

昆蟲作為動物飼料原料之全球產業現況與未來展望

石憲宗^{1,*} 王泰權¹ 張淑貞¹ 李啟陽¹ 姚美吉¹ 陳昌岑² 陳淑佩¹ 陳健忠³

¹ 行政農業委員會農委會農業試驗所應用動物組。台灣 台中市。

² 行政農業委員會農委會農業試驗所技術服務組。台灣 台中市。

³ 行政農業委員會農委會農業試驗所應用動物組退休研究員兼組長。台灣 台中市。

摘要

隨著人口增長、消費者環保意識抬頭、農業用地數量有限，迫切需要尋找傳統肉類產品的替代品。由於畜牧生產是人為引起的氣候暖化的主要原因，而生產或提供動物飼料的動植物源蛋白質成分過程，被認為是造成土地占用、初級生產利用、酸化、氣候變化、能源利用、水依賴和魚類資源匱乏的主因，這些影響主要與魚粉生產、蛋白質作物生產和飼料加工電力生產有關。為解決這個問題，需要尋找更可持續性的飲食方式，包括減少肉類消費、減少食物浪費或使用替代蛋白質來源。昆蟲正在世界範圍內被推廣為人類食物和動物飼料。昆蟲蛋白的生產成本將在2030年低於魚粉，歐盟將成為全球昆蟲蛋白生產技術與產業成熟的重鎮，即便如此，預估屆時產量仍不足以支持動物飼料所需。目前歐盟已完成多項不同昆蟲蛋白作為取代魚粉與豆粕的動物飼料產業之生命週期評估研究，期待可為畜牧產業降低碳足跡分數。本報告主要是針對全球養殖動物產業在面臨傳統飼料蛋白質原料日漸不足所採取的重要因應策略之中，從中回顧昆蟲源替代蛋白質的重要研究，包括往昔人類已食用昆蟲的物種及其特性，動物飼料用昆蟲及其產業於歐盟蓬勃發展的緣由、各種昆蟲作為養殖動物飼料的潛力、飼料用昆蟲產業發展現況暨瓶頸、以及未來展望。昆蟲蛋白產業是一個新穎性與可持續性的新興產業，透過回顧國外發展狀況，預期可提供我國發展此產業所需注意的相關課題。

關鍵詞：昆蟲蛋白、動物飼料、魚粉、飼料用昆蟲產業、碳足跡。

前言

根據聯合國的統計資料顯示，從 1950 年到 2020 年，全球人口從 26 億成長至 70 億，並預測 2050 年全球人口將達到 97 億 (Population 2020)。FAO (2004) 資料顯示 1995-2020 年間，全球對肉製品需求量已增長 58%；在 2000-2020 年間，肉類消費量由 2.33 億噸成長至 3 億噸，牛奶消費量從 5.68 億噸增加到 7 億噸，雞蛋產量需求則成長 30%。到 2050 年的趨勢預測，由於人口增加和發展

中國家生活水平提高的綜合影響，導致人類對肉類產品的需求量和攝食量大幅增加，同時全球對寵物食品和牲畜飼料的蛋白質需求逐年提高，動物生產的預期擴張，勢必造成全球飼料蛋白的供應短缺 (Boland *et al.* 2013; Bosch *et al.* 2014; Kim *et al.* 2019; Sánchez-Muros *et al.* 2016)。綜觀肉類生產過程，飼養動物明顯影響土地和水資源利用、溫室氣體排放以及生物多樣性，同時生產動物飼料，會用到大量的作物與魚粉，飼料加工也會消耗大量電力。因此，生產動物所需飼料過程，被認為是擴大農耕地面積、影響

*論文聯繫人

E-mail: htshih@tari.gov.tw

初級生產利用、造成土壤酸化、加速能源消耗與依賴水資源的重要因素 (Mungkung *et al.* 2013)。

因應全球人口增長，在確保糧食安全的前提下，面對動物源產品需求增加，生產動物飼料所需動、植物源原料明顯不足等預期問題，開發動物飼料所需的可持續性替代蛋白質來源，已成為全球農業的重要戰略議題。從營養與環境層面來看，食用和飼料用昆蟲可提供人類和動物所需的營養，飼育昆蟲對環境的影響遠低於禽畜魚類等養殖動物，包括溫室氣體排放量減少、土地與用水需求減少及能源使用更合理 (FAO 2013)。昆蟲被認為是動物蛋白潛在可持續來源的主因，在於其飼料轉化效率高 (Nakagaki & deFoliart 1991; Ramos-Elorduy 2008; Looy *et al.* 2014; Van Huis & Oonincx 2017)、生長速度快、繁殖力高，與傳統的家畜和一些農作物相比，生產昆蟲的環境足跡更低，這種符合營養需求和低環境足跡的整合優勢，將可大幅減輕肉類和乳製品等環境足跡較大行業的壓力 (Bessa *et al.* 2020)；同時，小型昆蟲農場飼育昆蟲所需空間與營業成本，遠低於禽畜業與水產養殖業，為貧困家庭提供脫貧機會 (Rumpold & Schlüter 2013)。發展飼料用昆蟲產業的過程和結果，兼顧消除貧困和應對氣候變遷，符合 2016 年 1 月聯合國推動的可持續發展目標 (sustainable development goals, SDGs) 及相對應的行動 (Chia *et al.* 2019)。

以全球視角來看，為因應全球人口增長所需足夠食物，二十一世紀的終極挑戰之一，就是以健康生態系統生產人類所需的一切食物，當代若未能克服可預期的未來困境，我們的後代勢必面臨更多更複雜的挑戰。為此，建立可持續性的動植物生產系統，已成為不可忽視的全球農業重要戰略議題。

台灣為海島型國家，能源、糧食與食物等原物料進口，易受氣候變遷與環境足跡等國際議題影響。為此，本文針對全球養殖動物產業面臨傳統飼料蛋白質原料日漸不足所採取的相關因應策略，從中回顧有關動物飼料之昆蟲源替代蛋白質的重要研究，包括往昔人類已食用昆蟲物種及其特性，動物飼料用昆蟲及其產業

於歐盟蓬勃發展的緣由、昆蟲作為養殖動物飼料或寵物食品的評價、飼料用昆蟲產業發展現況，並在未來展望提出發展飼料用昆蟲新興產業所需注意的跨部門與跨領域技術整合、法規調和與政策工具等建議，提供產官學界參考與共思如何整合各行業的既有基礎，開發可降低成本與符合飼料安全的新技術，並調整或釐清相關法規，以建構具有新穎性與可持續性特色的新興產業鏈。

提供人類與動物食用的昆蟲物種及其特性

昆蟲綱 (Insecta) 是全球物種最多的生物類群，1999-2018 年間全球已定名的昆蟲物種，已從 75.1 萬種 (Wilson 1999) 成長至 100 萬種 (Stork 2018)，估計還未定名的物種尚有 550 萬種 (Stork 2018)。由於昆蟲是地球生態圈不可缺少的分類群，試想少了昆蟲的生態環境，地球將會變成什麼樣貌。

昆蟲一直都是人類等多食性動物的替代性動物蛋白質來源之一，主要是用於彌補其他具有周期性或季節性才出現的魚禽獸類動物。Hardy *et al.* (2017) 分析西班牙出土的 120 萬年前人屬 (*Homo*) 化石之牙結石殘留物，發現包含昆蟲脆片、植物纖維、肉類、花粉和真菌孢子等，這是目前人屬物種的最早食蟲 (entomophagy) 紀錄年代。在亞洲、拉丁美洲和非洲有許多民族具有食蟲習性，食蟲為民族文化的一環，但歐洲的民族則普遍存在排斥食蟲的觀念。史載紀錄，2200-2500 年前的中國周禮與禮記，已記載周天子會食用蜆醢 (用螞蟻幼蟲製成的螞蟻醬)；在公元 77 年就有學者記載衣索比亞人會採集蝗蟲食用，即便近代仍對食蟲有恐懼感的歐洲人，1740 年林奈 (Carl Linnaeus) 在其動物學講座提到歐洲人食用蜜蜂、大黃蜂和螞蟻 (Svanberg & Berggren 2021)。Madau *et al.* (2020) 統計全球約有 110 多個國家有食蟲紀錄，主要集中在熱帶地區，Jongema (2017) 統計來自 166 篇研究報告和 12 個網站資料，顯示全球至少有 2,051 種可食用昆蟲 (edible insects)、15 種

