

氣候變遷對農業昆蟲直接與間接影響之研究回顧

石憲宗^{1*} 黃毓斌¹ 林鳳琪¹ 謝雨蒔¹ 張宗仁^{2,3}
黃守宏⁴ 江明耀¹ 王清玲¹ 高靜華¹

¹ 行政院農業委員會農業試驗所應用動物組

² 美國喬治亞大學植物病理學系

³ 國立中興大學植物病理學系

⁴ 行政院農委會農業試驗所嘉義分所植物保護系

* 通訊作者 e-mail: htshih@tari.gov.tw

摘要

過去百年來全球表面均溫大約上升 0.6°C，預估至 2100 年的 CO₂ 濃度為 540-970 ppm，平均溫度將上升 1.4-5.8 °C。因此，氣候變遷已成為全球關注的重要環境課題。不同地理區域的氣候變化，隨著溫度增加範圍、光照度、紫外線輻射度、降雨與濕度之數量與分布型式、非生物因子干擾程度的改變，對農業生態系統產生不同程度的影響。儘管這些氣候變化因子尚有許多不確定性，但氣候暖化對變溫動物在時間與空間的動態平衡，確實可造成影響或預期會造成影響，此影響對昆蟲及其周圍生物群落尤為明顯。昆蟲是變溫動物，體溫與環境溫度大致相同，因此溫度可能是影響昆蟲行為、分布、發育、生存與繁殖之環境首要因子。某些研究者相信溫度是影響昆蟲最為關鍵的因子，例如溫度上升 2 °C，將使昆蟲在每一季節增加 1 至 5 個生活史世代；也有研究者發現氣候暖化的過程，濕度與 CO₂ 也是影響昆蟲的重要潛在因子。事實上，氣候變化對農業昆蟲或植物病原微生物的影響，充滿不確定性，因為氣候變化對某些病蟲害發育可能有利，也有可能不利。為了瞭解溫度上升、雨量變化與 CO₂ 濃度增高如何影響昆蟲，氣候變化對農民的影響以及農民可資因應的策略為何，本文回顧氣候變化對農業昆蟲影響的研究進展，並提出若干見解。

前言

IPCC 第三次評估報告指出，對人類排放溫室氣體若未採取任何管制措施，全球平均地面氣溫至 2100 年將比 1990 年增加 1.4-5.8°C，海平面將上升 9-88 公分，並預估全球二氧化碳濃度至 2100 年將達 540-970ppm (IPCC, 2001)，另由全球觀測站資料顯示，世界各地因地理條件不同，增暖程度也有不同，例如陸地比海洋明顯，北半球又比南

半球更爲明顯，例如位於北半球東亞季風區 (the East Asian monsoon) 的台灣，過去百年來的年平均溫度已上升 1.0-1.4°C，爲同時期全球平均增溫速率的 2 倍 (Hsu and Chen, 2002; 陳, 2008)。

昆蟲爲變溫動物 (poikilothermic animal)，分布於不同緯度地區的分類群 (taxon) 或不同種類 (species) 的昆蟲，具有不同的溫度適存範圍，例如原產於寒帶的蜚蠊目 (Grylloblattodea) 昆蟲與適應熱帶環境的昆蟲，對地球表面均溫升高的反應差異極大。如果氣候變暖是一個事實，各地區農業生態系統將受不同程度的衝擊，例如改變作物相的過程，有害生物種類也隨之變化。近 20 餘年，氣候暖化、劇烈氣候與糧食安全等議題成爲全球關注焦點以來，以氣候變化影響農業昆蟲的研究主題雖然逐年增多，但多數野外監測報告引用的數據，仍與生物多樣性研究與長期生態調查一般，僅以特定採集方法調查動植物種類，再藉此結果討論可能的影響因子，甚少正視所有可能影響農業生態系統昆蟲種類變化的因子 (如生物因子、非生物因子與各因子間互爲影響的因素)。爲此，我國在推動氣候變遷與農業調適政策過程，必需重視研究方法是否相對客觀，並及早制定符合我國特色的配套政策。事實上，氣候變遷之農業調適策略，並非現代特有的課題，由歷史記載可看出氣候變遷深深影響一個國家糧食產量與國力強弱 (李, 2008)，所以人類文明本身就伴隨著調適逆境而發展。有關「氣候變遷對農業昆蟲影響之研究方法」及「氣候變遷與糧食安全及作物蟲害管理調適策略」之相關內容，作者已另文發表於「因應氣候變遷之農業生產與環境調適研討會」(石等, 2011)，於本文不再贅述。

