飼料用昆蟲生產技術回顧

王泰權[1,*] 石憲宗[1] 張淑貞[1] 姚美吉[1] 李啟陽[1]

[1]行政院農業委員會農業試驗所應用動物組。台灣 台中市。

摘要

昆蟲體內含有高成分的營養物質，包括蛋白質、脂肪酸及微量元素。昆蟲做為動物飼料的蛋白質來源有許多優勢，包括生活史短、食物轉換效率高、對於環境衝擊低，因此昆蟲已被科學界認為是未來動物性蛋白質的來源之一。由於昆蟲種類非常多樣化，具有不同的生活史，取食食物種類亦不相同，必須掌握昆蟲特殊的生態習性，才得以高效率的大量飼養。本文針對目前國際常見的飼料用昆蟲，包括麵包蟲（*Tenebrio molitor*）、黑水虻（*Hermetia illucens*）、家蠅（*Musca domestica*）、家蟋蟀（*Acheta domesticus*）及黃斑黑蟋蟀（*Gryllus bimaculatus*），彙整其生活史、飼養設備、採卵及飼養技術、飼養基質開發及蟲體收穫技術，提供昆蟲大量的飼育技術知識，期盼奠基台灣未來發展飼料用昆蟲產業之基礎。

關鍵詞：飼料昆蟲、生活史、飼養設備、飼養技術。

前言

全球面臨氣候暖化，人口持續增加，未來食物需求提高等嚴峻挑戰。昆蟲由於本身所含的營養價值高，不同種類的昆蟲粗蛋白含量為身體乾重的 34.6–74.4%，粗脂肪為 5.8–33.7%，且富含多樣化的胺基酸種類 (Barroso *et al.* 2014)。另外，昆蟲還具有生長快速、食物轉換效率高、生產所需的土地面積小及排放的溫室氣體少等優勢，使科學界聚焦在以昆蟲作為替代蛋白質的議題 (Mlček *et al.* 2014; van Huis and Oonincx 2017; Govorushko 2019; Cadinu *et al.* 2020)。

飼料用昆蟲產業在全球發展日漸蓬勃，根據國外的市場調查機構（Mordor Intelligence）估計全球飼料用昆蟲的產值，於 2018 年產值為 6.8 億美元，2024 年可達 13.9 億美元。歐盟及台灣目前皆立法將昆蟲蛋白做為動物用飼料用的蛋白質添加劑。歐盟的 2017/893 法規 (regulation) 明訂黑水虻 (*Hermetia illucens*)、家蠅 (*Musca domestica*)、麵包蟲 (*Tenebrio molitor*)、外米擬步行蟲 (*Alphitobius diaperinus*)、家蟋蟀 (*Acheta domesticus*)、帶狀蟋蟀 (*Gryllodes sigillatus*) 和牙買加蟋蟀 (*Gryllus assimilis*) 等 7 種昆蟲可以作為動物飼料之添加物；而我國「飼料管理法」中第 3 條第 1 項亦明定動物性飼料可以使用蠶蛹、蜂蛹、蠅蛆、麵包蟲、大麥蟲、孑孓、紅蟲、蝗蟲等昆蟲做為動物飼料的添加劑，同時規定水虻粉必須是以植物性飼料餵養所長成之蟲體製成。

大量飼養應用於飼料用昆蟲產業的種類包括麵包蟲、黑水虻、家蠅、蟋蟀等容易飼養的種類。為了達成昆蟲供應禽畜生產飼料的目的，昆蟲大量飼養與生產技術格外的重要。由於昆蟲種類繁多，各目昆蟲又

*論文聯繫人
E-mail: insect6925@tari.gov.tw

具有不同的生活型態，如雙翅目及鞘翅目屬於完全變態昆蟲，直翅目屬於漸進變態的昆蟲，因此針對不同種類的昆蟲，需研究發展不同昆蟲使用的飼養設施、飼養環境、昆蟲採卵技術、餌料配方及收穫方式等。為開發台灣昆蟲飼養的產業，本文針對數種國際常見之飼料用昆蟲，整理其飼養方式及相關技術，以奠基飼料昆蟲產業發展的知識基礎。

