

咖啡果小蠹 (*Hypothenemus hampei*) 整合性蟲害管理 (IPM) 綜論

陳柏宏¹、倪蕙芳^{2,*}

¹ 農委會農業試驗所嘉義農業試驗分所植物保護系助理研究員。臺灣 嘉義市。

² 農委會農業試驗所嘉義農業試驗分所植物保護系副研究員兼系主任。臺灣 嘉義市。

* 聯絡作者，E-mail: hfni@tari.gov.tw

摘要

陳柏宏、倪蕙芳。2023。咖啡果小蠹 (*Hypothenemus hampei*) 整合性蟲害管理 (IPM) 綜論。植物醫學65(1): 9-20。

咖啡果小蠹 [*Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867)] (鞘翅目：象鼻蟲科) 為極具破壞性之咖啡害蟲，全球咖啡產區多有分布，在臺灣於2007年首次發現其蹤跡。由於幼蟲、成蟲皆會蛀食咖啡果實，對咖啡產量及品質影響甚大。目前夏威夷及某些中南美洲咖啡產區皆致力推行整合性蟲害管理策略 (IPM)，以有效控制此蟲害發生。該策略係結合多種防治技術 (如耕作防治、生物防治及化學防治)，並設立蟲害監測方式與防治基準以作為決策依據。為提升我國咖啡農戶於此害蟲之防治成效並守護臺灣咖啡品質，本文回顧國內、外於咖啡果小蠹之蟲害管理相關研究報告，以作為臺灣咖啡產業及相關研究人員於蟲害防治上之參考。

關鍵詞：咖啡果小蠹、整合性蟲害管理 (IPM)、咖啡

緒言

咖啡果小蠹 [*Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867)] (鞘翅目：象鼻蟲科) 堪稱全球最為關鍵的咖啡害蟲，幼蟲與成蟲皆會蛀食咖啡果實，對咖啡產量及品質影響甚鉅^(30, 49)。此蟲原生於非洲原始森林⁽⁹⁴⁾，因咖啡產業蓬勃發展，而透過咖啡生豆或植株貿易等途徑擴散至各地咖啡產區⁽⁴⁹⁾。近十幾年來，仍持續有咖啡果小蠹新入侵紀錄之報導，如於2007年入侵波多黎各 (Puerto Rico)⁽⁵⁹⁾ 與臺灣 (Taiwan)⁽¹²⁾、於2010年入侵夏威夷 (Hawaii)⁽¹⁸⁾、於2017年入侵巴布亞紐幾內亞 (Papua New Guinea)⁽²⁷⁾，及於2019年入侵中國 (China)⁽⁸⁴⁾等地，迄今除了澳洲 (Australia)、尼泊爾 (Nepal) 等少數國家外，幾乎所有咖啡

產區皆可見其蹤跡⁽⁴⁹⁾。咖啡果小蠹被視為咖啡重要的生產限制因子，CABI Bioscience學者P. Baker曾推估此害蟲可造成全球經濟損失逾5億美元/年⁽⁸⁸⁾，例如咖啡果小蠹在巴西 (Brazil) 即曾導致咖啡產業年損2.15 - 3.58億美元⁽⁶⁹⁾，而在入侵夏威夷初期 (2011 - 2013年) 亦造成當地每年1 - 1.6千萬美元損失⁽⁵³⁾，又例如印尼 (Indonesia) 曾因此蟲害致使咖啡減產約10%，損失估計達670萬美元⁽¹⁰¹⁾，故此害蟲對各國咖啡產業的破壞性可見一斑。

近年來，臺灣咖啡飲用文化興盛，國產咖啡產量從而提升，國內咖啡栽培面積於2020年達1,153 ha，相較10年前已增加1.5倍 (農糧署統計資料，<https://agrstat.coa.gov.tw/sdweb/public/inquiry/InquireAdvance.aspx>)。然而，如同夏威夷、波多黎各等先例，自2007年咖啡果小蠹立足於臺灣後，造成本土咖啡栽培產業逐漸面臨嚴重的蟲害危機，許多咖啡園受到咖啡果小蠹危害導致產量銳減，甚至因而棄收。借鏡國外經驗，目前在夏威夷、中南美洲咖啡產區皆已導入整合性蟲害管理 (integrated pest management; IPM) 於咖啡果小蠹防治，此係結合多項防治技術 (耕作防治、生物防治、化學防治等)，並搭配蟲害監測、成本考量以調整防治作為之蟲害管理策略^(4, 5, 9, 50, 68)。故本文回顧國內、外有關咖啡果小蠹蟲害管理技術 (監測與防治基準、耕作防治、生物防治、化學防治與誘引等) 之研究，供作臺灣咖啡產業及相關研究人員在蟲害防治上之參考。

咖啡果小蠹的生物學

咖啡果小蠹以阿拉比卡咖啡 (*Coffea arabica* L.) 及羅布斯塔咖啡 (*C. canephora* Pierre ex Froehner) 為主要寄主^(89, 94, 95)。該蟲體型細小，屬雌雄異型 (sexual dimorphism)，雌成蟲 (以下簡稱雌蟲) 體長1.6 - 1.9 mm (圖一A)，雄成蟲 (以下簡稱雄蟲) 體

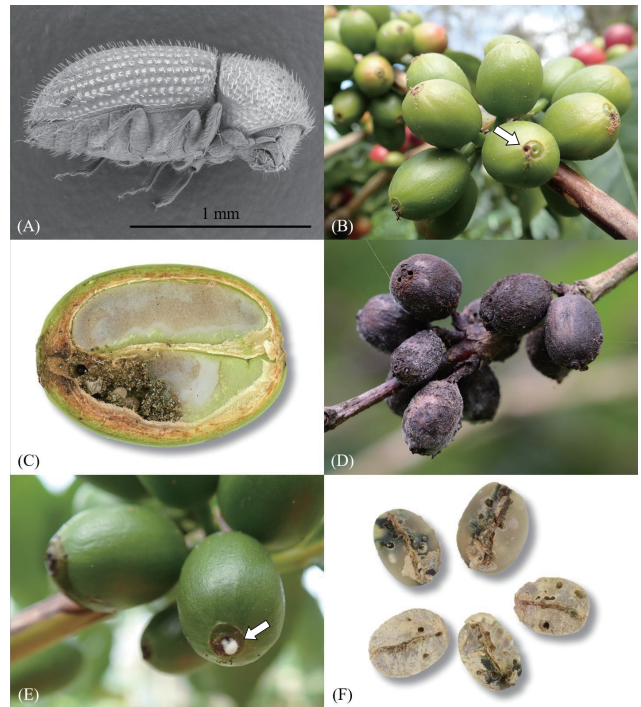
型則略小於雌蟲 (僅0.99 - 1.3 mm)⁽³⁹⁾，且複眼退化僅具感光能力⁽⁹²⁾，後翅亦萎縮而無法飛行⁽⁹³⁾，因此雄蟲一生不會離開咖啡果實⁽⁹⁰⁾。咖啡果小蠹的整個生活史包含卵期、幼蟲期 (共兩齡期)、蛹期及成蟲期⁽³⁹⁾，皆於咖啡果實內完成，雌蟲於果實內交尾後，會伺機找尋其它可供產卵的咖啡果實，而無論未熟果 (green berry) 或成熟果皆是其危害對象^(30, 90) (圖一B)。雌蟲通常待果實乾物重高於20%時 (約開花後120 - 150日)，方於胚乳 (即咖啡豆) 內鑽蛀隧道並產卵^(11, 78)，孵化後的幼蟲即以胚乳為食 (圖一C)。雌蟲產卵數量變異頗大，卵數自數十顆至數百顆皆有紀錄^(11, 78, 90)，按Jaramillo *et al.*⁽⁴³⁾於室內之觀察，單隻雌蟲平均產卵數可達287.7顆，另依據Jaramillo *et al.*⁽⁴⁶⁾於不同定溫下的飼養紀錄，以20°C下的產卵量最高 (296.9顆)，而30°C下的產卵數僅有64.3顆。咖啡果小蠹的雌雄蟲性比 (sex ratio) 以雌蟲遠多於雄蟲，多介於5.25:1至13:1之間^(26, 43, 46, 90)，且雌雄性比亦會受到環境、共生菌等因子影響^(58, 60)。咖啡果小蠹發育所需時間及壽命受溫度影響，一般自卵至成蟲的發育時間約耗費3 - 7週^(10, 11, 46, 58, 78)。此外，在高於35°C或低於15°C的定溫環境下，咖啡果小蠹無法順利完成發育與繁衍^(10, 46)。咖啡果小蠹成蟲壽命以雌蟲顯著較長，若環境條件許可，雌蟲壽命可長達2 - 4個月，或更長時間⁽⁹⁰⁾，據Constantino *et al.*⁽²⁸⁾的文獻指出，雌蟲於自然環境下可存活140日。