氣候變化對農業昆蟲的影響

氣候變化直接影響昆蟲的地理分布、遷移擴散、取食行爲、生長發育、代謝速率及生存繁殖；另透過影響寄主植物與天敵，間接改變害蟲的種群結構與發生密度。本文於此回顧國內外往昔研究報告，歸納氣候因子 (如溫度、濕度、二氧化碳、雨量、光照與風速等) 與生物因子 (如捕食性與寄生性天敵、作物等) 單獨與聯合作用之下，對農業昆蟲可能產生的影響，以作爲我國學者擬定氣候變遷影響作物有害生物研究方法的參考，並提供政府擬定因應氣候變遷過程，作物蟲害管理調適政策的修訂參考。

一、溫度對昆蟲的影響

昆蟲爲變溫動物，生存於不同氣候帶的昆蟲類群，各有其適存的溫度範圍，此與其體內的熱休克蛋白 (Heat shock proteins, Hsps) 與抗凍蛋白等調適機制有關，當昆蟲在接受低溫威脅之前，若能在較低溫度下曝露一定時間，將可提高其耐寒性；若將昆蟲曝

露在非致死高溫一段時間，不僅可提高其忍受更高溫度的脅迫，也可增強其耐熱性。

1. 影響昆蟲發育，導致昆蟲種群密度發生變化

昆蟲發育與溫度的高低具有密切關係，在適存溫度範圍內，不同種或同種不同生物型的昆蟲，對劇烈的溫度變化，有不同程度的反應，以半翅目粉蝨科 (Aleyrodidae) 害蟲為例，學者發現煙草粉蝨 (*Bemisia tabaci* (Gennadius)) 的熱休克蛋白基因 hsp20 與 hsp70，使煙草粉蝨具有較佳的抗高溫能力，例如 B 型煙草粉蝨成蟲在高溫環境的存活率和生殖適應性，高於溫室粉蝨 (*Trialeurodes vaporariorum* (Westwood))，此可說明 B 型煙草粉蝨種群可在夏季高溫季節發生 (王等, 2010)，另在中國長江流域 Q 型煙草粉蝨已逐漸取代 B 型，此可能與 Q 型煙草粉蝨對溫度脅迫具有更強的適應能力有關 (Bonato *et al.*, 2007)，此也可說明溫度變化可改變不同種昆蟲與同種不同生物型昆蟲的種群結構，進而改變受害作物的種類。除此，Masters *et al.* (1998) 指出氣候暖化使英國出現暖冬，暖冬期間造成半翅目頸吻群昆蟲 (auchenorrhynchs) 的卵提早孵化，也縮短了幼蟲越冬時間，但幼蟲的發育速率則未受影響。

Hsu and Chen (2002) 與陳 (2008) 分析台灣百年來氣候變化的狀況，指出台灣一年四季不僅變暖，夏季暖化速率高於冬季，冬季期縮短，寒流日數減少，全年升溫最明顯的現象則出現在時序交替的季節，另外夜間增溫現象較日間更為明顯。鄭 (1998) 與 Huang *et al.* (2010) 指出冬季溫度上升，將促使冬季以少量族群越冬的水稻重要害蟲 (如褐飛蝨、白背飛蝨及瘤野螟等)，在具備適合寄主植物的情況下，其族群越冬存活率可能因此提高，害蟲族群量可能因而大增；溫度上升導致害蟲生長發育所需有效積溫增加，害蟲之生長發育因此加速，發生時期也因而提早，這都會加速於一期作水稻害蟲發生種類、時期及族群量之變化，增加一期作水稻產量之損失。

