



入侵種與氣候變遷

史坦利·柏吉爾／安卓娜·穆爾 著

採取以生態系為基礎的調適策略，
面對全球變遷的多重驅力。



看守台灣協會



行政院農委會林務局

原著書名：Invasive Species, Climate Change and Ecosystem-based Adaptation:
Addressing Multiple Drivers of Global Change

著者：史坦利·柏吉爾 (Stanley W. Burgiel)、安卓娜·穆爾 (Adrianna A. Muir)

出版單位：全球入侵種規劃署 (Global Invasive Species Programme;GISP)

Copyright: © 2010 Global Invasive Species Programme (GISP)

引註：Burgiel, S.W. and A.A. Muir. 2010. Invasive Species, Climate Change and
Ecosystem-Based Adaptation: Addressing Multiple Drivers of Global Change.
Global Invasive Species Programme (GISP), Washington, DC, US, and Nairobi,
Kenya.

聯絡方式：Stas Burgiel 或 Sarah Simons (s.burgiel@gisp.org, s.simons@gisp.org)
Global Invasive Species Programme (GISP) (<http://www.gisp.org>)

中文書名：入侵種與氣候變遷

譯者：鍾佩真、陶曉航、陳奐宇、翁億齡、陳素嫻、
蕭人瑄、許惠萍、胡家璇、吳益銘

審稿者：謝和霖、鍾佩真

美編：羅允佳、鄭齊德

翻譯單位：看守台灣協會 

補助單位：行政院農委會林務局 



GISP感謝世界銀行對出版本報告予以補助，也要向 Sarah Simons, Doria Gordon, Piero Genovesi, Valerie Hickey, Geoffrey Howard, Frank Lowenstein, Shyama Pagad, Guy Preston 和 Arne Witt等人致謝，感謝他們提供寶貴的資訊與建議。本報告內容由作者全權負責。

Content 目錄

第一章 緒論與背景	5
氣候變遷與入侵種的交互作用	7
直接衝擊	8
間接與二級影響	11
以生態系為基礎的調適策略和生態系服務的維護	14
第二章 案例研究	16
海岸保護與完整性	17
海埔姜	17
海狸鼠	18
米氏野牡丹	18
漁業與海洋生態系	19
獅子魚	19
歐洲綠蟹與大閘蟹	21
淡水資源的服務與可得性	22
蘆竹	22
布袋蓮	23
農業、畜牧與糧食安全	25
咖啡果小蠹	26
藍舌病毒	28
人類與野生動物的健康	29
登革熱和瘧疾	30
禽痘和禽瘧疾	31
蛙壺菌	32
減緩氣候變遷	32
生質燃料	33
山松甲蟲	35
第三章 建議	36
政策與管理	37
科學與研究	40
術語表	43
參考文獻	46

全球入侵種規劃署 The Global Invasive Species Programme
入侵種與氣候變遷

GISP

第一章

緒論與背景





氣候變遷和入侵種是自然生態的兩大威脅，各自皆能嚴重威脅生物多樣性及生態系統所提供的珍貴服務。據估計，全球光是入侵種所造成的破壞，每年總計損失就超過1.4兆美元，相當於全球經濟的5%，衝擊遍及農業、林業、水產養殖、交通運輸、貿易、發電與休閒娛樂等許多部門（Pimentel等人，2001）。從環境面來看，以島嶼為例，其特殊多變的生物多樣性正深受入侵種打擊，各島嶼有半數到三分之二的物種滅絕都要歸因於入侵種（Donlan和Wilcox，2008；IUCN，2009b）。相較之下，全球氣候變遷所造成的經濟損失，預估可能達到國內生產毛額（GDP）的1-20%，約莫等於每年5%的GDP（Stern，2006）。單看這些預測，就足以讓負責國家發展的官員正視這些威脅並採取行動。

氣候變遷與入侵種這兩種導致全球變遷的推手若結合起來，則兩者間的交互作用會使情況變得十分錯綜複雜；也有愈來愈多的證據顯示，氣候變遷會使原本就已極具破壞力的生物入侵衝擊更加惡化。由氣候變遷所帶來的影響，諸如氣溫暖化與二氧化碳濃度改變等現象，都可能有利於入侵種，因為入侵種適應干擾的能力較強，對生物地理條件與環境控制力量的容忍範圍也較大。入侵種帶來的衝擊可能不止如此，因為其數量與範圍一旦增加，也可能會競奪日益稀少的資源（如水資源）。溫暖的空氣與水溫可能使入侵種得以突破原先環境的阻礙，藉由自然或人為的途徑擴散開來。

從糧食安全的面向來看，若主食作物已先遭有害生物入侵而毀壞，那麼要再來處理氣候變遷對該主食作物生產力所帶來的影響，顯然就沒什麼意義。同樣地，從保育的觀點來看，若我們想要保護的生物多樣性早已被入侵種摧殘殆盡，那也就不再用再談如何面對氣候變遷了。重大農業病蟲害或危及健康的疾病大流行，都可能導致人們生活痛苦、損失難以計數。

我們能做些什麼呢？以生態系為基礎的調適策略（Ecosystem-based adaptation）近來備受矚目，咸認是符合成本效益且能保護人類與生態群落免受氣候變遷衝擊的方法（Heller和Zavaleta，2009；Mooney等人，2009；World Bank，2009）。所謂以生態系為基礎的調適策略，乃是可增強自然面對氣候變遷衝擊時的恢復力、同時有助於滿足人類基本需求的策略。¹而入侵種會威脅到這些基本需求、危及生態系功能，因其能利用棲地的擾動、面臨壓力的物種以及原本是健康生態系的其他薄弱環節，從而影響生態系的多重功能，包括供給、調節、支持以及文化等服務（Millennium Ecosystem Assessment，2005；Vila等人，2009）因此，以生態系為基礎的方法不僅是為了拯救生態系，更是為了利用生態系以「拯救」人們與其賴以生存的資源。這樣的方法也能提供一整合性的架構，以面對來自氣候變遷和入侵種的雙重衝擊。



S. Burgiel

氣候變遷和入侵種並不限定於任一地理區域或生態系，然而兩者相互作用的模式，上自全球、下至地方及物種群落，各有獨特樣態。儘管自然科學家在研究這種全球變遷過程的複雜交互作用方面持續有所進展，但仍亟需實

¹關於更詳盡的術語清單及定義，請見附於本報告末的術語表。



際作為來減緩氣候變遷和入侵種的綜合影響。幸好我們已知道不少能夠處理入侵種威脅的重要政策和管理辦法²，同時也知道某些廣泛的策略，以適應全球變遷及周遭世界日益增加的不確定性；這些都是我們為了保護動植物與人類健康以及自然生態系，迫切需要採取的行動。生物入侵加上氣候變遷，會使入侵種管理更具急迫性，同時入侵種的行為以及相對應的管理措施也會變得更加複雜。再者，在考量如何設定管理措施的優先順序，才能維護最重要的生態系功能時，氣候變遷也能提供額外的思考方向。

本報告的對象是政策制定者，特別是負責制定氣候變遷減緩與調適策略，以處理保育、生態系服務、農業和永續生計等議題的政策制定者。本報告聚焦於入侵種和氣候變遷的初級連結，以及兩者引發諸多衝擊之間的次級與三級交互作用。最後一併附上建議，以指引讀者在考量跨部門的氣候變遷因應策略時，應如何整合入侵種的預防與管理措施。

現有的科學與保育文獻多圍繞在已發展國家中那些得到充份研究的入侵種，而本研究以回顧這些文獻為基礎，探討這兩個主要的全球變遷驅力的交互作用，結果再次證實了相關知識仍相當不足且仍有疑義。後述的個案研究，即凸顯了入侵種、氣候變遷，以及以生態系為基礎的調適措施，這三者之間的重要關聯與尚待解決的相關問題。

本報告主要想傳達下列三點訊息：

1. 氣候變遷的直接、間接衝擊會助長入侵種的引入、立足或擴散。
2. 入侵種會使生態系在面對其他氣候相關壓力源時更加脆弱，同時降低生態系吸存溫室氣體的潛力。
3. 採取以生態系為基礎的調適措施，可以預防引入新入侵種，並滅除或控制既存有害物種，從而減輕生態系所受到的這些壓力，進而確保其提供重要服務的能力。

氣候變遷與入侵種的交互作用

跨政府氣候變遷小組（Intergovernmental Panel on Climate Change；IPCC）估計過去一世紀以來，地表均溫已上升了0.6°C（IPCC，2002）。該小組更預測，接下來一百年，全球平均溫度將較工業革命前高1.1到4.6°C。目前已觀察到海洋溫度的上升，在1961至2001年期間平均約增加了0.10°C（IPCC，2007b；Levitus等人，2009）。這種氣溫變化的現象各地並不一致，以區域或國家的規模來看，會發現各地有相當大的變異性；例如在高緯度區域，溫度上升情形就較明顯。氣溫改變也與水文變化（如降雨型態、地下水位）、海平面升高及二氧化碳濃度增加的情形相符。此外，氣候變遷會對不同生態系類型帶來程度不等的打擊，其中以淡水棲地、濕地、紅樹林、珊瑚礁、極地與高山生態系、雲霧林等最為脆弱（SCBD，2009）。

²本報告所指的入侵種管理涵蓋預防、滅除與控制這三種措施，並且認為應採如下優先順序來衡量這些措施的資源與能力配置：預防優先，滅除次之，最後才是控制生物入侵。（CBD，2002；Wittenberg和Cock，2001）



這種種的生態系都可能遭受各種入侵種的侵害；因此現在有一個重要問題需要政策制定者、科學家以及資源管理者一起來思考，也就是：以場址的規模來看，入侵種如何與氣候變遷交互作用？部分研究專家已由不同角度切入這個議題，包括入侵的途徑（Sutherst，2000；Hellman等人，2008）、淡水生態系（Kolar和Lodge，2000；Rahel和Olden，2008）、海洋與海岸生態系（Carlton，2000；Hershner和Havens，2008）、森林（Willis等人，2010）以及較一般性的概述（Capdevila-Arguelles和Zilletti，2008；Low，2008；Mainka和Howard，2010）等。以下各節將探討氣候變遷與入侵種間的廣泛關連，提供一些具指標性的實例，藉此檢視兩者帶來的主要影響，彼此的關連以及因而衍生的後續效應。針對這些議題，本報告後半部的個案研究會提出更詳細的討論。

直接衝擊

展望未來，氣候和生物地理將會發生一連串的變化，這對原生種或外來種都會帶來重大影響。我們可以把一物種生存所需的特定生態與氣候條件（或參數），視為其生物氣候包絡（bioclimatic envelope）。環境變因（如溫度與水資源可得性）一旦有所變化，就會對物種造成影響，尤其是變因的改變幅度超出物種生存所需的生物氣候包絡範圍時，帶來的影響將更大：這可能會促使物種遷徙至較適合生存的棲地，而若該物種因為生物或物理因素無法遷徙，則其族群數就會下降。此外，物種與寄生宿主的關係、天敵的存在與否以及其他生態動態，對調節族群大小也都有舉足輕重的影響。

物種競爭與分布範圍的變化：一般認為入侵種的耐受範圍較原生種大，亦即入侵種擁有較大的生物氣候包絡，因此有較多的合適棲地（Walther等人，2009）。舉例來說，溫度變化對原生種的衝擊可能更勝於新進物種，於是改變了兩者間的競爭態勢。在某些情況下，溫度的變化可能不是決定因素。例如，就入侵植物而言，降雨型態變化、二氧化碳濃度升高、氮沉降增加，這些變因的影響更勝於溫度（Richardson等人，2000）。在各條件受到控制的情況下，三碳植物比四碳植物更能適應二氧化碳濃度的上升，但是其他諸如溫度、濕度等變因，也會對植物生長帶來額外影響（Dukes，2000）。因此必須綜觀所有與特定物種生物氣候包絡相關的變因，並考量該物種廣泛的共生關係和食物網絡。



S. Burgiel

競爭動態的變化情形並不會全球一致，特別是考慮到不同的氣候系統（如熱帶與溫帶對比）或不同緯度（低緯與高緯對比）等情況。隨著溫度的上升，在緯度與海拔較高的地區，可能會看到物種分布範圍的改變，以及從原先氣溫較暖和的鄰近地區遷移過來的「新物種」（Parmesan，2006）。至於熱帶生態系，由於已沒有其他地方比熱帶地區更暖和，所以並不會因為氣溫升



高而面臨大批自其他地區遷徙過來的物種。然而，降雨型態改變與其他氣候變因還是有可能衝擊熱帶生態系，而使其更容易受到入侵種的侵害。除了分佈範圍的擴張，入侵種也有可能因為氣候或其他因素，而出現分佈範圍萎縮或衝擊減弱的現象（Hellman等人，2008，Richardson等人，2000）。

助長物種遷徙：氣候變遷也會導致極端天候事件的嚴重度。強勁的風、洋流與波浪會助長入侵種的移動，使其蹤跡遍及區域甚至全球。比如2005年颶風季時，仙人掌蠹蛾（*Cactoblastis cactorum*）可能就是跟著颶風飄洋過海，從加勒比海的棲息島嶼被吹到墨西哥，而在當地引發嚴重的生態與經濟威脅，有超過104種仙人掌受到危害，其中有38種是特有種（Mafokoane等人，2007；March，2008）。紅棕櫚葉蟻（*Raoiella indica*）是生產果實的棕櫚樹和其他觀賞植物的重大害蟲，其很可能藉由大型風暴、颶風、遭寄生的植株與種子，擴散到加勒比海各地（Red Palm Mite Explosion，2007；Welbourn，2009）。其他地區也觀察到類似的現象，例如史瓦濟蘭的入侵種銀膠菊（*Parthenium hysterophorus*）。1984年，德莫妮雅颶風挾帶其種子侵襲位於內陸的史瓦濟蘭，因此銀膠菊在當地也被暱稱為德莫妮雅草（*Demonia weed*）；銀膠菊隨後持續擴散蔓延，對於當地的農業生產、原民狩獵區和野生動物保留區帶來重大打擊（IRIN，2002、2010）。

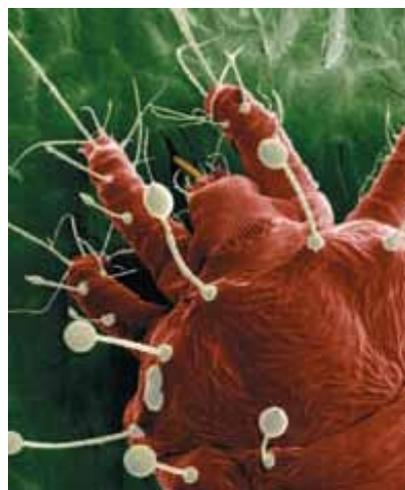


仙人掌蠹蛾。Caleb Slemmons

當然還有其他例子。比如美國中南部的水災，導致原本被侷限在水產養殖場或圈養設施的入侵種向外擴散。養殖銀鯉（*Hypophthalmichthys molitrix*）和大頭鱧（*H. nobilis*）原本是為了清除藻類，藉此維護水產養殖場與污水處理設施，然而1980年代初期發生嚴重水災，使這些入侵魚類遁入密西西比河，造成現今對五大湖區的生態威脅（Schofield等人，2005；Sea Grant Pennsylvania，2007）。又如在澳洲的北領地（Northern Territory），刺軸含羞木（*Mimosa pigra*）快速擴散蔓延的主要原因也是水災；刺軸含羞木已躋身世界百大入侵種，澳洲更將其列為國家一級有害植物（Lonsdale，1993）。

儘管相對於聖嬰現象或其他原因，很難將未來的這類極端天候事件直接歸咎於氣候變遷，但全球大氣與水的循環以及更嚴重的天候事件，明顯會助長物種的遷徙。

氣候變遷也可能導致人們為了保育或其他目的而刻意遷移物種。某些科學家與保育學者提出協助遷移（assisted migration）的概念，認為應協助受氣候變遷威脅的物種遷移，以保護瀕臨瓦解的生物多樣性。這類刻意遷移的提案應考量涉及的廣泛生態動態，以免這些保育物種遷至新生



紅棕櫚葉蟻。Eric Erbe；上色：Chris Pooley。



態環境後，反而成為入侵種。³種植生質作物或生質燃料作物，可能也會導致入侵種迅速擴散至新棲地，或增加入侵種已存在地區的繁殖體壓力（propagule pressure）（Raghu等人，2006）。因此在進行這類活動前，應透過風險與環境影響評估等工具，以降低生物入侵的風險。

原生入侵種與外來入侵種：生態系的改變，除了可能增加外來種的競爭力以外，也可能形成獨厚某原生種的環境條件，因而改變原先的族群動態或物種分布範圍。前面討論到，物種之間的競爭態勢會因環境變遷而有所消長，因此，原生種也有可能在其分布範圍內與固有群落中產生越來越大的衝擊。這種現象在水生環境中屢見不鮮，比如鹽度上升或污染增加可能在抑制部分原生種之餘，讓其他原生物種取得優勢；因此管理措施必須得關注每一種有害物種，無論其為原生或外來。對此，現有對抗外來入侵種的經驗無疑幫助極大，而基本的預防措施因為可減少潛在入侵種的整體數量，也極有助益。

舉例來說，北美洲的原生種山松甲蟲（mountain pine beetle）會啃食松樹，在科羅拉多州、美國西部各州、加拿大的英屬哥倫比亞以及亞伯達省部分地區，蟲害尤其氾濫。近幾年來暖冬頻仍，冬天的低溫不足以讓山松甲蟲大量死亡，而導致山松甲蟲族群數暴增，大量松林遭啃食而亡。又如在非洲部分地區，雖然有瘧疾存在，但在目前氣候和海拔條件下，瘧原蟲在其宿主甘干比亞瘧蚊（*Anopheles gambiae*）體內無法完成生命週期。然而氣溫若升高，可能使原先被認為安全的地區爆發疫情。原生種的負面衝擊隨氣候變遷而增加的情形也可見於農業地區，一些帶有侵略性的原生植物，也可能因氣候變遷而取得優勢，侵害農作植物。



S. Burgiel

將原生種歸類為入侵種，是個極具挑戰性的議題，因為舉凡現場管理工作到法律政策架構的實施，都明顯會受到難以預料的複雜影響。傳統上，各國與國際協定在處理入侵種議題時均將入侵種視為外來種。⁴由於相關的法律、規章、資助機制和因應措施，全都以外來入侵種為特定對象，因此若原生種也可歸類為入侵種，就會產生定義的問題（Walther等人，2009）。因此，這需要改變目前作法，將產生嚴重危害的原生種也納入為外來入侵種而設計的既有政策、制度與資助機制中，畢竟，不論是原生入侵種或外來入侵種，兩者的因應機制及方法均大同小異。

對碳吸存的影響：入侵種的回饋效應可能會加劇氣候變遷。完整的生態系統能吸存碳，有助於抵銷溫室氣體排放的效

³在保育界中，協助物種遷移的利與弊備受討論。目前「國際自然保育聯盟」（IUCN）已成立「遷移保育類動植物專門小組」（Task Force on Moving Plants and Animals for Conservation Purposes），由該聯盟的「入侵種專家小組」（Invasive Species Specialist Groups）與「再引入專家小組」（Re-Introduction Specialist Groups）召集，以進一步探討該議題並考量如何制定指引。

⁴例如，《生物多樣性公約》便特別針對外來種，亦即不在其過去或現在自然分布範圍內的物種。（CBD，2002）



應，入侵種卻會削減這種能力。前面討論過的山松甲蟲及其他森林有害生物，都可能增加樹木的死亡率，進而減少二氧化碳的吸存量。例如由一種真菌（*Dothistroma septosporum*）引起的松針紅斑病（*Dothistroma needle blight*），就是南半球人工松林的大敵（Woods等人，2005）。入侵草類和熱帶森林大火의 結合，同樣也會取代原始森林，並因此減少這些生態系的碳吸存量。

在管理上特別令人擔心的是那些能夠增加生態系碳吸存量的入侵種，例如德州沿海草原的入侵種烏柏（*Triadica sebifera*）。如果僅考量要減緩氣候變遷，政策制定者可能只會看到某物種的碳吸存效益，卻忽略其對生態所造成的更多負面衝擊。因此必須進一步採取長期的觀點，衡量演替生態系統的碳吸存量（例如比較再生林的碳吸存量，以及引入外來植物與其他物種後的碳吸存量），並考慮更廣泛的生態價值與服務，才能做好這方面的管理決策。

間接與二級影響

氣候相關的影響即便不直接導致生物入侵，仍可能間接促成入侵種的引入。需特別關注的領域包括干擾事件的作用及其對生態系的影響，以及隨著氣候變遷而持續變化的物種組成與食物鏈。這些現象也可能導致更廣泛的回饋效應，使得生態系更為脆弱，更易受到入侵種立足與擴散的危害（Campbell等人，2009）。舉凡土壤組成、水旱災循環、野火發生規律、冰河覆蓋面積等方面的改變以及永凍層暖化，都可能提供入侵種繁盛的沃土。最後，無論有心或無心，人類對氣候變遷的因應措施也會影響入侵種帶來的衝擊。

干擾事件：如前所述，氣候變遷會帶來許多影響，包括使極端天候事件的強度增加。大多數地區雖有較準確的氣候模擬，但根據一般經驗，專家認為在氣候變遷影響下，潮濕地區可能會變得更潮濕、乾燥地區可能會變得更乾燥。這可能會增強洪水與乾旱的強度，特別是季節性降雨或個別暴雨所造成的集中降雨。不論是洪水還是乾旱的強度增加，都會壓迫在地生態系提供可能的立足處，使能耐受極端天候或因干擾事件而繁旺的物種得以趁隙而入。