監測與防治基準

咖啡果小蠹於田間危害程度之判別，大多依據咖啡果實蟲蛀比例 (稱蟲蛀率或危害率) 及雌蟲危害進程，抑或監測雌蟲飛行活躍度 (flight activity；即陷阱誘捕雌蟲數) 作為量化指標^(21, 38, 50, 71)。為提升蟲害監測效率，哥倫比亞的國家咖啡研究中心 (Centro Nacional de Investigaciones de Café; Cenicafe) 創建一套標準取樣方法 (俗稱30棵樹/枝條取樣法) 供當地農戶依循，此法係於每公頃咖啡園 (約5,000棵樹) 隨機挑選30棵咖啡樹，每棵樹擇1枝條，每枝條需含有45顆以上的未熟果，最後計算遭受咖啡果小蠹鑽蛀之未熟果數量，並換算為蟲蛀率^(21, 24)。

$$\text{蟲蛀率 (\%)} = \frac{\text{蟲蛀果數量}}{\text{未熟果數量}} \times 100\%$$

同時，每枝條隨機選取3 - 4顆蟲蛀果 (共計約100顆)，並將果實剖開以調查雌蟲危害進程。Cenicafe將雌蟲危害進程區分為A - D共4個階段，分別為：(A) 雌蟲正鑽蛀果實，但蟲體未完全沒入果實內；(B) 雌蟲蛀入果實，但尚未危害至胚乳；(C) 雌蟲已開始蛀食胚乳；(D) 雌蟲已於胚乳中產下子代。當於A/B階段時，因雌蟲仍位於蛀孔附近，而較易接觸藥劑，且胚乳亦未遭受危害，因此為合適的施藥時機；反之，若雌蟲於C/D階段，則藥劑難以有效觸及蟲體，故防治效果不彰^(21, 25)。



圖一、(A) 咖啡果小蠹雌蟲 (B) 咖啡果小蠹於咖啡果實之蛀孔 (C) 咖啡果小蠹幼蟲及成蟲於蟲蛀果內部 (D) 樹上咖啡乾果 (E) 田間白僵菌自然感染咖啡果小蠹 (F) 蟲蛀咖啡豆。

Fig. 1. (A) CBB adult female (B) small holes bored in green berries by CBB (C) larvae and adult of CBB inside the berry (D) insect damage beans (E) natural infestation of *B. bassiana* on CBB (F) raisin on the coffee trees.

透過上述取樣方法及兩項指標 (蟲蛀率及雌蟲危害進程)，咖啡農戶即可掌握咖啡園內之蟲害程度⁽²¹⁾。此方法廣為中南美洲咖啡產區使用，亦經改良後引進至夏威夷^(4, 5, 9, 50)。不少研究仍持續精進此取樣方法，試圖使之更加便捷、精確^(8, 74, 75, 86)。如Pulakatu-thodi *et al.*⁽⁷⁴⁾建議可減少果實取樣數量，若每棵樹僅調查每枝條上3簇 (cluster) 或5簇咖啡果實，並不會影響取樣精準度；而Pulakatu-thodi *et al.*⁽⁷⁵⁾及Aristizábal *et al.*⁽⁸⁾經由模型分析，認為取樣上應導入逐次取樣法 (sequential sampling)，以視害蟲分布改變取樣數量，使取樣結果更為準確，亦能達到節省工時之目的。除此之外，亦有學者認為雌蟲飛行活躍度可作為判斷田間蟲害程度之依據，該些研究顯示陷阱所誘捕雌蟲數量與果實蟲蛀率呈線性正相關性^(38, 71)。

咖啡果小蠹防治基準應參考經濟閾值 (economic threshold; ET) 及經濟危害水準 (economic injured level; EIL)，制定上牽涉蟲害管理成本、商品價格、蟲害程度等多項因素^(21, 38, 40, 99, 102)。於哥倫比亞，若咖啡果小蠹蟲蛀率 > 5%，將造成經濟損失，故建議當蟲蛀率 > 2%，且雌蟲位於A/B階段之比例 > 50%，則應於3日內立即施藥防治^(4, 21)。於夏威夷，Kawabata *et al.*⁽⁵⁰⁾將蟲蛀率及雌蟲於A/B階段比例 (僅計算存活個體) 之二維表供農戶參考，原則上建議危害初期 (大致於蟲蛀率 < 5%及A/B階段比

例 > 25%) 為防治最佳時機。Hollingsworth *et al.*⁽⁴⁰⁾ 參照前人研究，將微生物製劑及其它防治資材施用時機訂定為，蟲蛀率 ≥ 3% 且雌蟲於A/B階段比例 ≥ 25%，該研究顯示於此基準下可更具效益的管理害蟲。另一方面，基於咖啡果小蠹雌蟲飛行活動與果實蟲蛀率之正相關性，Fernandes *et al.*⁽³⁸⁾ 將誘捕雌蟲數作為防治指標以供巴西咖啡農戶參考，於花期 (flowering stage)、幼果期 (pinhead fruit stage) 及果實成熟期 (ripening fruit stage) 之經濟危害水準分別為每誘殺器426隻、85隻及28隻。

耕作防治

各項耕作防治技術中，田間衛生 (sanitation) 為咖啡果小蠹整合管理最重要的防治措施，係藉由清除孳生源 (慣稱清園) 以減少害蟲族群密度之手段^(5, 6, 29, 50)，此法普遍施行於夏威夷、中南美洲等咖啡產區^(3, 5, 68, 90)，對於許多資源較為匱乏的非洲國家而言，更是主要仰仗之防治技術⁽⁵²⁾。由於咖啡果小蠹多藏匿於咖啡果實內，無論過熟果 (overripe berry) 或是乾果 (dry berry; raisin) (圖一D) 皆可為雌蟲繁殖、棲息處，即便地上落果亦會孳生大量害蟲^(48, 72)。因此，田間衛生執行上除須留意枝條上過熟果及乾果，樹下落果亦要加以移除，另適時修剪及鄰田咖啡植株妥善管理亦是考量範疇。

採收及清園

咖啡果小蠹多數時期藏匿於咖啡果實內，因此採收 (harvest) 咖啡的同時，亦兼具移除二次感染源之清園目的⁽⁴⁸⁾。自咖啡果小蠹入侵後，夏威夷、哥倫比亞等咖啡產區皆開始正視清園對蟲害管理之重要性，許多學者建議農戶應於咖啡產季末全面性移除枝條上任何未熟果、成熟果及乾果^(5, 21, 50)。於哥倫比亞，Bustillo *et al.*⁽²¹⁾ 認為確實地採摘咖啡果實 (包含過熟果及乾果) 可減少田間80%以上的咖啡果小蠹族群數量。Benavides *et al.*⁽¹⁴⁾ 田間試驗顯示，若定期清除樹上殘果 (2 - 3週1次)，則園內樹上果實及帶殼生豆 (parchment coffee) 之咖啡果小蠹蟲蛀率 (分別為3.6%及8.4%) 明顯低於僅施行化學防治園區 (11.4%及16.4%)。相同地，Aristizábal *et al.*⁽⁶⁾ 在不採用其它防治方法的情況下，僅定期落實清園管理 (年平均每棵樹殘果為6.2顆)，可將園內咖啡未熟果及帶殼生豆之平均蟲蛀率分別降至2.3%及1.5%。