飼料昆蟲生產設備

飼養設施對於生產大量昆蟲非常重要，是自動化大量飼養的基本元素之一。基礎昆蟲飼養設施包括幾個重要的部分：飼養區 (rearing area)、分離與篩選區 (separation and sorting area)、清理區 (cleaning area) 及堆肥區 (compost area) (Ortiz *et al*. 2016; Cadinu *et al*. 2020)。飼養區為昆蟲飼養生長的區域，由於室內飼養的空間有限，通常會層架延伸立體空間飼養，產業上飼養麵包蟲 (圖 1A) 或黑水虻 (圖 1B) 就是以層架式的方式來進行飼養，可增加昆蟲產量。飼養區必須包括飲水與餵食系統，並且具有溫溼度監控設備 (圖 1C)。昆蟲屬於變溫動物，因此溫度變化會造成生活史的差異；此外，飼養提供的水分及營養來源也會影響昆蟲生長，影響收穫時間及產量。分離及篩選區是為了分離可收穫的目標昆蟲，比如以自動化的監控設備辨識昆蟲收穫時期，並輔以機器設計分離昆蟲、食物及糞便等殘餘物質 (圖 1 D)。清理區為清理及消毒飼養昆蟲後飼養盒等設備。堆肥區則是消耗分解昆蟲糞便及食物的殘餘物，將昆蟲飼養剩下的殘餘物用作肥料用途，以農業達循環利用目的 (Ortiz *et al*. 2016; Cadinu *et al*. 2020)。

鞘翅目—麵包蟲飼養技術

國際上鞘翅目飼料昆蟲的種類包括麵包蟲、大麥蟲及外米擬步行蟲，這 3 種鞘翅目飼料昆蟲皆屬於擬步行蟲科 (Tenebrionidae)。擬步行蟲科的昆蟲飼養容易，幼蟲已經在寵物市場上作為餌料大量販售。擬步行蟲科內各種的飼養方式相似，僅體型大小與生活史長短有差異，主要皆以麥麩 (wheat bran) 作為飼養基質。其中以麵包蟲的應用及研究最為廣泛 (圖 2A)，本篇將麵包蟲做為擬步行蟲科昆蟲飼養技術的代表，說明如下。

麵包蟲在成蟲性成熟後於飼養基質上產卵，雌蟲伸出生殖器將卵產在食物基質中，為了避免成蟲取食麥麩而誤食蟲卵，可使用篩網將成蟲與蟲卵隔開，避免成蟲取食黏於麥麩的卵 (圖 2B)。篩網建議使用孔徑 850 μm 的 20 號篩網，於篩網下放置麥麩作為產卵基質，阻隔成蟲與產卵基質。雌成蟲產卵時的最佳密度為 0.14 隻/cm^2，密度過高會造成產卵效果不佳，羽化後 2–3 週的雌成蟲產卵效率最佳 (Morales-Ramos *et al*. 2012)，但是亦有研究顯示雌成蟲產卵最佳密度為 0.84 隻/cm^2，產卵數高峰在羽化後於第 6 d (Berggreen *et al*. 2018)。總結上述研究，雌成蟲密度介於 0.14–0.84 隻/ cm^2 為最佳，羽化後 1–3 週產卵效率最佳。

麵包蟲幼蟲的齡期變化大，14–18 個齡期都有，因此發育時間也隨之不同，卵期 5–7 d，幼蟲期 129–216 d，最適生長溫度為 25–27.5 ℃ (Koo *et al*. 2013; Kim *et al*. 2015; Morales-Ramos *et al*. 2015)。除了溫度會影響生活史，食物的營養成分也會造成齡期和生長的差異，麥麩中加入馬鈴薯粉或奶粉的飼料可縮短齡期 (Morales-Ramos *et al*. 2013)。

