

專論

氣候變遷對物種、生態系統影響及其管理策略之探討

謝東佑^{1,2,3,4)}

摘 要

自工業革命以來，人類活動所引起的氣候變化，已嚴重威脅各種生物及其賴以為生的生態系統。為了加深國人對氣候變遷影響的瞭解，並提昇國人應對氣候變遷威脅的能力，本文基於文獻回顧與作者觀察經驗，以近年來氣候變遷對生物及生態系統的不利影響為主，分為四個部份進行闡述：1.氣候變遷對物種的影響；2.氣候變遷對生態系統的影響；3.氣候變遷對亞熱帶及熱帶東亞地區生物的影響；4.氣候變遷下的物種及生態系統管理對策。

關鍵詞：全球變遷、物候學、物候時鐘、物候指紋、保育生物學。

謝東佑。2016。氣候變遷對物種、生態系統影響及其管理策略之探討。台灣林業科學31(3):227-55。

¹⁾ 中國科學院上海生命科學研究院 研究員，200031上海市岳陽路320號 Research Fellow, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences, 320 Yue Yang Rd., Shanghai 200031, China.

²⁾ 中國科學院上海辰山植物科學研究中心 研究員，201602上海市辰花路3888號 Research Fellow, Shanghai Chenshan Plant Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, 3888 Chenshan Road, Songjiang, Shanghai 201602, China.

³⁾ 上海辰山植物園上海市資源植物功能基因組學重點實驗室 研究員，201602上海市辰花路3888號 Research Fellow, Shanghai Key Laboratory of Plant Functional Genomics and Resources, Shanghai Chenshan Botanical Garden, 3888 Chenshan Road, Songjiang, Shanghai 201602, China.

⁴⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: sdyhsieh@gmail.com 或 dyxie@sibs.ac.cn
2015年5月送審 2015年8月通過 Received May 2015, Accepted August 2015.

Monograph

Impacts of Climate Change on Species, Ecosystems, and their Management Strategies

Tung-Yu Hsieh^{1,2,3,4)}

【 Summary 】

Since the industrial revolution, human activities have influenced climate, causing a severe threat to species and ecosystems on Earth. To improve people's understanding of the impacts of climate change and enhance their ability to resolve threats of climate change, the author combined his expertise and a literature review to assess the recent adverse effects of climate change on species and ecosystems. The study considered the following: (1) the impacts of climate change on species, (2) the impacts of climate change on ecosystems, (3) how climate change affects organisms and ecosystems in tropical and subtropical East Asia, and (4) management strategies to protect species and ecosystems from climate change.

Key words: global change, bioclimatology, phenological clock, phenological fingerprints, conservation biology.

Hsieh TY. 2016. Impacts of climate change on species, ecosystems, and their management strategies. Taiwan J For Sci 31(3):227-55.

緒言

工業革命以來，人為產生的溫室氣體長期累積於大氣中，導致地球氣候逐漸改變。到了上世紀末，氣候改變所造成的影響已日趨明顯。自有氣象紀錄以來，過去30多年是全球溫度最高的時期，此外各種極端氣候也越來越頻繁，例如2002年，歐洲剛遭遇幾世紀以來最嚴重的大洪水；2003年，歐洲又迎來1500多年來最熱的熱浪，超過二萬多人喪生；1987年，200多年來最強的风暴席捲英國及法國、比利時等地區，超過一千五百萬株樹木被強風吹倒。正當人們認為這些只是偶發性的極端氣候現象時，同樣等級或更強烈的風暴，在1990年發生了4次，到了1999年，在一個月內，就發生了3次，造成數億株樹木被吹倒。此後各種百年一遇或千年一遇的極端氣候，在短短30多年內頻繁的不斷發生，越來越多的證據顯示，人為活

動所造成的這種氣候異常變化，已經嚴重的威脅人類賴以維生的各種生態系統與生物，並導致各種疾病與災害發生(Stott et al. 2004, Patz et al. 2005, Bouwer 2011)。