清園確實與否決定咖啡果小蠹防治成效，Bustillo *et al.*⁽²¹⁾ 認為當咖啡園為輕、中度危害時 (咖啡果小蠹蟲蛀率 < 5%)，可依據咖啡收穫後平均每棵樹上殘留果實數量，將清園效率率化為「優」(≤ 5顆果實)、「良」(6 - 10顆果實) 及「差」(> 10顆) 三個等級。按此分級方式，依Aristizábal *et al.*⁽⁶⁾ 在哥倫比亞於2003年之調查，513位咖啡農戶中，雖有94.3%以上的農戶施

行清園，但僅45.2%農戶的清園效率達到「優」。在夏威夷於2016年的調查，照當地農戶收穫方式，咖啡採收後平均每棵樹上仍有13.9顆掛果，清園效率達到「優」或「良」的農場僅占30.3%⁽⁹⁾。另一方面，清園時間點亦是關鍵，於夏威夷的研究指出，若即早於12月初清除樹上所有果實，可大幅減少翌年咖啡果小蠹數量，反之若遲於1月底方著手清園，則園內雌蟲密度仍會高達 > 100隻/誘引器/天⁽⁹⁾。

地上落果為清園的標之一，除了地面上已受蟲蛀的咖啡果實之外，未受蟲蛀的落果亦可能遭咖啡果小蠹危害而成孳生源^(28, 72)。Pereira *et al.*⁽⁷²⁾ 於巴西的研究指出，咖啡落果中所羽化的蟲數顯著較多，因此該篇作者強調清除田間落果的重要性。然而，Mendesil *et al.*⁽⁶³⁾ 等學者則有不一樣的發現^(48, 59)，該些報告顯示落果內的蟲數通常較樹上乾果為少，推測此係由於咖啡果實一旦掉落於地面，則較難被雌蟲覓得⁽³⁵⁾ 且容易腐爛⁽⁷⁸⁾，故落果受蟲蛀的比例相對較低^(33, 48, 72)，又因落果內的咖啡果小蠹容易受到地面環境 (如雨水) 與天敵影響，死亡率往往較高^(44, 48)。儘管如此，Johnson *et al.*⁽⁴⁸⁾ 於夏威夷的調查所示，一旦咖啡園區內殘留過多落果 (131顆/m²)，每公頃仍估計可孳生14.3 - 23.7萬隻咖啡果小蠹 (占翌年孳生蟲源之49.5%)，又因雌蟲藏匿於落果中的時間相當長 (可達140日)⁽²⁸⁾，因此仍需考量落果對於蟲害發生的影響。在許多中南美洲咖啡產區，清園標的除了為枝條上的果實，亦涵蓋地面落果⁽⁴²⁾；但於夏威夷、波多黎各等人力資源不足、成本較高的區域，則較少落實園內落果之清除^(9, 48, 59)。目前夏威夷在咖啡果小蠹整合管理方針上，仍僅針對樹上果實進行清園式採收 (此採收方式稱作 'strip-picking')，但仍建議農戶於採收、修枝時避免果實落於地面⁽⁵⁰⁾。

修剪

適當地修剪咖啡植株，可更新枝條並提升咖啡產量^(5, 34)。然而，修剪方式對於咖啡果小蠹之蟲害發生亦具影響^(9, 22)。於哥倫比亞，慣用的修剪法稱作「zoqueo」，係於咖啡生產5 - 6年後，整園區進行大規模修剪 (植株回剪至離地約30 cm)，修剪後通常需耗費1年以上產量方會恢復正常^(4, 5)。由於當地農戶大多不會移除修剪下的廢棄枝條，因此枝條上夾帶的咖啡果實會成為咖啡果小蠹滋生源，進而影響鄰近園區，估計每公頃可孳生數百萬隻雌蟲⁽²²⁾。為解決此問題，Aristizábal *et al.*⁽⁴⁾ 建議於園區周遭與中央區域預留少部分咖啡樹不做修剪以作陷阱植株，並針對陷阱植株施用蟲生真菌 (entomopathogenic fungi)；抑或是於大規模修剪後，執行1次以上清園，以移除園內殘留的咖啡果實。

在夏威夷，為使咖啡樹可穩定生產，當地慣用「Kona style」與「Beaumont-Fukunaga」等修剪法。「Kona style」修剪法為每棵樹並存不同年生的直立枝 (vertical branch)，而「Beaumont-Fukunaga」修剪法於操作上，則為整排 (row) 咖啡

12 J. Plant Med.

樹同時修剪，並每年輪替修剪鄰近之3-5排植株，故同排植株直立梢皆屬同年生，而鄰排植株直立梢之生長年分則不同⁽¹⁵⁾。「Beaumont-Fukunaga」修剪法雖便利而廣受當地使用，但同區塊 (block) 內若交錯不同時期修剪之咖啡樹，將會影響田間蟲害管理效率，而加劇咖啡果小蠹危害^(5, 50)。Kawabata *et al.*⁽⁵⁰⁾建議避免以排為單位進行修剪，而應改由每區塊輪流更新枝條，藉此減少害蟲食物來源及棲息處，同時亦可提高採收、施藥效率。Aristizábal *et al.*⁽⁹⁾比較區塊式與「Beaumont-Fukunaga」單排式修剪下的蟲害狀況，該研究顯示區塊式修剪園區之生豆蟲蛀率為3.9%，顯著低於單排式修剪園區的生豆蟲蛀率 (10.2-10.6%)。但即便同一園區內交錯不同時期修剪之咖啡植株，若管理者於修剪後落實清園 (移除修剪枝條及清園式採收)，則可避免蟲害嚴重發生⁽³⁴⁾。

野生或未經管理之咖啡樹

近年較多研究認為咖啡果小蠹為單食性 (monophagous) 昆蟲，於田間僅能以咖啡屬 (*Coffea*) 植物種子完成整個生活史^(89, 90, 94)。由於目前尚未在咖啡屬外的植物中發現大量咖啡果小蠹個體，多數寄生紀錄僅可能為偶發性危害，又或是鑑定謬誤所致；因此，在田間與野外仍以咖啡為此害蟲最重要的寄主植物^(90, 94, 95)。基於此，田間衛生執行上，亦應注意鄰近園區野生或未經管理之咖啡樹^(47, 50)。Johnson & Manoukis⁽⁴⁷⁾調查管理良好園區 (well-managed farm)、管理不佳園區 (poorly managed farm)、廢耕園區 (abandoned farm) 及野生植株 (feral coffee) 共4種栽培環境下咖啡樹產量及蟲害發生情形，雖然以管理良好園區及管理不佳園區內咖啡產量顯著較高，但由於管理不佳園區內未定期清園，反而提供咖啡果小蠹更多孳生源，故該類型咖啡園之果實蟲蛀率為4者中最高，且園內誘捕蟲數顯著多於廢耕園區及野生環境。為減少咖啡果小蠹自鄰田侵染，Johnson & Manoukis⁽⁴⁷⁾建議可於園區周遭栽植圍籬作物 (border crop) 或架設防護網，以阻絕咖啡果小蠹入侵。

生物防治—白殭菌之應用

目前已知數種實際運用於防治咖啡果小蠹或具潛力之天敵種類，包含微生物、捕食性或寄生性昆蟲，以及鳥類^(19, 30, 37, 42, 54, 90, 91)。根據Escobar-Ramírez *et al.*⁽³⁷⁾針對1990-2017年有關咖啡果小蠹生物防治案例之系統性分析，具田間應用實績之大宗為真菌性蟲生病原-白殭菌 [*Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin] 及黑殭菌 [*Metarhizium anisopliae* (Metchnikoff) Sorokin]。考量防治效果、便利性及相容性等因素，蟲生病原當中以白殭菌最被廣泛使用；事實上，在夏威夷及中南美洲各國，白殭菌已被納為咖啡果小蠹整合管理之重要防治資材^(9, 13, 50, 104)。