除了直接遷移物種（請見前述「助長物種遷徙」）以外，暴風雨的破壞力將增加棲地的擾動，而提供原已存在的入侵種立足和擴散的機會。舉斯里蘭卡為例，2004年南亞海嘯過後，刺梨（*Opuntia dillennii*）、牧豆樹（*Prosopis juliflora*）、馬櫻丹（*Lantana camara*）、香澤蘭（*Chromolaena odorata*）等入侵種，便在體無完膚的海岸地區大幅擴張；而布袋蓮（*Eichhornia crassipes*）和水燭（*Typha angustifolia*）則大舉入侵瀉湖和河口（Bambaradeniya等人，2006）。另外，在庫克群島（Cook Islands）的拉羅湯加（Rarotonga），桔梗倒地鈴（*Cardiospermum grandiflorum*）和小花蔓澤蘭（*Mikania micrantha*）也正逐漸扼殺原始森林的綠意；這些入侵植物起初應是為了觀賞用途而引入，





結果1987年熱帶氣旋莎莉（Cyclone Sally）肆虐之下，種子被廣泛散播到被這個暴風嚴重擾動的地方（根據與 John Waugh 的私人通訊，2010）。

面對自然災害侵襲，後續的救濟工作也可能非刻意引入入侵種，包括藉由糧食援助，而把內含外來種子或繁殖體的食物運進來；或藉由外地的運具（包括用於建造、消防、軍事等用途的運具）帶進來。在進行重建或開發計畫時，則有可能為了快速復甦當地經濟，而刻意引入入侵種；比如2010年海地遭逢強震後，就迫切種植了外來的生質燃料作物。

水文模式的改變（如乾旱）、森林病蟲害的爆發、入侵植物造成落葉殘枝等燃料的累積增加，都會影響野火的發生規律：在原本自然就會發生火災的地方，火災的頻率與強度可能會提高；在原本火災並非自然規律的地方，則變得較容易著火（D'Antonio, 2000；Dukes, 2000）。在某些案例中，如受到生物入侵的濕地，生態系的動態可能因此而改變：在調節物種互動上，野火發生規律反而比原本的水文循環扮演更重要的角色（Hogenbirk和Wein, 1991；引用於D'Antonio, 2000）。

舉例來說，在加勒比海地區，入侵植物就改變了生態系原本的野火發生規律以及水文循環，包括可耐受野火與不耐受野火的生態系都受到影響。在波多黎各，巴弗草（*Pennisetum ciliare*；一種狼尾草）入侵「瓜尼卡國家旱林」（Guanica Dry State Forest），為頻繁的草原火災提供燃料，對不耐受野火的原生草種帶來不利影響，並造成一個惡性循環，促使巴弗草得以快速擴張。類似情況如入侵巴哈馬和佛羅里達州南部的小葉海金沙（*Lygodium microphyllum*），這種會攀爬樹身的蕨類會讓野火沿燒到樹冠，而導致火勢更為猛烈，造成某些物種死亡率增加，因為這些物種原本已適應低熱度、只在地表低層延燒的火災，如加勒比松（*Pinus caribaea*），一種原生於巴哈馬、古巴、土克凱可群島以及中美洲部分地區的植物（TNC, 2002；Caribbean and Florida Fire and Invasives Learning Network, 2009）。又如蘆竹（*Arundo donax*）、旱雀麥（*Bromus tectorum*）、歐洲荊豆（*Ulex europaeus*）以及鋪地狼尾草（*Pennisetum clandestinum*）等入侵性雜草，已知會增加火災的火載量（fire load）和熱強度，導致某些和野火相依存的物種死亡率增加，讓外來種有更多的入侵機會。

物種組成與生態系功能的改變：氣候變遷對物種組成與生態系所帶來的影響，人們已逐漸了解有哪幾大類，不過仍未能全面詳盡地了解這些影響，尤其是在場址層級上，每個個案所受到的影響可能都是獨特的。觀察到的受衝擊層面包括：物種的分布地理範圍、生物氣候學、光合作用速率、碳吸存量與生產力（SCBD, 2009）。

這些受衝擊層面的動態結合起來，會影響到物種間的互動以及更廣泛的層面如群落組成、食物網與相對應的生態系功能。例如花期要是提早，就可能無法配合共生傳粉媒介的出現；同樣從入侵種管理的角度來看，用於生物防治的物種功效，也會隨著目標入侵種的發育、型態和繁殖情況的改變而有所不同（Ziska 2005）。氣溫上升與季節延長，會使昆蟲與哺乳類的植食（herbivory）行為增加、繁殖率提升，而可能會影響到植物繁殖。這些看似獨立的交互作用，可能對層面更廣的生態系服務（如儲存與過濾地下水、授粉、抑制疾病以及碳吸存等）帶來複合效應。



上述物種組成與生態系功能的改變，對入侵種立足與擴散能力的影響，和「直接衝擊」一節所述「入侵種因競爭態勢改變而對生態系所帶來的威脅」密切相關。兩者間的區別只是反映生態系變化的進程不同，也就是「入侵種為生態系改變的最初原因」以及「因其他因素導致生態系變化而引發入侵種的反應行為」，兩者間的不同。

社會互動與回應：最後，社會對氣候變遷及其諸多影響的回應，會影響到入侵種引入或擴散的可能性。生長快速、能適應惡劣環境、耐受干擾事件又十分多產的強健物種，其在農業、林業、水產養殖業、生質燃料和其他固碳活動上的需求將會增加。巧的是這些特質和入侵種不謀而合，且目前已不乏人們提議或使用已知入侵種的實例。舉例來說，有許多被提議做為生質燃料的物種，如蘆竹 (*Arundo donax*)、蓖麻 (*Ricinus communis*)、中國芒 (*Miscanthus sinensis*)、詹森草 (*Sorghum halepense*)、麻瘋樹 (*Jatropha curcas*) 在某些地方已被列為入侵種 (Low和Booth, 2007; Barney和DiTomaso, 2008; GISP, 2008)。

以全球角度觀之，改變貿易模式和途徑，也會增加引入外來種至新環境的可能性。氣溫升高與降雨量變化對農業生產力影響甚鉅，因此會導致農作生產的改變。農業商品的貿易若產生變化，就會影響到商品的運輸網絡，進而影響到隨著各式載具而來的入侵種引入風險，如船舶壓艙水、船殼污損、航空和陸地交通工具等媒介。舉例來說，北極海冰的消融已促成西北航道的開通，這條航道不單能供船舶航行運輸貨物，更帶來開採原油、天然氣與其他自然資源的機會。如此一來，這個原本相當原始的區域遭受入侵種威脅的機會，就會透過船舶壓艙水、船殼污損、鑽井平台及其他設備，而顯著增加。



S. Burgiel

水資源枯竭、土地退化與海平面上升，可能會導致人口大量遷移，甚至產生氣候難民。人口遷移、人口密度增加、環境衛生惡劣，都可能會孳生病媒造成疾病傳播；而疾病的傳播情形又很可能因為氣候暖化，造成疾病（如瘧疾、登革熱與黃熱病）分布範圍擴張而更加惡化 (Reiter, 2001)。被迫遷徙的人們可能會攜帶喜歡的作物、家畜或觀賞物種至新居處，而因此加速新外來種的散播。

入侵種管理應成為氣候變遷調適策略的首要手段。人類為了適應氣候變遷，將會積極建立抵禦氣候變遷的能力，方法包括發展硬體基礎設施（如海堤、輸水系統）以及採取可加強生態系既有功能的實務。

在研擬氣候變遷調適與減緩的國家策略時，必須將入侵種引入與擴散的可能性納入考量。比如替代能源策略可能會考慮採用已知入侵植物做為生質燃料，而大型風力與太陽能發電廠可能會干擾生態系統的完整性，從而導致入侵種的引入。因此在刻意引入特定物種前，



必須預先採取適當的風險評估，並搭配更全面的環境影響評估以檢視基礎設施的開發，將有助於減少上述疑慮。

以生態系為基礎的調適策略和生態系服務的維護

社會可以積極加強生態系及其服務的恢復力和調適能力，使其更能面對氣候變遷與入侵種的威脅。所謂「以生態系為基礎的調適策略」，其定義為：

把運用生物多樣性與生態系服務的措施，融入整體調適策略，以幫助人們適應氣候變遷的諸多不利影響。以生態系為基礎的調適，會利用許多機會達成生態系的永續管理、保育與復育，使生態系得以提供服務，進而幫助人類適應氣候變遷的衝擊。這種調適方法的目標乃在維持並增強生態系與人類的恢復力，減少其脆弱性，使其更能面對氣候變遷的不利影響（SCBD，2009）。

生物多樣性之所以受到社會珍視，乃基於種種理由，包括功能與美學等層面。健全的生態系能提供糧食、纖維、建材及飲用水等多樣服務，支撐著日常必需品的生產。許多文化與傳統習俗都是基於特定生態要素或功能而發展，這些依存性維繫了無數個世代，早已根深蒂固。然而，入侵種再加上氣候變遷，卻嚴重威脅著人與自然這份最根本的關係。

保護森林、濕地、海岸棲地及其他自然生態系，可以裨益社會、經濟和環境，這些利益一是直接透過永續管理生物資源而來，二是間接透過保護生態系服務而衍生。保護區及其中的自然棲地，能保護集水區、調節水量與水質、防止水土流失、影響降雨型態及在地氣候、保存可收穫的再生資源及基因庫，也能保護種畜、自然授粉者和種子傳播者，而這些都是維持生態系統健全的要素。氾濫平原的森林和海岸的紅樹林能防範暴風雨侵襲，就像一道安全藩籬，抵禦洪水、龍捲風、海嘯等自然災害；而自然濕地則能過濾污染物，並可做為當地漁場孕育幼苗的場所。若能提供重要棲地與自然資源更佳的保護與管理，便能澤被貧窮、邊緣化的當地社群，讓他們在乾旱與災害來臨時，仍可繼續享受生態系的服務、取得必要的資源。（The World Bank，2009）

生態系服務為社會帶來廣泛的價值，因此失去生態系服務及其相對應的生物多樣性，將無可避免導致貧窮。以維生為目的的生計，尤其是和農林漁牧相關者，是健全的生態系及其服務的立即受害者（TEEB，2008）。也因此，在農林漁牧這些部門，長期以來便努力對抗生物的入侵。對於那些非入侵種直接影響的社群，原本認為入侵種帶來的衝擊多限於農業或環境的範圍內，然而這項認知近來有了關鍵的轉變，人們了解到入侵種對於人類社會其他重要部門也會間接產生廣泛的負面影響。加上全球化的關係，貿易的程度與數量日增，運輸效率提高，而社區與社區間的距離、人類聚落與原本不易接近的生態系之間的距離，也逐漸縮短消弭，這種種因素更強化了入侵種的危機。不幸的是，氣候變遷只會讓情況雪上加霜，為人們帶來更多壓力、挑戰和恐懼。

「以生態系為基礎的調適策略」主要是研擬管理措施，以加強生態系的恢復力，讓其在



氣候變遷影響下仍能提供重要服務。這些管理措施的關鍵要素，就是要降低其他重大威脅，以免其他威脅與氣候變遷的效應結合，導致生態系癱瘓而無法正常運作。主要的國際環境政策已開始注意到這層關聯，比如《生物多樣性公約》已將管理全球變遷的重大驅力視為優先要務，以制止生物多樣性繼續以目前的速度流失；同樣在《聯合國氣候變化綱要公約》下進行的討論，也開始強調應藉由保護周遭的自然生態系，來減緩與調適氣候變遷的影響。

入侵種顯然是個重大壓力源，且已確定會直接導致損失生物多樣性；因此入侵種管理的現有方法與努力，均有潛力增進物種和生態系抵禦氣候相關衝擊的能力，進而帶來重大效益。鑑定有哪些關鍵生態系及其提供了什麼服務，也可提供風險評估、規劃與設定優先順序等程序所需的資訊，以利管制現有入侵種及其引入途徑。



S. Burgiel



全球入侵種規劃署 The Global Invasive Species Programme
入侵種與氣候變遷

GISP

第二章

案例研究





接下來的段落是以對人類諸多部門與關切事項極具重要性的關鍵生態系過程為背景架構，探討入侵種、氣候變遷與生態系統服務三個領域的相互關係。如前所述，要了解這三個領域的交互作用，目前的科學知識仍有限，因此我們嘗試找出能夠清楚呈現關鍵層面及威脅的案例，並提出必須由科學界及決策者解決的關鍵問題。更具體的來說，我們是以人類必須保護與維持的生態系產品及服務（例如淡水供給、糧食安全）為重點。有許多案例因缺乏可參考的科學研究，而迫使我們必須採用更多的假設性分析，來說明這些問題。關於氣候變遷與入侵種的研究工作，傳統上都必須面對某種程度的不確定性，而這些不確定性未來很有可能提高；然而，我們仍可以依據現有的知識及實務，做出「良好」的管理決策，以因應入侵種的威脅。

海岸保護與完整性

氣候變遷的兩種主要後果是造成暴風雨的嚴重性增加以及海平面上升。這兩個現象所帶來的強風、洪水與暴潮，會增加海岸侵蝕、鹽份上升及風暴損害，而對海岸、社區及基礎設施造成重大衝擊。健康的海岸生態系可以緩衝這許多的作用，而能夠保護生物多樣性與人類的居住安全。例如，專家指出，美國路易斯安那州沿海的溼地與低窪島嶼系統因為退化與遭到破壞，才會在2005年時讓卡崔娜颶風長驅直入，襲擊紐奧良市，造成比原來有海岸生態系緩衝時還要嚴重許多的破壞（Shaffer等人，2009）。同樣地，檢視2004年東南亞大海嘯所衝擊的海岸地區時也可發現，有比較完整生態系的地區比起海岸生態系被開發或改變的地區來說，所受到的破壞較小（Mascarenhas和Jayakumar，2008；Kaplan等人，2009）。

雖然卡崔娜颶風或海嘯可能不是因為氣候變遷所造成，然氣候變遷所帶來的影響在未來可能會促成類似的災害。此外，已受到入侵種嚴重危害的海岸生態系統，在面對天候事件或是海平面上升時，將更加脆弱。以下介紹一些入侵海岸生態系的物種案例，包括海埔姜（beach vitex）、海狸鼠（nutria）、米氏野牡丹（*Miconia calvescens*），並說明這些入侵種與氣候變遷的交互作用。

海埔姜

原生於亞洲與太平洋海島的海埔姜（*Vitex rotundifolia*）是多年生灌木，多生長於海岸沙丘上。這種植物是在1980年代中期被引入美國東南部海岸地區作為觀賞園藝植物，並藉以控制沙丘侵蝕，穩定沙灘。不幸的是，海埔姜在北卡羅來納與南卡羅來納的海岸地區造成嚴重的沙丘流失與棲地破壞，因為其根系會造成高速率的侵蝕（Westbrooks和Madsen，2006），使房子與其他海岸基礎設施在面對暴風雨及逐步進逼的侵蝕時脆弱性增加，同時造成其他原生物種的棲地消失。海埔姜的植株也會阻礙母海龜上岸下蛋，並且會纏住新孵化的小海龜。另外，氣候變遷帶來的暴風雨強度增加跟海平面上升，將會與海埔姜所造成的環境衝擊交相作



海埔姜，美國夏威夷希洛（Hilo）。
Forest & Kim Starr。



用，而使得海岸沙丘生態完整性受到雙重打擊。暴風雨及其他惡劣的天候有利於海埔姜的擴散，因為這種植物是藉由走莖與植株片段傳播（Gresham和Neal，2004；Cousins等人，2010）。現今美國採取化學與物理防治法，戮力管理海埔姜所造成的問題，然而儘管其對於海岸所造成的明顯傷害，海埔姜仍可在美國某些地區的市場上販售。

海狸鼠

原生於南美的海狸鼠（*Myocastor coypus*）屬於水生齧齒類，生長在沼澤、溼地以及擁有豐富植被的其他海岸鹹水環境。主要是因為皮毛生產的商業需求，而被引入到北美、歐洲、亞洲及非洲等地。海狸鼠以水生植物的地下莖與幼芽為食，而嚴重影響整體植被以及



海狸鼠。Or Hiltch

依賴此種棲地的鳥類、魚類、植物與無脊椎動物（Carter和Leonard，2002）。在路易斯安那、馬里蘭、密西西比等州的海岸地區，海狸鼠已使得大片的沼澤地轉變為開放水域，因而增加海水入侵、降低自然處理雨水逕流的能力、並增加了內陸面對暴潮與侵蝕時的脆弱度（Carter等人，1999；與Steve Kendrick的私人通訊）。目前採取的管理方式包括獵捕、設陷阱以及利用狗群來捉海狸鼠，然而這些方法十分耗時耗本（Panzacchi等人，2007）。海狸鼠的擴散加上氣候變遷預期會造成的嚴重暴風雨及海平面上升，都將危及沼澤濕地提供重要生態系服務（如海岸保護、提供自然棲地和繁殖場域）的能力。

米氏野牡丹

米氏野牡丹（*Miconia calvescens*）是原生於中南美的樹種，在引入大溪地、夏威夷、斯里蘭卡及太平洋其他地區、亞洲與加勒比海地區後，現已成為當地森林的重大入侵植物。1937年作為景觀植物而被引入大溪地，至1996年，米氏野牡丹已擴散到65%的區域，而該島有25%的面積為米氏野牡丹純林（Meyer，1996）。在大溪地，米氏野牡丹的引入與立足已大幅改變原始棲地的樣貌。米氏野牡丹的根部會使土壤結構不穩定，而在有大量降雨的地方，增加山崩與陡坡侵蝕的機率，這已在大溪地與夏威夷河岸、海岸與珊瑚礁區造成淤積情形惡化。在南太平洋區域，預期氣候變遷會造成某些季節的降雨增加，這將使得米氏野牡丹所造成的山崩情形惡化，從而使得山崩對土壤侵蝕、珊瑚礁魚群存活與流域功能所帶來的環境衝擊更加嚴重（Christensen等人，2007）。

米氏野牡丹入侵的衝擊間接影響了海岸生物多樣性與生態系服務，並造成大眾危害。專家估計有40-50種大溪地特有植物可能因為米氏野牡丹的擴散而面臨絕種危機。為了有效防治其擴張，大溪地已引入一種隸屬於不完全菌亞群（Deuteromycotinal）的真菌，叫作*Colletotrichum gloeosporioides forma specialis miconiae*，會使米氏野牡丹生病死亡，目前已有正面跡象顯示其確實具有防治效果，已使該地特有植物開始回春（Meyer和Florence，1996；Meyer等人，2007）。



漁業與海洋生態系

海洋環境提供了重要的資源與服務，其透過漁業、溫度調整以及使海岸免於侵蝕與暴潮的保護作用，支持生活在沿海以及其他地區的人們。然而，大多數人仍未察覺海洋生態系對於入侵種與氣候變遷的敏感程度。近來研究指出，某些海域生物群落可能因為入侵種的擴散，而比陸域生物群落更快地受到氣候變遷的影響（Sorte等人，2010）。目前海岸地區的海域與河口棲地正受到入侵種的衝擊，同時氣候變遷也正在改變海洋溫度、化學作用、洋流與海平面高度（Bindoff等人，2007）。

入侵種與氣候變遷在海洋環境方面的主要交互作用之一是入侵種的分佈範圍已開始往極地移動。對於分佈範圍受限於溫度的物種，即使海洋溫度增加不到2°C，便足以大幅擴張範圍。一般而言，海洋入侵種的擴散速度普遍較陸域入侵種快一個數量級（Sorte等人，2010）。例如，十幾年前，卡爾頓便已發現有十種海洋物種（包括軟體動物、甲殼動物、海鞘、水媳、苔蘚蟲類）沿著北美太平洋海岸顯著地擴張範圍（Carlton，2000）。有時候，極端天氣事件也會導致物種範圍的變遷或擴張，例如聖嬰現象，其特色就是更強與更持久的洋流，能夠將一個物種帶到幾百公里外（Huyer等人，2002）。

此外，還有其他的壓力源會讓海域環境更容易受到生物入侵的影響，而可能讓海域與海岸生態系的結構受到改變。這些壓力源如：

- 混濁度增加；
- 紫外光穿透力與降雨量的改變所造成的初級生產量變化；
- 鹽度的改變，尤其是河口系統的鹽度；
- 海洋酸化對於珊瑚的衝擊；以及
- 維持生態型態所需之基本物種的流失。

（Smith，2010；Carlton，2000）

例如，氣候變遷正造成海洋的酸度增加，而將威脅所有仰賴碳酸鈣以打造生理結構的海洋生物。海洋酸化加上疾病等其他壓力源，將可能對珊瑚礁生物群落帶來大規模的死亡。上述干擾事件及其所造成的生態棲位空洞化，將可能促進外來入侵種（尤其是藻類和海草）的立足與擴散。

入侵種與氣候變遷之間的交互作用，可能對漁業穩定性帶來意想不到且不可逆轉的後果，並進而對經濟、糧食安全及在地生計造成重大衝擊（Harris和Tyrrell，2001；Stachowicz等人，2002）。以下列舉數例，說明海洋入侵種在氣候變遷影響下擴張範圍，而對漁業與海洋系統帶來的潛在衝擊。