2. 影響昆蟲發育世代數目

Yamamura and Kiritani (1998) 模擬溫度上升 1-3°C 的情況下，溫帶地區 15 種昆蟲、蟎類與線蟲發育的變化，模擬結果顯示溫度上升 1°C，僅有蟎類、縷翅目與寄生蜂 (如寄生捕食者) 等小型節肢動物的發育世代，多出 1 個世代；當溫度上升 2°C，除倉儲害蟲之外，所有受測動物的生活史均縮短，其中縷翅目與寄生蜂的發育世代，多出 2-3 個世代，蟎類則多出 4 個世代以上；當溫度上升 3°C，倉儲害蟲僅多 1 個世代，線蟲也僅多出 2 個世代，但寄生蜂多出 4 個世代，縷翅目多出 5 個世代，蟎類則多出 6 個世代以上。再者，鄭 (1998) 以台灣的水稻害蟲為例，當溫度升高 2.5°C，二化螟 (*Chilo suppressalis*) 與三化螟 (*Scirpophaga incertulas*) 每年至少可增加 1 個世代，斑飛蝨 (*Laodelphax striatellus*) 與黑尾葉蟬 (*Nephotettix cincticeps*)

則可增加 2-3 個世代。

由以上可知，在適溫範圍內，小型昆蟲與蠕類等節肢動物的年發生世代數目，隨溫度上升而明顯增加，一般害蟲則增加 1-3 個世代，但增加繁殖世代並不代表昆蟲的發生密度及危害程度提高，這當中仍需考量害蟲發生時期、作物生長期與天敵發育之同步性，以及其他氣候因子的聯合影響。

3. 改變昆蟲的地理分布範圍

溫度是影響昆蟲地理分布與擴散的重要因素之一，當溫度超過昆蟲適存範圍或不利昆蟲寄主存活時，對昆蟲的發育、繁殖與族群密度發展等，皆有不利的影響，此時昆蟲會藉由遷飛尋找適存的生境，以避逆境。

分布在不同氣候帶的昆蟲，對溫度的適應程度並不相同。在決定昆蟲全球分布的因素中，低溫往往比高溫更重要。受低溫限制的種，將來有可能在較高的緯度地區越冬，因而增加了有害生物向兩極擴散的機會，原分布在低海拔地區的種類，則可能往高海拔遷移。以溫帶地區的日本為例，水稻主要害蟲南方稻綠椿 (*Nezara viridula*) 是熱帶與亞熱帶地區普遍發生的種類，日本則為此種昆蟲在亞洲的分布北界，Musolin (2007) 指出本種昆蟲隨著氣候暖化，其分布北界已往北擴散 70 km 至大阪地區；再以亞熱帶地區的台灣為例，鄭 (1998) 指出以台灣為分布南界的水稻負泥蟲、水稻水象鼻蟲及斑飛蝨等溫帶害蟲種類，預期氣候暖化將促使這類害蟲的族群分布範圍往台灣北部或高海拔地區移動，對台灣水稻為害程度將逐漸減少；但以台灣為分布北界的害蟲種類，如台灣黑尾葉蟬 (*Nephotettix virescens*) 之族群發生將隨著氣候暖化而遍布台灣，同時，台灣水稻栽培環境也需注意在全球暖化的過程，必需嚴加預防亞洲水稻癭蚧 (*Orseolia oryzae*(Wood-Mason))、水稻螟蛾類 (*Scirpophaga innotata*, *Chilo polychrysus*)、黑尾葉蟬類 (*Nephotettix virescens*, *N. malayanus*)等原產於熱帶地區的山洋水稻重要害蟲，入侵與立足台灣。

另外，當溫度達到昆蟲之致死上限，則可能使昆蟲的空間分布進一步限縮，Deutsch *et al.* (2008) 指出熱帶生物終年處於相當穩定的氣候環境，所能忍受之溫度變化範圍很小，因此熱帶物種受到氣候暖化的衝擊，較分布於溫帶及寒帶氣候的生物還嚴重。