白殭菌屬蟲草菌科 (Cordycipitaceae) 之蟲生真菌，寄生種類涵蓋700種以上之昆蟲綱 (Insecta) 及蜱蟎亞綱 (Acari) 節

肢動物⁽¹⁰⁵⁾。許多咖啡園內皆可發現田間自然發生之白殭菌 (圖一E)，據Vega *et al.*⁽⁹⁰⁾所彙整各地曾記錄之白殭菌於咖啡果小蠹的最高自然感染率，在喀麥隆 (Cameroon) 為71%、在剛果民主共和國 (Democratic Republic of the Congo) 為63%、在印度 (India) 為60%、在尼加拉瓜 (Nicaragua) 為44%、在哥倫比亞為42%、在厄瓜多 (Ecuador) 為30%、在墨西哥 (Mexico) 為<10%，而在巴西及波多黎各皆<1%。另一方面，於臺灣主要咖啡產區之白殭菌最高自然感染率則介於4.9-13.3% (作者未發表資料)。一般而言，蟲生真菌於自然環境下之流行程度，除了取決於寄生密度，亦會受環境中不同生物性、非生物性因子影響，而溫度、濕度及日照量為白殭菌成功感染寄生並順利於寄主體內繁殖之關鍵因子^(31, 70, 83, 96)，而高濕及低日照的遮陰環境有助白殭菌感染咖啡果小蠹^(5, 80, 104)。由於受到不同環境因子的影響，以致各研究於不同時間、地點所調查之白殭菌自然發生程度差異甚鉅，例如Monzón *et al.*⁽⁶⁷⁾在2004年及2005年於尼加拉瓜所調查之白殭菌於咖啡果小蠹成蟲的自然感染率分別為2.7%與12.1%；於夏威夷，白殭菌自然感染率則隨咖啡園海拔提升而增加，於高海拔 (> 500 m)、中海拔 (300-500 m)、低海拔 (< 300 m) 之感染率分別為22%、6%及<1%⁽¹⁰³⁾。

施用白殭菌時應考量噴灑時機，方能達防治效益且符合經濟成本^(40, 102)。根據Woodill *et al.*⁽¹⁰²⁾針對夏威夷當地於白殭菌施用之成本效益分析，咖啡果小蠹於田間初始危害程度為影響最終淨收益的關鍵，若初始蟲蛀率自1%提升至5%，每咖啡園 (平均1.67英畝，約為0.68 ha) 淨收益將減少5,000美元，而若田間蟲蛀率達12.6%，則施用白殭菌將不再符合經濟效益。為降低田間蟲害發生，夏威夷咖啡農戶常採「按期施藥」 (calendar-based spray) 模式以連續施用白殭菌 (每產季6-12次)，但此操作模式卻衍生高額的防治成本⁽²⁾。Hollingsworth *et al.*⁽⁴⁰⁾比較「按防治基準施藥」 (threshold-based spray) (防治基準為蟲蛀率≥3%且雌蟲於A/B階段比例≥25%) 及「按期施藥」兩種模式之防治效益，兩模式管理下之收成及蟲蛀豆比例無顯著差異，但「按防治基準施藥」模式施藥次數僅4-5次 (成本1,789美元/ha)，「按期施藥」模式則計有7-11次 (2,928美元/ha)；換言之，循防治基準施用白殭菌等防治資材，將可降低防治成本，且同時維持咖啡產量及品質。此外，該篇作者亦認為，咖啡果實生長初期為施用白殭菌之關鍵時機，由於此時雌蟲尚未侵入咖啡果實深處，而較容易接觸到白殭菌，因此防治效果較佳⁽⁴⁰⁾。

白殭菌雖為目前防治咖啡果小蠹之利器，但使用上仍需配合其它蟲害管理技術，並留意彼此間之相容性，以發揮相輔相成之效。許多學者皆強調，適時施灑白殭菌之同時，亦應一併落實清園，才能有效控制蟲害^(9, 40, 50, 102)；倘若於咖啡生產前期之蟲害已相當嚴重，則白殭菌防治效果會變得極低^(50, 102)。另一方面，針對清園時無法顧及的樹下落果，Kawabata *et al.*⁽⁵⁰⁾建議夏威夷農戶可將白殭菌施用於地面以減少咖啡產期初始害蟲數

量。Bustillo *et al.*⁽²⁰⁾研究顯示，施用白殭菌於咖啡樹下土表（濃度為 1×10^9 孢子/樹），可使雌蟲離開落果時沾附真菌孢子，而造成樹上約29%雌蟲感染白殭菌；相同地，Vera *et al.*⁽⁹⁶⁾指出，土面施用白殭菌之方式能減少15 - 55%果實蟲蛀率。此外，部分殺菌劑等資材對於白殭菌菌絲生長或孢子發芽可能具抑制作用^(50, 51, 76)，如Kouassi *et al.*⁽⁵¹⁾指出，滅達樂 (metalaxyl)、鋅錳乃浦 (mancozeb) 及氧化銅 (copper oxide) 會抑制菌絲生長，而大幅降低白殭菌對咖啡果小蠹之致死效果，因此於施用時必須特別留意。

化學防治

化學殺蟲劑很早即被用於防治咖啡果小蠹。例如於巴西，自咖啡果小蠹在1913年侵入後，當地採用二硫化碳 (carbon disulfide) 燻蒸咖啡果實及包裝容器；於1947年後，農戶開始使用合成殺蟲劑於咖啡園，其中又以有機氯殺蟲劑-安殺番 (endosulfan) 最被廣為運用，此藥劑單次施用後可減少88%以上的蟲蛀率，且持效性長達12週⁽⁴⁹⁾。Ingram⁽⁴¹⁾於烏干達 (Uganda) 研究顯示，田間施用安殺番2次可減少咖啡果實內咖啡果小蠹蟲數及蟲蛀比例；該報導亦指出，安殺番對咖啡果小蠹具有部分燻蒸毒性，且在溫度較高環境下 (30°C) 的殺蟲效果較佳。但由於安殺番對非標的生物、環境之高毒性等因素，近年來此藥劑已陸續遭多國禁用⁽⁵⁷⁾，我國亦於2014年將之禁用，故許多研究持續致力於找尋對咖啡果小蠹有效的替代藥劑。

根據Villalba *et al.*⁽⁹⁸⁾於哥倫比亞之田間試驗，多種殺蟲劑當中，以陶斯松 (chlorpyrifos)、撲滅松 (fenitrothion)、芬殺松 (fenthion) 及亞特松 (pirimiphos-methyl) 等有機磷殺蟲劑擁有與安殺番相似之殺蟲效果，但這些殺蟲劑於施用後第15日皆已無顯著藥效。除有機磷殺蟲劑，分別有報告顯示剋安勃 (chlorantraniliprole)⁽⁷³⁾、賽速安 (thiamethoxam)⁽⁸⁵⁾及混合劑-賽速安勃 (thiamethoxam + chlorantraniliprole)⁽¹⁾對咖啡果小蠹具毒效。此外，Metellus *et al.*⁽⁶⁶⁾指出美氟綜 (metaflumizone)、益斯普 (ethiprole) 等多種不同作用機制殺蟲劑於室內、田間皆表現極佳防治效果，部分藥劑於施藥後40日之殘效仍可達80 - 100%防治率。於夏威夷，益達胺 (imidacloprid)、布芬淨 (buprofezin)、賜派滅 (spirotetramat) 被認為對咖啡果小蠹不具顯著之直接接觸毒性⁽⁵⁰⁾。於臺灣的研究報告顯示，若以藥劑噴布法進行生物檢定，以培丹 (cartap)、陶斯松及佈飛松 (profenophos) 所造成之咖啡果小蠹雌蟲死亡率較高^(26, 55)。Wei & Lin⁽¹⁰⁰⁾研究則指出，以益達胺、百滅寧 (permethrin)、第滅寧 (deltamethrin) 及可尼丁 (clothianidin) 噴灑於蟲體上的致死效果最佳 (接觸藥劑1日後可達100%致死率)，剋安勃、賽滅寧 (cypermethrin) 及布芬淨 (buprofezin) 則無法達到理想的殺蟲效果。然而，上述國內研究皆屬室內藥效試驗，目前尚無田間藥效評估之我國相關報告。

近年來，植物性殺蟲劑 (botanical insecticide) 及油劑等天然資材對咖啡果小蠹防治效果亦受到關注，但多種植物油、礦物油、脂肪酸鉀鹽 (potassium salts of fatty acid) 及印楝素 (azadirachtin) 於單獨使用下的除蟲效果皆不理想^(23, 50, 97)。儘管如此，部分資材經製劑後，仍可提升防治咖啡果小蠹之效力，例如添加協力劑之除蟲菊精 (pyrethrin) 產品⁽⁵⁰⁾，及苦楝油 (neem oil) 與檸檬烯 (D-limonene) 混合物⁽¹⁶⁾。