獅子魚

獅子魚（*Pterois volitans*）原生於南太平洋、印度洋與紅海的亞熱帶與熱帶珊瑚礁。在其原生範圍外，獅子魚是個狼吞虎嚥的掠食者，牠具有會分泌毒液的刺，對於其他魚類具有



獅子魚在加勒比海、墨西哥灣和大西洋地區的分佈，2009年1月。（引自 Freshwater等人，2009。）

負面衝擊，尤其是原生珊瑚礁與紅樹林的魚種、蝦子及螃蟹（Fishelson, 1997）。由於牠們的毒刺，獅子魚在其入侵範圍內沒有天敵，這有助於其族群的不斷擴張（Meister等人，2004；Whitfield等人，2007）。

1980年代中期，水族缸物種被釋出到南佛羅里達的水域中，之後獅子魚很快地成為入侵種（Whitfield等人，2002；Albins和Hixon，2008）。在接下來的十年間，獅子魚被發現在加勒比海出沒，且沿著北美洲的東海岸往北擴張，對沿岸棲地與魚類造成威脅（Whitfield等人，2007；Freshwater等人，2009）。剛開始，獅子魚並不被認為可在北大西洋的冬季低溫下存活，但是逐漸暖化的海洋溫度已使得獅子魚能夠在該海域立足，並且衝擊該海域的生態系統（Kimball等人，2004；Meister等人，2004；Whitfield等人，2007；Albins和Hixon，2008）。冬季底層水溫 1°C 的小變化，就已造成某些海域生態系裡的物種平衡發生變化，從溫帶生物群落逐漸變成熱帶生物群落（Parker和Dixon，1998）。在受到入侵的南大西洋，某些海域中的獅子魚族群數目前已和該海域的原生生物族群數相近（Whitfield等人，2007）。牠們的生理侵略與過度擁擠，最終可能會造成原生物種被取代，而對仰賴原生魚群的商業與生計漁業造成負面的衝擊（Taylor等人，1984；Moulton和Pimm，1986）。



獅子魚，巴哈馬。Willy Volk

獅子魚的危害在巴哈馬是特別明顯，造成當地珊瑚礁與紅樹林生態系受到衝擊。在那裡，獅子魚族群密度已是其原生海域的五倍，這進一步惡化了牠們高耗食率的問題，而其食物包括珊瑚礁魚類、甲殼類、食草動物、無脊椎動物、以無脊椎動物為食的動物和以浮游生物為食的動物（Fishelson，1997；Green和Cote，2009；Morris和Akens，2009；Barbour等人，2010）。有證據顯示，獅子魚的入侵巴哈馬，已經讓原生珊瑚礁魚類的族群補充情形降低，且可能明顯影響漁業（Albins和Hixon，2008）。當珊瑚礁面對氣候變遷引發的其他環境壓力源（例如海洋酸化及增加的暴風頻率）時，其恢復力可能也會受到獅子魚的威脅。

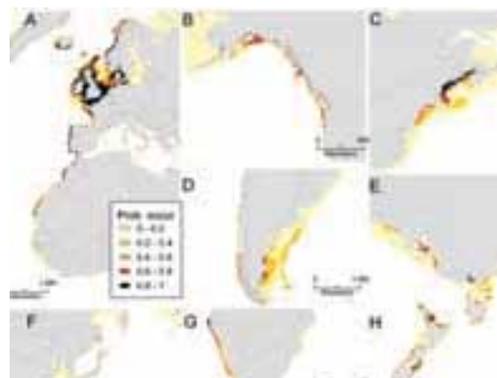
目前，獅子魚的控制方法只有一種，亦即由潛水俠操作的機械捕撈法；不過，獅子魚的毒刺可能會使這個任務困難重重。但是，局部捕撈和其他監測措施，將有助於早期的偵測與快速反應，可抑制獅子魚進一步的擴散，尤其是要避免其入侵具有生態價值或社會經濟價值的地方。目前要滅除獅子魚，還不太可行，因為獅子魚具有快速擴散與立足的能力（Albin和Hixon，2009；Morris和Akens，2009）。



歐洲綠蟹與大閘蟹

自然生態系常常在同一時間裡受到不只一種的入侵種威脅，如此既增加了衝擊的複雜度，也給這些生態系帶來更大的壓力，因為除了生物入侵的威脅外，這些生態系還要面對氣候變遷及其他壓力源。因此最重要的任務莫過於確認氣候變遷將如何與個別物種相互作用，且這些交互作用將如何擴及複雜的海洋生物群落（Williams和Grosholz，2008）。舊金山灣，是世界上生物入侵現象最嚴重的水生環境之一，也是研究入侵種行為的真實研究室；在此特舉歐洲綠蟹（*Carcinus maenas*）與大閘蟹（*Eriocheir sinensis*）為例。

歐洲綠蟹，原生於西北非至北歐的海岸，是於1989年首次在舊金山灣被偵測到（Cohen等人，1995）。這些歐洲綠蟹被認為是透過壓艙水，或者是透過不要的海鮮食物與誘餌蠕蟲之包裝，進入舊金山灣（Behrens Yamada和Gillespie，2008）。就在短短的三年後，原生於東亞河川與河口的大閘蟹，也透過壓艙水被引入到舊金山灣（Dittel和Epifanio，2009）。據估計，自其首次引入以來，這兩個物種便沿著太平洋海岸往北擴散1,200公里，遍及舊金山灣附近數千平方公里以上的面積（Rudnick等人，2003；See和Feist，2010）。



歐洲綠蟹擴張的可能範圍：(a)歐洲西北部 (b)美洲西北部 (c)美洲東北部 (d)巴塔哥尼亞 (e)澳洲東南部 (f)日本 (g)南非 (h)紐西蘭。深色部分為入侵可能性極高的地區，這項分佈範圍預測只評估到深度200公尺以內的棲地（引自Compton等人，2010年。）。

在牠們新入侵的北美太平洋海岸，這兩種螃蟹均對於當地的原生生態系帶來諸多威脅。歐洲綠蟹是當地本土蛤蜊與貽貝的重要掠食者，也是本土唐金蟹（*Cancer magister*）的重要競爭者，因而對於當地原生的雙殼貝類以及螃蟹類的生存帶來威脅（See和Feist，2010；見其中的引文）。大閘蟹以鮭魚為食，又會破壞魚網、魚餌，並對蝦子與淡水螯蝦的漁業操作有全面的影響，而對沿海漁業帶來重大衝擊。在大閘蟹特別豐富的地區，其幼蟹會在堤岸挖掘洞穴，以致危及堤岸的結構穩定性，導致堤岸的坍塌、沼澤沉積物的沖蝕以及植被相的減少（Dutton和Conroy，1998；Hui等人，2005；Rudnick等人，2005；Dittel和Epifanio，2009）。若去吃大閘蟹，則會對食用牠們的野生動物或人類造成健康的威脅，因為牠們是東方肺蛭（Oriental lung fluke）的宿主，並且體內會累積重金屬，如汞（Hui等人，2005）。



歐洲綠蟹。Luis Miguel Bugallo Sánchez

鑑於上述兩種入侵螃蟹為舊金山灣三角洲區域的環境與經濟帶來的深遠衝擊，不禁令人對於牠們擴散到太平洋海岸其他區域的可能性深感憂心（Dittel和



Epifanio, 2008)。雖然區別氣候變遷與聖嬰現象之間的確實關係是很困難的，但是來自氣候變遷的溫暖海水和來自聖嬰現象的洋流循環變化，很可能共同助長這些入侵螃蟹的擴散。歐洲綠蟹已經藉由其浮游性的幼體，往北擴散至英屬哥倫比亞，且於聖嬰事件期間發生的遷徙最為明顯（Grosholz和Ruiz, 1995；Behrens Yamada和Hunt, 2000）。同樣地，由於大閘蟹可以容忍廣泛的環境條件，且其族群周期又充滿變化，因此牠已往北進入英屬哥倫比亞並迅速立足（Rudnick等人, 2003）。

上述的每一種螃蟹，都具有遠距離散播與在多種棲地立足的潛能，因此很有可能入侵阿拉斯加的海岸河口棲地。入侵英屬哥倫比亞的歐洲綠蟹族群，可能透過聖嬰週期入侵南阿拉斯加，因為聖嬰週期可以將歐洲綠蟹的蟹苗往更北方輸送數百公里遠（Huyer等人, 2002；Behrens Yamada和Gillespie, 2008）。根據目前的溫度資料，阿拉斯加僅有幾處海岸地區可能適合歐洲綠蟹生長。然而，假如冬季持續溫暖，且海洋溫度增加 2°C ，那阿拉斯加可能被歐洲綠蟹入侵的場址數目將會倍增（deRivera等人, 2007；Compton等人, 2010）。同樣地，水溫增加 2°C 時，也將讓大閘蟹的蟹苗在阿拉斯加存活下來（Hanson和Sytsma, 2008）。

阿拉斯加的漁業是該州經濟、生態系與文化遺址所不可或缺的一部份，然而目前可用來防治入侵螃蟹的方案尚屬有限。預測入侵蟹種可能的範圍擴張情形並監測其引入情形，可在檢討進一步的管理方案時，做為因應措施（尤其是針對重要場址者）的指引。

淡水資源的服務與可得性

氣候變遷被認為會對降雨強度和時機以及更廣泛的水文循環帶來重大衝擊。預計某些地區降雨將會減少，並會有嚴重乾旱，這對生態系功能和依賴涓滴不息之水資源的人們來說，將會有廣泛的影響（Christensen等人, 2007）。非洲是最易受氣候變遷與氣候變異度



蘆竹。Chuck Bargeron

影響的大陸之一，且調適能力低落，並有部份人口早已面臨嚴重缺水的壓力，而使其所面臨的情勢更為險惡（Boko等人, 2007）。漠南非洲的暖化現象和乾燥、半乾燥區域的擴張，將比全球平均值更嚴重，尤其在非洲南部的部份地區（Boko等人, 2007；Christensen等人, 2007）。在全球各地，有某些入侵種已知會影響淡水的可得性與服務，包括後述的蘆竹（*Arundo donax*）、布袋蓮（*Eichhornia crassipes*），還有白千層（*Melaleuca quinquinervia*）以及尤加利（*Eucalyptus*）、相思樹（*Acacia*）、檉柳（*Tamarix*）和牧豆（*Prosopis*）等屬的物種。

蘆竹

蘆竹原生於東亞的河岸環境，目前已被引入到世界各地，而在其所到之處（尤其乾燥氣候區），對水資源



的可得性與服務造成負面衝擊。蘆竹因可作為建材而被引至南非，並自此成為河岸邊分佈極為廣泛的常見入侵植物（Milton，2004；Nel等人，2004）。

鑑於確保水資源可得性的重要性，南非於1996年透過立法，要求維護河流生態系的生態完整性，以便保護河流為人類永續提供產品與服務的能力。這個政策引發了人們對於入侵植物的更多關注，這些入侵植物中有許多對水資源有重大的影響（Mgidi等人，2004）。一份南非的研究指出，入侵植物的總用水量，估計每年達33億立方公尺（LeMaitre等人，2000）。

蘆竹也對南非的水文帶來顯著的衝擊。當其入侵南非的河岸，即強勢地以密集、單一的植物相取代了原生植群，並降低野生動物的多樣性（Coffman等人，2004；van Wilgen等人，2007）。這些高聳的草本植物，耗水量高於平均值（以葉子的單位面積蒸發量來計算），而可以改變河川的水文和沈積作用，同時增加了洪澇的風險（Mgidi等人，2004）。除此之外，蘆竹會增加火災發生率，災後更以3倍至4倍於南非原生河岸植物的速度重生，從而確保其持續的入侵（Coffman等人，2004）。

氣候變遷可能會擴大蘆竹的入侵情形，惡化蘆竹對水資源可得性的影響。在南非，一般來說，入侵性的禾草類植物預計會持續增加，蘆竹亦不例外（Milton，2004）。蘆竹能忍受廣泛的環境條件，且就氣候而言南非已有76%的區域適合其生長。美國加州（該州亦具有地中海型氣候，並將蘆竹列為應予禁止進入的入侵種）的實驗顯示，氣溫是影響蘆竹生長和生存最重要因子（Decruyenaere和Holt，2005）：在17.5°C（含）以上的溫度扦插枝時，發根成功率達百分之百（Wijte等人，2005）。此實驗證據顯示，在氣候變遷下蘆竹可能會變得更具入侵性。

氣候變遷可能也會改變蘆竹管理的選項，特別是考量到蘆竹的明顯益處時。在美國，有些人嘗試以物理（機具）和生物的方法來控制蘆竹，有些人則提議種植蘆竹以製成生質燃料（Mack，2008；Goolsby等人，2009）。蘆竹因生長迅速、繁殖容易，相當具有做為生質燃料的潛力；然而，考量到其高度的侵略性，且已知在數種其他環境下會成為入侵種，因此反對種植蘆竹以做為生質燃料的論述，確實是有某些依據的（Mack，2008）。

布袋蓮

20年來，肯亞、坦尚尼亞和烏干達的維多利亞湖流域，已被世上最惡名昭彰的水生雜草布袋蓮所入侵（Ogutu-Ohwayu，1997；Villamagna和Murphy，2010）。布袋蓮一開始只被視為是漁業和航運作業上的障礙，現在也被認為會威脅到水資源可得性、生物多樣性和近3,000萬



布袋蓮，烏干達坎帕拉。Sarah McCans

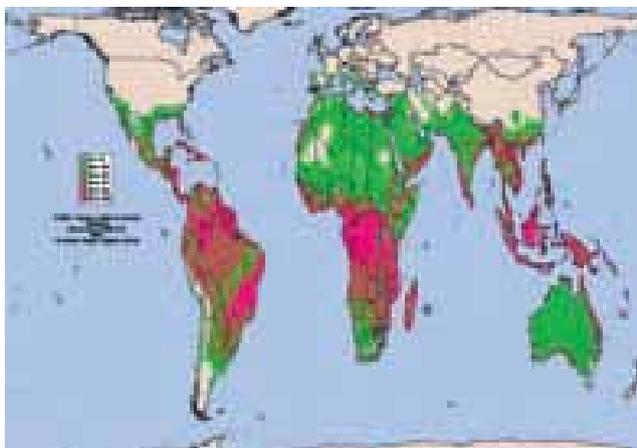


以某種方式依湖維生的人們（Luken和Thieret，1997；Njiru等人，2008）。近來關於氣候變遷將如何影響布袋蓮生長情況的研究顯示，這種存在於五大洲50多個國家的已知入侵性雜草，將會持續擴散而需要持續的控管（Villamagna和Murphy，2010）。

原生於南美洲熱帶和亞熱帶地區的布袋蓮，自1980年代晚期就已出現於非洲大湖區，並於1990年首次被報導出現於維多利亞湖（Harley，1991；Twongo，1991）。據推測，這多年生、自由漂浮的水生雜草由於生長快速，加上處於缺氧和優養化的水域條件，而逐漸蓬勃生長和擴散（Reddy等人，1989；Zhang，2010）。船舶、機具和水流也促進了布袋蓮在維多利亞湖上的分佈。到了1998年，布袋蓮已繁殖蟠踞了17,000公頃以上的湖面，覆蓋率達到巔峰（Albright等人，2004）。

入侵性布袋蓮的影響非常深遠，因為它會干擾漁業活動、船運、灌溉、水處理、水力發電、人類健康、觀光，還會對維多利亞湖的自然生態系帶來不下於前述人類活動的衝擊（Witte等人，1992；Ogutu-Owayu，1997；Opande等人，2004；Williams等人，2005；Odada和Olago，2006）。比方說，密生的布袋蓮會干擾船隻移動、漁民的單位努力漁獲量（catch-per-unit-effort）、水力發電廠的入流和都市供水的過濾（Opande等人，2004；Villamagna和Murphy，2010）；而當布袋蓮成為傳播瘧疾的蚊子和傳播血吸蟲病（*bilharzia, schistosomiasis*）的淡水蝸牛的繁殖溫床，人類健康將遭受影響（Ogutu-Owayu，1997；Masifwa 等人，2001；Plummer，2005）。布袋蓮造成的最嚴重影響之一是水資源的損失：這種水生植物因蒸發散的速率高，明顯地增加水的損耗；水域若被布袋蓮蟠踞，其水耗率將高達開闊水域的2.7~3.2倍（Penfound和Earl，1948；Lallana等人，1987）。

布袋蓮入侵維多利亞湖的程度已起了變化，而生物防治法的採取也展現了一些成效（Matthews和Brandt，2004；Julien，2008；Villamagna 和Murphy，2010），尤其是1995年在維多利亞湖釋放以防治布袋蓮的兩種象鼻蟲：「布袋蓮象鼻蟲」（*Neochetina eichhorniae*）和「普吉象鼻蟲」（*N. bruchi*）（Wilson et al. 2007）。一般認為，這兩種生物防治媒介成功地限制了布袋蓮的入侵，因為至2000年時布袋蓮的覆蓋率已大幅減少（Ogwang和Molo，2004；Wilson等人，2007）。然而，有些人主張聖嬰現象所帶來的氣候條件，包括多雲、濕潤，並不有利於布袋蓮的生長，因此在布袋蓮減少一事上扮演更重要的角色（Williams等人，2005）。最有可能的理由是，觀察到的布袋蓮銳減現象乃肇因於各種因子的總和，包括主要因子如生物防治、聖嬰現象的氣候條件，以及次要因子如物理移除（Albright等人，2004；Williams等人，2007）。須特別一提的是，最近在有些地點布袋蓮有死灰復燃的現象，雖然這有可能是特定的河流不斷地將富含養分的河水匯入湖中的緣故。



布袋蓮的可能分佈範圍，引自EPPO的報告，2008年。



由於聖嬰現象對布袋蓮的作用並不確定，因此引發了額外的疑問，就是氣候變遷到底對布袋蓮有何影響。有些研究指出，此區域的氣溫上升，對布袋蓮將有不利的影響，因為在溫度高過30°C時，其生長速率會受到抑制（Sato, 1998；Julien, 2008）。其他研究則顯示，在受控制的條件下，提高二氧化碳濃度，可增加布袋蓮的生物量（Williams等人, 2005）。此外，生物防治媒介本身的有效性不無疑問，因其成效隨氣候因子而變動（Hill和Olckers, 2001）。不過，考量到布袋蓮對經濟和環境層面諸多重要事項所帶來的衝擊，因此不論氣候變遷是如何影響維多利亞湖中的布袋蓮，都非常有必要控制住這種雜草。

放大來看，基於對不同氣候變遷因子的預測，布袋蓮很可能會擴大其全球分佈（EPPO, 2008）。例如，布袋蓮目前已在南歐部分地區立足，但隨著全球暖化的腳步，很容易擴散至地中海盆地其他地區，甚至更往北深入歐洲（EPPO, 2008）。這些新近受到入侵的區域，很可能遭遇到與維多利亞湖一帶所經歷的類似衝擊。

農業、畜牧與糧食安全

氣候變遷的效應將對農業系統帶來壓力，特別是造成入侵種（如雜草、害蟲與疾病）增加而影響作物與畜牧生產時。農業之所以重要，主要乃因其為人類食物之來源；同時，由於農業生產直接支持佔全球人口36%的農民生計，而農業透過國際農產品市場支持的人口更多，難以數計（光是發展中國家就有25億人），因此其生產力的損失也將對全球經濟帶來極大的影響（ILO, 2007；FAO, 2008a；Nelson等人, 2009）。尤有甚者，氣候變遷極有可能導致價格上揚；而隨著世界人口增加，糧食安全性（包括糧食之可得性、取得方式、穩定供應以及穩定利用等方面）降低的問題將更形嚴重，因為根據估計，2030年前糧食需求將增加50%（FAO, 2008b；Rangi, 2009）。倘欲維持糧食安全，有部分需要減少因入侵種造成的損失，還有，近來更得要適應氣候變遷的影響。

估計氣候變遷直接影響農業生產的方式，是讓特定作物不再適合於目前地點生長，進而導致收成降低。氣候因子，像降雨量變化，可以決定作物生產的實質可行性與經濟可行性，此取決於作物對於氣候變遷的敏感度，以及這些改變對該區域的影響程度（Liverman和O'Brien, 1991；Conde等人, 1997；FAO, 2008b）。專家警告，氣候變遷會導致糧食安全性降低，特別是在發展中國家以及因資源匱乏而難以滿足其糧食需求的窮人（FAO, 2008b）。不過，估計也會有一些農業地區因氣候因子改變成有利作物生長，而受惠於氣候變遷。即便如此，氣候變遷對於農業整體的影響絕對是弊遠多於利（Chang, 2002；Nelson等人, 2009）。

另者，由於導致入侵種的發生率及密集度增加，氣候變遷也會對農業產生間接性影響（Petzoldt和Seaman, 2005；Ziska, 2005；Rangi, 2009）。入侵種有植物、動物、昆蟲、疾病等種種型式，照理已是全球糧食安全及農業生產力的最大障礙（FAO, 2008a；Rangi, 2009）。例如在許多非洲國家，作物即因入侵種而損失近半；其中一種寄生性植物黃獨腳金（*Striga hermonthica*），每年就造成70億美元的玉米損失，3億非洲人口受到波及。玉米象



鼻蟲 (*Sitophilus zeamais*) 是多數非洲國家常見的害蟲，可以破壞高達40%的貯存作物；類似地，體型較大的大穀蠹 (*Prostephanus truncatus*; grain borer) 會摧毀七成的乾燥存糧，光是西非就造成高達8億美元的穀物損失 (Rangi, 2009)。