4. 昆蟲與寄主植物的物候同步性發生改變或昆蟲擴大寄主範圍

不同種類的昆蟲和寄主植物對溫度升高的容忍範圍並不相同，溫度升高除了直接影響昆蟲的生長發育及生存繁殖之外，同時也影響了寄主植物的生長發育時間，此將改變植食性昆蟲 - 寄主植物 - 其他生物彼此之間的相互關係，當害蟲發生種類產生變化之後，人類所需採取的防治策略也需隨之改變。Visser and Holleman (2001) 指出在荷蘭取食橡樹組織的冬尺蠖 (*Operophtera brumata*)，於明顯暖化的春天，幼

蟲提早在橡樹抽新芽之前三週孵化，甫孵化的幼蟲找不到食物的狀況下，僅能維持 2-10 日，這種因春天暖化卻未使橡樹提早抽芽的不同步性，致使幼蟲缺乏食物而餓死；然而，在亞熱帶地區，害蟲並無明顯的越冬現象，溫度升高也可能造成害蟲與寄主植物的物候同步性，這種狀況將造成寄主植物受到更嚴重的危害，另外某些多食性的害蟲，在氣候暖化導致發育縮短的情況下，害蟲爲了延續種群發育，害蟲將會嘗試擴大寄主範圍，一旦尋獲可供給生存需求所需營養之新寄主，將進一步牽動生態平衡，造成作物害蟲組成改變。

5. 對媒介昆蟲的影響

傳播植物原核生物性病害之媒介昆蟲，皆爲刺吸式口器，且多爲體型小的媒介昆蟲 (如薊馬、粉蝨、蚜蟲、木蝨與葉蟬等)。媒介昆蟲傳播病原的效率，與媒介昆蟲的發育、取食部位、傳病特性、寄主範圍等有關，例如取食木質部汁液的大葉蟬 (*cicadelline leafhoppers*) 與沫蟬 (*spittlebugs*)，可傳播侷限木質部導管之細菌性病原；取食韌皮部汁液的蚜蟲、粉蝨、木蝨與多數葉蟬，則可傳播侷限韌皮部篩管之細菌性病原 (Shih *et al.*, 2011)；至於系統性的蟲媒植物病毒，則由薊馬、蚜蟲與部分葉蟬傳播。

因應氣候變遷改變作物栽培種類，勢必引起蟲媒病害與媒介昆蟲種類的改變，由 Yamamura and Kiritani (1998) 的模擬數據可知，氣候暖化將促使小型昆蟲 (包括上述各類蟲媒病害之媒介昆蟲) 的年發生世代數目增加，當媒介昆蟲族群數量提高之後，將拓展其寄主範圍 (增加寄主種類) 以維持族群發展，使得蟲媒病害與媒介昆蟲的防治，變得更爲複雜；除此，改變耕作措施 (如設施與施肥) 也會改變作物的微氣候溫度或作物營養結構發生改變，進而改變作物上的害蟲種類或族群數目，造成蟲媒病害種類與流行趨勢發生改變爲例，鄧 (2001) 指出台灣某些蟲媒病毒的流行，與田間栽培管理措施改變有關，例如 1985 年推廣洋香瓜 PE 布隧道式栽培以來，冬季保溫效果好，提高果實甜度與減少裂果，但相對也營造有利於媒介昆蟲 - 蚜蟲與粉蝨的生存環境，促使此類昆蟲媒介傳播的病毒流行於田間。

6. 對害蟲抗藥性的影響

氣候暖化對於害蟲抗藥性之影響，Liu *et al.* (2008) 比較感性品系小菜蛾與抗藥性品系小菜蛾在不同氣溫下的生長狀況，顯示抗性品系對溫度增高的適應程度較感性品系差。感性品系在高溫環境下的適存值 (*fitness*) 比抗性品系優越，推測是因爲抗藥性發生的同時，也增加了小菜蛾本身的 *fitness cost*，故面對環境壓力時，原本 *fitness cost* 需求較少的感性品系，其適應度自然較佳，這點也可以從溫度增減時抗性族群互爲消長的情形獲得印證，類似的情形在黃條葉蚤 (*Phyllotreta striolata* (Fabricius)) 亦有發現 (Zhou and Wu, 2004)。