許多廣效性殺蟲劑雖對咖啡果小蠹具明顯的直接、間接接觸毒性，但多數仍難以對果實內的蟲體達到防治效果^(26, 55)，甚至具燻蒸作用之藥劑 (如安殺番) 亦無法完全消滅田間害蟲族群⁽⁴¹⁾。另一方面，長期施用化學殺蟲劑存在抗藥性風險，例如於新喀里多尼亞 (New Caledonia)，因連年施用有機氯殺蟲劑-靈丹 (lindane) 及安殺番 (後者每年施用2次)，當地咖啡果小蠹野外族群對於安殺番已產生1,000倍以上抗藥性⁽¹⁷⁾。因此，當今於夏威夷、中南美洲等地在咖啡果小蠹整合管理上，皆已不再強調使用化學殺蟲劑，而以白殭菌等微生物製劑為主要防治資材^(4, 9, 50)。

誘引

甲醇 (methanol) 及乙醇 (ethanol) 混合物被認為是極佳的咖啡果小蠹誘引物質^(32, 61, 64, 65)，自Mendoza Mora⁽⁶⁴⁾首次發現甲醇/乙醇混合物對此害蟲具誘引效果後，許多學者陸續針對誘引劑 (比例、揮發量、其它添加物等) 及誘引器 (形狀、顏色、擺放高度等) 進行研究^(32, 61, 77, 79, 81, 82, 87, 101)。較多研究報告指出，甲醇、乙醇混合後具協力效應，誘引效果較單獨使用為佳，而不同混合比例 (1:3、1:1及3:1) 所誘捕蟲數無顯著差異^(32, 65, 82)。針對誘引器型式開發之文獻顯示，紅色外觀對咖啡果小蠹雌蟲較具誘引力^(32, 61)，但亦有報告指出，透明綠色 (transparent green) 較紅色更具誘引效果⁽⁸²⁾。關於最佳之誘引器擺放高度，Ruiz-Diaz & Rodrigues⁽⁷⁹⁾研究指出，若同時於離地0.5 m、1.5 m、2.5 m及3.5 m之高度吊掛誘引器，則以離地0.5 m位置的誘引器可捕獲較多咖啡果小蠹雌蟲，而此現象亦可見於Uemura-Lima *et al.*⁽⁸⁷⁾之報告。

目前於多數咖啡產區，誘引陷阱較常採用3:1或1:1之甲醇/乙醇混合形式誘引劑，主要用作研究上監測雌蟲飛行活躍度，以瞭解害蟲於田間之族群密度及危害程度^(5, 7, 35, 47, 50, 56, 90)，或作為啟動防治措施之基準^(38, 71)，亦有研究嘗試將陷阱作為大量誘殺 (mass trapping) 雌蟲的防治資材^(32, 36, 101)。然而，Vega *et al.*⁽⁹⁰⁾回顧多篇研究報告並指出，除了少數報告證實誘捕蟲數與蟲蛀率之相關性^(38, 62, 71)，相較於田間龐大的咖啡果小蠹族群數量，誘引陷阱似乎僅能捕獲到少部分雌蟲，而誘捕蟲數往往難以反映實際危害狀況。此外，由於甲醇及乙醇亦會吸引其它種類的小蠹蟲⁽⁷¹⁾，以至得耗費工時以正確鑑定所捕獲蟲隻為咖啡果小蠹與否。考量防治效果、投入成本等因素，透過陷阱大量誘殺

咖啡果小蠹之效益仍有待進一步評估，故目前於夏威夷、中南美洲等咖啡產區並未實際推行大量誘殺技術於防治此害蟲，而主要以陷阱作為判斷田間害蟲族群數量之一項輔助依據^(4, 9, 50, 90)。

結 論

咖啡果小蠹已於臺灣立足十餘載，近年來愈加受到國內咖啡農戶重視，然而隨著咖啡栽培面積擴大，又因全球Jaramillo *et al.*⁽⁴⁶⁾氣候變遷所致之環境暖化，將造成咖啡果小蠹繁衍速度加快^(10, 46)，並促使害蟲族群擴散至更高海拔咖啡產區⁽⁴⁵⁾，以致蟲害勢必趨於嚴重。由於臺灣正於發展國產精品咖啡之際，維持咖啡生豆品質甚是關鍵，按精品咖啡協會 (Specialty Coffee Association, SCA) 標準，350 g生豆樣品當中若有60顆以上的輕微蟲蛀豆 (約占整體生豆樣本2 - 3%) (圖一F)，即不屬精品級 (specialty grade)。然而，生產者往往對咖啡果小蠹生態習性不甚瞭解，防治上略顯捉襟見肘，而無法有效控制蟲害發生。因此，當前極需一套適合本土氣候與栽培模式之蟲害管理技術，以防患於未然。所幸國外與此害蟲已拚搏多年，他國經驗相當值得借鑑，如同夏威夷自2010年咖啡果小蠹入侵後，亦曾取經於中南美洲以逐步建構符合當地產業的防治策略，並於2011年迅速將白蠟菌登記於防治此害蟲⁽⁹⁾，且陸續訂定防治基準供農戶參考。相較於國外所運用之技術，臺灣目前尚缺少登記於此害蟲之微生物製劑、化學藥劑等任何防治資材，亦無合宜的防治基準作為用藥依據。儘管如此，為防止蟲患猖獗，咖啡農戶目前仍可先以落實田間衛生為主要策略，此亦乃咖啡果小蠹防治技術之重中之重。目前，國內咖啡果小蠹於防治上仍存在諸多環節有待補足，氣候變遷對於蟲害發生之影響等生態研究亦相當值得探討，故本研究團隊正致力於咖啡果小蠹管理技術之研究 (包含擬定蟲害防治基準、建立農戶自行監測技術、篩選具防治效力之本土白蠟菌菌株等)，希冀透過產官學三方群策群力以建構專屬我國咖啡產業之咖啡果小蠹整合性管理技術，促進國產咖啡永續蓬勃發展。

引用文獻

- Arcila Moreno, A., Duarte Cano, A. F., Villalba Guott, D. A., and Benavides Machado, P. 2013. Nuevo producto en el manejo integrado de la broca del café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafe* 437:1-8. (in Spanish).
- Aristizábal, L. F. 2018. Challenges faced by coffee growers establishing an integrated pest management for coffee berry borer in Hawaii. *Agri. Res. & Tech.: Open Access J.* 14:555919.
- Aristizábal, L. F., Vélez, J. C., and León, C. A. 2006. Diagnóstico del manejo integrado de la broca, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae), con caficultores caldenses. *Rev. Colomb. Entomol.* 32:117-124. (in Spanish with English abstract).
- Aristizábal, L. F., Lara, O., and Arthurs, S. P. 2012. Implementing an integrated pest management program for coffee berry borer in a specialty coffee plantation in Colombia. *J. Integr. Pest Manag.* 3:1-5.
- Aristizábal, L. F., Bustillo, A. E., and Arthurs, S. P. 2016. Integrated pest management of coffee berry borer: strategies from Latin America that could be useful for coffee farmers in Hawaii. *Insects* 7:6.
- Aristizábal, L. F., Jiménez, M., Bustillo, A. E., and Arthurs, S. P. 2011. Monitoring cultural practices for coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) management in a small coffee farm in Colombia. *Fla. Entomol.* 94:685-687.
- Aristizábal, L. F., Shriner, S., Hollingsworth, R., and Arthurs, S. 2017. Flight activity and field infestation relationships for coffee berry borer in commercial coffee plantations in Kona and Kau districts, Hawaii. *J. Econ. Entomol.* 110:2421-2427.
- Aristizábal, L. F., Shriner, S., Hollingsworth, R., Mascarin, G. M., Chaves, B., Matsumoto, T., and Arthurs, S. P. 2018. Field sampling strategies for coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) infesting berries in coffee farms in Hawaii. *Int. J. Trop. Insect Sci.* 38:418-426.
- Aristizábal, L. F., Johnson, M., Shriner, S., Hollingsworth, R., Manoukis, N. C., Myers, R., Bayman, P., and Arthurs, S. P. 2017. Integrated pest management of coffee berry borer in Hawaii and Puerto Rico: Current status and prospects. *Insects* 8:123.
- Azrag, A. G. A., Yusuf, A. A., Pirk, C. W. W., Niassy, S., Mbugua, K. K., and Babin, R. 2020. Temperature-dependent development and survival of immature stages of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). *Bull. Entomol. Res.* 110:207-218.
- Baker, P. S., Barrera, J. F., and Rivas, A. 1992. Life-history studies of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*, Scolytidae) on coffee trees in southern Mexico. *J. Appl. Ecol.* 29:656-662.
- Beaver, R. A., and Liu, L. Y. 2010. An annotated synopsis of Taiwanese bark and ambrosia beetles, with new synonymy, new combinations and new records (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Zootaxa* 2602:1-47.
- Benavides, P., Góngora, C., and Bustillo, A. 2012. IPM program to control coffee berry borer *Hypothenemus hampei*, with