暴增的入侵種病原體，可能會造成出口國受到貿易禁令的打擊，或為了符合食品衛生與動植物防疫檢疫的要求而成本增加，而使其經濟力量受到限制。有證據顯示，有數種重要作物的昆蟲、雜草與植物疾病，其領域已經向極地擴張 (Rosenzweig等人, 2000)。氣溫回暖較早可能造成馬鈴薯的一種早期損害：晚疫病 (在許多地區，此乃因入侵性的晚疫病菌 (*phytophthora infestans*) 所致)，甚至可能導致更為嚴重的傳染病，而造成農民為防治病菌而使用更多的殺真菌劑 (Kaukoranta, 1996；引用於Petzoldt和Seaman, 2005)。在未來的氣候情境下，重大農業病蟲害的入侵增加將是關鍵問題之一，而麥銹病 (wheat rust)、瘡痂病 (grey leaf spot)、木薯綿粉介 (cassava mealy bug) 以及仙人掌蠹蛾 (cactus moth) 等只不過是其中的冰山一角而已 (Zimmermann等人, 2004；Rangi, 2009)。

由於糧食安全面臨了氣候變遷以及入侵種的挑戰，這些威脅的管理也益形困難。愈來愈多的證據顯示，隨著二氧化碳的增加，除草劑作用於入侵植物的化學效力也隨之下降 (Ziska, 2005)。在氣候變遷下，其他管理策略 (諸如殺真菌劑、殺蟲劑以及生物防治等) 的效力，也可能發生類似的變化 (Chakraborty等人, 2000)。尚要增加化學藥劑施用，或需要轉換成其他管理策略，可能發生相對的經濟成本，小農可能負擔不起 (Gay等人, 2006)。

目前對於氣候變遷與入侵種交互作用對農業所造成的影響，特別是主要的農業區與林業區的基礎氣候數據及估計的變化率，相當缺乏研究調查 (FAO, 2008b)。雖然有不少關於氣候變遷與入侵種個別影響的技術性研究，然而以下選出的幾個例子，都特別注意到這兩項重要的全球性變化，其交互作用對農業所造成的影響。

咖啡果小蠹



咖啡果。Andreas Balzer

咖啡 (*Coffea Arabica*與*C. canephora*) 在全球貿易商品中，其貨幣價值僅次於石油，是世界上某些地區的主要經濟作物。然而，由於氣候變遷與入侵種，咖啡的產量與品質也遭到波及。種植咖啡是一種風險相當高的投資事業，容易遭受數種害蟲攻擊，對於溫度與降雨量的變化又極其敏感。根據「國際咖啡組織」 (International Coffee Organization) 的報告，氣候變遷的效應將使得咖啡產量持續降低，價格也將會攀升 (Schwartz, 2010)；氣候變遷加上諸如「咖啡果小蠹」 (*Hypothenemus hampei*; coffee berry borer) 之類的害蟲，將令咖啡生產難以維繫。

咖啡原產於東非與中非，是許多地區至關重要的經濟



來源；在東非、南亞與東南亞、中美洲與南美洲，有數百萬人（包括小農在內）賴以維生（Gay等人，2006；Oxfam，2008；CABI，2010c）。這種極具價值的作物受到多種病蟲害的影響，包括咖啡果小蠹、葉銹病（leaf rust）、咖啡豆病（coffee berry disease）、細菌性枯萎（bacterial blight）、線蟲（nematodes）、葉蟲（leaf miners）等等，都會顯著降低收穫量。咖啡果小蠹隨著受其污染的咖啡種子傳輸到世界各地，目前已成為全球危害咖啡作物最嚴重的害蟲（Jaramillo等人，2009；CABI，2010b）。這種原生於非洲的甲蟲，引致早熟落果，並降低咖啡豆的重量與品質。在印尼，這種入侵性的害蟲導致年產量損失15~20%左右（CABI，2010b）。

在氣候變遷的影響下，類似咖啡果小蠹之類的咖啡害蟲將變得更難處理。過去十年來，咖啡果小蠹以及其他咖啡害蟲的出現頻率顯著增加（CABI，2010a）；咖啡果小蠹的熱耐受力極強，且曾被發現其族群隨著溫度上升而成長得更快。由於此類昆蟲的分佈受到溫度以及宿主咖啡樹是否存在的雙重限制，因此可以預測將隨著植株擴散。在烏干達與印尼，其已經擴張其垂直分布範圍，攻擊較高海拔的咖啡園。氣候變遷所造成的降雨量變化，也會改變此類昆蟲對咖啡的影響；像在哥倫比亞這類終年降雨較為平均的國家，受咖啡果小蠹的影響將會加劇；不過像中非等這類長期乾旱的地區，受到的影響將較為輕微（Jaramillo等人，2009）。

一般來說，咖啡生長以及其相關產業預期將受到氣候變遷嚴重影響（Jaramillo等人，2009）。由於原產於潮溼的熱帶地區，咖啡在整個生長季節中，只有在溫暖濕潤、變化有限的氣候下，才能生長良好（Gay等人，2006；Oxfam，2008）。溫度與降雨型態的改變都會降低咖啡的產量與品質；例如，雨水太多或無法預測，會減少開花、降低土壤肥力，咖啡豆也不易乾燥（Oxfam，2008）。可以預見溫度與降雨的變化將使得許多目前認為理想的咖啡栽種地區變得不再適合（Gay等人，2006）。在巴西、墨西哥與烏干達等地的研究顯示，即便溫度僅些微升高，都可能導致嚴重後果，部分案例甚至出現適合栽植咖啡地區減少了95%之鉅（GRID-Arendal，2002；Assad等人，2004；Gay等人，2006）。在肯亞，無法預測及不可靠的降雨，已讓作物管理與疾病防治變得極為困難；因其導致咖啡豆成熟期間各異，因而一年中需要投入更多人力去採收降低的收成（Obulutsa和Fernandez，2010）。

農民已開始針對氣候變遷及其對於咖啡生產與蟲害（如咖啡果小蠹）管理的影響進行調適（Oxfam，2008）。可調適氣候變遷的咖啡栽培方式有數種，其中有些已實施，這些包括提高栽植密度、採用耐性較高的基改品系以及樹蔭法（arborization）（Camargo，2010）。特別是樹蔭法，乃將咖啡植株栽種於樹蔭下，如此可以緩解極端微氣候，並緩衝氣溫、濕度與風的變化。這種栽植方式尚有其他優點，諸如咖啡品質較佳、可提供較好棲地給能夠自然防治咖啡果小蠹的掠食性節肢動物（Camargo，2010；Jaramillo等人，2009）。不過，樹蔭法亦有其缺點，諸如收穫量相對較低，還有咖啡園可能移動至海拔較高、較涼爽的地區，以至於取代了森林（Gay等人，2006）。面對氣候變遷以及諸如咖啡果小蠹之類的入侵種威脅，有必要稍微調整這些管理系統，這不只是為了在地與全球的經濟，也為了我們早餐的那杯咖啡。



藍舌病毒

一種與氣候變遷息息相關的入侵性牲畜疾病是藍舌病，這種疾病目前在歐洲已相當普遍。歐洲過去就曾發現藍舌病，不過從來未曾發生在目前發生的分佈範圍，也從來未曾像目前這麼猖獗。證據顯示，氣候變遷有利於病毒的昆蟲病媒生長繁殖，因而助長此類病毒的散播（Wilson和Mellor，2009）。1998至2005年間，藍舌病導致超過150萬頭羊死亡，數千隻牲畜遭到撲殺（Purse等人，2008；Wilson和Mellor，2009）。這種疾病直接影響經濟，光是2007這一年，由於藍舌病的爆發使得受影響國家的畜牧產業直接損失超過兩億美元（Hoogendam，2007, 引用於Wilson和Mellor，2009）。

藍舌病咸認為是家畜最重大的疾病之一，已被世界動物衛生組織（World Organization for Animal Health；OIE）列入「A級狀況名單」（A-list status）（Mellor和Wittmann，2002）。此類疾病乃由「藍舌病毒」（Orbivirus）引起，其在免疫學上互異的血清類型有25種之多（Hendrickx，2009）。所有家畜以及野生反芻動物都極易受到感染，而特定品種的羊，尤其是歐洲常見體毛纖細以及肉用品種更為敏感（MacLachlan 1994）。罹病者有許種症狀，包括死亡；耐受性較高的動物，使得病毒可以潛伏在此類較有抵抗力、不發病的宿主（通常是牛隻），而使得管理益形困難（Mellor和Wittmann，2002；Purse等人，2005）。一般認為藍舌病毒原生於非洲、澳洲、北半球部分地區與亞洲（Tabachnick，2010）。儘管藍舌病毒幾乎遍佈全球，但歷史上只曾在短暫期間內於歐洲南部與東部邊緣發現其踪跡；在這段期間內，藍舌病毒進入歐洲的可能性早就存在，途徑包括貿易輸入受感染反芻動物，或透過藉由風力散播的受感染蠓蟲（Purse等人，2008）。

庫蠓屬（*Culicoides*）吸血性蠓（*Ceratopognidae*）乃藍舌病毒的節肢動物病媒；此病媒會隨著氣候變遷所導致的溫升而增加其族群數、存活率與疾病傳播速率（Wittmann和Baylis，2000；Mellor和Wittmann，2002）。庫蠓的地理範圍受限於冬季的低溫，因此庫蠓只在較溫暖的月份傳播藍舌病毒（Wittmann和Baylis，2000；Purse等人，2005）。氣候變遷預期會增加暴風雨及水患頻度，也會使得海平面升高，如此可能增加庫蠓的鹼水繁殖棲地（Wilson和Mellor，2009）。

近來，此類病毒往北擴張肆虐，進入之前從未受到影響的歐洲其他地區，引發史上最大規模的家畜流行病。導致藍舌病流行範圍大幅改變的原因複雜，不過很容易與其主要病媒殘肢庫蠓（*Culicoides imicola*）的活動範圍擴張及新病媒的加入戰局扯上關係（Mellor和Wittmann，2002）。之前一直認為寒冬可以保護歐洲溫帶地區免於此疾病荼毒，但是藍舌病毒卻已有數年能在歐洲越冬（Mellor和Whittman，2002）。2006年，德國與法國等小型反芻動物密度較高的國家，爆發藍舌病大流行；之後幾年接著是捷克、瑞典及英國（Purse等人，2005；Tabachnick，2010）。值得注意的是，歐洲經歷最高溫的地區，其藍舌病發生率也最高。病媒殘肢庫蠓已擴張到那些明顯暖化的地區，不過尚未進入較為涼爽，或氣候沒有變化的區域（Purse等人，2005、2008）。有人主張氣候變遷可能不是這類疾病擴散的唯一決定因子，農牧方式以及庫蠓棲地的改變，也可能是造成疾病傳播的原因（Tabachnick，2010）。



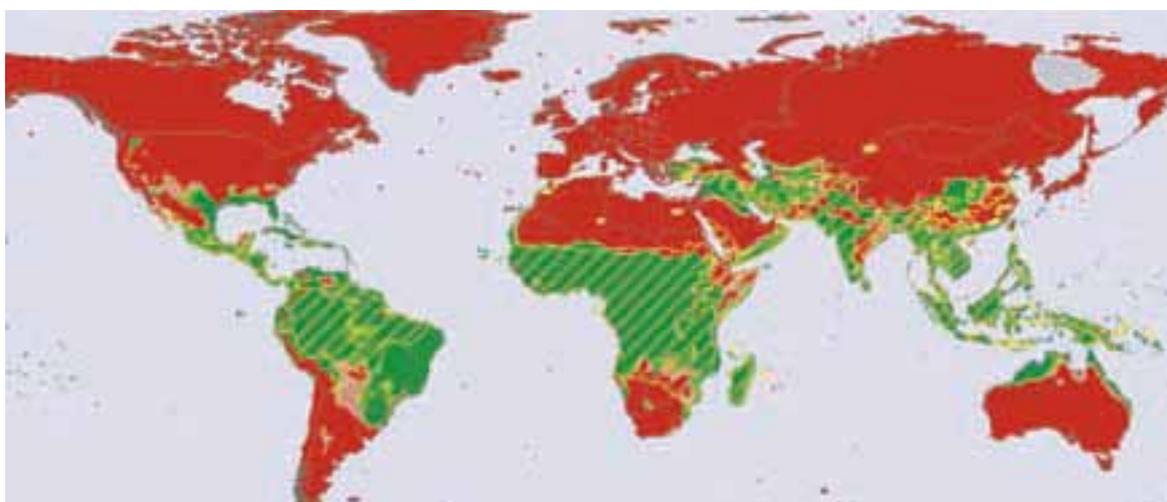
有鑑於藍舌病毒對牲畜的影響，各國的食品安全與動植物防疫檢疫措施已經限制受藍舌病毒感染國與未受感染國家之間的牲畜貿易；目前在管理上的解決方式是隔離受感染的牲畜，並盡可能對牲畜施打疫苗（Tabachnick，2010）。不過，藍舌病毒有多種血清類型，加上有新的藍舌病毒進入歐洲，因此單靠疫苗的施打也很難阻止所有藍舌病毒的傳播（Hendrickx，2009；Mellor和Wittmann，2002）。

人類與野生動物的健康

疾病，本質上就極為有害，預料在氣候變遷下，將變得更加盛行且頻繁。環境變化與新的生態條件可能會讓入侵種激增，而這些入侵種又會直接或間接地影響新興傳染病的疫情，如禽流感、鼠疫、焦蟲症、裂谷熱、霍亂、昏睡病、登革熱、肺結核、伊波拉病毒、黃熱病、萊姆病、西尼羅河病毒以及瘧疾等（McMichael和Bouma，2000；WCS，2008）。氣候變遷若再加上全球貿易與運輸網絡，將會顯著增加這類流行病的威脅，而人類、牲畜與野生動物之間跨物種疾病傳播的屏障卻越來越低。

一般來說，藉由病媒、動物以及水傳染的疾病將在全球各處增加（Portier等人，2010）。病媒傳染病是一種經由第三者為宿主來傳播的疾病，這種疾病會因為生態上與氣候上的變化，而增加或減少其分佈範圍（McMichael和Bouma，2000）。例如，蚊子在炎熱與潮濕的氣候下擔任許多傳染病的媒介，而氣候變遷可能會擴大牠們的分佈範圍，增加牠們的疾病傳播速率（McMicheal和Bouma，2000；Halstead，2008；Gething等人，2010）。

此外，經由蚊子傳播的疾病亦會隨著更多洪水的發生而增加；1997年聖嬰／反聖嬰-南方震盪現象發生後，在肯亞與索馬利亞爆發的裂谷熱就與洪水有關（McMichael和Bouma，2000）。如同在「糧食安全」一節中所指出的，家畜與水產養殖動物對於疾病的易感性日益受到關注，在家畜方面，藍舌病與裂谷熱有蔓延及加重衝擊的可能性，水產養殖方面則有流行性潰瘍症候群與藻類大量繁殖的隱憂。我們絕對不可少的資源——淡水——將於不久的未來見證越來越多的水媒病，這類疾病的疫情會因為水溫升高、降雨（雪）頻率與嚴峻程度上



預測惡性瘧疾在氣候變遷下有限的傳播狀況。（引自Rogers和Randolph，2000）



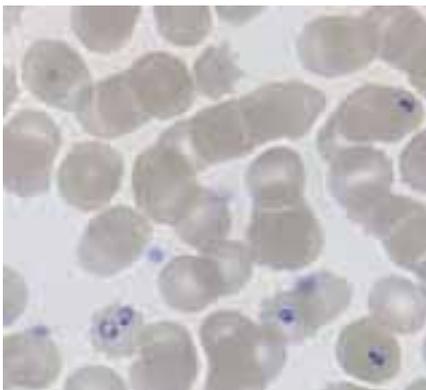
升、蒸發-蒸散速率增加以及沿海生態系健康狀況的變化增加等等而被擴大（Portier等人，2010）。最後，氣候變遷所造成的人類遷移，以及氣候變遷難民營越來越擁擠的狀況，讓疾病的傳播透過人與人近距離接觸與不衛生的條件而進一步惡化。

下面的例子說明疾病如何與人類及野生動物互動，並說明疾病疫情如何因氣候變遷而將變得更加惡化。

登革熱和瘧疾



埃及斑蚊。Muhammad Mahdi Karim



血液中的瘧疾寄生蟲。M. Zahniser

登革熱和瘧疾是兩種人類的致命性疾病，常見於整個熱帶地區。由於它們的傳播媒介（原生的蚊子）變得越來越普遍，如今已有超過100個國家有登革熱與瘧疾的發生病例。登革熱（由黃熱病毒所造成）與瘧疾（由瘧原蟲寄生所造成）都是藉由蚊子為媒介來傳播，主要的蚊子種類分別為埃及斑蚊（*Aedes aegypti*）與甘比亞瘧蚊（*Anopheles gambiae*）。這兩種傳染性疾病每年影響5,000萬至3億1,100萬人，導致全球每年超過100萬人死亡（CDC，2010a、2010b）。登革熱對小孩來說尤其致命，在某些亞洲國家，登革熱是造成孩童重病與死亡的主要原因（WHO，2009）；至於瘧疾，據估計於2008年造成將近100萬人死亡，而全世界有89%的瘧疾死亡病例發生在漠南非洲（sub-Saharan Africa），是該地區第二大死因，僅次於愛滋病（CDC，2010b）。研究與模型預測亦顯示，瘧疾可能蔓延至北美、歐洲以及中亞等地區（Martens，1999）。由於這些疾病能夠造成嚴重的衝擊，因此，了解氣候變遷在改變這些疾病的感染率與地理分佈上所扮演的角色，對於公共衛生來說是非常重要的（Lafferty，2009）。

由於登革熱與瘧疾都是藉由蚊子為媒介來傳播，因此表面上看來，這些疾病的感染率應當會受到同樣的氣候變因所影響，也就是影響蚊子族群的氣候變因。蚊子喜愛較溫暖與較潮濕的環境，因此某些特定地點的登革熱和瘧疾相關數據顯示，溫度、降雨量以及疾病發生率存在著長期相關性（Halstead，2008；Johansson等人，2009；Gething等人，2010）；不過，使用長期全球氣候模式的研究，其預測結果不一定指出登革熱與瘧疾的疾病爆發次數在氣候變遷的影響下有增加的趨勢。這兩種傳染性疾病的流行，若以短期、小尺度的情境來看，似乎會受到氣候變因的影響；但長期、全球性的疾病流行，也會受到其他人為因素的影響（Johansson等人，2009；Lafferty，2009；Rogers和Randolph，2000）。因此，政府必須衡量氣候變遷的長



短期影響、疫情擴及新區域的可能性及其他影響疾病傳播的交互作用因子，判斷疾病擴散的趨勢。

禽痘和禽瘧疾

禽痘 (*Poxvirus avium*) 與禽瘧疾 (*Plasmodium relictum*) 是入侵性疾病，對特有生物夏威夷蜜旋木雀的殘存種類構成威脅。在氣候變遷的預期趨勢下，這些稀有的鳥類無可避免地會與媒介疾病的蚊子接觸。屬於管什鳥科 (*Drepanidinae*) 的夏威夷蜜旋木雀，曾一度繁盛於夏威夷群島上自海平面至林木線之間的區域 (van Riper 等人, 1986)；因為受到數種環境威脅，如今僅分佈於某些海拔範圍內，且正經歷著世界上最快的滅絕速率：17種蜜旋木雀被認為已經絕種、14種被認為瀕臨滅絕 (FWS, 2006)。

自從禽痘與禽瘧疾分別於十九世紀末與二十世紀初經由外來鳥種被引入夏威夷以來，它們就成為當地特有森林鳥種減少與滅絕的主要原因 (Warner, 1968; van Riper 等人, 1986; van Riper 等人, 2002; Atkinson 和 LaPointe, 2009)。這兩種疾病都是經由入侵性的蚊子 (*Culex quinquefasciatus*) 傳播，因此在盛行蚊子的低中海拔森林，已讓易感染這兩種疾病的蜜旋木雀鳥種絕跡 (van Riper 等人, 1986; Atkinson 和 LaPointe, 2009)。蜜旋木雀僅能在高海拔 (1500 公尺以上) 地區避開這些傳染性疾病，因為高海拔較低的氣溫限制了蚊子的分布，並因此限制了這些疾病的傳播 (van Riper 等人, 1986; Benning 等人, 2002)。儘管禽痘與禽瘧疾對蜜旋木雀以及其他本土鳥種具有致命的影響，外來鳥種往往能夠抵抗這些疾病，並且扮演疾病傳染窩 (disease reservoir; 編註：病原體賴以生存、繁殖並可逸出使易感染宿主受感染的處所。) 的角色 (Warner, 1968; Stone 和 Anderson, 1988; Benning 等人, 2002; Atkinson 等人, 2005)。