可食用蜘蛛及其他 45 種可食用的節肢動物。

由於自然環境下，可自然取食昆蟲的野生動物種類很多，人類長期觀察野生動物與半圈養禽畜的自然取食狀況，累積出養殖動物飼料配方的知識經驗，例如世界各地的野貓食用昆蟲比率，約占其食物量的 6% (Veldkamp *et al.* 2012)，野生鳥類和自由放養的家禽均可自然捕食昆蟲的成蟲、幼蟲和蛹 (Zuidhof *et al.* 2003; Sánchez-Muros *et al.* 2014)。

人類食用昆蟲的手段，從早期的野外採集，到後來為了食用、製藥、製絲綢、製膠、作物或衛生害蟲防治等不同目的，逐漸發展出昆蟲野外採集技術、或半馴化生產技術 (例如僅能透過露天栽培目標昆蟲的寄主植物，誘引昆蟲前來繁殖)、或完全馴化生產技術 (完全透過人為飼養技術維持，亦即養殖昆蟲)，Yen (2015) 指出全球食用昆蟲總供應量，有 92% 來自野外採集，6% 來自半馴化生產，其他 2% 才是養殖昆蟲產業的供應量。

以上顯示，未來想要透過昆蟲來補充人類或養殖動物的動物蛋白，以當前養殖昆蟲產業所使用的昆蟲種類及其總供應量 (產能)，尚有很大的開發空間。事實上，以人為大量飼育昆蟲的技術非常複雜，因為昆蟲的飼養環境 (溫度和濕度) 和種群要求均很嚴格，特別是不同昆蟲在部分繁殖期間 (從卵至幼蟲、若蟲或成蟲期) 或完整繁殖期間 (從本世代到下一世代的卵期)，都有不同的飼育條件。

Leppla (2009) 列出 920 種曾被飼育過的昆蟲，依其所屬目級層次 (order category) 與各目物種所占比率來歸類，鱗翅目 (高於 32.6%)、鞘翅目 (高於 21.7%) 與雙翅目 (約 21.7%) 所占比率居多，其次則為半翅目 (低於 10.8%) 與膜翅目 (低於 10.8%)，其他則為直翅目 (蟋蟀和蝗蟲)、脈翅目草蛉、蜚蠊目蟑螂、等翅目白蟻和蚤目的跳蚤。

由上可知曾被飼育過的昆蟲，多為農作物、倉儲、衛生或園藝等農業害蟲和益蟲，其易被飼養的共通特性，包括絕大多數屬於陸生昆蟲 (少數水生者，如蚊類幼蟲)、體型多為小型或中型、食性則以多食性、植

食性與腐食性 (分解者) 居多 (寄生性或肉食性者，多數是為了瞭解其作為生物天敵的應用潛力)、具環境廣適應性與可集約化生產 (生產面積低) 等。同時，飼養昆蟲還需具備專業的昆蟲學知識、科學化分析與知識傳承，才能轉化為可持續性的工業量產技術。以上，可知為何人類自古迄今大規模飼養的昆蟲種類，僅有少數如提供絲綢與食用的家蠶與蜜蜂，以及近十餘年在各大洲普遍運用在養殖漁業與家禽業的麵包蟲與黑水虻。

動物飼料用昆蟲及其產業於歐盟蓬勃發展的緣由

由於世界人口的增長、經濟的發展、更高的消費能力和不斷變化的消費者偏好，預計未來全球農業生產和對食品和畜產品的需求將大幅增加 (Verbeke *et al.* 2015)，預計中國、印度和非洲等發展中國家，未來將以 1.9% 的肉類消費量逐年增長 (Allegretti *et al.* 2018)，如何因應肉類消費所帶來擴增動物飼料消耗所引發的複雜問題，成為全球性的議題。

聯合國糧農組織 (FAO) 和荷蘭 Wageningen University and Research Centre (WUR) 於 2013 年出版「Edible insects: future prospects for food and feed security (食用昆蟲：糧食和飼料安全的未來前景)」，指出 2011 年的世界飼料總產量達 8.7 億公噸，全球商業飼料產值約為 3,500 億美元，其中飼料為畜牧生產最重要的成本，占總成本 70%，這當中又以蛋白質成分的成本最高，並預期至 2050 年飼料總產量必須增加 70% 才能養活全世界，由於動物和魚飼料主要原料為魚粉、魚油、豆粕和其他幾種穀物 (FAO 2013)，截至 2020 年全球飼料的總產量已達 11.88 億公噸，其中最大的增長來自肉雞、豬、水產和寵物飼料 (以歐洲成長最快) 行業 (Alltech 2021)。

對全球動物和魚飼料產業的挑戰，在於豆粕的來源為大豆，大豆作為飼料除與人類糧食競爭，對耕地不足更是雪上加霜，事實上，全球每年所生產的大豆，

有 85% 被加工製成豆餅和豆油，其中又有 97% 用作動物飼料 (Kim *et al.* 2019)；至於魚粉和魚油則為水產飼料的重要蛋白質和脂質來源，對集約養殖的高營養魚種更是重要，全球總漁獲量的 30% 是被轉化為魚粉和魚油，作為動物和魚類飼料 (Ogunji *et al.* 2006)。由於捕撈漁業的過度開發導致魚粉產量已無法支持飼料逐年增幅的需求，造成魚粉成本逐年攀升。值得注意的是，動物飼料成分的價格變化，對畜牧業獲利程度具有關鍵性的影響。

人們越來越關注將傳統人類食物來源轉用於飼料用途，這種因飼養動物造成與人類競爭資源的窘境，目前正透過提高作物產量 (如培育適應性良好的品種) 和改善農場管理 (如更集約化的作物管理)，達到促進全球作物增產目標，另透過水產養殖以解決捕撈漁業過度開發所導致的漁資源不足 (預估 2027 年全球的水產養殖產量，將超越捕撈漁業產量，至 2030 年則占有所有魚類總產量的 52% (OECD/FAO 2021))。

在動物與人類競爭食物過程，上述努力恐怕只是杯水車薪，為了減少環境污染和增加動物福利，並具體實現聯合國擬定的可持續發展目標，促使各國加速研究可取代傳統動物飼料配方的新型替代蛋白質來源，以適度或全面取代動物飼料中的大豆、魚粉與肉粉等。無論是飼養動物或人類可以食用的動植物，其體內所含蛋白質分別被稱為完全蛋白質和不完全蛋白質，此導致當前新型替代蛋白質的研究方向，包括動物源蛋白 (如昆蟲)、植物源蛋白 (如微藻 (microalgae)) 與微生物蛋白質 (microbial proteins) (Kim *et al.* 2019)，然因動物源蛋白所含有的胺基酸組成，更接近人類或人類飼養動物所需，基於動物飼料產業需求，研究上仍以動物替代蛋白最多。昆蟲為地球上物種最多的動物，所具必要胺基酸不亞於傳統牛、豬、雞等食用動物，且飼養過程具高效的飼料換肉率 (feed conversion rate, FCR)、對環境衝擊小的特性，所以被稱之為可持續性的動物蛋白，這也是為何被推薦用於取代傳統魚粉、大豆與肉粉的原因。