- emphasis on highly pathogenic mixed strains of *Beauveria bassiana*, to overcome insecticide resistance in Colombia. Page 512-540 in: Insecticides-Advances in Integrated Pest Management. F. Perveen ed. InTech Europe, Rijeka, Croatia, 724 pp.
14. Benavides, P., Bustillo, A., Montoya, E. C., Cárdenas, R., and Mejía, C. G. 2002. Participación del control cultural, químico y biológico en el manejo de la broca del café. *Rev. Colomb. Entomol.* 28:161-165. (in Spanish with English abstract).
 15. Bittenbender, H. C., and Smith, V. E. 2008. Growing Coffee in Hawaii. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawai'i, Mānoa, Honolulu, Hawai'i, 40 pp.
 16. Brito, W. A. de, Siquieroli, A. C. S. V. A., Duarte, J. G., Sousa, R. M. F. de, Felisbino, J. K. R. P., and Silva, G. C. da. 2021. Botanical insecticide formulation with neem oil and D-limonene for coffee borer control. *Pesq. Agropec. Bras.* 56:e02000.
 17. Brun, L., Marcillaud, C., Gaudichon, V., and Suckling, D. 1989. Endosulfan resistance in *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) in New Caledonia. *J. Econ. Entomol.* 82:1331-1316.
 18. Burbano, E., Wright, M., Bright, D. E., and Vega, F. E. 2011. New record for the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*, in Hawaii. *J. Insect Sci.* 11:117.
 19. Bustillo, A. E., Cárdenas, R., and Posada, F. J. 2002. Natural enemies and competitors of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae) in Colombia. *Neotrop. Entomol.* 31:635-639.
 20. Bustillo, A. E., Bernal, M. G., Benavides, P., and Chaves, B. 1999. Dynamics of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* infecting *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) populations emerging from fallen coffee berries. *Fla. Entomol.* 82:491-498.
 21. Bustillo, A. E., Cardenas, R., Villalba, D. A., Benavides, P., Orozco, J., and Posada, F. J. 1998. Manejo Integrado de la Broca del Café: *Hypothenemus hampei* (Ferrari) en Colombia. Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia, 134 pp. (in Spanish).
 22. Castaño-Sanint, A., Benavides-Machado, P., and Baker, P. S. 2005. Dispersión de *Hypothenemus hampei* en cafetales zoqueados. *Cenicafé* 56:142-150. (in Spanish with English abstract).
 23. Celestino, F. N., Pratisoli, D., Contarini Machado, L., Gonçalves dos Santos Jr., H. J., de Queiroz, V. T., and Mardgan, L. 2016. Control of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) with botanical insecticides and mineral oils. *Acta. Sci. Agron.* 38:1-8.
 24. Cenicafé. 1993. Cómo determinar la infestación de broca en un cafetal. Brocarta No. 5:1. (in Spanish).
 25. Cenicafé. 1994. Recomendaciones para el manejo integrado de la broca del café. Brocarta No. 18:1-4. (in Spanish).
 26. Chu, Y. F., Yang, M. H., Chang, S. F., Chen, P. H., and Wang, T. C. 2017. The composition of life stages of coffee berry borer (Scolytidae: *Hypothenemus hampei*) in the coffee berry and the control efficacy of different insecticides for the pest. *J. Taiwan Agric. Res.* 66:318-325. (in Chinese with English abstract).
 27. CIC. 2017. PNG coffee industry under threat of CBB. Coffee Industry Corporation Newsletter.
 28. Constantino, L. M., Gil, Z. N., Montoya, E. C., and Benavides, P. 2021. Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) emergence from ground fruits across varying altitudes and climate cycles, and the effect on coffee tree infestation. *Neotrop. Entomol.* 50:374-387.
 29. Cure, J. R., Rodríguez, D., Gutierrez, A. P., and Ponti, L. 2020. The coffee agroecosystem: bio-economic analysis of coffee berry borer control (*Hypothenemus hampei*). *Sci. Rep.* 10:12262.
 30. Damon, A. 2000. A review of the biology and control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). *Bull. Entomol. Res.* 90:453-465.
 31. Douglas Inglis, G., Goettel, M. S., Butt, T. M., and Strasser, H. 2001. Use of hyphomycetous fungi for managing insect pests. Page 23-69 in: Fungi as Biocontrol Agents: Progress, Problems and Potentials. T. M. Butt, C. W. Jackson, and N. Magan eds. CABI, Wallingford, UK, 390 pp.
 32. Dufour, B. P., and Frérot, B. 2008. Optimization of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Col., Scolytidae), mass trapping with an attractant mixture. *J. Appl. Entomol.* 132:591-600.
 33. Dufour, B. P., Franco, F. F., and Hernández, A. 2007. Evaluación del trapeo en el marco del manejo integrado de la broca del café. Page 89-99 in: La Broca del Café en América Tropical: Hallazgos y Enfoques. J. F. Barrera, A. García, V. Domínguez, and C. Luna eds. Sociedad Mexicana de Entomología y El Colegio de la Frontera Sur, Tapachula, Chiapas, México, 141 pp. (in Spanish).
 34. Dufour, B. P., Kerana, I. W., and Ribeyre, F. 2019. Effect of coffee tree pruning on berry production and coffee berry borer infestation in the Toba Highlands (North Sumatra). *Crop Prot.* 122:151-158.
 35. Dufour, B. P., Kerana, I. W., and Ribeyre, F. 2021. Population dynamics of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) according to the phenology of *Coffea arabica* L. in equatorial conditions of North Sumatra. *Crop Prot.* 146:105639.