夏威夷的紅蜜旋木雀。D. Hutcheson

蜜旋木雀、疾病及蚊子的分佈都與海拔有關 (van Riper 等人, 1986; Ahumada 等人, 2004)。高海拔森林是八種瀕臨絕種的森林蜜旋木雀最後僅存的無病避難所。在氣候變遷的影響下，景觀分析預測這些沒有蚊子的蜜旋木雀棲地將會縮減：夏威夷兩個位於山區的保留區中，低瘧疾風險 (低於 13°C) 的森林面積均將縮減至 300 公頃以下 (Benning 等人, 2002)。如果氣候變遷緩慢發展，向上遷移的蜜旋木雀森林棲地也許能夠跟上暖化的步伐，讓高海拔避難所的底線保持在疾病傳播區域的高度以上。然而，影響疾病傳播的不只是溫度，若降雨量如預期般減少，將會制止森林向較高緯度擴展，進而壓縮這些碩果僅存的高緯度鳥類的生存空間：不僅往下要面對疾病傳播區域逐步進逼的威脅，往上也受到限制 (Atkinson 和 LaPointe, 2009)。若沒有有效的管理，例如棲地保護或是引入具有抗病性的蜜旋木雀，氣候變遷與入侵性疾病間的交互作用可能使僅存的蜜旋木雀族群滅絕 (Atkinson 和 LaPointe, 2009)。



蛙壺菌

近幾十年來，世界各地的兩棲動物族群數以驚人的速度下降，超過三分之一的兩棲物種瀕臨滅絕或是已經絕種（Global Amphibian Assessment, 2008）。在這起主要是熱帶蛙類的大規模滅絕現象中，蛙壺菌（*Batrachochytrium dendrobatidis*）被指為是兇嫌之一（Lips等人，2005；Pounds等人，2006）。蛙壺菌是一種能迅速蔓延的壺狀真菌，會抑制兩棲類皮膚的電解質傳輸，而導致一種高致命性的皮膚病：壺菌病（chytridiomycosis）（Voyles等人，2009）。1990年代初期，科學家開始記錄拉丁美洲的哈樂金蛙類（harlequin frogs）的物種消



雌性的沼生哈樂金蛙。Brian Gratwicke



蛙壺菌。AJ Kann

失現象；哈樂金蛙類是斑蟾屬（*Atelopus*）的俗稱，為全球兩棲類生物多樣性的重要構成要素，也是這個區域生態旅遊的吸睛之處；然而分別有75%的高地哈樂金蛙類與38%的低地哈樂金蛙類已經消失（LaMarca等人，2005）。科學家一致認為入侵性的蛙壺菌在哈樂金蛙類的減少上扮演某種角色；另有一些科學家認為，氣候變遷及其間接造成哈樂金蛙類更易受到蛙壺菌感染的作用，也是原因之一。

那些主張氣候變遷也難辭其咎的學者指出，全球大規模的暖化可能為蛙壺菌提供了絕佳的孳生溫床。根據他們的研究，溫度變化正造成白日溫降及夜間溫升的趨同現象，而這種日夜溫差縮小的情況將助長疾病傳播。此外，雲量的變化也會影響到溫度與濕度，而可能造成有利蛙壺菌生長的环境，同時使蛙類得以生存的棲地縮減（Pounds和Puschendorf, 2004；Pounds等人，2006）。也有人認為乾燥的聖嬰現象迫使兩棲類族群擠到一些潮濕的微棲地，導致蛙壺菌傳播至殘存的族群（Anchukaitis和Evans, 2010）。然而，另一群科學家則

爭論氣候變遷與蛙壺菌造成的兩棲類減少沒有關聯，他們認為氣候變遷和蛙壺菌的流行與擴散傳播這兩者之間的因果關係並未有充分及適當的檢驗。相反的，他們根據一個簡單的時空模式，認為中美與南美洲兩棲類減少的最佳解釋，是入侵性的蛙壺菌在山地族群之間的擴散傳播（Lips等人，2008）。無論蛙壺菌是否直接受到氣候變遷影響，兩棲類科學家一致同意蛙類生物多樣性之所以受到威脅，是因為蛙類同時受到蛙壺菌與氣候變遷的衝擊（LaMarca等人，2005；Lips等人，2008）。

減緩氣候變遷

減緩氣候變遷的基本作法之一是減少溫室氣體的總排放量，這可透過減少溫室氣體排放到大氣層的量（減少排放源），或者（透過碳匯）維持或增加溫室氣體的吸存量，包括那些已經儲存於森林、泥炭沼澤地及其他生物材料中的量。減少溫室氣體排放源的努力目前都聚



焦於增加燃料效率、節能及捨棄傳統化石燃料改採替代性能源等方面；過去數年來，獲得不少關注、研究及投資的再生能源之一就是生質燃料，特別是從木質纖維作物所提煉出來的第二代生質燃料。雖然這個產業部門的經濟前景看好，但也引發了一些問題，包括選擇的生質燃料作物種類及其快速生長、雜草般的特性。

原始生態系吸存溫室氣體（增加碳匯）的潛力也受到不少的關注，尤其是原始森林、泥炭地等生態系的碳匯功能特別受到重視。不幸的是，生態系的破壞及退化，不但會使其完整性受損，也會改變其碳平衡，促進其碳排放。因此，依據《聯合國氣候變化綱要公約》，減少來自伐林及森林退化的排放量成為核心工作重點。舉例來說，1997年印尼的泥炭沼澤地大火釋出了大約1,098百萬噸的二氧化碳；2002年的奧瑞崗森林大火（Biscuit Fire）中，20萬公頃的森林付之一炬，釋出了大約3.5-4.4百萬噸的二氧化碳（Heil等人，2006；Campbell等人，2007）。即使在火災為生態系自然一環的地方，若造成燃料可得性、火災密集度及物種組成的改變，也會導致其碳吸存與排放的規律與型態的根本改變。

入侵種及其他有害生物也會造成這樣的生態系改變，比如導致植物死亡率增加、造成原生草本植物或以灌木為主的林相被樹木取代（或反過來的情況）、改變野火或水文的規律，或者以其他方式改變物種組成，從而讓生態系更容易受到其他導致變遷的因子影響。已有研究指出，某些入侵種會降低生態系的吸存能力，例如雜草入侵木本灌木林，或者森林的土壤及微生物生物量有所改變時（Bradley等人，2006；Strickland等人，2010）。又如以松樹為食的北美原生種「山松甲蟲」（*Dendroctonus ponderosae*），在氣候暖化下正扮演起改變森林生態系的要角，其涉及的規模更是驚人。管理這些威脅，應成為維護碳匯、減緩氣候變遷的重要策略之一，不論這些威脅是來自外來種或原生種，只要其造成廣泛的生態系破壞與改變，就應予以處理。



生質燃料

近來能源價格波動，加上化石燃料使用所造成的溫室氣體排放問題日益受到關注，諸多國家已開始考慮種植高產作物以提煉生質燃料。在國內種植生質燃料作物，也能增加國家的能源安全、支持在地經濟的發展。過去幾年此部門獲得大幅的投資，發展相當快速，不過也因而引發諸多議題討論，包括生質燃料可能導致慣常種植的糧食作物被取代、造成糧食價格上漲、增加土地利用變更的壓力及提高人們種植具有生物入侵前科的外來速生作物的興趣（Sawyer，2007；Koh和Ghazoul，2008）。

GISP於2008年的一份報告中檢討了將近40種被考量做為生質燃料的作物，發現其中大約有75%有成為入侵種的記錄。此外，考慮以已知入侵植物做為生質燃料的趨勢已在全球蔓延，並遍及北美、南美、中美洲、非洲、澳洲、歐洲及亞洲等地（Low和Booth，2007；



GISP, 2008; Howard和Ziller, 2008; IUCN, 2009a)。有潛力的生質燃料作物通常具有快速生長、耐旱、能在貧瘠土壤中生長、抗蟲害（或少蟲害）的特性（Barney和DiTomaso, 2008; Raghu等人, 2006）。除此之外，為種植生質燃料作物而改變土地利用，特別是改變原始森林及其他生態系，已引發諸多疑慮，認為如此所能達到的溫室氣體減量效益將大打折扣，不論所考量的時間尺度為何（Danielsen等人, 2008; Gibbs等人, 2008）。

學者專家建議，在生質燃料作物引入前，應進行雜草風險評估，分析伴隨這些特定物種而來的風險；這個建議是從歷史上學來的重要一課，因為世界上大部分最具侵略性的植物都是被刻意引入作為飼料、土壤穩定、農業及其他觀賞用途（Barney和DiTomaso, 2008; Howard和Ziller, 2008; Mack, 2008; Simberloff, 2008）。另外，有助於減緩氣候變遷的原生物種使用也是研究的重點（Tilman等人, 2006）。總之，預防已知入侵種的引入（或者確保其擴散的風險或進一步的傷害均被妥為管理），可減少入侵種的潛在族群數及其對生態系（包括其所衍生的服務）所帶來的壓力。

麻瘋樹（*Jatropha curcas*）：是被提議作為生質燃料作物中最具爭議性且被廣泛吹捧的植物之一。麻瘋樹是一種可以生產富含油質種籽的高聳灌木，原生於中美洲。儘管在世界許多地方，如巴西、澳洲、美國及太平洋地區，皆已有麻瘋樹入侵的記錄；然麻瘋樹仍被廣泛推廣作為生質燃料作物，尤其是在非洲、南美洲及亞洲（特別是中國、印度與斯里蘭卡）等許多退化的土地上種植，供小規模與大規模的生質燃料生產（Low和Booth, 2007; Brittain和Lutaladio, 2010）。鑑於麻瘋樹在澳洲北部與西部的侵擾現象，西澳的州政府已公佈麻瘋樹為有害植物，並禁止麻瘋樹進口（Low和Booth, 2007; Randall, 2004）。麻瘋樹除了具有環境雜草的特性，其種子也有毒性，誤食會對人體及牲畜造成傷害。再者，儘管麻瘋樹被吹捧為可促進經濟發展，然而實際經驗（特別是肯亞經驗）卻證明種植麻瘋樹並不足以維持小農生計（Endelewu Energy等人, 2009）。

鵲草（*Phalaris arundinacea*）：速生草種是研究潛在生質燃料作物的另一個熱門領域，例如蘆竹（見「淡水資源的服務與可得性」一節）、柳枝稷（*Panicum virgatum*）及芒草類（*Miscanthus* spp.）等。鵲草具有產量高、生長於涼爽季節、多年生等特色，多見於北美中部、歐洲及亞洲的溼地及河岸地帶；可被種植在排水不良及密實的土壤中，目前北歐地區已考慮將鵲草作為生質燃料之用（Wrobel等人, 2009）。然而，由於鵲草會密集生長而佔據溼地及阻礙水道，故美國部份地區及澳洲已將其列為入侵雜草（Marten, 1985; Kercher和Zedler, 2004; Molofsky, 1999）。鵲草及其相關品種會入侵原始分布範圍的鄰近地區，這個事實也是在考量何者可被視為原生種時必須特別注意的一個議題。

牧豆樹（*Prosopis juliflora*）：牧豆樹及其他牧豆樹屬植物為速生木本灌木，營養需求低，故能在乾旱及半乾旱土地上存活。牧豆樹是中南美的原生樹種，但已被引入非洲、亞洲及澳洲作為柴薪、飼料、遮陰、土壤改良及防止土壤侵蝕之用（ENS, 2010）。由於牧豆樹的廣泛使用及其在乾旱地區生長良好，使得牧豆樹成為發展生質燃料的熱門樹種。不幸的是，如果放任牧豆樹自然繁衍（例如經營失敗而被荒廢的牧豆林地），那麼已有案例證明它



會變成入侵種，因為牧豆樹會發展成濃密的樹叢，讓原生種無立椎之地，並且會吸取較多的地下水（IUCN，2009a）。在東部非洲，牧豆樹的侵擾已妨礙當地農業及放牧，而放牧仍是當地牧民的重要生計。在南非，牧豆樹屬已入侵至少180萬公頃的沖積平原及季節性河道（Van Wilgen等人，2001）。

山松甲蟲

外來及原生害蟲的暴增，會嚴重衝擊森林健康，大幅改變森林組成，進而影響森林的碳排放與吸存。在北美洲，山松甲蟲（*Dendroctonus ponderosae*）是以多種松樹為食物來源的原生昆蟲，其族群數量受到溫度的自然調節，包括春、秋兩季的寒冷期，是山松甲蟲最脆弱的發育階段；或者持續維持在零度以下的冬天時節（Regniere和Bentz，2007）。最近幾年，在加拿大的英屬哥倫比亞省以及亞伯特省部份地區，還有美國的科羅拉多及其他西部各州，由於冬天氣溫較溫和，結果導致山松甲蟲族群數暴增，造成松樹大量死亡。山松甲蟲也是傳染松胞銹病（*Cronartium ribicola*）的媒介，松胞銹病是一種黴菌，對於松樹具危害性，其疫情也有日益增加的趨勢（Logan等人，2003）。

在英屬哥倫比亞，山松甲蟲的暴增現象日益惡化，不僅因為暖冬所引起，也與夏季愈來愈熱但降雨愈來愈少有關，這些氣候條件助長了山松甲蟲入侵北部及較高海拔的森林。2006年結束前，累計的受影響森林面積總共大約有1,300萬公頃，而最主要的損失為林木；某些地區有將近95%的松樹樹冠死亡，估計英屬哥倫比亞省的碳排放高達270百萬噸，比之前記錄的所有山松甲蟲暴增事件所導致的碳排放量還要高一個數量級（Kurz等人，2008）；專家們已將這次的暴增事件直接歸因於持續的氣候變遷。山松甲蟲的現況正足以反映自1970年代以來因為氣候變遷造成山松甲蟲適宜性棲地擴張的趨勢，且從這趨勢看起來，其棲地將可能更進一步往北、往東及較高處擴張（Carroll等人，2004）。

研究結果也顯示，山松甲蟲的侵擾會增加森林大火的可能性，加上乾旱及其他氣候因素，使得火災風險更向上攀升（Lynch等人，2006）。山松甲蟲的侵擾所造成的大規模森林破壞，將進而導致支持在地生物多樣性的棲地流失，同時增加土壤侵蝕、逕流及水體淤積情形。在英屬哥倫比亞，因為山松甲蟲導致的森林死亡，可能對北美馴鹿（*Rangifer tarandus caribou*）、漁貂（*Martes pennanti*）、美洲貂（*Martes americana*）、侏儒鴉（*Sitta pygmaea*）及啄木鳥等族群帶來顯著衝擊（Ritchie，2008）。

山松甲蟲如此這般的原生種經驗，也讓人們對於非原生入侵種可能造成的衝擊產生嚴重疑慮；因為諸如翡翠白楊吉丁蟲（*Agrilus planipennis*; emerald ash borer）、亞洲長角甲蟲（*Anoplophora glabripennis*）及其他重大的森林害蟲及病原體，都有可能讓北美及其他地區的森林的所有樹種消失殆盡。



受侵擾的西部黃松，美國科羅拉多落磯山國家公園。Quinn Dombrowski



全球入侵種規劃署 The Global Invasive Species Programme
入侵種與氣候變遷

GISP

第三章

建議





也許此份報告的重要啟示在於，雖然我們尚不完全明瞭入侵種和氣候變遷之間錯綜複雜的交互作用和所帶來的複合式衝擊，其實際的影響及未來的衝擊卻十分重大，我們勢必要採取行動。此外，雖然目前因應入侵種的經驗和措施，清楚地指引我們未來應如何降低整體威脅；然而，即使有更先進的研究、更長期的數據、以及不同地區的詳細資訊，我們依然無法了解全貌或確切地掌握未來，未來仍有必要持續地努力。以下內容為政策、管理、科學、與研究各方面提供建議，且這幾個面向尚需持續的整合，以因應日益迫切的改革挑戰。

政策與管理

政策上，入侵種和氣候變遷這兩個議題向來被分開處理，但越來越多跡象顯示這兩者需要一起來面對，尤其下述幾個共同優先事項更需整合為之。在此必須明確指出，面對氣候變遷，對於以生態系為基礎的調適策略而言，入侵種管理可說是一關鍵工具，因為適當地管理入侵種，可減輕入侵種對生態系及生態系服務所產生的重大壓力，也可減少因入侵種衝擊而可能造成的額外溫室氣體排放。

如同派克等人所言：「研擬和實施氣候變遷政策時，必須特別考量對入侵種的影響；相對而言，入侵種政策也須顧及對氣候變遷可能造成的後果。」（Pyke 等人，2008）

整體而言，政策發展應該：

- 描述氣候變遷和入侵種之間直接和間接的交互作用；
- 釐清氣候變遷政策可能對入侵種管理帶來負面影響之處；
- 支持氣候變遷政策和入侵種政策之間可能的協同作用，例如以生態系為基礎的調適策略和提升生態系恢復力。

從氣候變遷政策的角度的角度而言，主要建議包括：

適應氣候變遷的管理計畫和活動，尤其是以生態系為基礎的調適策略，應整合入侵種管理並將之視為主要工具，以減輕入侵種對重要生態系服務施加的壓力，並提升生態系的恢復力。

更具體的行動包括：

- 預防新外來種的引入與立足，避免未來發生入侵現象以及隨之而來的衝擊；
- 對於應優先防治的既有入侵種（包括有害的原生種），採取滅除或控制措施，以避免生態系組成和服務遭受巨變，藉此提升生態系的恢復力；
- 對於調適措施的發展與建設，尤其是為滿足重要人類需求而設計者（如供水系統、水產養殖設施、農耕方法改變），評估其帶來生物入侵的可能性。

減緩氣候變遷的計畫和活動不應造成新的生物入侵，或使既有入侵問題加劇。主要活動可包括：



第三章 建議

- 評估因培育特定物種（例如刻意引入可產製生質燃料的物種）或發展建造特殊封存技術（例如能源基礎設施或海洋施肥技術，其可能造成入侵種的意外引入或擴散）而造成生物入侵的可能性；
- 滅除或控制可能降低生態系碳吸存能力的有害物種。

這些措施尚需考量氣候變遷造成的物種分佈範圍的時空變化，以及暴風雨等氣候事件的影響，因為這些因素可能干擾生態系，造成物種遷移或使生物入侵問題加劇。

從**入侵種管理**的角度來看，我們必須確保政策能夠促進資源和工具應用在不同領域以及不同有害物種上。目前針對外來入侵種的管理技術是保育知識的重要一環，未來將需要應用該技術以管理新生態系和新群落的所有有害物種，包括原生種和外來種。另外，我們亦須持續檢視目前採行的方法是否有效，因為氣候變遷可能改變入侵種傳輸和引入的機制、改變約束入侵種的氣候因子、改變入侵種的分布和影響，以及改變我們管理策略的效力（Hellmann 等人，2008）。

關於預防入侵種引入與立足的現行法規，對於減少潛在入侵種的數量是十分重要的。這種預防措施能夠在源頭及引入途徑找出並減輕入侵種傳輸的風險（Sutherst，2000）。例



S. Burgiel

如，為促進農產品貿易，境外檢疫措施便越來越常見，這種措施就是由來源國 / 出口國進行一系列經認證的檢驗和處理，以加速進口國海關檢疫的程序。處理已知引入途徑（如船舶壓艙水、船殼汙損、實木包裝）的國際和國家法律也應重新檢視，檢討其在氣候變遷背景下（包括新的貿易路徑和貿易夥伴）的效力。

此外，關於滅除和控管入侵種的政策和經費也應有所改變，以反映原生入侵種的潛在威脅；同時也需要更多經費以及機構間的通力合作，確保所擬定和施行的政策、因應措施及研究活動能夠考量到這些額外的面向和工作事項，以促進以生態系為基礎的調適策略，同時維持生態系服務。其他具體建議包括：

預防新外來種

- 斷絕外來種的非刻意引入途徑；
- 對於擬引入的外來種進行風險評估，包括生物地理因素和可能的氣候情境；
- 針對可能的引入途徑和地點建立早期偵測、快速反應系統，並將氣候變遷的動態納入考量。



減除和控制

- 盡可能減除生態系中既存的入侵種；
- 若減除的方法不可行，則應控制已知的入侵種，如果有必要，有害的原生種也應受控制；
- 監測已知的入侵種以及有入侵潛力的可疑外來種和原生種。

監測、早期偵測和快速反應系統，能夠用來管理入侵種的既有引入與可能引入。

- 監測既存物種，包括已知入侵種、有入侵潛力之外來種和可能有害之原生種；應注意其分佈範圍的轉移，並在干擾後調查時，格外留心是否有新的入侵或入侵範圍擴大的現象。
- 針對主要引入途徑（包括藉暴風雨、強烈的聖嬰現象而遷移的途徑，及透過船、飛機和工程設備等人造載體而移動的途徑）和某些特別易受生物入侵的地區（例如經歷冰河消退的地區、溫度上升的沿海地區和受干擾地區），建構早期偵測和快速反應的能力，以避免新入侵種的立足或擴散。

針對潛在入侵種的引入與擴散以及生態系健康而進行的**風險與脆弱性評估**，必須整合氣候變遷因素，才能成為對管理者和決策者有用的工具。新外來種引入的可能性和其潛在影響會直接衝擊生態系健康，而生態系的健康狀況則決定其如何回應初期的生物入侵。這些評估能夠分析新物種的棲地適合度、氣候匹配度及其他可能促進入侵種引入和擴散的因素，亦能分析引入種對應優先保護棲地帶來的潛在威脅（PRI，2008；Sutherst，2000）。

人類為適應或減緩氣候變遷的影響所採取的措施，也可能促進入侵種的引入和擴散。例如在選用再造林樹種或生質燃料作物時，必須考量外來種的潛在影響；而興建風力發電廠和其他替代能源設施時，皆有可能干擾棲地或為入侵種創造新的引入媒介。因此這些為因應氣候變遷而設計的活動，應納入風險評估程序，考量引入途徑和入侵種的潛在影響。同樣地，對於經常發生在農業和水產養殖業的物種刻意引入活動，在針對其引入計畫進行風險評估時，應將未來氣候變遷情境納入考量。所有生物類群都應有其風險評估的方法，而且所有國家都應確實實踐這些方法。