儘管歐洲在提供人類消費所需的動物蛋白尚能自

給自足，但其氣候條件並不適合廣泛種植大豆等蛋白質作物 (protein crops)，因此每年需進口 70% 的此類作物用於生產動物飼料，由於飼料成本占動物生產總成本的 50-70%，一旦動物飼料原料價格發生變動，對畜牧業的獲利就會產生重大影響 (Verbeke *et al.* 2015)；學者估計歐盟從南美洲進口 1 公斤乾豆粕，就會產生 11.65 公斤的二氧化碳當量 (Martin 2014; Kim *et al.* 2019)，這是歐洲畜牧業需嚴肅面對的碳足跡議題。歐盟委員會 (the European Commission) 於 2018 年 11 月舉辦為期兩天的研討會，討論歐盟蛋白質供應的未來，除我們熟知的昆蟲蛋白之外，尚討論在歐洲領土內發展高度可持續的豆類種植系統，以降低對美國和巴西生產大豆的過度依賴 (Mancuso *et al.* 2019)。近年歐盟國家有愈來愈多學者投入食用與飼料用昆蟲在動物飼料產業的生命週期評估研究，期待可為畜牧產業降低碳足跡分數。但迄今為止，已報告用於飼料和食品各種食物，在工業規模昆蟲生產上，尚無完整的生命週期評估 (Smetana *et al.* 2016)。

歐洲雖不屬於傳統食用昆蟲的地域，但鑒於氣候變遷勢必造成各國擬定其國內糧食生產和糧食安全等因應政策，預期會引發歐盟社會、經濟和環境的不確定性。基於因應糧食、氣候變遷與環境可持續性的全球尺度問題，歐盟對昆蟲源等新型替代蛋白質的研究，是以支持食用和飼料用昆蟲新興產業為最終目標，因此其研究尺度已細緻到涵蓋科技、法規與政策等各層面，此種發展有別於亞、歐、非與中南美等傳統食用昆蟲國家，這些國家迄今僅具小農生產規模或野外採集販售，缺乏大型企業支持，且絕大多數國家尚缺乏有系統的法規與政策配套作為。

除此，提高蛋白質利用效率，也是歐盟減少飼料蛋白質短缺的另一重要手段，因此歐盟對於昆蟲作為循環農業的生物反應器 (bioreactor)，以及成為可持續性蛋白質來源的研究也相當先進。這些昆蟲可將有機廢物 (如過度浪費的食物、動植物殘渣、動物糞便或農作物副產品等)，轉化為高質量營養物質的能力，也

迅速開啟了創新的循環經濟前景 (Allegretti *et al.* 2018; Chia *et al.* 2019; Pinotti *et al.* 2019) 。黑水虻則為循環農業體系最具代表性的昆蟲物種。在建構完整的食用與飼料用昆蟲新興產業過程，歐盟國家也相當注重生產端、應用端與消費端（農友、企業、民眾）等利害關係人，對產業支持與否的意向調查研究，例如 Bessa *et al.* (2020) 指出儘管昆蟲在人類的未來食物中，可能占有關鍵席位，但必須先克服消費者對昆蟲接受程度的挑戰，分析顯示西方消費者更願意食用經過加工而看不到蟲體的食物，而不是直接食用可見的蟲體，例如歐洲已經販賣含有家蟋蟀 (*Acheta domesticus*)、黃斑黑蟋蟀 (*Gryllus bimaculatus*) 和麵包蟲 (*Tenebrio molitor*) 加工品的漢堡肉餅。Menozzi *et al.* (2021) 指出提供有關昆蟲飼料作為家禽業蛋白質替代品的環境、安全、營養和口味等相關資訊給消費者，可提高消費者接受昆蟲作為飼料的意願，進而促使他們購買這類昆蟲產品。

總結歐盟目前在飼料用昆蟲的發展現況，根據歐盟 2017/893 條例 (Commission Regulation (EU) 2017/893)，允許 7 種昆蟲可作為生產水產養殖動物的複合飼料成分 (components of compound aquafeeds)，包括黑水虻 (BSF) (*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 (*Grylodes sigillatus*) 和牙買加蟋蟀 (*Gryllus assimilis*)，值得注意的是此條例不允許將昆蟲蛋白用於餵食其他動物。至 2021 年 8 月 17 日歐盟 (EU) 2021/1372 條例 (Commission Regulation (EU) 2021/1372)，修訂歐洲議會和理事會關於禁止用來自動物衍生的蛋白質餵養非反芻類養殖動物 (毛皮動物除外) 的附件四。歐盟自上述修法之後，現在已允許將昆蟲源蛋白質作為豬與家禽飼料、寵物食品 (如狗、貓、鳥或爬行動物) 和毛皮動物 (如貂) 的飼料。

昆蟲作為養殖動物飼料或寵物食品的評價

動物源飼料成分含有易於消化的蛋白質，具有高生物價值和胺基酸特徵。昆蟲在營養價值方面具有多種優勢，其蛋白質的胺基酸組成、脂肪以及其他大量和微量的營養素，通常已可滿足與維持動物良好生長和健康所需，已被證明是動物飼料高質量營養素的可持續供應者 (Gasco *et al.* 2020a; Guine *et al.* 2021)。

飼料用昆蟲被運用在養殖動物的方式，包括直接餵食或經過加工產出的昆蟲粉 (insect meal) 餵食，已被運用的目標動物則有水產動物、藥用爬蟲類動物、毛皮動物、單胃養殖動物、家禽類等和寵物 (貓、犬、兔、鳥類、爬蟲類和兩棲類動物等)。

儘管少數學者早在 50 多年前已開始從事昆蟲作為動物潛在食物的研究 (Barroso *et al.* 2014; Van Huis *et al.* 2020)，但直到 FAO (2013) 倡議昆蟲可作為人類或動物的食物以來，全球僅有極少數昆蟲物種之營養價值，曾被學者研究過。相對於全球已被命名的 100 萬種昆蟲 (Stork 2018)，人類大規模飼養的食用和飼料用昆蟲種類不超過 12-13 種 (Maciel-Vergara & Ros 2017)。再以歐盟所核准的 7 種可作為飼料用的昆蟲種數來看，僅達已知昆蟲物種比率 0.0007%，相對於 2,051 種人類可食用昆蟲物種數目來看 (Jongema 2017)，預期還有更多具有潛力的昆蟲物種值得研究。迄今，昆蟲作為動物飼料 (特別是運用在魚、家禽和豬等三類動物) 的可持續原料來源，尤受寵物食品、禽畜與水產飼料生產公司的關注，其中研究與運用最多的物種則為黑水虻、麵包蟲和家蠅 (Sogari *et al.* 2019)。

本報告整理國外已發展的重要或具潛力飼料用昆蟲的營養價值，並擇要提出已應用在養殖動物的試驗或應用實例，作為國內評估不同養殖動物是否有適合種類的飼料用昆蟲。聯合國糧農組織 (FAO) 在 2013 年推動食用與飼料用的初表，是為了生產人口增長所需的動物性替代蛋白。因此，所有當前已提出的動物飼料替代蛋白，無論是昆蟲蛋白、藻類蛋白或新興蛋白，其主要目標是「可持續性的提供，而非完全取代魚粉或豆粕等」，至於需有多少程度的替代比率，需

視目標養殖動物種類與昆蟲種類而定。例如 Barroso *et al.* (2014) 指出以各種昆蟲物種所製成的昆蟲粉，作為鰻鰻鱔 (*Clarias anguillaris*)、尖齒鰻鱔 (*Clarias gariepinus*)、尼羅吳郭魚 (*Oreochromis niloticus*) 與歐洲比目魚 (*Psetta maxima*) 等養殖魚類的替代食物為例，高於 30% 的替代率，就會降低生長，這些變因取決於魚類和昆蟲種類；Dierenfeld and King (2008) 研究顯示黑水虻幼蟲在巨溝蛙 (*Leptodactylus fallax*) 體內的營養消化率很差，除鈉和鉀之外，可透過加工（打成泥）來提高巨溝蛙的消化率，此方法可提供足夠的礦物質而無需額外添加鈣。

飼料用昆蟲的胺基酸、蛋白質、脂肪、幾丁質與微量元素等營養特性簡介

昆蟲通常富含蛋白質（占乾重約 30-68%），並含有動物生存所需的胺基酸種類 (Gasco *et al.* 2020a)；儘管昆蟲的脂肪酸組成變化很大，但仍富含脂質（占乾重約 10-30%），昆蟲也被認為是維生素（尤其是維生素 B12）和生物可利用礦物質（尤其是鐵和鋅）的良好來源 (Gasco *et al.* 2020a; Payne *et al.* 2016)。