16 J. Plant Med.

36. Dufour, B. P., González, M. O. M., José Julian, Chávez, B. A., and Ramírez Amador, R. 2005. Validation of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferr.) trapping with the Brocap® trap. Page 1243-1247 in: Proceeding of the 20th International Scientific Colloquium on Coffee. October 11-15, 2004. Bangalore, India. ASIC, Paris.
37. Escobar-Ramírez, S., Grass, I., Armbrrecht, I., and Tscharrntke, T. 2019. Biological control of the coffee berry borer: main natural enemies, control success, and landscape influence. *Biol. Control* 136:103992.
38. Fernandes, F. L., Picanco, M. C., Campos, S. O., Bastos, C. S., Chediak, M., Guedes, R. N. C., and da Silva, R. S. 2011. Economic injury level for the coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) using attractive traps in Brazilian coffee fields. *J. Econ. Entomol.* 104:1909-1917.
39. Gomez, J., Chavez, B. Y., Castillo, A., Valle, F. J., and Vega, F. E. 2015. The coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae): how many instars are there? *Ann. Entomol. Soc. Am.* 108:311-315.
40. Hollingsworth, R. G., Aristizábal, L. F., Shriner, S., Mascarin, G. M., de Andrade Moral, R., and Arthurs, S. P. 2020. Incorporating *Beauveria bassiana* into an integrated pest management plan for coffee berry borer in Hawaii. *Front. Sustain. Food Syst.* 4:22.
41. Ingram, W. 1968. Observations on the control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferr.), with endosulfan in Uganda. *Bull. Entomol. Res.* 57:539-547.
42. Jaramillo, J., Borgemeister, C., and Baker, P. 2006. Coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae): searching for sustainable control strategies. *Bull. Entomol. Res.* 96:223-233.
43. Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Poehling, H. M., Kamonjo, C., and Borgemeister, C. 2009. Development of an improved laboratory production technique for the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*, using fresh coffee berries. *Entomol. Exp. Appl.* 130:275-281.
44. Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Borgemeister, C., Kamonjo, C., Poehling, H.-M., and Vega, F. E. 2009. Where to sample? Ecological implications of sampling strata in determining abundance and impact of natural enemies of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. *Biol. Control* 49:245-253.
45. Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F. E., Davis, A., Borgemeister, C., and Chabi-Olaye, A. 2011. Some like it hot: the influence and implications of climate change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. *PLoS One* 6:e24528.
46. Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F. E., Poehling, H.-M., and Borgemeister, C. 2009. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLoS ONE* 4:e6487.
47. Johnson, M. A., and Manoukis, N. C. 2020. Abundance of coffee berry borer in feral, abandoned and managed coffee on Hawaii island. *J. Appl. Entomol.* 144:920-928.
48. Johnson, M. A., Fortna, S., Hollingsworth, R. G., and Manoukis, N. C. 2019. Postharvest population reservoirs of coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae) on Hawai'i island. *J. Econ. Entomol.* 112:2833-2841.
49. Johnson, M. A., Ruiz-Diaz, C. P., Manoukis, N. C., and Verle Rodrigues, J. C. 2020. Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*), a global pest of coffee: perspectives from historical and recent invasions, and future priorities. *Insects* 11:882.
50. Kawabata, A. M., Nakamoto, S. T., Miyahira, M., and Curtiss, R. T. 2020. Recommendations for coffee berry borer integrated pest management in Hawai'i 2020. UH-CTAHR IP-47.
51. Kouassi, M., Coderre, D., and Todorova, S. I. 2003. Effects of the timing of applications on the incompatibility of three fungicides and one isolate of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin (Deuteromycotina). *J. Appl. Entomol.* 127:421-426.
52. Kucel, P., Kangire, A., and Egonyu, J. P. 2009. Status and Current Research Strategies for Management of the Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei* Ferr) in Africa. National Crop Resources Research Institute, Mukono, Uganda, 9 pp.
53. Leung, P. S., Kawabata, A., and Nakamoto, S. T. 2014. Estimated economy-wide impact of CBB for the crop years 2011/12 and 2012/13. Brief Report at Request of Hawaii Congressional Delegation.
54. Liang, Y. P., and Wang, T. C. 2020. Identification and pathogenicity of *Isaria javanica* CAES1 isolated from the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in Taiwan. *J. Taiwan Agric. Res.* 69:132-146. (in Chinese with English abstract).
55. Lin, M. Y., and Chen, S. K. 2015. Study on the control efficiency of insecticides against coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. *Research Bulletin of Tainan District Agricultural Improvement Station* 65:38-44. (in Chinese with English abstract).
56. Lin, M. Y., Wu, Y. F., and Chen, S. K. 2010. Monitoring survey of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*, and its control in the field. *Research Bulletin of Tainan District Agricultural Improvement Station* 56:35-44. (in Chinese with English abstract).

57. Lubick, N. 2010. Endosulfan's exit: US EPA pesticide review leads to a ban. *Science* 328:1466.
58. Mariño, Y. A., Verle Rodrigues, J. C., and Bayman, P. 2017. *Wolbachia* affects reproduction and population dynamics of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*): implications for biological control. *Insects* 8:8.
59. Mariño, Y. A., Vega, V. J., García, J. M., Verle Rodrigues, J. C., García, N. M., and Bayman, P. 2017. The coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae) in Puerto Rico: distribution, infestation, and population per fruit. *J. Insect Sci.* 17:58.
60. Mariño, Y. A., Perez, M.-E., Gallardo, F., Trifilio, M., Cruz, M., and Bayman, P. 2016. Sun vs. shade affects infestation, total population and sex ratio of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in Puerto Rico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 222:258-266.
61. Mathieu, F., Brun, L. O., Marchillaud, C., and Frérot, B. 1997. Trapping of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* Ferr (Col., Scolytidae) within a mesh-enclosed environment: interaction of olfactory and visual stimuli. *J. Appl. Entomol.* 121:181-186.
62. Mathieu, F., Brun, L. O., Frerot, B., Suckling, D. M., and Frampton, C. 1999. Progression in field infestation is linked with trapping of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Col., Scolytidae). *J. Appl. Entomol.* 123:535-540.
63. Mendesil, E., Jembere, B., and Seyoum, E. 2004. Population dynamics and distribution of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae) on *Coffea arabica* L. in Southwestern Ethiopia. *SINET: Ethiop. J. Sci.* 27:127-134.
64. Mendonza Mora, J. R. 1991. Resposta da broca-do-café, *Hypothenemus hampei*, a estímulos visuais e semioquímicos. MS thesis, Universidade Federal de Viçosa Viçosa. (In Portuguese).
65. Messing, R. H. 2012. The coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) invades Hawaii: preliminary investigations on trap response and alternate hosts. *Insects* 3:640-652.
66. Metellus, D., Sampaio, M. V., and Celoto, F. J. 2020. Activity of insecticides on coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). *J. Biosci.* 36:1099-1115.
67. Monzón, A. J., Guharay, F., and Klingen, I. 2008. Natural occurrence of *Beauveria bassiana* in *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) populations in unsprayed coffee fields. *J. Invertebr. Pathol.* 97:134-141.
68. Oliva, M., Rubio, K., Rivasplata, E., and Leiva, S. 2020. Integrated management of the coffee berry borer: a comparison of cultural, biological, and ethological control. *Entomol. Res.* 50:539-544.
69. Oliveira, C. M., Auad, A. M., Mendes, S. M., and Frizzas, M. R. 2012. Economic impact of exotic insect pests in Brazilian agriculture. *J. Appl. Entomol.* 137:1-15.
70. Pell, J. K., Hannam, J. J., and Steinkraus, D. C. 2010. Conservation biological control using fungal entomopathogens. *BioControl* 55:187-198.
71. Pereira, A. E., Vilela, E. F., Tinoco, R. S., de Lima, J. O. G., Fantine, A. K., Morais, E. G. F., and França, C. F. M. 2012. Correlation between numbers captured and infestation levels of the coffee berry-borer, *Hypothenemus hampei*: a preliminary basis for an action threshold using baited traps. *Int. J. Pest Manag.* 58:183-190.
72. Pereira, A. E., Gontijo, P. C., Fantine, A. K., Tinoco, R. S., Ellersieck, M. R., Carvalho, G. A., Zanuncio, J. C., and Vilela, E. F. 2021. Emergence and infestation level of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) on coffee berries on the plant or on the ground during the post-harvest period in Brazil. *J. Insect Sci.* 21:10.
73. Plata-Rueda, A., Martínez, L. C., Rodrigues Costa, N. C., Zanuncio, J. C., de Sena Fernandes, M. E., Serrão, J. E., Carvalho Guedes, R. N., and Lemes Fernandes, F. 2019. Chlorantraniliprole-mediated effects on survival, walking abilities, and respiration in the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. *Ecotox. Environ. Safe.* 172:53-58.
74. Pulakkatu-thodi, I., Gutierrez, R., and Wright, M. G. 2017. Comparison of sampling intensity to estimate infestations of coffee berry borer on Hawaii. *Proc. Hawaii Entomol. Soc.* 49:11-16.
75. Pulakkatu-thodi, I., Gutierrez-Coarite, R., and Wright, M. G. 2018. Dispersion and optimization of sequential sampling plans for coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae) infestations in Hawaii. *Environ. Entomol.* 47:1306-1313.
76. Roberti, R., Righini, H., Masetti, A., and Maini, S. 2017. Compatibility of *Beauveria bassiana* with fungicides in vitro and on zucchini plants infested with *Trialeurodes vaporariorum*. *Biol. Control* 113:39-44.
77. Rostaman, and Budi, P. 2019. Response of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) to alcohol-based attractants on coffee crops in Banjarnegara, Indonesia. Page 25-28 in: Proceeding of the International Conference and the 10th Congress of the Entomological Society of Indonesia. October 6-9, 2019. Kuta, Bali, Indonesia. Atlantis Press.
78. Ruiz-Cárdenas, R., and Baker, P. 2010. Life table of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) in relation to coffee berry