麵包蟲幼蟲的食性複雜，可取食多種農業副產物，主要以穀物為主，其中以麥麩對其生長影響為最佳 (Rumbos *et al*. 2020)，因此飼養麵包蟲多數以此作為主要食物基質。在飼養過程中除了供給主要飼料基質外，水分的供給對於生長發育也十分重要，供給水與不供水的實驗中，沒有供給水源的麵包蟲明顯發育時間較長，而且重量較輕 (Urs & Hopkins 1973)。作為水分來源的新鮮植物同時提供多樣維生素營養，比較僅取食麥麩和麥麩添加新鮮植物 (如紅莧苣、馬鈴薯、紅蘿蔔或柑橘) 的實驗，顯示取食新鮮植物的麵包蟲

增加 40–46% 的生長率，由此可知新鮮植物為飼養麵包蟲不可或缺的營養補充劑 (Liu *et al*. 2020)。

擬步行蟲科的飼養，幼蟲密度的增加會造成幼蟲發育漸緩，食物轉換效率變差 (Morales-Ramos & Rojas 2015)，進一步造成產生較多體重較輕的蛹，亦會導致化蛹不完全的現象出現 (Weaver & McFarlane 1990; Park *et al*. 2012)。

在大量飼養過程中，由於麵包蟲具有同類相殘的行為，養殖到生長後期的化蛹階段，蛹必須和幼蟲進行分離，若於同一空間，蛹容易被幼蟲攻擊致死，可使用孔徑 3.5 mm 的 8 號篩網分離蛹，或在飼養中使用可讓幼蟲通過，但可攔阻蛹通過的篩網。目前自動分離的設備已經有發展出轉彎式氣流分離機 (zig-zag air separator) 來分離幼蟲、食物與糞便，更有研發幼蟲影像辨識技術來做為未來自動化飼養的研究 (Kröncke *et al*. 2020)。

雙翅目—黑水虻及家蠅飼養技術

黑水虻飼養技術

黑水虻屬於雙翅目 (Diptera) 水虻科 (Stratiomyidae) 的昆蟲 (圖 3A、3B)，主要分布在熱帶與亞熱帶地區，產卵與其成蟲獲得的營養息息相關，研究顯示餵食成蟲糖水，可以增加產卵量、產卵時間和成蟲壽命 (Macavei *et al*. 2020)。黑水虻產卵於食物基質附近的隙縫中，因此大量飼養下，採卵會將成蟲放置於大型的尼龍網內，緣由為交尾模式具有特殊的交尾場行為 (Lekking behavior)，亦即雄性個體會有聚集行為與雌蟲進行交尾 (Tomberlin & Sheppard 2001)。所以產卵場域使用的尼龍網必須維持至少 1.0 × 1.0 × 2.5 m 以上空間 (圖 3 C)，最後放入產卵基質誘集卵塊 (Kim *et al*. 2016)。通常使用木頭堆成塊狀 (圖 3 D)、堆疊而成的紙板、或是水族市場使用的生化球 (bioball) 做為採卵器具，將採卵器具放置於腐敗的有機質中供成蟲產卵，皆能獲得不錯的產卵效果 (Sheppard *et al*. 2002; Dortmans *et al*. 2017; Hoc *et al*. 2019)。

黑水虻的幼蟲食性極為複雜，由於其廣泛的食性，目前各國已經應用幼蟲處理各種的生物廢棄物。常見飼養基質有無毒的有機物質，如動物糞便、動物或植物的廢棄物、麥麩、玉米粉或是苜蓿粉所組成之飼料，飼養基質的水分含量最適約為 60–90%，在不同飼養基質飼養下，幼蟲的生長率及營養組成與食物來源習習相關 (Sheppard *et al*. 2002; Myers *et al*. 2014; Nguyen *et al*. 2015; Barragán-Fonseca *et al*. 2018; Gold *et al*. 2018)。

幼蟲最適合飼養溫度為 25–30℃，相對溼度為 70%，喜愛黑暗的環境。於 25 和 30℃ 的溫度飼養下，幼蟲期分別為 32.8 d 和 24.7 d，蛹期為 22.3 d 和 13.0 d，成蟲壽命為 10.2 和 9.2 d (Shumo *et al*. 2019)。黑水虻的收集可以應用前蛹會離開潮濕的環境化蛹的特性，對潮濕基質進行非震動式的網篩法，對破碎化的基質使用震動式的網篩法 (Dortmans *et al*. 2017)。