雖然昆蟲被認為是許多養殖動物的天然食餌或飼料蛋白質替代來源，但其營養價值卻取決於昆蟲物種（含種內的不同發育期）、取食習性與飼養系統，尤其是昆蟲取食的基質 (substrate) (Veldkamp & Bosch 2015; Pinotti *et al.* 2019; Gasco *et al.* 2020a)，昆蟲的營養成分高度依賴於飼養基質 (Danieli *et al.* 2019)，例如陸生昆蟲含有少量多元不飽和脂肪酸 (Gasco *et al.* 2020a)，透過餵食含有多元不飽和脂肪酸 (polyunsaturated fatty acids, PUFA) 或富含礦物質 (minerals) 的天然基質者，可獲得更適合作為動物飼料用途的昆蟲原料 (Pinotti *et al.* 2019)。因此，飼料用昆蟲本身的營養成分，可根據特定養殖動物的飲食營養需求，透過適當的飲食策略進行調節 (Gasco *et al.* 2020a)，由於飼料用昆蟲無法完全提供目標養殖動物所需的一切營養，可在動物飼料適度補

充合成胺基酸或礦物質，來解決飼料用昆蟲本身所缺乏的某些必需胺基酸或礦物質。

由於動物並無真正的蛋白質需求，動物實際上需要的是胺基酸，蛋白質是由胺基酸組成的，因此可由胺基酸組成，作為定義蛋白質品質的標準，特別是必需胺基酸和非必需胺基酸間的平衡。昆蟲具有優質胺基酸，富含必需胺基酸，而植物源蛋白通常缺乏蛋氨酸 (methionine) 和亮氨酸 (leucine) 這些常見的限制性胺基酸 (Sánchez-Muros *et al.* 2014)；除此，不同物種的昆蟲，其彼此之間的胺基酸組成和含量變化頗大，即便同種昆蟲的不同發育期，體內的胺基酸含量也不同；同時，不同養殖動物對同種或不同種的飼料用昆蟲的利用效率也不同，昆蟲粉替代比率多寡，對目標養殖動物成長與肉類品質，也有不同影響。例如往昔研究資料也顯示家蠅幼蟲，已廣泛運用在水產養殖魚類和甲殼類動物，Makkar *et al.* (2014) 指出家蠅蛹期的賴氨酸 (lysine) 與含硫胺基酸 (sulphur-containing amino acids) 含量，皆略低於幼蟲期；以大豆為基礎的飼料，對斷奶仔豬添加 10% 家蠅幼蟲粉來代替魚粉，結果顯示對體重增加或飼料轉化效率並無負面影響；Newton *et al.* (1997) 發現黑水虻幼蟲粉的胺基酸、脂質和鈣含量，很適合作為成長豬隻飼料的合適替代成分，但飼料中需補充黑水虻幼蟲粉所缺乏的蛋氨酸 + 胱氨酸和蘇氨酸 (threonine)，Newton *et al.* (2005) 以黑水虻預蛹粉 100% 完全取代乾血漿粉，提供早期斷奶豬隻食用，其成長表現較取代乾血漿粉 50% 的組別差；但當黑水虻幼蟲粉以 10-56% 的比例替代大豆和魚粉時，鵝鶉和雞肉具有令人滿意的肉味、香氣和營養成分，證實黑水虻幼蟲粉適合加入家禽飼料之中 (Cullere *et al.* 2018; Onsongo *et al.* 2018)。

往昔昆蟲生理學領域，已有相當多有關昆蟲營養化學成分研究，其中最典型的研究物種為蝗蟲、黑水虻、家蠅、蜜蜂、蚊子、椿象、螢火蟲與家蠶等。至於昆蟲在水產養殖動物和禽畜動物飼料應用的營養價值 (nutritional value) 研究，則集中於近二十年，但

甚少研究評估多種飼料用昆蟲對單一養殖動物其發育狀況的影響。Sánchez-Muros *et al.* (2014) 的報告回顧了許多昆蟲與魚粉的營養價值比較，在此綜整要點如下。(1) 比較 67 種昆蟲和魚粉的粗蛋白 (crude protein, CP) 有 20 種昆蟲與高級魚粉相近 (CP=60-80%)，另有 28 個昆蟲物種其蛋白質比例相近或略高於豆粕 (CP=45-50%)，這些昆蟲當中以鞘翅目的花椰象鼻蟲 (*Metamasius spinolae*) (69.1%) 和北美龍蟲 (*Rhantus atricolor*)、雙翅目的黑腹果蠅 (*Drosophila melanogaster*) (70.1%) 以及直翅目蝗蟲科的黃肚短角蝗 (*Boopedon flaviventris*) (76.0%)、刺喉蝗蟲 (*Melanoplus mexicanus*) (77.1%) 和豔麗錐頭蝗 (*Sphenarium histrio*) (74.8%) 等三種蝗蟲；(2) 家蠶 (*Bombyx mori*)、墨西哥巴基利斯巨緣椿 (*Pachilis gigas*)、兩種椿象 (*Euschistus egglestoni* 和 *Atizies taxcoensis*)、家蠅和水蠅 (*Ephydra hians*) 的蛋氨酸含量高於魚粉，但所有曾被研究的昆蟲物種，其賴氨酸含量均低於魚粉，以上顯示現有已被研究的所有昆蟲物種的胺基酸組成，均未高於優質理想魚粉，儘管家蠶的胺基酸組成最多，仍缺乏組氨酸 (histidine)、賴氨酸和色氨酸 (tryptophan)；(3) 脂肪酸方面，在昆蟲粉中，與植物油一樣，必需脂肪酸的亞油酸 (Linoleic acid, LA, 18:2 n-6) 濃度高於 α -亞麻酸 (18:3 n-3)。然而，魚粉的高度不飽和脂肪酸 (highly unsaturated fatty acid, HUFAS) 含量很高，尤其是 20:5 n3 (EPA) 和 22:6 n3 (DHA)。EPA 和 DHA 在脊椎動物中具有重要的生物學功能，必須在飲食中加入 EPA 和 DHA，尤其是魚類，因為與營養需求相比，其合成速度較低。陸生昆蟲明顯缺乏 20:5 n3 (EPA) 和 22:6 n3 (DHA)，而水生昆蟲中存在 20:5 n3。因此，水生昆蟲被認為是淡水魚脂肪酸的良好來源。

除此，昆蟲的幾丁質 (chitin) 成分是一種粗纖維 (crude fibre)，其含量與昆蟲物種及發育階段有關，多數養殖動物很難消化幾丁質。雖然如此，Esteban *et al.* (2001) 指出將幾丁質加入海魚飼料可提升大西洋

鯛 (*Sparus aurata*) 先天免疫系統 (the innate immune system) 的活性。Kurokawa *et al.* (2004) 研究證實若干海洋肉食性硬骨魚類具有產生內源幾丁質酶的能力。利用昆蟲作為新型的動物飼料添加劑 (feed additives) 也可達到改善養殖動物的腸道健康。此與昆蟲含有月桂酸 (lauric acid)、抗菌肽 (antimicrobial peptides) 和幾丁質等生物活性成分有關 (Chia *et al.* 2019; Gasco *et al.* 2020b)。飼食昆蟲也可提高水產養殖魚類的生長速度和同化效率 (assimilation efficiency) (Kono *et al.* 1987)。

目前對昆蟲營養化學分析研究，絕大多數聚焦在各國傳統的食用或藥用昆蟲。有關昆蟲對養殖動物的營養需求研究，多數集中在歐盟所核准的食用或飼料用昆蟲、或少數待申請評估的昆蟲；較前瞻性的研究相當少，並以水生昆蟲為主，例如挪威國家營養與水產研究所 (National Institute of Nutrition and Seafood Research, NIFES) 研究取食海藻的海帶蠅 (kelp fly, *Coelopa* spp.)，以生產富含 omega-3 脂肪酸的昆蟲產品 (Payne *et al.* 2016)。但自然界尚有數以百萬具有潛力的昆蟲物種，這種數量和多樣性表明在飼料和食品生產鏈中應用昆蟲的複雜性 (Raamsdonk *et al.* 2017)，因為不同物種或同物種的不同發育階段，皆存在不同的營養組成。因此各國在發展適用目標養殖動物的飼料用昆蟲時，可廣泛蒐集與分析往昔報告，基本上同一分類群與取食習性相近的昆蟲，其蛋白質、胺基酸組成與脂肪酸組成相近。