- phenology under Colombian field conditions. *Scientia. Agricola*. 67:658-668.
79. Ruiz-Diaz, C. P., and Rodrigues, J. C. V. 2021. Vertical trapping of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytinae), in coffee. *Insects* 12:607.
 80. Sanchez, E., Dufour, B., Olivas, A., Virginio-Filho, E. M., Vilchez, S., and Avelino, J. 2013. Shade has antagonistic effects on coffee berry borer. Page 729-736 in: *Proceeding of the 24th International Conference on Coffee Science*. November 11-16, 2012. San José, Costa Rica. ASIC, Paris.
 81. Santos de Souza, M., Medeiros Costa, J. N., Curitiba Espíndula, M., and de Almeida e Silva, A. 2018. Response of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) to semiochemicals and blends using baited traps in coffee fields. *Aust. J. Crop Sci.* 12:961-966.
 82. Silva, F. C. da, Ursi Ventura, M., and Morales, L. 2006. Capture of *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera, Scolytidae) in response to trap characteristics. *Scientia. Agricola*. 63:567-571.
 83. Staver, C., Guharay, F., Monterroso, D., and Muschler, R. G. 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforest. Syst.* 53:151-170.
 84. Sun, S., Wang, Z., Liu, A., Lai, S., Wang, J., Meng, Q., Gou, Y., Johnson, A. J., and Li, Y. 2020. First record of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) on Hainan Island, China. *Coleopt. Bull.* 74:710-713.
 85. Torres, F. Z. V., de Oliveira Rigitano, R. L., and Castro Torres, L. 2010. Occurrence of thiamethoxam in coffee (*Coffea arabica* L.) leaves and fruits following a soil drench application of the insecticide. *Coffee Sci.* 5:148-153.
 86. Trujillo, H. I., Aristizábal, L. F., Bustillo, A. E., and Jiménez, M. 2006. Evaluación de métodos para cuantificar poblaciones de broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), en fincas de caficultores experimentadores. *Rev. Colomb. Entomol.* 32:39-44. (in Spanish).
 87. Uemura-Lima, D. H., Ventura, M. U., Mikami, A. Y., da Silva, F. C., and Morales, L. 2010. Responses of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae), to vertical distribution of methanol: ethanol traps. *Neotrop. Entomol.* 39:930-933.
 88. Vega, F. E., Franqui, R. A., and Benavides, P. 2002. The presence of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*, in Puerto Rico: fact or fiction? *J. Insect Sci.* 2:1-3.
 89. Vega, F. E., Davis, A. P., and Jaramillo, J. 2012. From forest to plantation? Obscure articles reveal alternative host plants for the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). *Biol. J. Linn. Soc.* 107:86-94.
 90. Vega, F. E., Infante, F., and Johnson, A. J. 2015. The genus *Hypothenemus*, with emphasis on *H. hampei*, the coffee berry borer. Page 427-494 in: *Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species*. F. E. Vega, and R. W. Hofstetter eds. Academic Press, San Diego, CA, US, 640 pp.
 91. Vega, F. E., Infante, F., Castillo, A., and Jaramillo, J. 2009. The coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae): a short review, with recent findings and future research directions. *Terr. Arthropod Rev.* 2:129-147.
 92. Vega, F. E., Simpkins, A., Bauchan, G., Infante, F., Kramer, M., and Land, M. F. 2014. On the eyes of male coffee berry borers as rudimentary organs. *PLoS One* 9:e85860.
 93. Vega, F. E., Simpkins, A., Bauchan, G., Valdéz-Carrasco, J. M., Castillo, A., and Infante, F. 2015. A mysterious wing spine in male coffee berry borers (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Fla. Entomol.* 98:352-353.
 94. Vega, F. E., Smith, L. T., Davies, N. M. J., Moat, J., Góral, T., O'Sullivan, R., and Davis, A. P. 2019. Elucidation of hosts, native distribution, and habitat of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) using herbaria and other museum collections. *Front. Plant Sci.* 10:1188.
 95. Vega, V. J., Mariño, Y. A., Deynes, D., Greco, E. B., Bright, D. E., and Bayman, P. 2020. A beetle in a Haystack: are there alternate hosts of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in Puerto Rico? *Agronomy* 10:228.
 96. Vera, J. T., Montoya, E. C., Benavides, P., and Góngora, C. E. 2011. Evaluation of *Beauveria bassiana* (Ascomycota: Hypocreales) as a control of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) emerging from fallen, infested coffee berries on the ground. *Biocontrol Sci. Technol.* 21:1-14.
 97. Vijayalakshmi, C. K. 2014. Effect of few commercial neem-based insecticides in the management of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Curculionidae). *J. Zool. Stud.* 1:22-25.
 98. Villalba, D., Bustillo, A. E., and Chaves, B. 1995. Evaluación de insecticidas para el control de la broca del café en Colombia. *Cenicafé* 46:152-163. (in Spanish).
 99. Wegbe, K., Cilas, C., Decazy, B., Alauzet, C., and Dufour, B. 2003. Estimation of production losses caused by the coffee berry borer (Coleoptera: Scolytidae) and calculation of an economic

- damage threshold in Togolese coffee plots. *J. Econ. Entomol.* 96:1473-1478.
100. Wei, S. H., and Lin, M. Y. 2021. Study on the efficacy of insecticides and population dynamics of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *J. Agric. For. (NCYU)* 18:69-81. (in Chinese with English abstract).
101. Wiryadiputra, S., Cilas, C., and Morin, J-P. 2009. Effectiveness of the Brocap trap in controlling the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei* Ferr.) in Indonesia. Page 1405-1408 in: *Proceeding of the 22nd International Conference on Coffee Science*. September 14-19, 2008. Campinas, São Paulo, Brazil. ASIC, Paris.
102. Woodill, A. J., Nakamoto, S. T., Kawabata, A. M., and Leung, P. 2017. To spray or not to spray: a decision analysis of coffee berry borer in Hawaii. *Insects* 8:116.
103. Wraight, S. P., Galaini-Wraight, S., Howes, R. L., Castrillo, L. A., Carruthers, R. I., Smith, R. H., Matsumoto, T. K., and Keith, L. M. 2018. Prevalence of naturally-occurring strains of *Beauveria bassiana* in populations of coffee berry borer *Hypothenemus hampei* on Hawai'i Island, with observations on coffee plant-*H. hampei*-*B. bassiana* interactions. *J. Invertebr. Pathol.* 156:54-72.
104. Wraight, S. P., Galaini-Wraight, S., Howes, R. L., Castrillo, L. A., Griggs, M. H., Carruthers, R. I., Smith, R. H., Matsumoto, T. K., and Keith, L. M. 2021. Efficacy of *Beauveria bassiana* strain GHA spray applications against coffee berry borer *Hypothenemus hampei* on Hawai'i Island. *Biol. Control* 161:104587.
105. Zimmermann, G. 2007. Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. *Biocontrol Sci. Technol.* 17:553-596.
- and quality of coffee. The integrated pest management (IPM) program has been implemented against CBB successfully in Hawaii and in some coffee producing countries of Latin American. The key components of the IPM for CBB are pest monitoring, determination of action thresholds, and several control tactics (e.g. cultural control, biocontrol, and chemical control). In order to increase the control effectiveness of CBB and to maintain quality of coffee in Taiwan, this paper presents a review of the literature about the major components of IPM for CBB, and serves as a reference for Taiwan coffee farmers and researchers.

Keywords: coffee berry borer (CBB), integrated pest management (IPM), coffee.

ABSTRACT

Po-Hung Chen and Hui-Fang Ni. 2023. The review on integrated pest management of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. *J. Plant Med.* 65(1): 9-20.

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

The coffee berry borer (CBB), *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae), is the most devastating pest of coffee worldwide. The CBB was first reported in Taiwan in 2007. Both CBB adults and larvae feed on the endosperm (coffee bean) inside the coffee berries, and cause a significant reduction in production