家蠅飼養技術

家蠅為全球廣泛分布的物種，屬於雙翅目 (Diptera) 家蠅科 (Muscidae)，生活史短，幼蟲期約 8–10 d，蛹期約 6–7 d (Pastor *et al*. 2014)。成蟲飼料可以以奶粉、蔗糖或是酵母粉混合而成 (Shipp & Osborn 1967; Pastor *et al*. 2011; Pastor *et al*. 2014)。採產方式可以使用動物糞便或是發酵的麥麩誘集成蟲產卵 (Pastor *et al*. 2011; Tang *et al*. 2016; Hussein *et al*. 2017)，採卵後即可將家蠅的卵移至飼料基質上飼養。最適合生長的飼料水分含量大約為 50–80%，飼料中水分超過 90% 或低於 40% 皆會影響幼蟲的生長 (Farkas *et al*. 1998)。幼蟲的飼料配方非常多樣化，例如各種的動物糞便 (豬糞、雞糞或牛糞) (Larraín & Salas 2008; Roffeis *et al*. 2015; Hussein *et al*. 2017; Miranda *et al*. 2020)，目前亦發展出植物源飼養配方，如麥麩、苜蓿粉、玉米粉及啤酒酵母粉混合，再將其與水進行 1:1 混合，即成為家蠅的飼

養配方 (Hogsette 1992; Miranda *et al*. 2020)。最適飼養溫度為 25–32℃，相對濕度為 65–75% (Ortiz *et al*. 2016)。目前蟲體的收集方式有應用篩網篩選、低氧環境誘使幼蟲離開飼養基質、或自動收集裝置進行蛹的分離等。

直翅目—蟋蟀飼養技術

蟋蟀飼養最常見的種類為家蟋蟀和黃斑黑蟋蟀，家蟋蟀的卵期 10–14 d，若蟲期 40–45 d，成蟲期 40–55 d；而黃斑蟋蟀的卵期為 7–10 d，若蟲期 30–35 d，成蟲期 30–40 d。蟋蟀一般飼養 20–35 d 後開始收穫，理論上約 33 d 收穫 1 次，每年可收穫 11 次。蟋蟀適合的生長溫度為 28–30℃ (Clifford & Woodring 1990; Booth & Kiddell 2007)。

蟋蟀的採卵方式，可以使用泥炭土 (peat moss) 或砂土給予成蟲產卵 (Clifford & Woodring 1990; Hanboonsong & Durst 2020; Reverberi 2020)。飼養蟋蟀的飼料非常多樣化，如已開發的 Patton 13 蟋蟀飼料，是以大豆粉、玉米粉、全脂奶粉、脫脂奶粉、去脂牛肝、麥麩、酵母粉組成，因此測試蟋蟀飼料配方試驗都以此作為對照組；動物飼料如雞飼料、兔子飼料亦可；植物性配方飼料如玉米粉、大豆粉、玉米油、磷酸氫鈣、碳酸鈣、碘鹽。除了飼料之外，飼養過程中可以加入新鮮的植物基質，如 10 d 大的若蟲即可開始添加木瓜葉、樹薯葉或是南瓜切片等植物 (Patton 1963; Collavo *et al*. 2005; Hanboonsong & Durst 2020; Morales-Ramos *et al*. 2020)。

蟋蟀的飼養環境必須有大空間給予躲藏，通常使用大型箱子 (圖 4A) 或大型水泥方形結構作為飼養槽，裡面放置蛋盒或是紙團提供躲藏空間 (圖 4B)，盒子上方覆蓋網子避免逃逸或是捕食性天敵進入，箱內設置盛放水源及食物的容器 (Clifford & Woodring 1990; Collavo *et al*. 2005; Hanboonsong & Durst 2020)。蟋蟀的收集方式相當簡單，只要將飼養槽中的蛋盒集中於角落，迫使蟋蟀躲入角落的蛋盒中，隨後搖動蛋盒，收集蛋盒中的蟋蟀及進行熱水消毒、包裝以應用於飼料或食物市場 (Hanboonsong & Durst 2020)。