氣候變遷和入侵種這兩個領域都充滿著不確定性和風險，如何妥適處理是非常棘手的問題，而這衍生的**管理複雜度**對政策制定者和執行者來說將是日益重要的議題。一般來說，我們知道某地區的氣候變遷概況，或入侵種被引入某生態系的可能方式，然而目前的數據和模型的準確性依然不足以讓我們針對特定地點的反應進行細部的預測。

因此，我們務必要運用現有的知識，包括廣泛的氣候趨勢、生態系壓力及入侵種管理等，並應積極採取行動，同時要持續研究、從做中學。

氣候變遷是生態保育面臨的一大挑戰，我們必須要有能力因應快速的單向變化和巨大的不確定性。因此適應氣候變遷需要採行大量的措施，包括短期和長期計畫、預警和紮實的行動、具有風險或不得不採取的特定防範作為（Heller & Zavaleta，2009）。



S. Burgiel

調適管理包括此種反覆的作法，並強調應採取行動面對變遷，同時認知到不論成功與失敗，我們都可從中汲取進一步的資訊，而持續學習與調整我們的作為。最後，這些措施應以預警原則為依歸，預警原則不僅和調適管理相輔相成，並提醒我們現在就應採取行動，提升生態系恢復力和生態系服務，小心入侵種這個重大威脅。與氣候變遷有關的入侵種數量可能只佔一部分，因此我們必須針對情況明顯的案例，全力解決具有潛在風險或高風險衝擊者。

發展一系列的預防措施（比如提高國家動植物防疫檢疫標準），可能可以達到多重目標，因為不僅可能可以因應氣候變遷和入侵種交互作用所帶來的特定問題，對於入侵種一般會帶來的廣泛威脅亦有所助益。總而言之，減少入侵種的總體威脅和維持生態系健康的相關措施可以是一項風險低的策略，且不論氣候變遷帶來的衝擊程度為何，都能為增進人類福祉帶來益處。

科學與研究

過去幾年內，研究入侵種與氣候變遷的交互作用已在學界形成一股越來越大的潮流。將近十年前，由Duke和Mooney（1999）、Mooney和Hobbs（2000）及Rogers和McCarty（2000）的早期著作開始，現已發展成一門學派，所發表的論述涵蓋實證研究、綜合評論以及管理與政策分析，並且被本研究報告所引用。這些研究，不論是透過實驗觀察、型態探究與數學模擬，都有助於我們了解條件變動的影響與後續應採取的管理作為。（Kritikos等人，2007；EPP0，2008；Gjershaug等人，2009）儘管往前跨了一大步，然而這個領域仍充斥著會導致預測或假設模糊不明的傳聞性證據，而非以經過充份證實的證據來闡明現象之間的關係。因此，關於入侵種與氣候變遷之交互作用的特定研究，尤其是要用以引導管理策略的研究，需要有更重大的進展。

我們認為更大規模的結論尚未普遍產生，有以下幾個原因。首先，儘管這領域的研究已有所進展，但重點仍聚焦於已被高度研究過的特定生物系統上。這些生物系統通常包括具經濟重要性的物種（例如農業雜草，像是旱雀麥（cheatgrass）和斑點矢車菊（spotted knapweed）），這些物種能夠在實驗環境（如實驗室或溫室）下輕易操控，並且經常是位於研究活動活躍的地區（例如北美洲）（參見Smith等人，2000；Bradley和Mustard，2006；Broennimann等人，2007；Broennimann和Guisan，2008）。在多數發展中國家，用來預測入侵種與氣候變遷交互作用的資料多半不存在，而這些國家也經常缺乏關於入侵種本身所造成之衝擊的基線資訊（Parmesan，2006）。

其次，許多以證據為基礎的科學至今探究的仍是物種範圍變化和溫度的關係，然而眾多實驗室或田野試驗檢視的卻是物種對二氧化碳濃度增加的反應。因此，我們缺乏相關資訊而難以了解入侵種與其他氣候變遷因子（如降雨量變化、海平面上升、海水酸化、同步氣候因子及較廣泛的全球變遷因子（例如土地使用與人口成長等））之間的關係（Walther等人，2009）。



第三，氣候變遷預測模型仍存在著重大侷限，而影響其應用於入侵種研究的效用。為了應用於某些地點與物種，例如太平洋區域的東方果蠅以及歐洲的布袋蓮，氣候變遷模型已發展至可充份適用於區域層級的規模（EPP0，2008；Kriticos等人，2007）。然而，氣候變遷模型所依據的資料往往不可靠且預測能力有限，特別是當這些模型把應用規模從大塊的地景降至實施環境管理的特定地點上時（EPA，2008）。而在全球尚未開發的地區，也因缺乏微規模的氣候模型，使得入侵種資訊短缺的情形更為嚴重。此外，氣候變遷研究與保育策略（如入侵種管理）兩者的時空尺度並不相配，因而限制了我們對於這兩者之交互作用的認識，也限制了我們對於這兩者之管理策略的發展（Wiens和Bachelet，2009）。因此有必要推動進一步的工作，才能對氣候匹配工具（例如CLIMEX）以及那些依照《聯合國氣候變化綱要公約》（UNFCCC）、用來評估氣候變遷影響的工具，進行細微的調整，以協助入侵種的管理。⁵

管理策略經常受礙於研究的匱乏，特別是可滿足管理之實用需求的研究（EPA，2008），比如能夠用於風險評估、媒介傳輸以及入侵種防治方式者。用來評估物種群落的可入侵性或是重要棲地之脆弱程度的風險評估，通常沒有納入氣候變遷這項因子，雖然氣候變遷對於了解風險與時間的關係非常重要（PRI，2008）。入侵種的引入途徑或媒介已漸成為管理上的焦點；然而，這種管理方法往往未能考量入侵種與氣候變遷的交互作用，例如：在氣候變遷情況下，目前最主要的途徑會如何改變？會產生哪些新的途徑？在分析媒介時應如何將氣候變遷因子納入考量？關於入侵種與氣候變遷交互作用的研究領域中，另一塊似乎很明顯卻常受到忽略的研究範疇是防治方法。目前極需了解各種防治方法（不論是物理防治、化學防治或生物防治）在氣候變遷下的成效。即使是廣泛分佈且已被充分研究過的入侵種，我們仍不清楚目前的各種防治方法中有那些在氣候變遷下最適合、有那些仍舊強而有效、有那些必須因此來改變（EPA，2008）。總之，雖然我們非常需要立即有效的解決方案，但我們仍必須依照氣候條件的變化，運用嘗試與測試的管理方式來改善我們的主體知識。

本研究顯示，在入侵種與氣候變遷之交互作用的這項課題上，有許多工作及長期性的資料尚待研究發展；我們必須確保研究與管理上的努力有助於此知識基礎的建立，方能向前邁進。對於氣候變遷的減緩與調適以及入侵種的管理，以證據為基礎的科學很可能是獲取政策支持這個議題的最好方式。以下一些建議謹提供科學界參考：

研究人員可以更善加利用**現有的研究**與資料。舉例而言，關於生物族群的範圍與分佈邊緣的研究，可能可以說明物種對各種氣候因子的耐受範圍；此外，植物標本館的記錄或其他資料來源，可能會顯示出生物生命周期隨氣候的變化。

研究非傳統的入侵種和氣候變遷因子的新實驗，可以把重點放在**物種與氣候變遷的不同**

⁵關於CLINEX的進一步資訊，請見 <http://www.climatemodel.com>；關於來自《聯合國氣候變化綱要公約》、用來評估氣候變遷衝擊與調適之方法與工具的進一步資訊，請見 http://unfccc.int/methods_and_science/impacts_vulnerability_and_adaptation/methods_and_tools_for_assessment/items/596.ph。



S. Burgiel

尺度或層面上。例如，進一步的研究可把重點放在微觀的尺度或巨觀的尺度上，包括從入侵性微生物和改變的土壤組成到生物群落層次的交互作用；實驗室的實驗可以納入海洋酸化的因子；溫室實驗可考量各種降雨型態；田野試驗可評估海平面上升與生物環境之間的交互作用。

試驗的複雜性，考量多重變因，必須成為常態。科學家可以開始進行這類研究，考量多種入

侵種、多項氣候變遷因子、多重緯度或地點以及多個環境壓力源（土地使用、資源開採、污染等等）的長期影響。這些研究確實是更加複雜，但其結果可以反映真實的生態情境與多樣的人為衝擊，可幫助我們了解入侵種與氣候變遷的交互作用（EPA，2008；Heller和Zavaleta，2009；Walther等人，2009）。

在這過程中，也有一些明顯的資訊優先順序，包括：

- 關於可能被入侵的環境、在生態上佔優勢的物種以及棲地擾動與退化的趨勢等生態學知識；
- 特定物種的詳細生物及族群資訊；
- 持續的資料產出與蒐集，以做為入侵種與氣候變遷預測模型的基礎；
- 從生態系的復育與生態系服務的維護當中所習得的經驗教訓；
- 足以使預測模型調降適用規模至場址層次所需的氣候資料與研究方法；以及
- 將不確定性納入評估與決策的策略。

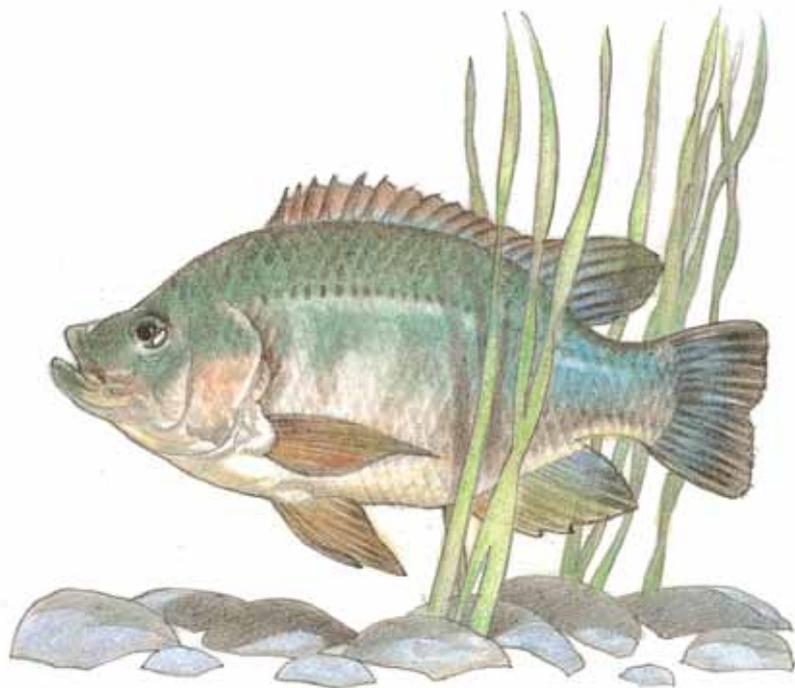
（Capdevila-Arguelles和Zilletti，2008；EPA，2008；PRI，2008）

這些領域的深入研究顯然需要資金，然而與其他環境議題（包含入侵種議題）相比，氣候變遷科學可說是取得了大部分的資金。因此，科學界與管理人員必須提出充份理由，說明入侵種與氣候變遷研究的關係，以獲取更充裕的資金支持。



入侵種與氣候變遷

術語表





協助遷移 (Assisted migration)：指人類有計畫的行動，目的為幫助某些物種遷移至更適合生長的區域，以利其保育 (McLachlan等人，2007)。

生物氣候包絡 (Bioclimatic envelope)：根據物種目前分佈情形與氣候因子之間的關係，呈現與預測物種的分佈範圍。

調適氣候變遷 (Climate change adaptation)：指為回應實際或預期的氣候變遷衝擊及其造成的影響，調整自然系統或人為系統以便緩和氣候變遷所造成的傷害，或利用其中有利的形勢 (IPCC, 2007a)。

減緩氣候變遷 (Climate change mitigation)：改善科技或開發替代方案，以減少溫室氣體排放 (碳源)，增進碳吸存的程序 (碳匯)。

干擾事件 (Disturbance event)：指造成環境條件改變，進而干擾生態系功能的事件。

生態恢復力 (Ecological resilience)：指生態系在面對內部變動或外部壓力和干擾的情況下，維持其完整性的能力。

以生態系為基礎的調適策略 (Ecosystem-based adaptation)：指面對氣候變遷的不利衝擊時，運用生物多樣性和生態系服務作為整體調適策略的一部分，以維持並增加生態系與人類的恢復力，並減少其脆弱性 (SCBD, 2009)。

生態系服務 (Ecosystem services)：指生態系帶來的利益，服務類別則可依照生態系功能區分為供給 (provisioning)、調節 (regulating)、支持 (supporting)、文化 (cultural) 等四大類 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)。

新興傳染病 (Emerging infectious disease)：指因為出現在新宿主族群中，或其疫情在現有宿主族群中經過長期演變，而導致其發生率日增的感染性疾病 (Cleaveland等人，2007)。

入侵種 (Invasive species)：指在經引入或擴散至另一非原生生態系後，會威脅當地自然環境、人類社群與經濟發展等面向之健全與福祉的物種。

入侵種管理 (Invasive species management)：預防、滅除和控制入侵種 (此三措施的優先性最好依照這個順序)。

病原體 (Pathogen)：即會導致疾病的生物體，特別指細菌、病毒或霉菌等微生物。

有害生物 (Pest)：泛指任何對植物或植物產品有害的動植物或病原體，不論其品種、品系或生物型為何 (IPPC, 2010)。

生物氣候學 (Phenology)：研究週期性生物現象的學問，例如植物開花、動物遷徙等。

分布位移 (Range shift)：指某物種分布的地理範圍，因受環境和生物氣候因素影響而有所改變。



風險分析 (Risk analysis)：決定一生物體、事件或開發所造成之潛在威脅的過程。分析步驟包括：風險評估、風險管理、風險溝通。所謂風險評估，為描述並預測現有及未來風險的機率、特性及大小；所謂風險管理，為評估與採取措施以減低風險；所謂風險溝通，為將風險評估與管理的相關資訊傳達給決策者和其他利害相關者。

食物網 (Trophic web)：指生物群落中各個物種之間的一種交互作用，其界定了生產者、消費者和分解者間的能量交換。

病媒傳染病 (Vectorborne disease)：有動物宿主或媒介參與傳播循環 (transmission cycle) 的感染性疾病。病原體藉由病媒，而從一宿主傳到另一宿主。

有害植物 (Weed)：指令人嫌惡、不符合種植需求或有害的植物。

人畜共通傳染病 (Zoonotic disease)：指藉由與動物接觸，或是經由病媒攜帶人畜共通病原體，而由動物傳播到人類的感染性疾病。



The Global Invasive Species Programme

入侵種與氣候變遷

參考文獻





- Ahumada, J.A., D. LaPointe and M.D. Samuel. 2004. Modeling the population dynamics of *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) along an elevational gradient in Hawaii. *Journal of Medical Entomology* 41(6):1157-1170.
- Albins, M.A. and M.A. Hixon. 2008. Invasive Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans* reduce recruitment of Atlantic coral-reef fishes. *Marine Ecology Progress Series* 367:233-238.
- Albright, T.P., T.G. Moorhouse and T.J. McNabb. 2004. The rise and fall of water hyacinth in Lake Victoria and the Kagera River Basin, 1989-2001. *Journal of Aquatic Plant Management* 42:73-84.
- Anchukaitis, K.J. and M.N. Evans. 2010. Tropical cloud forest climate variability and the demise of the Monteverde golden toad. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107:5036-5040.
- Assad E.D., H.S. Pinto, J. Zullo and A.M. Helminsk. 2004. Climatic changes impact in agroclimatic zoning of coffee in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39:1057-1064.
- Atkinson, C.T., J.K. Lease, R.J. Dusek and M.D. Samuel. 2005. Prevalence of pox-like lesions and malaria in forest bird communities on leeward Mauna Loa Volcano, Hawaii. *The Condor* 107:537-546.
- Atkinson, C.T. and D.A. LaPointe. 2009. Introduced avian diseases, climate change, and the future of Hawaiian honeycreepers. *Journal of Avian Medicine and Surgery* 23(1):53-63.
- Bambaradeniya, C., S. Perera and P. Samarawickrema. 2006. A rapid assessment of post-tsunami environmental dynamics in relation to coastal zone rehabilitation and development activities in the Hambantota district of southern Sri Lanka. *Occasional papers of IUCN Sri Lanka* (10), IUCN (The World Conservation Union), Colombo, Sri Lanka.
- Barbour, A.B., M.L. Montgomery, A.A. Adamson, E. Diaz-Ferguson and B.R. Silliman. 2010. Mangrove use by the invasive lionfish *Pterois volitans*. *Marine Ecology Progress Series* 401:291-294.
- Barney, J.N. and J.M. DiTomaso. 2008. Non-native species and bioenergy: Are we cultivating the next invader? *BioScience*. 58(1):64-70.
- Behrens Yamada, S. and C. Hunt. 2000. The arrival and spread of the European green crab, *Carcinus maenas*, in the Pacific Northwest. *Dreissena!* 11:1-7.
- Behrens Yamada, S. and G.E. Gillespie. 2008. Will the European green crab (*Carcinus maenas*) persist in the Pacific Northwest? *ICES Journal of Marine Science* 65:725-729.
- Bell, G.P. 1997. Ecology and management of *Arundo donax* and approaches to riparian habitat restoration in Southern California. In: Brock. J.H., M. Wade, P. Pysek and D. Green (Eds). *Plant Invasions: Studies from North America and Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Benning, T.L., D. LaPointe, C.T. Atkinson and P.M. Vitousek. 2002. Interactions of climate change with biological invasions and land use in the Hawaiian Islands: Modeling the fate of endemic birds using a geographic information system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(22):14246-14249.
- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan. 2007. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds). *Climate Change 2007: The Physical*
- Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, US.
- Boko, M., I. Niang, A. Nyong, C. Vogel, A. Githeko, M. Medany, B. Osman-Elasha, R. Tabo and P. Yanda. 2007. Africa. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, US.



- Bradley, B.A., R.A. Houghton, J.F. Mustard and S.P. Hamburg. 2006. Invasive grass reduces aboveground carbon stocks in shrublands of the Western U.S. *Global Change Biology* 12:1815–1822, doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01232.x.
- Bradley, B.A. and J.F. Mustard. 2006. Characterizing the landscape dynamics of an invasive plant and risk of invasion using remote sensing. *Ecological Applications* 16(3):1132-1147.
- Brittaine, R. and N. Litaladio. 2010. *Jatropha*: A smallholder bioenergy crop – The potential for pro-poor development. *Integrated Crop Management* 8 (FAO, Rome, Italy).
- Broennimann O., U.A. Treier, H. Müller-Schärer, W. Thuiller, A.T. Peterson and A. Guisan. 2007. Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecology Letters* 10:701-70.
- Broennimann, O. and A. Guisan. 2008. Predicting current and future biological invasions: Both native and invaded ranges matter. *Biology Letters* 4(5):585-589.
- CABI. 2010a. Beating the coffee borers. <http://www.cabi.org/default.aspx?site=170&page=1017&pid=1388>. Viewed: 20 August 2010.
- 2010b. Stopping the coffee berry borer in its tracks. <http://www.cabi.org/default.aspx?site=170&page=1017&pid=2734>. Viewed: 20 August 2010.
- 2010c. Rust proofing Indian and African Coffee. <http://www.cabi.org/default.aspx?site=170&page=1017&pid=1254>. Viewed: 20 August 2010.
- Camargo, M.B.P. de. 2010. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia*, Campinas 69(1):239-247.
- Campbell, J., D. Donato, D. Asuma and B. Law. 2007. Pyrogenic carbon emission from a large wildfire in Oregon, United States. *Journal of Geophysical Research* 112:G04014.
- Campbell, A., V. Kapos, J.P.W. Scharlemann, P. Bubb, A. Chenery, L. Coad, B. Dickson, N. Doswald, M.S.I. Khan, F. Kershaw and M. Rashid. 2009. Review of the Literature on the Links between Biodiversity and Climate Change: Impacts, Adaptation and Mitigation. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series No. 42.
- Capdevila-Argüelles, L. and B. Zilletti. 2008. A Perspective on climate change and invasive alien species (T-PVS/Inf (2008) 5 rev.) Prepared for the 2nd Meeting of the Group of Experts on Biodiversity and Climate Change under the Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats. Council of Europe, Strasbourg, France.
- Caribbean and Florida Fire and Invasives Learning Network. 2009. Second Workshop, 7-10 Dec 2009, San Juan, Puerto Rico.
- Carlton, J.T. 2000. Global change and biological invasions in the oceans. In Mooney, H.A. and R.J. Hobbs (Eds.) *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC. 31-53.
- Carroll, A. L., S.W. Taylor, J. Regniere and L. Safranyik. 2004. Effects of climate change on range expansion by the mountain pine beetle in British Columbia. In: Shore, T. L., J.E. Brooks and J.E. Stone (Eds). *Mountain Pine Beetle Symposium: Challenges and Solutions*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Kelowna, BC. Report number BC-X-399.
- Carter, J., A.L. Foote and L.A. Johnson-Randall. 1999. Modeling the effects of nutria (*Myocastor coypus*) on wetland loss. *Wetlands* 19(1):209-19.
- Carter, J. and B.P. Leonard. 2002. A Review of the literature on the worldwide distribution, spread of, and efforts to eradicate the coypu (*Myocastor coypus*). *Wildlife Society Bulletin* 30(1):162-75.
- CBD (Convention on Biological Diversity). 2002. Decision VI/23: Alien species that threaten ecosystems, habitats or species (Endnote I). Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal.