雖然飼料用昆蟲可望取代動物飼料中的部分植物源與動物源蛋白，仍需更多的研究才知道那些昆蟲種類，真正適用於各類養殖動物。另外，為保證提供養殖動物食用的飼料用昆蟲，對食用養殖動物的人類也是安全的，未來有必要針對昆蟲對牲畜毒性作用進行更多研究 (Sánchez-Muros *et al.* 2016)。

全球飼料用昆蟲產業發展現況

為了促進昆蟲作為人類食物和動物飼料，聯合國糧農組織 (FAO) 和荷蘭 Wageningen University

and Research Centre (WUR) 於2014年5月14-17日合作·在荷蘭舉辦第一屆昆蟲飼養世界會議 (The first international conference on insects to feed the world) (Vantomme *et al.* 2014) ·此會議主要討論主軸包括 (1) 從自然中收穫昆蟲；(2) 生產昆蟲作為食物和飼料；(3) 食品安全、立法和政策；(4) 從特定生產系統所生產當作飼料的昆蟲；(5) 營養、加工、消費者態度和美食；(6) 環境問題。此會議目標可作為各國發展食用或飼料昆蟲的重要參考·包括 (1) 提高全球認識昆蟲這類替代食物和動物飼料源料替代來源；(2) 策劃最新技術藍圖並確定關鍵主題的知識差距；(3) 確定發展食用昆蟲和飼料用昆蟲的限制因素；(4) 促進昆蟲價值鏈中利益相關者之間的互動；(5) 在相關合作夥伴之間建立跨學科網絡 (interdisciplinary networks)；(6) 發展有助於分析昆蟲營養組成之標準方法；(7) 促進研擬有關食用和飼料用昆蟲產品之生產和貿易的國際和國家統計數據；(8) 研擬可提升昆蟲作為食物和飼料來源的影響建議。該次會議之後·研究人員和企業家在昆蟲作為食物和飼料的領域取得快速進展·在 2014-2015 年間·至少已有 61 家生產或銷售昆蟲作為食物或飼料的公司 (Dossey *et al.* 2016) ·另 BugBurger 網站 (The Eating insects startups: Here is the list of Entopreneurs around the world! - Bug Burger - äta insekter!) 自 2015 年 10 月 23 日開始·提供全球食用和飼料用昆蟲相關產業、昆蟲養殖產業、研究機構之即時清單·本文第一作者在 2019 年 7 月 20 日與 2021 年 9 月 20 日·查詢該網站所列各類型昆蟲相關公司和研究機構數量·發現這段時間雖值全球 COVID-19 疫情發生·但公司總數目仍呈正成長·由 250 家持續成長至 320 家 (不包括昆蟲行業組織和昆蟲倡導組織) (BugBurger 2021) ·某些新創公司透過募資籌措數百萬美元加入研發或生產行列 (Feed Navigator: www.feednavigator.com) 。

國外生產動物飼料用昆蟲的公司很多·有原來的動物飼料大廠·也有專門生產昆蟲蛋白粉的新創公司·

其中屬於國際大廠的包括荷蘭的 PROTIX、英國的 AgriProtein、法國的 Ynsect 和 INNOVA 等公司。其他尚有美國的 EnviroFlight, LLC、Entomo Farms 和 Beta Hatch、加拿大的 Enterra Feed Corporation、法國的 NextProtein 和 Mutatec、西班牙的 Entomotech、英國的 DeliBugs、愛爾蘭的 Hexafly Biotech、荷蘭的 Kreca Ento-Feed BV、比利時的 Nussect、波蘭的 HiProMine、中國的 Haocheng Mealworms Inc、馬來西亞的 Nutrition Technologies 和 Protenga 以及越南的 Entobel 等公司·預計到 2029 年底·用於動物飼料用的昆蟲產值將擴增為 23.86 億美元 (Guine *et al.* 2021) 。

以上·昆蟲蛋白粉的最大供應市場為寵物食品·其次才是水產飼料市場·估計約數千公噸的昆蟲蛋白已應用於水產飼料·昆蟲蛋白已被證明對魚類具有營養價值。資料顯示歐盟昆蟲年產量約 6000 噸·相當於 2,000-3,000 噸昆蟲源動物加工蛋白 (insect-derived processed animal proteins (PAPs)) (IPIFF 2019; Mancuso *et al.* 2019; Sogari *et al.* 2019; Niyonsaba *et al.* 2021) 。

以目前昆蟲蛋白的價格而言·單憑其優良營養價值·仍不足以廣泛運用。不過·在投資和合作夥伴關係的支持下·昆蟲行業正逐漸擴大規模·生產技術不斷進步並邁向自動化、改善育種技術和法律調適·使得生產效率大幅提升的同時也會促使成本逐漸降低·估計到 2030 年·至少有 50 萬公噸昆蟲蛋白可作為動物飼料和寵物食品·遠高於目前的 1 萬公噸·昆蟲蛋白生產成本於 2030 年將低於魚粉·即便如此·預估屆時昆蟲蛋白總產量仍不足以支持動物飼料所需 (Feed Navigator: www.feednavigator.com) 。

未來展望

他山之石可以攻錯 – 從國外發展飼料用昆蟲產業鏈所遇瓶頸反思

以全球角度而言，歐盟是全球發展食用和飼料用昆蟲研究最為積極的經濟體，涵蓋範圍包括政治、環境生態、社會經濟、社會福利、食品安全、跨域科技、法規等層面。從糧食安全和可持續性的角度來看，發展飼料用昆蟲對各國皆是有利的，昆蟲蛋白是可以填補魚粉與蛋白質作物的缺口，雖然現階段發展過程仍有許多待研究的技術問題，但我們可由歐盟從 2013 年開始發展食用與飼料用昆蟲產業的具體經驗來學習。

最簡單的例子，對農民和企業而言，需要深入瞭解昆蟲生產獲利能力和潛在的經濟數據。如果未獲利或生產法規所未允許的動物飼料，農民和企業都不可能投入生產飼料用昆蟲，銀行也不會提供融資，產業鏈中的所有利害關係人對於投資也會產生猶豫。因此，政府官員和科學家在面對這一個新創產業的同時，需有嚴謹的策略規劃，包括進行產業評估、技術缺口與跨域合作、法規調和、研擬跨域（政治、環境、經濟、科技等）推拉政策工具等。下列僅針對較重要的課題進行分享，但整體的配套作為，仍需由產官學研界齊聚共思，如此才能發展屬於台灣特色的動物替代蛋白新興產業，特別是目前國內已有基本量能的昆蟲源蛋白未來如何運用的問題。

一、選擇適當的本土昆蟲物種與發展自動化飼養系統

選擇發展飼料用的昆蟲種類，需優先考量可兼顧環境生態平衡及飼料昆蟲種類多元化發展，前者主要須採用本土的昆蟲種類，避免外來昆蟲將其原產地的蟲生病原或天敵，帶到新環境，危及產業發展與自然環境生態危機；後者，主要是參考國外不同養殖動物或寵物最適合的飼料用昆蟲種類，並進行不同市場分析，從中尋找同一分類群（例如鞘翅目擬步行蟲科的麵包蟲與外米擬步行蟲；直翅目蟋蟀科；雙翅目家蠅科、麗蠅科、水虻科）的昆蟲物種，並依昆蟲取食與生活習性，設計自動化飼養系統發展。