結語

昆蟲生活史短且繁殖能力迅速，只要掌握不同種類昆蟲的產卵、取食行為、食料、飼養設備、溫溼度條件，即可成功大量飼養昆蟲。大規模的飼養下必須注意病菌及天敵的發生，以往曾有蟋蟀麻痺病毒 (cricket paralysis virus) 重創蟋蟀飼養產業，亦有發生麵包蟲感染白殭菌 (*Beauveria bassiana*) 的案例，因此昆蟲飼養時必須謹慎控制溫度與溼度，避免使用帶病的種蟲生產繁殖，並且加強飼養器具的衛生管理 (Eilenberg *et al*. 2015)。為了降低昆蟲大量飼養的生產成本，未來應開發價格更便宜且高效的食物配方，也可以將昆蟲飼養生產自動化以減少人力成本，除了目前以氣流或是物理方式開發的昆蟲分離技術，未來亦可結合人工智慧影像辨識系統，更精確的選別大量飼養的昆蟲，以進一步簡化飼養模式。

致謝

本文有關國內飼料用昆蟲大量飼養的圖片，非常感謝萌芽生物科技有限公司的卓先生、晁陽農產科技股份有限公司的黃先生、龍蝦宴的葉先生，同意提供黑水虻、黃斑黑蟋蟀及麵包蟲之飼養設備拍攝及飼育流程的資料收集。

參考文獻

Barragán-Fonseca, K., J. Pineda-Mejia, M. Dicke, and J. J. van Loon. 2018. Performance of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) on vegetable residue-based diets formulated based on protein and carbohydrate contents.

J. Econ. Entomol. 111: 2676–2683.

Barroso, F. G., C. de Haro, M. J. Sánchez-Muros, E. Venegas, A. Martínez-Sánchez, and C. Pérez-Bañón. 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. Aquaculture. 422: 193–201.

Berggreen, I., J. Offenberg, M. Calis, and L.-H. Heckmann. 2018. Impact of density, reproduction period and age on fecundity of the yellow mealworm Tenebrio molitor (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Insects Food Feed 4: 43–50.

Booth, D. T. and K. Kiddell. 2007. Temperature and the energetics of development in the house cricket (*Acheta domesticus*). J. Insect Physiol. 53: 950–953.

Cadinu, L. A., P. Barra, F. Torre, F. Delogu, and F. A. Madau. 2020. Insect rearing: Potential, challenges, and circularity. Sustainability 12: 4567.

Clifford, C. W. and J. Woodring. 1990. Methods for rearing the house cricket, Acheta domesticus (L.), along with baseline values for feeding rates, growth rates, development times, and blood composition. J. Appl. Entomol. 109: 1–14.

Collavo, A., R. H. Glew, Y. S. Huang, L. T. Chuang, R. Bosse, and M. G. Paoletti. 2005. House cricket small-scale farming. p. 515–540. in: Ecological Iimplications of Minilivestock: potential of insects, rodents, frogs and snails. (Paoletti M. G. ed.) Science Publishers, Inc. Enfield, New Hampshire, U.S.A. 648 pp.

Dortmans, B., S. Diener, B. Verstappen, and C. Zurbrugg. 2017. Black soldier fly biowaste processing-a step-by-step guide Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Dubendorf, Switzerland.

Eilenberg, J., J. Vlak, C. Nielsen-LeRoux, S. Cappellozza, and A. Jensen. 2015. Diseases in insects produced for food and feed. J. Insects Food Feed 1: 87–102.

Farkas, R., J. A. Hogsette, and L. Börzsönyi. 1998. Development of Hydrotaea aenescens and Musca domestica (Diptera: Muscidae) in poultry and pig manures of different moisture content. Environ. Entomol. 27: 695–699.

Gold, M., J. K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg, and A. Mathys. 2018. Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. Waste Manage. 82: 302–318.

Govorushko, S. 2019. Global status of insects as food and feed source: A review. Trends Food Sci. Technol. 91: 436–445.