- CDC (U.S. Centers for Disease Control and Prevention). 2010a. Epidemiology – Dengue. <http://www.cdc.gov/dengue/epidemiology/index.html>. Viewed: 3 Jun 2010.
- 2010b. Malaria – About malaria. <http://www.cdc.gov/malaria/about/facts.html>. Viewed: 3 Jun 2010.
- Chakraborty, S., A.V. Tiedemann and P.S. Teng. 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* 108:317-326.
- Chang, C.C. 2002. The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. *Agricultural Economics* 27:51-64.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioic, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton. 2007. Regional Climate Projections. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, US.
- Cleaveland, S., D.T. Haydon and L. Taylor. 2007. Overviews of pathogen emergence: Which pathogens emerge, when and why? *Current Topics in Microbiology and Immunology* 315:85-111.
- Coffman, G., P. Rundel and R. Ambrose. 2004. Invasion of *Arundo donax* in river ecosystems of Mediterranean-climate regions: Causes, impacts and management strategies. *Ecological Society of America Annual Conference*, 1-4 Aug 2004, Portland, Oregon.
- Cohen, A.N., J.T. Carlton and M. Fountain. 1995. Introduction, dispersal and potential impacts of the green crab *Carcinus maenas* in San Francisco Bay, California. *Marine Biology* 122:225-237.
- Compton, T.J., J.R. Leathwick and G.J. Inglis. 2010. Thermogeography predicts the potential global range of the invasive European green crab (*Carcinus maenas*). *Diversity and Distributions* 16:243-255.
- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villarreal and C. Gay. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research* 9(1):17-23.
- Cousins, M.M., J. Briggs, C. Gresham, J. Whetstone and T. Whitwell. 2010. Beach Vitex (*Vitex rotundifolia*): An invasive coastal species. *Invasive Plant Science and Management* doi:10.1614/IPSM-D-09-00055.1.
- Danielsen, F., H. Beukema, N.D. Burgess, F. Parish, C.A. Bruhl, P.F. Donald, D. Murdiyarto, B. Phalan, L. Reijnders, M. Struebig and E.B. Fitzherbert. 2008. Biofuel plantations on forested lands: Double jeopardy for biodiversity and climate. *Conservation Biology* 23(2):348-358.
- D'Antonio, C.M. 2000. Fire, plant invasions and global changes. 2000. In Mooney, H.A. and R.J. Hobbs (Eds.) *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC. 65-93.
- Decruyenaere, J.G. and J.S. Holt. 2005. Ramet demography of a clonal invader, *Arundo donax* (Poaceae), in Southern California. *Plant and Soil* 277:41-52.
- deRivera, C.E., N. Gray Hitchcock, S.J. Teck, B.P. Steves, A.H. Hines and G.M. Ruiz. 2007. Larval development rate predicts range expansion of an introduced crab. *Marine Biology* 150(6):1275-1288.
- Dittel, A.I. and C.E. Epifanio. 2009. Invasion biology of the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*: A brief review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 374:79-92.
- Donlan, C.J., and C. Wilcox (2008). Diversity, invasive species and extinctions in insular ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 45: 1113-1123.
- Dukes, J.S. 2000. Will the increasing atmospheric CO₂ concentration affect the success of invasive species? In Mooney, H.A. and R.J. Hobbs (Eds.) *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC, US.



- Dukes, J.S. and H.A. Mooney. 1999. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution* 14(4):135-139.
- Dutton, C. and C. Conroy. 1998. Effects of burrowing Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) on the Thames tideway. Environment Agency, London, UK.
- Endelevu Energy, World Agroforestry Centre and Kenya Forestry Research Institute. 2009. *Jatropha Reality Check: A Field Assessment of the Agronomic and Economic Viability of Jatropha and Other Oilseed Crops in Kenya*. German Technical Cooperation (GTZ), Nairobi.
- ENS – Environmental News Service. 2010. Invasive biofuel crops an overlooked danger. <http://www.ens-newswire.com/ens/feb2010/2010-02-19-01.html>. Viewed: 15 August 2010.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2008. Effects of Climate Change for Aquatic Invasive Species and Implications for Management and Research (EPA/600/R-08/014). National Center for Environmental Assessment, Washington, DC, US. Available at: <http://www.epa.gov/ncea>.
- EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). 2008. Report of a Pest Risk Analysis: *Eichhornia crassipes* (08-14408). EPPO, Paris.
- FAO (Food and Agriculture Organization) 2008a. *Climate Change and Food Security: A Framework Document*. Rome: FAO.
- 2008b. *Climate Change Adaptation and Mitigation in the Food and Agriculture Sector: Technical Background Document (HLC/08/BAK/1)*. Rome: FAO.
- Fishelson, L. 1997. Experiments and observations on food consumption, growth and starvation in *Dendrochirus brachypterus* and *Pterois volitans* (Pteroinae, Scorpaenidae). *Environmental Biology of Fishes* 50:391-403.
- Freshwater, D.W., A. Hines, S. Parham, A. Wilbur, M. Sabaoun, J. Woodhead, L. Akins, B. Purdy, P.E. Whitfield and C.B. Paris. 2009. Mitochondrial control region sequence analyses indicate dispersal from the US East Coast as the source of the invasive Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans* in the Bahamas. *Marine Biology* 156:1213-1221.
- FWS (U.S. Fish and Wildlife Service). 2006. Revised Recovery Plan for Hawaiian Forest Birds. U.S. Fish and Wildlife Service, Portland, OR, US.
- Gay, C., F. Estrada, C. Conde, H. Eakin and I. Villers. 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change* 79:259–288, doi:10.1007/s10584-006-9066-x.
- Gething, P.W., D.L. Smith, A.P. Patil, A.J. Tatem, R.W. Snow and S.I. Hay. 2010. Climate change and the global malaria recession. *Nature* 465:342-346.
- Gibbs, H.K., M. Johnston, J.A. Foley, T. Holloway, C. Monfreda, N. Ramankutty and D. Zaks. 2008. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: The effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters* 3: doi:10.1088/1748-9326/3/3/034001.
- Global Amphibian Assessment. 2008. The IUCN Red List of Threatened Species, Amphibians. <http://www.iucnredlist.org/initiatives/amphibians>. Viewed: 20 May 2010.
- GISP (Global Invasive Species Programme). 2008. *Biofuel Crops and the Use of Non-native Species: Mitigating the Risks of Invasion*. GISP, Nairobi, Kenya.
- Gjershaug, J.O., G.M. Rusch, S. Oberg and M. Qvenild. 2009. Alien Species and climate change in Norway: An assessment of the risk of spread due to global warming (NINA Report 468). Norwegian Institute for Nature Research (NINA), Trondheim Norway.



- Goka, K., J. Yokoyama, Y. Une, T. Kuroki, K. Suzuki, M. Nakahara, A. Kobayashi, S. Inaba, T. Mizutani and A.D. Hyatt. 2009. Amphibian chytridiomycosis in Japan: Distribution, haplotypes, and possible route of entry into Japan. *Molecular Ecology* 18:4757-4774.
- Goolsby, J.A., D. Spencer and L. Whitehand. 2009. Pre-release assessment of impact on *Arundo donax* by the candidate biological control agents *Tetramesa romana* (Hymenoptera: Eurytomidae) and *Rhizaspidiotus donacis* (Hemiptera: Diaspididae) under quarantine conditions. *Southwestern Entomologist* 34(4):359-376.
- Green, S.J. and I. M. Côte. 2009. Record densities of Indo-Pacific lionfish on Bahamian coral reefs. *Coral Reefs* 28:107.
- Gresham, C.A. and A. Neal. 2004. An evaluation of the invasive potential of beach vitex (*Vitex rotundifolia*). The Belle W. Baruch Institute of Coastal Ecology and Forest Science, Clemson University, Georgetown, SC, US. Available at: www.northinlet.sc.edu/beachvitex/media/gresham_manuscript.pdf.
- GRID-Arendal. 2002. Vital Climate Graphics Africa. Global Resource Information Database, Arendal, Norway. United Nations Environment Programme. Available at: <http://www.grida.no/climate/vitalafrica/english/23.htm>.
- Grosholz, E.D. and G.M. Ruiz. 1995. Spread and potential impact of the recently introduced European green crab, *Carcinus maenas*, in central California. *Marine Biology* 122(2):239-247.
- Halstead, S.B. 2008. Dengue virus–mosquito interactions. *Annual Review of Entomology* 53:273-291.
- Hanson, E. and M. Sytsma. 2008. Potential for mitten crab *Eriocheir sinensis* H. Milne Edwards, 1853 (Crustacea: Brachyura) invasion of Pacific Northwest and Alaskan Estuaries. *Biological Invasions* 10:603-614.
- Harley, K.L.S. 1991. Survey report: Survey project on exotic floating African water weeds. Commonwealth Science Council.
- Harris, L.G. and M.C. Tyrrell. 2001. Changing community states in the Gulf of Maine: Synergism between invaders, overfishing and climate change. *Biological Invasions* 3:9-21.
- Heil, A., B. Langmann and E. Aldrian. 2006. Indonesian peat and vegetation fire emissions: Study on factors influencing large-scale smoke haze pollution using a regional atmospheric chemistry model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(1):113-33.
- Heller, N.E. and E.S. Zavaleta. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142:14-32.
- Hellmann, J.J., J.E. Byers, B.G. Bierwagen and J.S. Dukes. 2008. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology* 22(3):534-543.
- Hendrickx, G. 2009. The spread of blue tongue in Europe. *Small Ruminant Research* 86:34-39.
- Hershner, C. and K.J. Havens. 2008. Managing invasive aquatic plants in a changing system: Strategic consideration of ecosystem services. *Conservation Biology*. 22(3):544-550.
- Hill, M.P. and T. Olckers. 2001. Biological control initiatives against water hyacinth in South Africa: Constraining factors, success and new courses of action. In: Julien, M.H., M.P. Hill, T.D. Center and D. Jianqing (Eds). *Biological and integrated control of water hyacinth, Eicchornia crassipes*. ACIAR Proceedings 102.
- Hogenbirk, J.C. and R.W. Wien. 1991. Fire and drought experiments in northern wetlands: A climate change analogue. *Canadian Journal of Botany* 69:1991-97.
- Hoogendam K. 2007. International study on the economic consequences of outbreaks of bluetongue serotype 8 in north-western Europe. Van Hall Institute, Leeuwarden, The Netherlands.



- Howard, G., and S.R. Ziller. 2008. Alien alert: Plants for biofuel may be invasive. *Bioenergy Business* July/August:14-16.
- Hui, C.A., D. Rudnick and E. Williams. 2005. Mercury burdens in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) in three tributaries of southern San Francisco Bay, California, USA. *Environmental Pollution* 133:481-487.
- Huyer, A., R.L. Smith and J. Fleischbein. 2002. The coastal ocean off Oregon and northern California during the 1997–8 El Niño. *Progress in Oceanography* 54(1-4):311-341.
- ILO (International Labor Organization). 2007. *Key Indicators of the Labor Market*, 5th Edition. ILO, Geneva, Switzerland.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2002. *Climate Change and Biodiversity*. IPCC Technical Paper. V. Gitay, H., S. Avelino, R.T. Watson and D.J. Dokken (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland.
- 2007a. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, US.
- 2007b. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, US.
- IPPC (International Plant Protection Convention). 2010. *International Standards for Phytosanitary Measures: ISPM No.5 Glossary of Phytosanitary Terms*. Secretariat of the IPPC, Rome.
- IRIN (U.N. Integrated Regional Information Networks). 2010. Swaziland: Aliens are tough adversaries. <http://allafrica.com/stories/201006081095.html>. Viewed: 10 August 2010.
- 2002. Southern Africa: Focus on invasion of plant “invasives.” <http://www.irinnews.org/report.aspx?reportid=30087>. Viewed: 10 August 2010.
- IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2009a. *Guidelines on Biofuels and Invasive Species*. IUCN, Gland, Switzerland.
- 2009b. *IUCN Red List of Threatened Species*. Available at: <http://www.iucnredlist.org>. Viewed: 10 August 2010.
- Jaramillo J., A. Chabi-Olaye, C. Kamonjo, A. Jaramillo, F.E. Vega, et al. 2009. Thermal Tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLoS ONE* 4(8): e6487. doi:10.1371/journal.pone.0006487.
- Johansson, M.A., D.A.T. Cummings and G.E. Glass. 2009. Multiyear climate variability and dengue – El Niño Southern Oscillation, weather, and dengue incidence in Puerto Rico, Mexico, and Thailand: A longitudinal data analysis. *Public Library of Science Medicine* 6(11):1-9.
- Julien, M. 2008. Plant biology and other issues that relate to the management of water hyacinth: a global perspective with focus on Europe. *OEPP/EPPO Bulletin* 38:477-486.
- Kaplan, M., F. G. Renaud and G. Luchters. 2009. Vulnerability assessment and protective effects of coastal vegetation during the 2004 Tsunami in Sri Lanka. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9:1479–1494.
- Kaukoranta, T. 1996. Impact of global warming on potato late blight: risk, yield loss and control. *Agricultural and Food Science in Finland* 5:311-327.
- Kercher, S. and Zedler, J.B. 2004. Multiple disturbances accelerate invasion of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.) in a mesocosm study. *Oecologia* 138:455-464.
- Kimball, M.E., J.M. Miller, P.E. Whitfield and J.A. Hare. 2004. Thermal tolerance and potential distribution of invasive lionfish (*Pterois volitans/miles* complex) on the east coast of the United States. *Marine Ecology Progress Series* 283:269-278.



- Koh, L.P. and J. Ghazoul. 2008. Biofuels, biodiversity, and people: Understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological Conservation*: doi:10.1016/j.biocon.2008.08.005.
- Kolar, C.S. and D.M. Lodge. 2000. Freshwater nonindigenous species: Interactions with other global changes. In Mooney, H.A. and R.J. Hobbs (Eds.) *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC, US.
- Kriticos, D.J. , A.E.A. Stephens and A. Leriche. 2007. Effect of climate change on oriental fruit fly in New Zealand and the Pacific. *New Zealand Plant Protection* 60:271-278.
- Kurz, W. A., C.C. Dymond, G. Stinson, G.J. Rampley, E.T. Neilson, A.L. Carroll, T. Ebata and L. Safranyik. 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452(06777):987-990.
- Lafferty, K.D. 2009. The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology* 90(4):888-900.
- Lallana, V.H., R.A. Sebastian and M.D.C. Lallana. 1987. Evapotranspiration from *Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Salvinia herzogii* and *Azolla caroliniana* during summer in Argentina. *Journal of Aquatic Plant Management* 25:48-50.
- LaMarca, E., K.R. Lips, S. Lötters, R. Puschendorf, R. Ibáñez, J.V. Rueda-Almonacid, R. Schulte, C. Marty, F. Castro, J. Manzanilla-Puppo, J.E. García-Pérez, F. Bolaños, G. Chaves, J.A. Pounds, E. Toral and B.E. Young. 2005. Catastrophic population declines and extinctions in Neotropical harlequin frogs (*Bufonidae*: *Atelopus*). *Biotropica* 37(2):190-201.
- LeMaitre D.L., D.B. Versfeld and R.A. Chapman. 2000. The impact of invading alien plants on surface water resources in South Africa: A preliminary assessment. *Water S.A.* 26(3):397-408.
- Levitus, S., J.I. Antonov, T.P. Boyer, R.A. Locarnini, H.E. Garcia and A.V. Mishonov. 2009. Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophysical Research Letters* 36:L07608.
- Lips, K.R., P.A. Burrowes, J.R. Mendelson III and G. Parra-Olea. 2005. Amphibian population declines in Latin America: A synthesis. *Biotropica* 37(2):222-226.
- Lips, K.R., J. Diffendorfer, J.R. Mendelson III and M.W. Sears. 2008. Riding the wave: Reconciling the roles of disease and climate change in amphibian declines. *Public Library of Science Biology* 6(3):441-454.
- Liverman, D. and K. O'Brien. 1991. Global warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change* 1(4):351-364.
- Logan, J.A., J. Regniere and J.A. Powell. 2003. Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1:130-37.
- Lonsdale, W.M. 1993. Rates of spread of an invading species: *Mimosa pigra* in northern Australia. *Journal of Ecology* 81:513-521.
- Low, T. 2008. Climate change and invasive species: A review of interactions. Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts of the Commonwealth of Australia. Canberra, Australia. Available at: <http://www.environment.gov.au/biodiversity/publications/pubs/interactions-cc-invasive.pdf>.
- Low, T. and C. Booth. 2007. *The Weedy Truth about Biofuels*. Invasive Species Council, Melbourne.
- Luken, J. O. and J. W. Thieret. 1997. *Assessment and management of plant invasions*. Springer, New York, NY, US.
- Lynch, H.J., R.A. Renkin, R.L. Crabtree and P.R. Moorcroft. 2006. Influence of previous mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) activity on the 1988 Yellowstone fires. *Ecosystems* 9:1318-1327.
- Mack, R.N. 2008. Evaluating the credits and debits of a proposed biofuel species: Giant reed (*Arundo donax*). *Weed Science* 56:883-888.



- MacLachlan, N.J. 1994. The pathogenesis and immunology of bluetongue virus infection of ruminants. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases* 17:197-206.
- Mafokoane, L.D., H.G. Zimmermann and M.P. Hill. 2007. Development of *Cactoblastis cactorum* Berg (Lepidoptera: Pyralidae) on six North American *Opuntia* species. *African Entomology* 15(2):295-299.
- Mainka, S.A. and G.W. Howard. 2010. Climate change and invasive species: Double jeopardy. *Integrative Zoology* 5: 102-111.
- Mann, J. 1969. Cactus-feeding insects and mites. *Smithsonian Institution Bulletin* 256:1-158. Smithsonian Institute, Washington, D.C.
- March, I.J. 2008. *The Cactus Moth: A Major Threat to North American Aridlands*. The Nature Conservancy, Mexico City, Mexico.
- Marten, G.C. 1985. Reed canarygrass. In: Heath, M.E. (Ed.) *Forages, the Science of Grassland Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, IA, US.
- Martens, P., R.S. Kovats, S. Nijhof, P. de Vries, M.T.J. Livermore, D.J. Bradley, J. Cox and A.J. McMichael. 1999. Climate change and future populations at risk of malaria. *Global Environmental Change* 9:S89-S107, doi:10.1016/S0959-3780(99)00020-5.
- Mascarenhas, A. and S. Jayakumar. 2008. An Environmental perspective of the posttsunami scenario along the coast of Tamil Nadu, India: Role of sand dunes and forests. *Journal of Environmental Management* 89(1):24-34.
- Masifwa, W.F., T. Twongo and P. Denny. 2001. Impact of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart) Solms on the abundance and diversity of aquatic macroinvertebrates along the shores of northern Lake Victoria, Uganda. *Hydrobiologia* 452:79-88.
- Matthews S. and K. Brandt. 2004. *Africa Invaded: The Growing Danger of Invasive Alien Species*. GISP, Cape Town, South Africa.
- McLachlan, J.S., J.J. Hellmann and M.W. Schwartz. 2007. A Framework for Debate of Assisted Migration in an Era of Climate Change. *Conservation Biology* 21(2):297-302.
- McMichael, A.J. and M. Bouma. 2000. Global changes, invasive species and human health. In: Mooney, H. and R. Hobbs (Eds). *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington DC, US.
- Meister, H.S., D.M. Wyanski, J.K. Loefer, S.W. Ross, A.M. Quattrini and K.J. Sulak. 2004. Further evidence for the invasion and establishment of *Pterois volitans* (Teleostei: Scorpaenidae) along the Atlantic Coast of the United States. *Southeastern Naturalist* 4(2):193-206.
- Mellor, P.S. and E.J. Wittman. 2002. Bluetongue virus in the Mediterranean Basin 1998-2001. *The Veterinary Journal* 164: 20-37.
- Meyer, J.Y. 1996. Status of *Miconia calvenscens* (Melastomataceae), a dominant invasive tree in the Society Islands (French Polynesia). *Pacific Science* 50(1):66-76.
- Meyer, J.Y. and J. Florence. 1996. Tahiti's native flora endangered by the invasion of *Miconia calvenscens* D.C. (Melastomataceae). *Journal of Biogeography* 23:775-81.
- Meyer, J.Y., A. Duploux and R. Taputuarai. 2007. Population dynamics of the endemic tree *Myrsine longifolia* (Myrsinaceae) in forests of Tahiti (French Polynesia) invaded by *Miconia calvenscens* (Melastomataceae) after the introduction of a biocontrol fungal pathogen: First investigations. *Revue d'écologie* 62(1):17-33.
- Mgidi, T. 2004. *An assessment of invasion potential of invasive alien plant species in South Africa*, CSIR-Environmentek, Pretoria, South Africa.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, US.