隨著氣候變遷所造成的影響越來越明顯，各國政府也開始逐漸重視這個問題。1988年，聯合國組織全球相關領域的專家，成立「跨政府氣候變遷平台」(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)，開始全面進行氣候變遷對各個領域的影響評估。從1988年至今，IPCC總共提出了5次有關氣候變遷影響的詳細評估報告。這些報告指出，自1750年工業革命以來，大氣中二氧化碳濃度已從280 ppm上升至390 ppm，且其上升的趨勢與氣候暖化的趨勢，有很明顯的相關性。由於該數據是根據實際測量得到的，因此氣候變遷與人類活動所排放的

二氧化碳相關，已是不容爭議的事實。儘管氣候變化對人類及其生態系統影響的好壞，仍有各種不同的聲音，但是從歷年IPCC的評估報告中可以看出，人為活動所造成的氣候變遷，對人類及地球生態系統的影響，整體而言還是弊大於利，且其不利的影響，正隨著氣候惡化的程度而快速增加當中(IPCC 1990, 1995, 1996, 2001a, b, 2007, 2013, 2014a, b)。

鑑於氣候變遷對全球生物與自然環境的影響日益嚴重，並影響其對人類的服務功能，聯合國仿效IPCC組織，於2012年另外成立「生物多樣性與生態系統服務的跨政府科學政策平台」(IPBES: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)，其目標為建立決策者與科學界的溝通平台，以推動全球生物多樣性與生態系統保護工作的發展(Larigauderie and Mooney 2010, Perrings et al. 2011)。儘管這個新成立的機構尚未開始發揮其功能，然而透過這個組織的成立，可以看出國際社會對抗氣候變遷，與保護生態環境的努力與決心。反觀國內，目前仍未成立任何有關氣候變遷的獨立研究機構，甚至多數人對氣候變化會造成什麼樣的影響，仍所知不多。為增進國人對氣候變遷的認識，本文詳細探討氣候變遷對各種生物及生態系統的影響，並提出可能的管理策略，作為相關研究工作者之參考。

氣候變遷對物種的影響

分布區的變化

每種生物都有適合其生存的氣候環境，當氣候發生變化，不再適合物種生存時，生物往往會遷徙至更適合的氣候環境下，以避開不利氣候的影響，這個過程稱為「氣候生態位尋蹤」(climatic niche tracking) (La Sorte and Jetz 2012)。故透過生物的分布變化，一定程度上亦可反映出氣候變化對生物的衝擊。近年來受到暖化的影響，越來越多的證據顯示，許多物種正往高海拔及高緯度地區移動(Perry et al. 2005, Hamann and Wang 2006, McKenney

et al. 2007, Kelly and Goulden 2008)。在所有物種中，蝴蝶是對氣候變化最敏感，也最容易觀察的生物。1992~1996年間，北美洲一項針對愛得薩蛺蝶(*Euphydryas editha*)分布區變化的長期研究顯示，在排除了物種競爭及棲地破壞等其他影響因子後，該蛺蝶在低海拔及低緯度的分布區域正逐漸消失，且其消失的趨勢與氣候變化的模式十分一致，顯示氣候變化是直接導致愛得薩蛺蝶分布區域發生變化的主因(Parmesan 1996)。這也是近代氣候變遷導致陸生生物分布區改變的最早可信案例。此後這類相關的研究案例快速增加，有關氣候變遷導致物種分布區變化的證據也越來越多(Parmesan et al. 1999, Warren et al. 2001, Thuiller et al. 2005, Parmesan 2006, Moritz et al. 2008)。這些研究結果顯示，氣候變遷對蝴蝶、鳥類及高海拔、高緯度地區的物種分布區衝擊最大，而生物移動的速度，是否能趕上氣候變化的速度，將是遷移成功與否的主要關鍵，當物種遷移不及，退無可退或無法適應時，唯有走上滅絕一途(Pounds et al. 1999, Walther et al. 2002, Franco et al. 2006, Aitken et al. 2008)。