Hanboonsong, A., and P. Durst. 2020. Guidance on sustainable cricket farming–a practical manual for farmers and inspectors, Food & Agriculture Org.

Hoc, B., G. Noël, J. Carpentier, F. Francis, and R. Caparros Megido. 2019. Optimization of black soldier fly (*Hermetia illucens*) artificial reproduction. PLoS One 14: e0216160.

Hogsette, J. A. 1992. New diets for production of house flies and stable flies (Diptera: Muscidae) in the laboratory. J. Econ. Entomol. 85: 2291–2294.

Hussein, M., V. V. Pillai, J. M. Goddard, H. G. Park, K. S. Kothapalli, D. A. Ross, Q. M. Ketterings, J. T. Brenna, M. B. Milstein, and H. Marquis. 2017. Sustainable production of housefly

(*Musca domestica*) larvae as a protein-rich feed ingredient by utilizing cattle manure. PLoS One 12: e0171708.

Kim, S. Y., J. B. Park, Y. B. Lee, H. J. Yoon, K. Y. Lee, and N. J. Kim. 2015. Growth characteristics of mealworm Tenebrio molitor. J. Seric. Entomol. Sci. 53: 1–5.

Kim, W., E. Kim, J.-Y. Choi, and S.-H. Kim. 2016. Effect of adult population density on egg production in the black soldier fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae). Int. J. Ind. Entomol. 33: 92–95.

Koo, H. Y., S. G. Kim, H. K. Oh, J. E. Kim, D. S. Choi, D. I. Kim, and I. Kim. 2013. Temperature-dependent development model of larvae of mealworm beetle, *Tenebrio molitor* L.(Coleoptera: Tenebrionidae). Korean J. Appl. Entomol. 52: 387–394.

Kröncke, N., A. Baur, V. Böschen, S. Demtröder, R. Benning, and A. Delgado. 2020. Automation of Insect Mass Rearing and Processing Technologies of Mealworms (*Tenebrio molitor*), pp. 123–139, African Edible Insects As Alternative Source of Food, Oil, Protein and Bioactive Components. Springer.

Larraín, P., and C. Salas. 2008. House fly (*Musca domestica* L.)(Diptera: Muscidae) development in different types of manure. Chil. J. Agric. Res. 68: 192-197.

Liu, C., J. Masri, V. Perez, C. Maya, and J. Zhao. 2020. Growth performance and nutrient composition of mealworms (*Tenebrio molitor*) fed on fresh plant materials-supplemented diets. Foods 9: 151.

Macavei, L. I., G. Benassi, V. Stoian, and L. Maistrello. 2020. Optimization of *Hermetia illucens* (L.) egg laying under different nutrition and light conditions. PLoS One 15: e0232144.

Miranda, C., J. Cammack, and J. Tomberlin. 2020. Life-history traits of house fly, *Musca domestica* L.(Diptera: Muscidae), reared on three manure types. J. Insects Food Feed 6: 81–90.

Mlček, J., O. Rop, M. Borkovcova, and M. Bedná řov á . 2014. A comprehensive look at the possibilities of edible insects as food in Europe-A Review. Polish J. Food Nutr. Sci. 64: 147–157..

Morales-Ramos, J. A. and M. G. Rojas. 2015. Effect of larval density on food utilization efficiency of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Econ. Entomol. 108: 2259–2267.

Morales-Ramos, J. A., M. G. Rojas, A. T. Dossey, and M. Berhow. 2020. Self-selection of food ingredients and agricultural by-products by the house cricket, *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae): a holistic approach to develop optimized diets. PLoS One 15: e0227400.

Morales-Ramos, J. A., M. G. Rojas, S. Kay, D. I. Shapiro-Ilan, and W. L. Tedders. 2012. Impact of adult weight, density, and age on reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Entomol. Sci. 47: 208–220.

Morales-Ramos, J. A., M. G. Rojas, D. I. Shapiro-Ilan, and W. L. Tedders. 2013. Use of nutrient self-selection as a diet refining tool in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Entomol. Sci. 48: 206–221.