二、降雨量與濕度變化對昆蟲的影響

大部分作物害蟲的最適生存濕度範圍介於 70-95% 之間，適度降雨有利害蟲的正常發育與繁殖，例如溫帶地區的英國，暖化使夏季雨量增加，使植物獲得滋長機會，提高頸吻群昆蟲的豐度 (Master et al., 1998)；連續細雨會提高環境的相對濕度，對昆蟲寄生菌的繁殖有利，但傾盆大雨對絕多數農業害蟲則為不利 (鄭, 1998; 劉等, 2010)。降雨也會直接影響土壤中的含水量與濕度，Vincent *et al.* (2003) 曾指出利用淹水提高土壤相對濕度，管理土中之越冬害蟲。

降雨對某些潛葉性的農業害蟲或許有利，Chhetry *et al.* (2011) 調查印度 Jammu 地區甜橙上柑桔潛葉蛾 (*Phyllocnistis citrella* Stainon) 為害動態與重要氣候因子的關係，發現 2007 年的高降雨量使甜橙獲得充份水份而抽出新梢，嫩葉則成為柑桔潛葉蛾的重要食物來源，平均降雨量、最高氣溫、最低氣溫和平均氣溫與柑桔潛葉蛾之數量呈正相關，且降雨量和溫度與柑桔潛葉蛾為害程度呈顯著正相關。

三、二氧化碳濃度升高對昆蟲的影響

1. 對咀嚼式與刺吸式植食性昆蟲的影響

二氧化碳濃度升高會影響植物的光合作用與呼吸作用，改變植物體內的碳氮比等營養組成，甚至改變組織中胺基酸的組成種類與含量 (Stacey and Fellowes, 2002)，間接影響植食性昆蟲的發育。Bezemer and Jones (1998) 指出不同食性昆蟲對於大氣二氧化碳濃度升高的反應不同，例如潛葉性昆蟲 (如斑潛蠅或潛葉蛾等) 在高 CO₂ 濃度下，食量未明顯增加、蛹重減輕與發育時間縮短；取食木質部汁液的沫蟬，在高 CO₂ 濃度下，其若蟲存活率降低 20% 以上、生長發育延遲、但繁殖不受影響；取食韌皮部汁液的蚜蟲，在高 CO₂ 濃度下，其種群密度則隨之增高。由上可知，二氧化碳濃度升高，使蟲媒植物病毒之媒介蚜蟲族群密度隨之提高，促進病害流行速度；對於具有同樣取食習性的木蝨、粉蝨、飛蝨與部分葉蟬等昆蟲，是否也受相同程度的影響，值得深究，因為韌皮部取食習性的昆蟲，同時也是傳播植物菌質體與柑橘黃龍病的重要媒介昆蟲。

2. 對作物-害蟲-天敵的影響

大氣的 CO₂ 濃度升高，可直接影響作物光合作用及植物組織之化學組成份，並透過食物鏈，間接影響植食性昆蟲及其天敵的發育。因此，戈等 (2010) 指出研究 CO₂ 濃度升高對「作物-害蟲-天敵」營養關係系統之影響研究，即能掌握 CO₂ 濃度對害蟲與天敵的影響。目前所知 CO₂ 濃度升高，會促使棉蚜體內可溶性蛋白質及游離胺基酸濃度升高，以 700 uL/L CO₂ 濃度處理，棉蚜的營養狀況最好，對其天敵異色瓢蟲的發育也最為有利。

四、日照時數或光週期改變對昆蟲的影響

日照時數是水稻生育過程中相當的影響因子，也會影響螟蟲的趨光性、取食、棲息、交尾、滯育和休眠。增加日照時數，使溫度增高的時數增多，促使水稻生長旺盛間接提供害蟲良好棲所與食物來源，導致蟲害發生程度可能提高 (劉等，2010)，但此一推論並未加入多因子作用的考量。在光週期部分，Bradshaw and Holzapfel (2008) 發現北美洲的一種雙翅目蚊科昆蟲-*Wyeomyia smithii*，爲了因應光週期的改變，可藉由遺傳機制調整休眠時間、遷移及繁殖時機。