二、飼料用昆蟲取食的基質

研究顯示昆蟲成為哺乳動物普立昂蛋白載體 (vector of prions) 的可能性，與其飼養基質是否含有普立昂蛋白可依存的物質有關；屬於飼料和食品級材料的商品被認為是安全的，但對動物副產品和人類排泄物則需採取預防性措施；歐盟為此將用於飼養昆蟲的飼料商品 (feed commodities)，分為反芻動物 (ruminant) 和非反芻動物 (non-ruminant) 來源 (EFSA 2015)。歐盟為了避免傳染性海綿狀腦病 (transmissible spongiform encephalopathies, TSE) 透過飼料擴散，禁止使用與反芻類動物有關的廢棄物及動物加工蛋白產品，歐盟規範昆蟲為養殖動物 (farmed animals)，除可提供植物源食物之外，只能餵食歐盟法規 2017/1017 條例所列的動物源飼料，即魚粉、非反芻動物的血液製品、水解蛋白或非反芻動物的明膠和膠原蛋白、雞蛋與膳食產品，且昆蟲不能用糞便、廢物、含有肉、魚的非完美食品 (former foodstuffs) 或源自餐館或餐飲場所的剩餘食物來餵養，歐盟以外的國家在食品安全方面的限制較少 (Pinotti *et al.* 2019; Sogari *et al.* 2019)，不少國家甚至沒有相關法規進行規範。

三、能源消耗與碳足跡分數

相對於大豆與魚粉，目前昆蟲粉的市場相對小很多，很難掌握市場價格，一般公司已習慣根據訂單大小來擬訂供貨價格；以歐盟公司為例，受限於生產過程的法規限制（如飼養昆蟲的基質種類）及目前生產規模不大，其昆蟲源的動物加工蛋白價格每公斤達 2-10 歐元，遠高於歐盟以外國家每公斤 0.8-3.5 歐元的生產價格 (Gasco *et al.* 2020a; Mancuso *et al.* 2019)。其實，昆蟲蛋白的成本，也與生產昆蟲種類所需的技術密切相關，也與歐洲氣候環境有關，例如在歐洲等溫帶國家冬季生產昆蟲，需使用電力維持昆蟲最適發育溫度，昆蟲的蟲生病原控制或環境衛生維護等，都是提高昆蟲養殖的成本 (Finke 2002; van Huis 2013; Guine *et al.* 2021)，例如黑水虻用於生物降解的一個缺點是它需要溫暖的環境，在溫帶氣候下可能

難以維持或需消耗電能才能維持量。台灣屬於亞熱帶和熱帶氣候區之間，生產飼料用昆蟲的能源消耗成本，低於歐盟國家，因此碳足跡分數相對低於歐盟國家。

四、生產規模與智慧財產權

儘管昆蟲作為飼料是大自然的一部分，而且商業昆蟲飼養受到亞熱帶與熱帶氣候條件的國家青睞，但大規模生產需有科學化監管和技術投資來支持，以全球食用與飼料用昆蟲大企業普遍分布於歐美來看，未來亞洲、非洲與美洲等熱帶與亞熱帶國家，可望在技術與法規配套措施成熟之後，成為區域或跨國企業生產昆蟲蛋白的熱區。

在水產、禽畜與寵物飼料產業等大規模供應鏈中，使用昆蟲蛋白質來源成為巨大挑戰，此僅能透過自動化養殖和加工，才能提升產量及其加工產能 (FAO 2013)。由於昆蟲養殖自動化產養技術，牽涉跨學門技術整合，發展過程的研發投資成本過高，因此昆蟲養殖企業通常採取智慧財產權 (intellectual property rights, IPR) 政策來保護 (Gasco *et al.* 2020)。為此，若能以昆蟲學知識為基礎，妥善擘劃農業、食品業、工業技術整合的飼料用昆蟲新產業發展策略藍圖，將是我國發展下一個新興產業的重要契機。

五、法規調和

各國對於昆蟲作為飼料的法規管理做法不同 (Sogari *et al.* 2019)，例如歐盟最新法規除允許昆蟲源動物加工蛋白，可作為水產養殖動物、寵物食品以及豬、家禽和毛皮動物的飼料，但在美國需要特別授權，在加拿大則允許家禽和魚類使用黑水虻產品，在中國大陸或韓國則不需要授權。

飼料用昆蟲於台灣的法源依據則為飼料管理法，對於可當作飼料用昆蟲的種類、提供飼料用昆蟲的食物 (或稱飼料、基質) 種類、取食不同食物來源的飼料用昆蟲用途等，均有基本規範，並依國內外發展現況適度調整，例如「飼料管理法」第三條第一項，在「可供給家畜、家禽、水產動物之飼料」之動物性飼料，

2.9 列出「蠶蛹、蜂蛹、蠅蛆、蚯蚓、麵包蟲、大麥蟲、子子、絲蚯蚓、紅蟲、蝗蟲」、2.10 列出「水虻粉 (限以 1.植物性飼料餵養所長成之蟲體製成者)」。考量黑水虻在處理 (再利用) 廚餘等類物質的效果良好，為配合國家發展循環經濟，調整水虻餵養基質不再僅限於植物性飼料，透過參考先進國家對傳染性海綿狀腦病在家畜動物的傳播風險，對於餵食植物性飼料以外的其他基質的蟲體，限制僅能用於家禽或水產動物。為此，行政院農業委員會於 2021 年 7 月 20 日預告修正「可供給家畜、家禽、水產動物之飼料」第二點，**增列水虻乾**為動物性飼料，並增列水虻乾 (粉) 之水分含量、餵養基質種類及使用於特定動物 (家禽或水產動物) 等條件，以符實際。

由於飼料用昆蟲與昆蟲蛋白產業，對各國而言都是相當新穎性的課題，屬於跨學門與跨部會的新興產業鏈，當中尚有不同主管部門需進行業務分工，或相關法規有待同步調整，茲將台灣已經或即將面臨的重要課題簡列如下，提供相關部會主管機關參考：(1) 昆蟲養殖產業主管機關有待釐清 (楊，2010)；(2) 昆蟲蛋白及昆蟲源相關副產品 (如幾丁質、昆蟲油) 的用途，包括食用 (含人類食品添加劑或食用油)、飼料用、肥料用、生質能油、保健食品、醫療用途 (藥用或傷口敷料) 等，涉及不同主管部門，對生產過程的環境與安全控管程序，可預先思考可能的重複審查問題，以提升產業效能與競爭力；(3) 昆蟲養殖產養規模不一，從單純生產與販售活體、兼具生產與簡單加工 (冷凍乾燥或傳統乾燥)、兼具生產飼料及昆蟲副產品的提取、專門作為肥料等，這當中需考量昆蟲原料的源頭管理 (風險控管)，也就是由不同基質 (如植物性基質、動物性基質、廚餘、動物糞尿) 所飼養出來的昆蟲原料，需有正確的標示；(4) 規劃跨部門討論昆蟲養殖場、昆蟲原料與副產品加工廠、昆蟲肥料工廠的廠址設置、交通運輸與相關主管機關等問題，解決新興或複合產業面臨設廠的土地使用與成本問題；(5) 研擬鼓勵產業自動化的跨領域技術研發、技術整合、品管與創投等配套政策；(6) 參考國外發展經驗與科學報告，針對以

農業廢棄物 (植物性或動物性殘渣)、廚餘、食品加工廢棄物或糞便等有機廢棄物飼養的昆蟲，規範不同基質來源所飼養昆蟲之具體應用範圍，為循環經濟下的昆蟲產業，找出正確的定位。

總結

可供飼料用與食用的昆蟲，基於其具有高營養價值和普遍分布特性，已成為水產、家禽、寵物與毛皮動物的可持續飼料資源。總結當前既有研究結果，證實昆蟲粉可完全或部分取代魚粉和豆粕。鑒於既有作為歐盟及先進國家動物飼料原料的飼料用昆蟲種類有限，且昆蟲的營養價值又與昆蟲種類、棲息地、發育階段、攝食習性以及其他人為提供的基質高度相關，未來唯有開發更多符合不同動物飼料產業與不同養殖需求的飼料用昆蟲種類，才能符合小規模 (家庭式或小型養殖場)、工業規模 (半自動化或自動化養殖場) 養殖動物產業與寵物市場的需求。台灣飼料用昆蟲養殖種類，以麵包蟲、大麥蟲與蟋蟀為主，需求端主要是觀賞魚類、爬蟲與鳥禽等寵物市場，近年興起的黑水虻也有法規規範可以提供的需求端。對台灣而言，如何掌握動物飼料蛋白質原料生產的巨大商機，需在兼顧本土生態與循環經濟的前提下，透過盤點國外飼料用昆蟲的生產與品管技術、經濟、環保與法規等發展重點、產業瓶頸及其解決策略，作為國內技術開發、法規調和與政策整合的參考依據，同時也要思考循環農業體系所生產的昆蟲，其基質有很多是動物糞尿、或具有農藥、抗生素與反芻動物副產品的廚餘或農業廢棄物，此類昆蟲作為肥料利用之外，尚具作為能源與紡織等高經濟價值的原料，通盤思考後，才能建立兼顧經濟競爭力與可持續性發展的昆蟲養殖產業鏈。

