemini Notebook)實作，計60人參加。
6月18日	於頭屋鄉農會辦理「柑橘果園經營管理技術講習會」，由盧科長美君主持，內容包括柑橘栽培管理、減碳增匯及土壤管理等，計40人參加。
6月19日	於苗栗縣竹南鎮龍舟碼頭辦理「端出好時光，親子舟遊趣」，由許主任碧純主持，適逢苗栗縣在地端午節盛事，為打破傳統性別分工、倡導父職參與及兩性平權觀念，並深入體驗百年傳承民俗文化，同時鼓勵同仁參與體育 活動以強健身心，參與竹南鎮公所主辦之龍舟體育競賽觀賽活動，計38人參加。
6月23日至25日	於本場辦理115年農民學院養蜂入門班，由施場長佳宏開訓，研習內容包含養蜂學概論、蜂群管理技術及認識蜜蜂病蟲敵害等，計30名學員參加，課程滿意度為100%。
7月3日	農科院及中興大學於農科院召開「中部地區農業研究機構第十四次學研聯繫會議」，本場由施場長佳宏與史助理研究員晴與會。中興大學、農科院及農業部14個試驗改良機構首長代表，針對氣候變遷調適、抗逆境微生物資材、智慧化生產及農民心理健康照護等議題進行交流。會後，與會單位至本場參訪，由施場長佳宏導覽9棟建築物耐震補強成果，並由陳助理研究員本翰帶領進行真假蜜辨識與水果蜂蜜酒研發成果體驗活動，計32人參加。
7月13日至17日	辦理115年作物病蟲害整合管理班，由施場長佳宏開訓，研習內容包含病蟲害整合防治技術簡介、芽孢桿菌之開發與應用及蘇力菌在害蟲防治之應用等，計12名學員參加，課程滿意度為100%。

日 期	重　　要　　紀　　事
7 月 18 日	本場與公館鄉農會共同舉辦「苗栗農改場 Open Day ！璀璨家政七十·饗棗食農傳承趣」慶祝活動，單日吸引超過 11,000 人次參與。活動當日，農業部林主任秘書家榮、苗栗縣鍾縣長東錦以及各試驗單位首長代表等均親臨現場，與民眾一同見證本場 9 棟建築物耐震補強成果，並呈現本場在作物、蠶蜂、食農教育及天敵昆蟲等方面之研發與推動亮點。此外，現場設置食農闖關體驗等互動區，並同步舉辦家政七十成果展，展現在地家政推廣歷程與農特產品成果，活動順利圓滿成功。
7 月 22 日	於本場生物防治研究中心辦理「115 年度草莓 IPM 輔導暨設施補助標準說明會」，由鍾副場長國雄主持，說明本年度苗栗縣草莓栽培設施專案補助核銷辦法、IPM 輔導說明、病蟲害防治與育苗期肥培管理解說，計 50 人參加。
7 月 27 日	辦理「世界養蜂大會與澳洲蜂產業技術交流之觀察與啟發」專題演講，由吳科長姿嫻主持，邀請參與國外考察之蜂產品業者、養蜂業者及本場研究人員，分享世界養蜂大會及澳洲蜂產業考察成果，計 100 人參加。
8 月 5 日	行政院人事行政總處與銓敘部於 115 年 8 月 5 日至 6 日共同舉辦「115 年全國人事主管會報」，並擇定於 8 月 6 日安排行政院人事行政總處周威廷主任秘書、銓敘部施能傑部長、銓敘部主管同仁及全國各機關人事主管蒞臨本場參訪交流，本場由施佳宏場長率同仁熱情接待，透過農業科研成果展示與在地文化體驗，讓人事夥伴從不同面向認識本場業務特色。
8 月 15 日	臺灣養蜂產業年度盛事「115 年全國國產龍眼及荔枝蜂蜜品質評鑑頒獎暨成果發表會」，8 月 15 日在臺中林皇宮盛大舉行。當日活動產官學界貴賓齊聚，本場施場長佳宏、農糧署陳主任秘書立儀、台灣養蜂協會趙理事長燿烽共同出席，親自為獲獎蜂農頒發獎項與喝采。
8 月 17 日	於本場辦理「草莓健康種苗應用與綜合栽培管理」講習會，由吳代理主任姿嫻主持，本場、種苗場、桃園場、臺南場、臺灣大學與農科院專家分別講授草莓健康種苗應用與綜合栽培管理相關主題，並由受輔導業者經驗分享。會後座談由施場長佳宏主持，全體講師與農糧署張專門委員耿勳與會，計 182 人參加。
8 月 17 日 至 21 日	於本場辦理「115 年有機農業經營管理班」，由施場長佳宏開訓，研習內容包含有機栽培技術、有機農田雜草管理、天敵昆蟲應用、有機農產品驗證基準及程序等，計 8 名學員參加，課程滿意度為 100%。
8 月 18 日	於農業部辦理「蜂箱小 - 甲蟲專用誘殺盒」研發成果發表記者會，由鍾副場長國雄開場，施場長佳宏主持，吳科長姿嫻簡報說明蜂箱小甲蟲在全球的流行危害現況及本項技術開發的緣由與重要性。動植物防疫檢疫署杜署長麗華亦親臨共襄盛舉，肯定自主研發成果。



115.07.18 苗栗農改場 Open Day ！璀璨家政七十·饗棗食農傳承趣」慶祝活動大合影。



115.07.18 苗栗農改場家政 70 慶祝活動 - 家政走秀合影。



115.08.04 落實 - 外國青年農民來臺實習 , 苗栗區農業改良場與苗栗縣農會共同舉辦印尼青農學習活動合影。



115.08.05 全國人事主管及與會長官齊聚本場合影留念。



115.08.15 逆境淬鍊蜜香榮耀！ 115 年全國國產蜂蜜評鑑「淬蜜之冠」隆重頒獎。



115.08.18 農業部苗栗區農業改良場與農業部動植物防疫檢疫署團隊於記者會合影，共同攜手推動蜜蜂病蟲害防治、守護蜂產業。