氣候因子在氣候變化過程對昆蟲的聯合影響

李等 (2011) 研究中國新疆維吾爾自治區昌吉州的蝗蟲災害與氣候因子的相互關係，指出溫度與降雨是影響昌吉州蝗蟲發生之關鍵因子，並提出 3 個結論：(1) 高溫與乾旱爲蝗蟲大量發生的必要條件；(2) 蝗蟲災害發生的關鍵時段及氣候因子，爲當年 5-7 月的氣溫、降雨量及前一年 11-12 月的氣溫，持續暖冬與冬季多雪有利蝗卵越冬；春季若爲乾暖氣候，則有利蝗卵孵化與蝗蛹發育，促使種群數量上升；前一年夏季和當年溫暖少雨，對蝗蟲發育有利；(3) 蝗蟲災害是多種因素聯合作用的結果，除氣候因素之外，尚需綜合考量其他因素。

以上可知，氣候變遷對昆蟲的影響，是由環境的生物因子與非生物因子共同作用的結果，這當中還需考量昆蟲本身的遺傳特性，例如昆蟲滯育 (diapause) 是由遺傳與環境 (如溫度、濕度、光週期與食物等) 共同作用導致昆蟲生長發育或繁殖中止的現象 (涂等，2009)。因此，當吾人探討溫度提高 2°C 對作物或作物有害生物到底會產生什麼影響的同時，即便以普遍運用的 Climex 這類軟體預測溫度變化對昆蟲發育與分布的影響，所獲答案仍與實際狀況存有明顯差異。因此，對於氣候變遷對農業昆蟲可能影響的研究方法，應考量多因子分析不易的情況下，如何採用兼顧理論 (單因子作用) 與現況 (多因子交互作用) 相互校正的研究方法，此部分可參考陳及馬 (2010) 與石等 (2011) 簡介之數種研究方法。

結語

氣候暖化主要肇因於溫室氣體 (greenhouse gas) 於大氣濃度大幅增加所致。雖然全球氣候變遷的成因尚待確認，部份學者認爲是由工業革命以來溫室氣體增加所致，部份學者則認爲是地球自身週期變化的結果，但不可否認的事實是全球表面均溫的確

增加，極端氣候的發生頻度也縮短當中。因此，「因應氣候變遷的調適策略」，是全球的事，也是全民的事。

我國為海島型國家，需仰賴進口的糧食與能源方能維繫全民所需，當糧食安全與能源需求成為全球關注議題之際，可預期糧食與能源價格將成為全球政治問題，為此我國更需審慎擬定短、中、長程的因應策略。

氣候變遷是一個長期趨勢，在政策面與實務面，需針對我國整體農業環境與糧食安全組成跨部會的討論，針對國家需求與產業現況調整國家政策及研究方向。Sutherst *et al.* (2011) 指出氣候變遷需以國家層次來關心，整個策略規劃層面必需包括生態、經濟、教育與國家安全等。以農業有害生物管理層面為例，制定因應氣候變遷的農業蟲害管理調適策略過程，必需從基礎面與應用面同步處理，將生產者至消費者的全部因素都納入考量，凡與生產者有關者 (如規劃適種地區可以栽培的作物種類、開發新型害蟲防治資材、評估市場需求與銷售等)，均需制定妥善的配套政策，例如某些分屬跨單位職掌的蟲害防治管理或害蟲防治資材的業務，則需由更高的行政機關召集相關單位進行業務討論，盼望可在農友因應未來蟲害種類發生變化之前，研究單位已完成新型防治資材的開發，以避免所開發之資材不符合農藥管理法規。