然而並不是只有分布區縮小的物種才有滅絕風險，相反地有些生物反而是因為分布區擴大而出現警兆，例如具有領域性需求的物種(area-demanding species)，常需要一定範圍的巢域(home range)作為捕食及繁殖後代的領土，一旦氣候變化導致原有巢域的食物數量或品質下降，將迫使這些物種擴大其巢域範圍，以獲取足夠的食物維持生存，這種情況往往導致這些生物，因擴大領域與人類在內的其他生物發生衝突。早期這種現象往往被誤認為是保育發生效，物種數量增加的結果，直到後來才發現，這是物種受到氣候變遷威脅的警訊。許多生物如北極熊、灰熊等，在擴大領域的過程中，往往因為侵入人類活動區域而喪生，領地無法擴增的話，也將使原本能維持族群數量的棲地，因為長期食物供應不足，最後導致整個族群的崩潰而滅絕(Boyd et al. 2008, Hannah 2010)。

物候的改變

分布區變化並非生物反應氣候改變的唯一方式，對許多物種而言，利用物候的變化來應對氣候改變，也是十分重要的手段。在全球暖化的趨勢下，越來越多的證據顯示，物種的物候也隨之發生改變(Cleland et al. 2007, Körner and Basler 2010)。在人類歷史上，有關生物最早的物候長期紀錄，是日本長達1300年以上，櫻花開花的時間紀錄(Aono and Kazui 2008, Aono and Saito 2010)，其中自1970年後，櫻花開花的物候時間明顯提前，與氣象紀錄顯示的近年暖化趨勢相符(Primack et al. 2009, Hsieh and Chiou 2013)。由於生物物候易於觀察、對氣候變化反應敏感，及其結果直觀簡單等特性，讓「物候時鐘」(phenological clock)及其「物候指紋」(phenological fingerprints)成為監測氣候變遷對生物影響的最佳工具。國際物候園的物候時鐘紀錄顯示，近年來受到暖化的影響，全球物候普遍出現春季提前，秋季延後及生長季延長的現象，然而氣候變遷對於不同物種、地區、物候期，甚至不同年份，其影響差異極大。以區域尺度來看，歐洲在1952~2000年間，平均每年生長季約增加0.36日，但是其中地中海地區，每年平均卻是增加0.67日，相當於整個歐洲大陸平均的兩倍；對不同物種而言，美國西部1968~1994年間的資料顯示，春季紫丁香(*Syringa vulgaris*)平均每年提早0.15日開花，金銀花(*Lonicera japonica*)則是平均每年提早0.35日開花；對不同物候期而言，在過去的30~50年間，歐洲春季物候(展葉及開花)每年平均提前0.12~0.31日，秋季物候則是每年平均推遲0.03~0.26日；從不同年份來比較，德國物候網1951~1996年間的資料顯示，當地春季物候平均每年提早0.12日，1951~2000年間的資料統計結果則顯示，當地春季物候平均每年提早0.16日，這期間僅多出短短4年的時間(1997~2000年)，當地的春季物候時鐘每年卻快了0.04日，表示近年來氣候變遷對生物的影響，遠比過去要大的多(Menzel et al. 2001, Hsieh and Chiou 2013, Schmidt et al. 2014)。而氣候變遷所導致的生物物候改變，所引起的後

果往往十分嚴重。越來越多的研究證據顯示，氣候變遷將導致生態系統中，相關物種出現物候不同步(asynchronies)，如授粉昆蟲的出現與蜜、粉源植物花期的不同步、鳥類繁殖期與其食物昆蟲發生期的物候不同步、昆蟲幼蟲孵化與食草萌芽的物候不同步等，這些現象會使生態系統中，關鍵物種的生態功能無法發揮，進而造成物種適應性降低、物種滅絕、生物多樣性降低、生態系統的異常、退化或是崩解(Bond 1995, Visser et al. 1998, Visser and Holleman 2001, Edwards and Richardson 2004, Kudo et al. 2004, Parmesan 2006, Post et al. 2008, Both et al. 2009, Burkle et al. 2013)。