Morales-Ramos, J. A., S. Kay, M. G. Rojas, D. I.

Shapiro-Ilan, and W. L. Tedders. 2015. Morphometric analysis of instar variation in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 108: 146–159.

Myers, H. M., J. K. Tomberlin, B. D. Lambert, and D. Kattes. 2014. Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure. Environ. Entomol. 37: 11–15.

Nguyen, T. T., J. K. Tomberlin, and S. Vanlaerhoven. 2015. Ability of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. Environ. Entomol. 44: 406–410.

Ortiz, J. C., A. T. Ruiz, J. Morales-Ramos, M. Thomas, M. Rojas, J. Tomberlin, L. Yi, R. Han, L. Giroud, and R. Jullien. 2016. Insect mass production technologies, pp. 153–201, Insects as sustainable food ingredients. Elsevier.

Park, Y. K., Y. C. Choi, Y. B. Lee, S. H. Lee, J. S. Lee, and S. H. Kang. 2012. Fecundity, life span, developmental periods and pupal weight of *Tenebrio molitor* L.(Coleoptera: Tenebrionidae). J. Seric. Entomol. Sci. 50: 126–132.

Pastor, B., A. S. Martinez-Sanchez, G. A. Ståhls, and S. Rojo. 2014. Introducing improvements in the mass rearing of the housefly: biological, morphometric and genetic characterization of laboratory strains. Bull. Entomol. Res. 104: 486–493.

Pastor, B., H. Čičková, M. Kozanek, A. Martinez-Sanchez, P. Takáč, and S. Rojo. 2011. Effect of the size of the pupae, adult diet, oviposition substrate and adult population density on egg production in *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). Eur. J. Entomol. 108: 587–596.

Patton, R. 1963. Rearing the House Cricket, *Aeheta domesticus*, on Commercial Feed. Ann. Entomol. Soc. Am. 56: 250–251.

Reverberi, M. 2020. Edible insects: cricket farming and processing as an emerging market. J. Insects Food Feed 6: 211–220.

Roffeis, M., B. Muys, J. Almeida, E. Mathijs, W. Achten WMJ, B. Pastor, Y. Velásquez, A. I. Martinez-Sanchez, and S. Rojo. 2015. Pig manure treatment with housefly (*Musca domestica*) rearing–an environmental life cycle assessment. J. Insects Food Feed 1: 195–214.

Rumbos, C. I., I. T. Karapanagiotidis, E. Mente, P. Psofakis, and C. G. Athanassiou. 2020. Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. Sci. Rep. 10: 1–10.

Sheppard, D. C., J. K. Tomberlin, J. A. Joyce, B. C. Kiser, and S. M. Sumner. 2002. Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). J. Med. Entomol. 39: 695–698.

Shipp, E. and A. Osborn. 1967. The effect of protein sources and of the frequency of egg collection on egg production by the housefly (*Musca domestica* L.). Bull. World Health Organ. 37: 331–335.

Shumo, M., F. M. Khamis, C. M. Tanga, K. K. Fiaboe, S. Subramanian, S. Ekesi, A. Van Huis, and C. Borgemeister. 2019. Influence of temperature on selected life-history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya. Animals 9: 79.

Tang, R., F. Zhang, J. H. Chen, F. Zhu, R. C. Han, C. L. Lei, M. Kenis, L. Q. Huang, and C. Z. Wang.

2016. Identification and testing of oviposition attractant chemical compounds for *Musca domestica*. Sci. Rep. 6: 1–9.

Tomberlin, J. K. and D. C. Sheppard. 2001. Lekking behavior of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). Fla. Entomol.: 729–729.

Urs, K. and T. Hopkins. 1973. Effect of moisture on growth rate and development of two strains of *Tenebrio molitor* L.(Coleoptera, Tenebrionidae). J. Stored Prod. Res. 8: 291–297.

van Huis, A. and D. G. Oonincx. 2017. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. Agron. Sustain. Dev. 37: 1–14.

Weaver, D. K. and J. McFarlane. 1990. The effect of larval density on growth and development of *Tenebrio molitor*. J. Insect Physiol. 36: 531–536.