引用文獻

- 王豔敏、仵均祥、萬方浩。2010。昆蟲對極端高低溫脅迫的響應研究。環境昆蟲學報 32: 250-255。
- 戈峰、陳法軍、吳剛、孫玉誠。2010。昆蟲對大氣 CO₂ 濃度升高的影響。科學出版社。北京，中國。212 頁。
- 石憲宗、黃毓斌、林鳳琪、黃守宏、謝雨時、張宗仁、張淑貞、江明耀、高靜華。2011。因應氣候變遷之作物蟲害管理調適策略。第 xx-xx 頁。因應氣候變遷之農業生產與環境調適研討會。台中。xxx 頁 (已接受) (2011 年 10 月 25 日於台中區農業改良場舉行)。
- 李文濤。2008。氣候變化對歷史的影響研究評述。華中師範大學研究生學報 15:110-113。
- 李新燕、阿帕爾、馮俊平、劉海紅。2011。昌吉州蝗蟲災害的氣候特徵分析。現代農業科技 15: 180-181。
- 涂小玉、匡先鉅、徐婧、薛芳森。2009。昆蟲滯育的遺傳性。江西農業大學學報 31: 858-861。
- 陳雲蘭。2008。百年來台灣氣候的變化。科學發展 424: 6-11。
- 陳瑜、馬春森。2010。氣候變暖對昆蟲影響研究進展。生態學報 30: 2159-2172。

- 鄭清煥。1998。第五章 全球氣候變遷對台灣地區蟲害發生影響及因應對策。第 73-85 頁。氣候變遷對農作物生產之影響。林俊義、楊純明編。農試所特刊第 71 號。台中。212 頁。
- 鄧汀欽。2011。三十年來台灣瓜類病毒病害的流行趨勢演變。農作物害蟲及其媒介病害整合防治技術研討會專刊 (石憲宗、張宗仁主編)：第 147-163 頁。行政院農業委員會農業試驗所、行政院農業委員會動植物防疫檢疫局編印。台中市。222 頁。
- 劉文棟、葛意活、何燕。2010。氣候變化對水稻病蟲害發生發展趨勢的影響。中國農學通報 26: 243-246。
- Bezemer, T. M., and T. H. Jones. 1998. Plant-insect herbivore interactions in elevated atmospheric CO₂ quantitative analyses and guild effects. *Oikos* 82: 212-222.
- Bonato, O., A. Lurette, C. Vidal, J. Fargues. 2007. Modelling temperature dependent bionomics of *Bemisia tabaci* (Q - biotype). *Physiol. Entomol.* 32: 50- 55.
- Bradshaw, W. E., and C. M. Holzapfel. 2008. Genetic response to rapid climate change: it's seasonal timing that matters. *Mol. Ecol.* 17: 157-166.
- Chhetry, M., J. S. Tara, R. Gupta. 2011. Infestation dynamics of *Phyllocnistis citrella* Stainton (Lepidoptera: Phyllocnistidae) on Mosambi (*Citrus sinensis*) and its relation with important weather factors in Jammu, India. *Acta Entomol. Sinica* 54: 327-332.
- Deutsch, C. A., J. J. Tewksbury, R. B. Huey, K. S. Sheldon, C. K. Ghalambor, D. C. Haak, and P. R. Martin. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105: 6668-6672.
- Hsu, H. H., and C. T. Chen. 2002. Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorol. Atmos. Phys.* 79: 87-104.
- Huang, S. H., C. H. Cheng, and W. J. Wu. 2010. Possible impacts of climate change on rice insect pests and management tactics in Taiwan. *Crop, Environment & Bioinformatics* 7: 269-279.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Liu, F., T. Miyata, Z. J. Wu, C. W. Li, G. Wu, S. X. Zhao, and L. H. Xie. 2008. Effects of temperature on fitness costs, insecticide susceptibility and heat shock protein in insecticide-resistant and -susceptible *Plutella xylostella*. *Pestic. Biochem. Physiol.* 91: 45-52