參考文獻

楊順堯。2020。昆蟲養殖產業與循環經濟之關聯發展。台灣經濟研究月刊 43: 53-60。

- Allegretti, G., E. Talamini, V. Schmidt, P. C. Bogorni, and E. Ortega. 2018. Insect as feed: An emergy assessment of insect meal as a sustainable protein source for the Brazilian poultry industry. *J. Clean. Prod.* 171: 403-412.
- Alltech. 2021. Global feed survey. [Accessed 2021 Sept 23]. <https://www.porkbusiness.com/news/hog-production/alltech-global-feed-survey-finds-global-feed-production-grew-1-last-year>
- Barroso, F. G., C. de Haro, M. J. Sanchez-Muros, E. Venegas, A. Martinez-Sanchez, and C. Perez-Banon. 2014. The potential of various insect species for use as food for fish. *Aquac.* 422-423:193-201.
- Bessa, L. W., E. Pieterse, J. Marais, and L. C. Hoffman. 2020. Why for feed and not for human consumption? The black soldier fly larvae. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 19:2747-2763.
- Boland, M. J., A. N. Rae, J. M. Vereijken, M. P.M. Meuwissen, A. R. H. Fischer, M. A. J. S. van Boekel, S. M. Rutherford, H. Gruppen, P. J. Moughan, and W. H. Hendriks. 2013. The future supply of animal-derived protein for human consumption. *Trends Food Sci. Technol.* 29:62-73.
- Bosch, G., S. Zhang, D. G. A. B. Oonincx, and W. H. Hendriks. 2014. Protein quality of insects as potential ingredients for dog and cat foods. *J. Nutr. Sci.* 3, e29:1-4.
- Chia, S. Y., C. M. Tanga, J. JA van Loon, and M. Dicke. 2019. Insects for sustainable animal feed: inclusive business models involving smallholder farmers. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 41:23-30.

- Cullere, M., G. Tasoniero, V. Giaccone, G. Acuti, A. Marangon, and A. Dalle Zotte. 2018. Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: meat proximate composition, fatty acid and amino acid profile, oxidative status and sensory traits. *Anim.* 12:640-647.
- Danieli, P. P., C. Lussiana, L. Gasco, A. Amici, and B. Ronchi. 2019. The effects of diet formulation on the yield, proximate composition, and fatty acid profile of the Black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) prepupae intended for animal feed. *Anim.* 9, 178; doi:10.3390/ani9040178
- Dierenfeld, E. S. and J. King. 2008. Digestibility and mineral availability of phoenix worms, *Hermetia illucens*, ingested by mountain chicken frogs, *Leptodactylus fallax*. *J. Herpet. Med. Surg.* 18:100-105.
- Dossey, A. T., J. A. Morales-Ramos, and M. G. Rojas. 2016. Insects as sustainable food ingredients: production, processing and food applications. Academic Press, Cambridge, MA, USA.
- Esteban, M. A., A. J. Cuesta, J. Ortuna, and J. Meseguer. 2001. Immunomodulatory effects of dietary intake of chitin on gilthead seabream (*Sparus aurata* L.) innate immune system. *Fish Shellfish Immunol.* 11:303-315.
- European Food Safety Authority (EFSA). 2015. Scientific opinion on a risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA J.* 13:4257-4317.
- FAO. 2004. Protein Sources for the Animal Feed Industry, FAO Animal Production and Health Proceedings. FAO, Bangkok, April 29-May 3, 2002.
- FAO. 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. FAO Forestry Paper 171, <http://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>
- Finke, M. D. 2002. Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. *Zoo Biol.* 21:269-285.
- Gasco, L., G. Acuti, P. Bani, A. D. Zotte, P. P. Danieli, A. De Angelis, R. Fortina, R. Marino, G. Parisi, G. Piccolo, L. Pinotti, A. Prandini, A. Schiavone, G. Terova, F. Tulli, and A. Roncarati. 2020a. Insect and fish by-products as sustainable alternatives to conventional animal proteins in animal nutrition. *Ital. J. Anim. Sci.* 19:360-372.
- Gasco, L., I. Biancarosa, and N. S. Liland. 2020b. From waste to feed: a review of recent knowledge on insects as producers of protein and fat for animal feeds. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 23:67-69.
- Guine, R. P. F., P. Correia, C. Coelho, and C. A. Costa. 2021. The role of edible insects to mitigate challenges for sustainability. *Open Agric.* 6:24-36.
- Hardy, K., A. Radini, S. Buckley, R. Blasco, L. Copeland, F. Burjachs, J. Girbal, R. Yll, E. Carbonell, and J. M. B. de Castro. 2017. Diet and environment 1.2 million years ago revealed through analysis of dental calculus from Europe' s oldest hominin at Sima del Elefante, Spain. *Sci. Nat.* 104:1-5.
- IPIFF. 2019. The European Insect Sector today: challenges, opportunities and regulatory landscape. IPIFF vision paper on the future of the insect sector towards 2030. [Accessed 2021 Sept. 22]. https://ipiff.org/wp-content/uploads/2019/12/2019IPIFF_VisionPaper_up

dated.pdf

- Jongema, Y.** 2017. Worldwide list of recorded edible insects. The Netherlands, Department of Entomology, Wageningen University & Research.
- Kim, S. W., J. F. Less, L. Wang, T. Yan, V. Kiron, S. J. Kaushik, and X. G. Lei.** 2019. Meeting global feed protein demand: Challenge, opportunity, and strategy. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 7:17.1-17.23.
- Kono, M., T. Matsui, and C. Shimizu.** 1987. Effect of chitin, chitosan, and cellulose as diet supplements on the growth of cultured fish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 53:125- 129.
- Kurokawa, T., S. Uji, and T. Suzuki.** 2004. Molecular cloning of multiple chitinase genes in Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*. *Comp. Biochem. Physiol. B: Biochem. Mol. Biol.* 138:255-264.
- Leppla, N. C.** 2009. Rearing of insects. In: Resh, V.H., Carde, R. (Eds.), *Encyclopedia of Insects*. Academic Press, San Diego, California, pp. 866-869.
- Looy H., F. V. Dunkel, and J. R. Wood.** 2014. How then shall we eat? Insecteating attitudes and sustainable foodways. *Agric. Hum. Values* 31:131-141.
- Maciel-Vergara, G. and V. I. D. Ros.** 2017. Viruses of insects reared for food and feed. *Journal of Invertebr. Pathol.* 147:60-75.
- Madau, F. A., B. Arru, R. Furesi, and P. Pulina.** 2020. Insect farming for feed and food production from a circular business model perspective. *Sustainability* 12, 5418; doi:10.3390/su1213 5418.
- Makkar, H. P. S., G. Tran, V. Heuzé, and P. Ankers.** 2014. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197:1-33.
- Mancuso, T., L. Pippinato, and L. Gasco.** 2019. The European insects sector and its role in the provision of green proteins in feed supply. *Calitatea* 20:374-381.
- Martin, N.** 2014. What is the way forward for protein supply? The European perspective. *OCL* 21: D403.
- Menzio, D., G. Sogari, C. Mora, M. Gariglio, L. Gasco, and A. Schiavone.** 2021. Insects as feed for animal poultry: Are Italian consumers ready to embrace this innovation? *Insects* 12, 435. <https://doi.org/10.3390/insects12050435>
- Mungkung, R., J. Aubin, T. H. Prihadi, J. Slembrouck, H. M. G. van der Werf, and M. Legendre.** 2013. Life Cycle Assessment for environmentally sustainable aquaculture management: a case study of combined aquaculture systems for carp and tilapia. *J. Clean. Prod.* 57:249-256.
- Nakagaki, B. J. and G. R. DeFoliart.** 1991. Comparison of diets for mass-rearing *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae) as a novelty food, and the comparison of food conversion efficiency with values reported for livestock. *J. Econ. Entomol.* 84:891-896.
- Newton, L., C. Sheppard, D. W. Watson, G. Burtle, and R. Dove.** 2005. Using the black soldier fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. In: Report for Mike Williams, Director of the Animal and Poultry Waste Management Center. North Carolina State University.
- Newton, G. L., C. V. Booram, R. W. Barker, and O.**