- Milton, S.J. 2004. Grasses as invasive alien plants in South Africa. *South African Journal of Science* 100:69-75.
- Molofsky, J., S. Morrison and C. Goodnight. 1999. Genetic and environmental controls on the establishment of the invasive grass, *Phalaris Arundinacea*. *Biological Invasions* 1:181-188.
- Mooney, H., A. Larigauderie, M. Cesario, T. Elmquist, O. Hoegh-Guldberg, S. Lavorel, G.M. Mace, M. Palmer, R. Scholes and T. Yahara. 2009. Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1(1):46-54.
- Morris Jr., J.A. and J.L. Akins. 2009. Feeding ecology of invasive lionfish (*Pterois volitans*) in the Bahamian archipelago. *Environmental Biology of Fishes* 86:389-398.
- Moulton, M.P. and S.L. Pimm. 1986. Extent of competition in shaping an introduced avifauna. In: Diamond, J. and T.J. Case (Eds). *Community ecology*. Harper and Row, New York, NY, US.
- Nel, J.L., D.M. Richardson, M. Rouget, T. Mgidi, N.P. Mdzeke, D.C. Le Maitre, B.W. van Wilgen, L. Schonegevel, L. Henderson and S. Naser. 2004. A proposed classification of invasive alien plant species in South Africa: towards prioritising species and areas for management action. *South African Journal of Science*: 100:53-64.
- Nelson, G.C., M.W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Valmonte-Santos, M. Ewing and D. Lee. 2009. *Climate Change: Impact on Agriculture and Costs of Adaptation*. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, US. doi:10.2499/0896295354.
- Njiru, M., J. Kazungu, C.C. Ngugi, J. Gichuki and L. Muhoozi. 2008. An overview of the current status of Lake Victoria fishery: Opportunities, challenges and management strategies. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 13:1-12.
- Obulutsa, G. and C. Fernandez. 2010. Climate change affecting Kenya's coffee output. Reuters. 11 February 2010. Available at: <http://www.reuters.com/article/idUSTRE61A0WA20100211>.
- Odada, E.O., and D.O. Olago. 2006. Challenges of an ecosystem approach to water monitoring and management of the African Great Lakes. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 9(4):433-446.
- Ogutu-Ohwayo, R., R.E. Hecky, A.S. Cohen and L. Kaufman. 1997. Human impacts on the African Great Lakes. *Environmental Biology of Fishes* 50:117-131.
- Ogwang, J.A. and R. Molo. 2004. Threat of water hyacinth resurgence after a successful biological control program. *Biocontrol Science and Technology* 14(6):623-626.
- Opande, G.O., J.C. Onyango and S.O. Wagai. 2004. Lake Victoria: The water hyacinth (*Eichhornia crassipes* [Mart.] Solms), its socio-economic effects, control measures and resurgence in the Winam Gulf. *Limnologia* 34:105-109.
- Oxfam. 2008. *Turning Up the Heat: Climate Change and Poverty in Uganda*. Oxfam, Kampala, Uganda and Oxford, UK.
- Panzacchi, M., S. Bertolino, R. Cocchi and P. Genovesi. 2007. Population control of coypu *Myocastor coypus* in Italy compared to eradication in UK: A cost-benefit analysis. *Wildlife Biology* 13(2):159-171.
- Parker Jr., R.O. and R.L. Dixon. 1998. Changes in a North Carolina reef fish community after 15 years of intense fishing: Global warming implications. *Transactions of the American Fisheries Society* 127:908-920.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 37:637-69, doi:10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100.
- Penfound, W.M.T and T.T. Earle. 1948. The biology of the water hyacinth. *Ecological Monographs* 18:448-473.



- Petzoldt, C. and A. Seaman. 2005. Climate change impacts on insects and pathogens. *Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses*. Available at: <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/III.2Insects.Pathogens.pdf>.
- Pimentel, D., S. McNair, J. Janecka, J. Wightman, C. Simmonds, C. O'Connell, E. Wong, L. Russel, J. Zern, T. Aquino and T. Tsomondoa. 2001. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 84:1-20.
- Plummer, M.L. 2005. Impact of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on snail hosts of Schistosomiasis in Lake Victoria, East Africa. *EcoHealth* 2:81-86.
- Portier, C.J., T.K. Thigpen, S.R. Carter, C.H. Dilworth, A.E. Grambsch, J. Gohlke, J. Hess, S.N. Howard, G. Lubber, J.T. Lutz, T. Maslak, N. Prudent, M. Radtke, J.P. Rosenthal, T. Rowles, P.A. Sandifer, J. Scheraga, P.J. Schramm, D. Strickman, J.M. Trtanj and P.Y. Whung. 2010. A Human Health Perspective On Climate Change: A Report Outlining the Research Needs on the Human Health Effects of Climate Change. Research Triangle Park, NC, US. Environmental Health Perspectives/National Institute of Environmental Health Sciences. doi:10.1289/ehp.1002272. Available at: www.niehs.nih.gov/climate-report.
- Pounds, J.A. and R. Puschendorf. 2004. Clouded futures. *Nature* 427(8):107-109.
- Pounds, J.A., M.R. Bustamante, L.A. Coloma, J.A. Consuegra, M.P.L. Fogden, P.N. Foster, E. La Marca, K.L. Masters, A. Merino-Viteri, R. Puschendorf, S.R. Ron, G.A. Sánchez-Azofeifa, C.J. Still and B.E. Young. 2006. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 439(12):161-167.
- PRI (Policy Research Initiative). 2008. Integrating climate change into invasive species risk assessment/ risk management. PRI Project, Sustainable Development, PRI, Government of Canada. Workshop report. Ottawa, Canada.
- Purse, B.V., H.E. Brown, L. Harrup, P.P.C. Mertens and D.J. Rogers. 2008. Invasion of bluetongue and other orbivirus infections into Europe: The role of biological and climatic processes. *Revue Scientifique et Technique-Office International Des Epizooties* 27(2):427-442.
- Purse B.V., P.S. Mellor, D.J. Rogers, A.R. Samuel, P.P.C. Mertens and M. Baylis. 2005. Climate change and the recent emergence of bluetongue in Europe. *Nature Reviews Microbiology* 3:171-181.
- Pyke, C.R., R. Thomas, R.D. Porter, J.J. Hellmann, J.S. Dukes, D.M. Lodge and G. Chavarria. 2008. Current practices and future opportunities for policy on climate change and invasive species. *Conservation Biology* 22(3):585-592.
- Quinn, L.D. and J.S. Holt. 2008. Ecological correlates of invasion by *Arundo donax* in three southern California riparian habitats. *Biological Invasions* 10:591-601.
- Raghu, S., R.C. Anderson, C.C. Daehler, A.S. Davis, R.N. Wiedenmann, D. Simberloff and R.N. Mack. 2006. Adding biofuels to the invasive species fire? *Science* 313:1742.
- Rahel, F.J. and J.D. Olden. 2008. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology* 22(3):521-533.
- Randall R. 2004. *Jatropha curcas* (physic nut): Its weed potential in Western Australia and the implications of large scale plantations for fuel oil production. Department of Agriculture of Western Australia, Perth, Australia.
- Rangi, D. 2009. Invasive species and poverty: The missing link. *Environment Matters* (The World Bank, Washington, DC, US):12-13.
- Red Palm Mite Explosion Causing Caribbean Fruit Losses. 2007. Wallace's Farmer. 21 May 2007. <http://wallacesfarmer.com/story.aspx/red/palm/mite/explosion/causing/caribbean/fruit/losses/8/11967>. Viewed: 15 June 2010.



- Reddy, K.R., M. Agami and J.C. Tucker. 1989. Influence of nitrogen supply rates on growth and nutrient storage by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) plants. *Aquatic Botany* 36:33-43.
- Regniere, J. and B. Bentz. 2007. Modeling cold tolerance in the mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae*. *Journal of Insect Physiology* 53:559-72.
- Reiter, P. 2001. Climate change and mosquito-borne disease. *Environmental Health Perspectives* 109(Supplement 1):141-61.
- Richardson, D.M., W.J. Bond, W.R.J. Dean, S.I. Higgins, G.F. Midgley, S.J. Milton, L.W. Powrie, M.C. Rutherford, M.J. Samways and R.E. Schulze. 2000. Invasive alien species and global change: A South African perspective. In Mooney, H.A. and R.J. Hobbs (Eds.) *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC, US.
- Ritchie, C. 2008. Management and challenges of the mountain pine beetle infestation in British Columbia. *Alces* 44:127-35.
- Rogers, C.E. and J.P. McCarty. 2000. Climate change and ecosystems of the Mid-Atlantic Region. *Climate Research* 14:235-244.
- Rogers, D.J. and S.E. Randolph. 2000. The global spread of malaria in a future, warmer world. *Science* 289:1763-1766.
- Rosenzweig, C., A. Iglesias, X.B. Yang, P.R. Epstein and E. Chivian. 2000. Climate change and U.S. agriculture: The impacts of warming and extreme weather events on productivity, plant diseases, and pests. Center for Health and the Global Environment, Harvard Medical School, Boston, MA.
- Rudnick, D.A., K. Hieb, K.F. Grimmer and V.H. Resh. 2003. Patterns and processes of biological invasion: The Chinese mitten crab in San Francisco Bay. *Basic Applied Ecology* 4:249-262.
- Rudnick, D.A., V. Chan and V.H. Resh. 2005. Morphology and impacts of the burrows of the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* H. Milne Edwards (Decapoda, Grapsoidea), in South San Francisco Bay, California, USA. *Crustaceana* 78:787-807.
- Sato, H. 1998. The growth analysis of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* Solms, in different water temperature conditions. *Ecological Research* 3:131-144.
- Sawyer, D. 2008. Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 363: doi:10.1098/rstb.2007.0030.
- SCBD (Secretariat of the Convention on Biological Diversity). 2009. Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: Key messages from the Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on biodiversity and climate change. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series No. 41.
- Schofield, P.J., J.D. Williams, L.G. Nico, P. Fuller and M.R. Thomas. 2005. Foreign nonindigenous carps and minnows (Cyprinidae) in the United States: A guide to their identification, distribution, and biology. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5041.
- Schwartz, A. 2010. Coffee industry hit hard by climate change. *Fast Company*. 26 February 2010. Available at: <http://www.fastcompany.com/1564365/coffee-industry-hit-hard-by-climate-change>.
- Sea Grant Pennsylvania. 2007. Asian carp. Available at: <http://seagrant.psu.edu/publications/fs/asiancarp2007.pdf>.
- See, K.E. and B.E. Feist. 2010. Reconstructing the range expansion and subsequent invasion of introduced European green crab along the west coast of the United States. *Biological Invasions* 12:1305-1318.



- Shaffer, G.P., J.W. Day Jr., S. Mack, G.P. Kemp, I. van Heerden, M.A. Poirrier, K.A. Westphal, D. FitzGerald, A. Milanes, C.A. Morris, R. Bea and P.S. Penland. 2009. The MRGO navigation project: A massive human-induced environmental, economic, and storm disaster. *Journal of Coastal Research* 54:206-224.
- Simberloff, D. 2008. Invasion biologists and the biofuels boom: Cassandras or colleagues? *Weed Science* 56:867-872.
- Smith, S.D., T.E. Huxman, S.F. Zitzer, T.N. Charlet, D.C. Housman, J.S. Coleman, L.K. Fenstermaker, J.R. Seemann and R.S. Nowak. 2000. Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem. *Nature* 408:79-82.
- Smith, C. 2010. Marine invasive species in the context of climate change. Meeting of the Invasive Species Advisory Committee, National Invasive Species Council, 22-24 June 2010, San Francisco, CA, US.
- Sorte, C.J.B., S.L. Williams and J.T. Carlton. 2010. Marine range shifts and species introductions: Comparative spread rates and community impacts. *Global Ecology and Biogeography* 19:303-316.
- Stachowicz, J.J., J.R. Terwin, R.B. Whitlatch and R.W. Osman. 2002. Linking climate change and biological invasions: Ocean warming facilitates nonindigenous species invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(24):15497-15500.
- Stern, N. 2006. *Stern Review: The Economics of Climate Change*. HM Treasury, London, UK.
- Stone, C.P. and S.J. Anderson. 1988. Introduced animals in Hawaii's natural areas. *Proceedings of the Vertebrate Pest Conference* 13:134-140.
- Strickland, M.S., J.L. Devore, J.C. Maerz and M.A. Bradford. 2010. Grass invasion of a hardwood forest is associated with declines in belowground carbon pools. *Global Change Biology* 16: 1338-1350, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02042.x.
- Sutherst, R.W. 2000. Climate change and invasive species: A conceptual framework. In Mooney, H.A. and R.J. Hobbs (Eds.) *Invasive Species in a Changing World*. Island Press, Washington, DC, US.
- Tabachnick, W.J. 2010. Challenges in predicting climate and environmental effects on vector-borne disease epizootics in a changing world. *Journal of Experimental Biology* 231:946-954.
- Taylor J.N., W.R. Courtenay and J.A. McCann Jr. 1984. *Known impacts of exotic fishes in the continental United States*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, US.
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). 2008. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: An Interim Report*. European Communities, Brussels, Belgium.
- Tilman, D., J. Hill and C. Lehman. 2006. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. *Science* 314:1598-1600.
- TNC (The Nature Conservancy). 2002. *The Ecological Role and Management of Fire in Caribbean and Central American Pineland Ecosystems*. Highlights of a workshop held at Rio Bravo Conservation Area. 7-9 May 2002, Belize.
- Twongo, K.T. 1991. Implications of the water hyacinth infestation for fisheries, with particular reference to Lake Kyoga. In: Thompson, K. (Ed.) *Water hyacinth in Uganda*. FAO, Rome, Italy, FI TCP/UGA/9153.
- van Riper III, C., S.G. van Riper, M. Lee Goff and M. Laird. 1986. The epizootiology and ecological significance of malaria in Hawaiian land birds. *Ecological Monographs* 56(4):327-344.
- van Riper III, C., S.G. van Riper and W.R. Hansen. 2002. Epizootiology and effect of avian pox on Hawaiian forest birds. *The Auk* 119(4):929-942.
- van Wilgen, B.W., J.L. Nel and M. Rouget. 2007. Invasive alien plants and South African rivers: A proposed approach to the prioritization of control operations. *Freshwater Biology* 52:711-723.



- Van Wilgen, B.W., D.M. Richardson, D.C. LeMaitre, C. Marais and D. Magadla. 2001. The economic consequences of alien plant invasions: Examples of impacts and approaches to sustainable management in South Africa. *Environment, Development and Sustainability* 3:145–168.
- Veldhuizen, T.C. and S. Stanish. 1999. Overview of the life history, distribution, abundance, and impact of the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*. California Department of Water Resources, Environmental Services Office, Sacramento, CA, US.
- Vilà, M., C. Basnou, P. Pysek, M. Josefsson, P. Genovesi, S. Gollasch, W. Nentwig, S. Olenin, A. Roques, D. Roy, P.E. Hulme and DAISIE (Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe) Partners. 2009. How well do we understand the impacts of alien species on ecological services? A pan-European cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8:135-144.
- Villamagna, A.M. and B.R. Murphy. 2010. Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): A review. *Freshwater Biology* 55:282-298.
- Voyles, J., S. Young, L. Berger, C. Campbell, W.F. Voyles, A. Dinudom, D. Cook, R. Webb, R.A. Alford, L.F. Skerratt and R. Speare. 2009. Pathogenesis of chytridiomycosis, a cause of catastrophic amphibian declines. *Science* 326:582-585.
- Walther, G.R., A. Roques, P.E. Hulme, M.T. Sykes, P. Pysúk, I. Kühn, M. Zobel, S. Bacher, Z. Botta-Dukát, H. Bugmann, B. Czúcz, J. Dauber, T. Hickler, V. Jarošík, M. Kenis, S. Klotz, D. Minchin, M. Moora, W. Nentwig, J. Ott, V.E. Panov, B. Reineking, C. Robinet, V. Semchenko, W. Solarz, W. Thuiller, M. Vilà, K. Vohland and J. Settele. 2009. Alien species in a warmer world: Risks and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution* 24(12):686-693.
- Warner, R.E. 1968. The role of introduced diseases in the extinction of the endemic Hawaiian avifauna. *The Condor* 70:101-120.
- WCS (Wildlife Conservation Society). 2008. *The Deadly Dozen: Wildlife Diseases in the Age of Climate Change*. Wildlife Conservation Society, New York, NY, US.
- Welbourn, C. 2009. Pest Alert: Red Palm Mite *Raoiella indica* Hirst (Acari: Tenuipalpidae). Florida Department of Agriculture and Consumer Services, Division of Plant Industry, Gainesville, FL, US. <http://www.doacs.state.fl.us/pi/enpp/ento/r.indica.html>. Viewed: 8 June 2010.
- Weldon, C., L.H. du Preez, A.D. Hyatt, R. Muller and R. Speare. 2004. Origin of the amphibian chytrid fungus. *Emerging Infectious Diseases* 10:2100-2105.
- Westbrooks, R.G. and J. Madsen. 2006. Federal Regulatory Weed Risk Assessment Beach Vitex (*Vitex rotundifolia* L. f.). Assessment Summary. GeoResources Institute and Mississippi State University, Whiteville, NC, US. Available at: http://www.northinlet.sc.edu/beachvitex/media/bv_risk_assessment.pdf.
- Whitfield, P.E., T. Gardner, S.P. Vives, M.R. Gilligan, W.R. Courtenay Jr., G.C. Ray and J.A. Hare. 2002. Biological invasion of the Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans* along the Atlantic coast of North America. *Marine Ecology Progress Series* 235:289-297.
- Whitfield, P.E., J.A. Hare, A.W. David, S.L. Harter, R.C. Muñoz and C.M. Addison. 2007. Abundance estimates of the Indo-Pacific lionfish *Pterois volitans*/miles complex in the western North Atlantic. *Biological Invasions* 9:53-64.
- WHO (World Health Organization). 2009. Dengue and dengue haemorrhagic fever. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs117/en/>. Viewed: 3 June 2010.
- Wiens, J.A. and D. Bachelet. 2009. Matching the multiple scales of conservation with the multiple scales of climate change. *Conservation Biology* 24(1):51-62.
- Wijte, A.H.B.M., T. Mizutani, E.R. Motamed, M.L. Merryfield, D.E. Miller and D.E. Alexander. 2005. Temperature and endogenous factors cause seasonal patterns in rooting by stem fragments of the invasive giant reed, *Arundo donax* (Poaceae). *International Journal of Plant Sciences* 166(3):507-517.



- Williams, A.E., H.C. Duthie and R.E. Hecky. 2005. Water hyacinth in Lake Victoria: Why did it vanish so quickly and will it return? *Aquatic Botany* 81:300-314.
- Williams, A.E., H.C. Duthie and R.E. Hecky. 2007. Water hyacinth decline across Lake Victoria: Was it caused by climatic perturbation or biological control? A reply. *Aquatic Botany* 87:94-96.
- Williams, S.L. and E.D. Grosholz. 2008. The invasive species challenge in estuarine and coastal environments: Marrying management and science. *Estuaries and Coasts* 31:3-20.
- Willis, C.G., B.R. Ruhfel, R.B. Primack, A.J. Miller-Rushing, J.B. Losos and C.C. Davis. 2010. Favorable climate change response explains non-native species' success in Thoreau's Woods. *Public Library of Science ONE* 5(1):e8878.
- Wilson A. and P. Mellor. 2009. Bluetongue in Europe: Vectors, epidemiology and climate change. *Parasitology Research* 104. doi:10.1007/s00436-008-1314-8.
- Wilson, J.R.U., O. Ajuonu, T.D. Center, M.P. Hill, M.H. Julien, F.F. Katagira, P. Neuenschwander, S.W. Njoka, J. Ogwang, R.H. Reeder and T. Van. 2007. The decline of water hyacinth on Lake Victoria was due to biological control by *Nechetina* spp. *Aquatic Botany* 87:90-93.
- Witte F., T. Goldschmidt, J.H. Wanink, M. van Oijen, K. Goudswaard, E. Witte-Maas and N. Bouton. 1992. The destruction of an endemic species flock: Quantitative data on the decline of the haplochromine cichlids of Lake Victoria. *Environmental Biology of Fish* 34:1-28.
- Wittenberg, R. and M.J.W. Cock (Eds.) 2001. *Invasive Alien Species: A Toolkit of Best Prevention and Management Practices*. CAB International and GISP, Oxon, UK.
- Wittmann, E. J. and M. Baylis. 2000. Climate change: Effects on Culicoides-transmitted viruses and implications for the UK. *The Veterinary Journal* 160:107-117, doi:10.1053/tvj.2000.0470.
- Woods, A., K.D. Coates and A.I. Hamann. 2005. Is an unprecedented *Dothistroma* blight epidemic related to climate change? *BioScience* 55(9):761-769.
- World Bank. 2009. *Convenient solutions to an inconvenient truth: Ecosystem-based approaches to climate change*. Environment Department, The World Bank, Washington, DC, US.
- Wrobel, C., B.E. Coulman and D.L. Smith. 2009. The potential use of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.) as a biofuel crop. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B -Plant Soil Science* 59(1):1-18, doi:10.1080/09064710801920230.
- Zhang, Y., D. Zhang and S.C.H. Barrett. 2010. Genetic uniformity characterizes the invasive spread of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), a clonal aquatic plant. *Molecular Ecology* 19:1774-1786.
- Zimmermann, H., S. Bloem and H. Klein. 2004. *Biology, history, threat, surveillance and control of the cactus moth, Cactoblastis cactorum*. Joint FAO/IAEA Programme of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, IAEA/FAO-BSC/CM, IAEA, Vienna.
- Ziska, L.H. 2005. Climate change impacts on weeds. *Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses*. Available at: <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/III.1Weeds.pdf>.



看守台灣協會



行政院農委會林務局