- Masters, G. J., V. K. Brown, I. P. Clarke, J. B. Whittaker, and J. A. Hollier. 1998. Direct and indirect effects of climate change on insect herbivores: Auchenorrhyncha (Homoptera). *Ecol. Entomol.* 23: 45-52.
- Musolin, D. L. 2007. Insects in a warmer world: ecological, physiological and life-history responses of true bugs (Heteroptera) to climate change. *Global Change Biol.* 13: 1565-1585.
- Shih, H. T., C. Y. Lee, Y. D. Wen, C. C. Su, S. C. Chang, C. J. Chang, S. J. Tuan, C. Y. Feng. 2011. Advance and application prospect in an integrated management of the vectors of plant pathogenic prokaryotes. p. 107-122. In: Shih and Chang [eds.], *Proceedings of the symposium on integrated management technology of insect vectors and insect-borne diseases*. Special Publication of TARI No. 152. Taiwan Agricultural Research Institute, Bureau of Animal and Plant Health Inspection and Quarantine. 222 pp. (in Chinese with English abstract)
- Stacey, D. A., and M. E. Fellowes. 2002. Influence of elevated CO₂ on interspecific interactions at higher trophic levels. *Global Change Biol.* 8: 668-678.
- Sutherst, R. W., F. Constable, K. J. Finlau, R. Harrington, J. Lucj, and M. P. Zalucki. 2011. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *WIREs Clim. Change* 2: 220-237.
- Vincent, C., G. Hallman, B. Panneton, and F. Fleurat-Lessardú. 2003. Management of agricultural insects with physical control methods. *Ann. Rev. Entomol.* 48: 261-281.
- Visser, M. E., and L. J. M. Holleman. 2001. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proc. R. Soc. Lond.* 268: 289-294.
- Yamamura, K. and K. Kiritani. 1998. A simple method to estimate the potential increase in the number of generations under global warming in temperate zones. *Appl. Ent. and Zool.* 33:289-298.
- Zhou, X. Z., and G. Wu. 2004. Temporal and spatial dynamics of resistance to some commercial insecticides in *Phyllotreta striolata* (Fabricius) (Coleoptera: Chysomelidae) in Fuzhou, China. *J. Fujian Agri. Forestry Univ.* 33: 158-161.

Direct and indirect effects of climate change on agricultural insects: A brief review

Hsien-Tzung Shih^{1*} Yu-Bing Huang¹ Feng-Chyi Lin¹ Yi-S Shieh¹ Chung-Jan Chang^{2,3}
Shou-Horng Huang⁴ Ming-Yau Chiang¹ Chin-Ling Wang¹ Cing-Hua Kao¹

¹ Applied Zoology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture, Taichung, Taiwan, ROC

² Department of Plant Pathology, University of Georgia, Griffin, GA, USA

³ Department of Plant Pathology, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan, ROC

⁴ Department of Plant Protection, Chiayi Agricultural Experiment Station, Taiwan Agricultural Research Institute, Chiayi 60044, Taiwan, ROC

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

Abstract

The global average surface temperatures have increased by approximately 0.6 °C during the past 100 years and will continue to increase by 1.4-5.8 °C by 2100 with the atmospheric carbon dioxide concentrations expected to rise to between 540 and 970 ppm over the same period. Consequently, climate change is an important environmental dilemma which has caused great concern around the world. The nature of climate change will differ with geographical regions and its final impact on agroecosystems varies depending on the extent of temperature increase, changes in irradiance and levels of UVB, amount and patterns of precipitation and humidity, and alterations in the incidence and nature of abiotic disturbances. Despite many uncertainties of the above-mentioned factors on climate change, there is a consensus to the fact that global warming has already had and will continue to have impact on the temporal and spatial dynamics of poikilothermic animals, especially on insects and their surrounding biotic community. Insects are poikilothermic animals; their body temperature is approximately the same as that of the environment. Thus, temperature is probably the single most important environmental factor influencing insect behavior, distribution, development, survival, and reproduction. Some researchers believe that the effect of temperature on insects largely overwhelms the effects of other environmental factors. It has been estimated that with a 2 °C increase insects might experience one to five additional life cycles per season. Other researchers have found that the effects of moisture and CO₂ on insects as a result global climate change can

be potentially important. The precise impacts of climate change on agricultural insects and plant pathogens are somewhat uncertain because climate changes may or may not favor the growth of pathogens and insects. In this article, the authors review the most recent progress in the effects of climate change on agricultural insects and provide viewpoints on the following subject matters: how insects are affected by rising temperatures, changes of precipitation, and rising CO₂ levels as well as how farmers are affected and the strategy farmers can use to deal with the problem.