圖 1. 昆蟲大量飼養的設備。(A) 飼養麵包蟲的層架式設計；(B) 飼養黑水虻的塑膠盤；(C) 溫溼度監控設備；(D) 自動蟲體分離機器。

Fig. 1. The equipment for insect mass rearing. (A) The layer holder design for mealworm; (B) plastic trays for black solider fly; (C) temperature and humidity control devices; (D) insect separator machine.



圖 2. 麵包蟲的大量飼養過程。(A) 麵包蟲的幼蟲；(B) 成蟲以網篩阻隔食物的採卵方式。

Fig. 2. The procedure of mass rearing of mealworm. (A) mealworm larva; (B) the egg collection separating food and adult by sieve.



圖 3. 黑水虻的大量飼養。(A) 成蟲；(B) 幼蟲與前蛹；(C) 交尾場；(D) 採卵器具。

Fig. 3. Mass rearing of black soldier fly. (A) Adult; (B) larva and prepupa; (C) mating space and (D) egg collection devices.

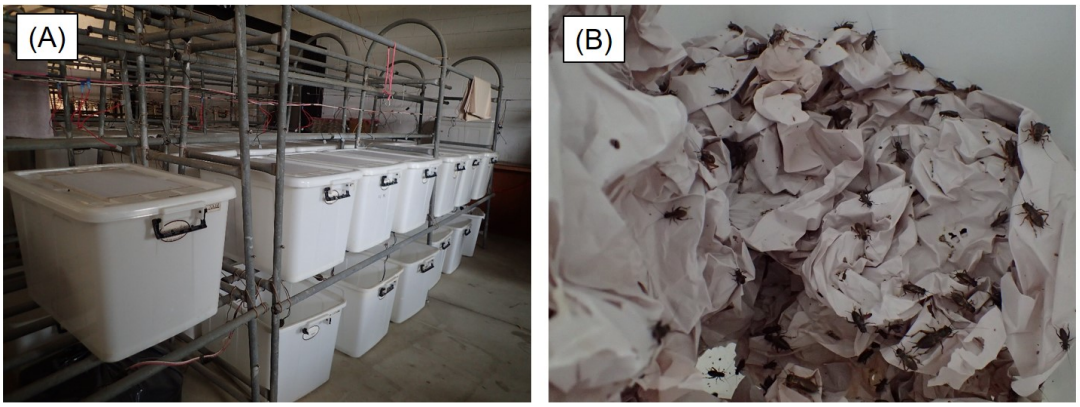


圖 4. 飼養蟋蟀的設備。(A) 大型整理箱；(B) 提供給蟋蟀躲藏空間的紙團。

Fig. 4. The equipment for cricket farming. (A) Big plastic boxes; (B) hiding space made by papers (B).

The Review of Rearing Technologies of Insects as Feed

Tai-Chuan Wang[1,*], Hsien-Tzung Shih[1], Shu-Chen Chang[1], Me-Chi Yao [1], and Chi-Yang Lee [1]

[1] Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung city, Taiwan, ROC.

Abstract

Insects contain high nutrients including protein, fatty acid, and minerals. Insects as a protein source for animal feed have many advantages, including short life cycle, high food conversion rate, low environmental impact. Therefore, insects have been regarded as alternative protein source in the future. As insect species are very diverse with different life cycles and different foods they eat, it is necessary to understand their special behaviors in order to be able to complete the mass rearing of them efficiently. The review focuses on common insect species as feed, like mealworm (*Tenebrio molitor*), black solider fly (*Hermetia illucens*), housefly (*Musca domestica*), house cricket (*Acheta domesticus*) and two-spotted cricket (*Gryllus bimaculatus*) and describes their life cycles, rearing equipments, oviposition methods, feeding substrate developments and harvest of targeted insect. We do hope that such knowledge related to insect breeding technology can form the foundation for the future development of the feed insect industry in Taiwan.

Key words: Insects as feed, Life cycle, Rearing equipment, Rearing technologies.

*Corresponding author.
E-mail: insect6925@tari.gov.tw