- M. Hale.** 1977. Dried *Hermetia illucens* larvae meal as a supplement for swine. *J. Anim. Sci.* 44:395-400.
- Niyonsaba, H. H., J. Höhler, J. Kooistra, H. J. Van der Fels-Klerx, and M. P. M. Meuwissen.** 2021. Profitability of insect farms. *J. Insects Food Feed* 7:923-934.
- OECD/FAO.** 2021. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/19428846-en>.
- Ogunji, J. O., W. Kloas, M. Wirth, C. Schulz, and B. Rennert.** 2006. Housefly maggot meal (maggot meal): An emerging substitute of fishmeal in Tilapia diets. Conference on International Agricultural Research for Development; Deutscher Tropentag, Bonn, Germany.
- Onsongo, V. O., I. M. Osuga, C. K. Gachuri, A. M. Wachira, D. M. Miano, C. M. Tanga, S. Ekesi, D. Nakimbugwe, and K. K. M. Fiaboe.** 2018. Insects for income generation through animal feed: effect of dietary replacement of soybean and fish meal with black soldier fly meal on broiler growth and economic performance. *J. Econ. Entomol.* 111:1966-1973.
- Payne, C. L. R., D. Dobermann, A. Forkes, J. House, J. Josephs, A. McBride, A. Müller, R. S. Quilliam, and S. Soares.** 2016. Insects as food and feed: European perspectives on recent research and future priorities. *J. Insects Food Feed* 2:269-276.
- Pinotti, L., C. Giromini, M. Ottoboni, M. Tretola, and D. Marchis.** 2019. Review: Insects and former foodstuffs for upgrading food waste biomasses/streams to feed ingredients for farm animals. *Animal* 13:1365-1375.
- Population.** Population: the numbers. In: **Population Matters | Every Choice Counts | Sustainable World Population.** 2020. <https://populationmatters.org/the-facts/the-numbers>. Accessed 2 September 2021.
- Raamsdonk, L. W. D., Van, H. J., Van der Fels-Klerx, and J. de Jong.** 2017. New feed ingredients: the insect opportunity. *Food Addit. Contam. Part A* 34:1384-1397.
- Ramos-Elorduy, J.** 2008. Energy supplied by edible insects from Mexico and their nutritional and ecological importance. *Ecol. Food Nutr.* 47:280-297.
- Rumpold, B. A. and O. K. Schlüter.** 2013. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Mol. Nutr. Food Res.* 57:802-823.
- Sánchez-Muros, M. J., F. G. Barroso, and F. Manzano-Agugliaro.** 2014. Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. *J. Clean. Prod.* 65:16-27.
- Sánchez-Muros, M. J., F. G. Barroso, and C. de Haro.** 2016. Brief summary of insect usage as an industrial animal feed/feed ingredient. p. 273-309. *in*: Insects as sustainable food ingredients: Production, processing and food applications. (Dossey, A. T., J. A. Morales-Ramos, and M. G. Rojas, eds.) Academic Press. 402 pp.
- Smetana, S., M. Palanisamy, A. Mathys, and V. Heinz.** 2016. Sustainability of insect use for feed and food: Life cycle assessment perspective. *J. Clean. Prod.* 137:741-751.
- Sogari G, M. Amato, I. Biasato, S. Chiesa, and L.**

- Gasco.** 2019. The potential role of insects as feed: a multi-perspective review. *Anim.* 9, 119; doi:10.3390/ani9040119
- Stork, N. E.** 2018. How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on earth? *Annu. Rev. Entomol.* 63:31-45.
- Svanberg, I. and A. Berggren.** 2021. Insects as past and future food in entomophobic Europe. *Food Cult. Soc.* DOI:10.1080/15528014.2021.1882170
- Van Huis, A.** 2013. Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annu. Rev. Entomol.* 58:563-583.
- Van Huis, A. and D. G. A. B. Oonincx.** 2017. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 37: 43. DOI 10.1007/s13593-017-0452-8.
- Van Huis, A.** 2020. Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review. *J. Insects Food Feed* 6:27-44.
- Vantomme, P., C. Munke, A. van Huis, J. van Itterbeeck, and A. Hakman.** 2014. Insects to feed the world conference - summary report. FAO and WUR Press, Wageningen, The Netherlands. 13 pp.
- Veldkamp T., G. van Duinkerken, and A. van Huis.** 2012. Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets: a feasibility study. Lelystad, The Netherlands: Wageningen UR Livestock Research.
- Verbeke, W., T. Spranghers, P. De Clercq, S. De Smetc, B. Sas, and M. Eeckhout.** 2015. Insects in animal feed: Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sector stakeholders and citizens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 204:72-87.
- Wilson, E. O.** 1999. The diversity of life. W. W. Norton & Company Ltd. Press, New York & London. 424 pp.
- Yen, A. L.** 2015. Insects as food and feed in the Asia Pacific region: Current perspectives and future directions. *J. Insects Food Feed* 1:33-55.
- Zuidhof, M. J., C. L. Molnar, F. M. Morley, T. L. Wray, F. E. Robinson, B. A. Khan, L. Al-Ani, and L. A. Goonewardene.** 2003. Nutritive value of house fly (*Musca domestica*) larvae as a feed supplement for turkey poult. *Anim. Feed Sci. Technol.* 105:225-230.

Current Status and Future Prospects of the Global Industry of Insects as Animal Feed Ingredients

Hsien-Tzung Shih^{1,*}, Tai-Chuan Wang¹, Shu-Chen Chang¹, Chi-Yang Lee¹,
Me-Chi Yao¹, Chang-Tsern Chen², Shu-Peu Chen¹, and Chien-Chung Chen³

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

² Technical Service Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

³ Former Research Fellow and Director, Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC.

Abstract

Globally, there is an urgently need to find alternatives to conventional meat products, following population growth, consumers' environmental awareness rise, and limited agricultural land. Since livestock production is the primary cause of climate warming, the process of producing or providing animal and plant-derived protein components for animal feed is considered to cause land occupation, primary production utilization, acidification, climate change, energy utilization, water dependence and the lack of fish resources. These effects were mainly related to the production of fishmeal, protein crops, and electricity production for feed processing. It is necessary to find more sustainable diets to solve this problem, including reducing meat consumption, reducing food waste, or using alternative protein sources. Insects are being promoted as human food and animal feed worldwide. The production cost of insect protein will be lower than that of fish meal in 2030. The European Union will become a major hub for global insect protein production technology and industrial maturity by then. Even so, it is estimated that the output will not be enough to support animal feed. At present, the European Union has completed several life cycle assessment studies for the animal feed industry with different insect proteins as a substitute for fish meals and soybean meal. It is expected that it can reduce the carbon footprint of the animal husbandry industry. This review focuses on the crucial response strategies adopted by the global animal farming industry in the face of the increasing shortage of conventional feed protein ingredients. It reviews important researches on replacing proteins with insect sources, including the species and characteristics of insects that humans have eaten in the past, animal feed, the reasons for the vigorous development of insects and their industries in the European Union, the potential of various

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

insects as feed for farmed animals, the current development and bottlenecks of the insect industry for animal feed, and future prospects. The insect protein industry is a novel and sustainable emerging industry. Reviewing the development status of foreign countries is expected to provide relevant topics that need attention in the development of this industry in Taiwan.

Keywords: Insect protein, Animal feed, Fish meals, Insect industry for animal feed, Carbon footprint.