影響生物生理

氣候變遷除了造成生物分布範圍及物候改變外，也常影響生物的生理，導致生物適應性降低，或是各種病害及災害發生(Pörtner and Farrell 2008)。有關氣候變遷影響生物生理最著名例子，是近代氣候變遷導致生物滅絕的第一個案例-金蟾蜍(*Bufo periglenes*)滅絕事件(Pounds et al. 1999, Flannery 2006)。金蟾蜍(golden toad)為哥斯大黎加蒙特維霧林保護區(Monteverde Cloud Forest Reserve)的特有物種，由於這種蟾蜍大都生活在地底，僅繁殖期才出現於地面，因此直到1966年才被命名發表(Savage 1966)。該物種從1966年發現，到1987年為止，每年繁殖期間，都有大量的成蟾被發現，直到1988年前後，受到聖嬰現象影響，科學家觀察到1987年間，成蟾兩次繁殖均因乾旱而失敗，第二年成蟾的繁殖群聚並沒有出現，至1989年僅剩一隻成蟾被觀察到。此後經過長時間的大規模調查，均未再發現任何金蟾蜍的蹤跡，由於該屬近緣種成蟾的壽命最長可達12年，因此IUCN直到2004年，才正式宣佈金蟾蜍已滅絕。透過對金蟾蜍的長期性全面調查，科學家們還發現，金蟾蜍的滅絕只不過是氣候變遷影響下的冰山一角。從1988年調查至今，短短二十幾年內，全球已有大量的兩棲類在氣候變遷下滅絕，其中光是斑足蟾屬(*Atelopus*)，就有超過74個物種滅絕，而這種氣候變遷所

導致的全球性大規模物種滅絕現象，隨著調查的不斷深入，仍在持續增加當中(Jacobson and Vandenberg 1991, Crump et al. 1992, Pounds and Crump 1994, Pounds et al. 1999, Crump 2000, Gibbons et al. 2000, Pounds 2001, Pounds et al. 2006, Pörtner and Knust 2007, Pounds and Coloma 2008, Rohr et al. 2008, Pounds and Masters 2009)。除了兩棲類外，越來越多的證據顯示，氣候變遷對其他生物生理的衝擊也十分嚴重，且其影響過程與機制，會隨著物種的不同而有很大差異，例如氣候會影響許多爬蟲類的性比例，而導致種群中的雌雄比例嚴重失衡，並使族群數量快速下降(Janzen 1994, Araújo et al. 2006, Bickford et al. 2010)，類似的狀況，也可能發生於許多植物的開花生理表現上(Nitsch et al. 1952, Rudich and Peles 1976, Miao et al. 2000)。例如許多有關草莓屬(*Fragaria*)植物的研究即發現，暖化在固定日長之條件下，將導致草莓花芽分化受影響，而無法開花(Verheul et al. 2006, Heide and Sonstebj 2007)，進而威脅其族群生存。

改變生物互動模式

氣候變化也可能透過其他直接、間接或更複雜的途徑，來影響生物間的互動模式及其生態系統。例如前面提到的物候不同步，就是一個典型的例子。然而氣候變遷造成生物互動性改變，最早引起人們注意的，是全球性大規模珊瑚白化(coral bleaching)事件。珊瑚白化是因珊瑚處於高溫海水中時，會排出提供其光合產物的蟲黃藻(zooxanthellae)，失去蟲黃藻中的光合色素後，珊瑚即呈現其碳酸鈣骨骼原有的白色外觀，並因養分消耗殆盡而逐漸死亡。從1979年迄今，全球已觀測到近10次的大規模珊瑚白化事件，這些事件多少都與聖嬰現象有關。就目前調查所知，1997~1998年的聖嬰現象，對珊瑚影響是最嚴重的，全球有超過10%的珊瑚死亡，這當中印度洋的珊瑚死亡率甚至高達近半數(Glynn 1991, Glynn 1996, Donner et al. 2005, Hoegh-Guldberg et al. 2007, McClanahan et al. 2007, Selig et al.

2012, Kelmo and Attrill 2013)。自從1979年以來，大規模的珊瑚白化事件開始被科學家注意到以後，有越來越多的氣候變遷所導致生物互動性改變案例，在全球各地被觀察到，並導致各種不同的結果。例如在美國西南部，即觀察到因氣候變遷而導致的乾旱，造成食用松-杜松群落(pinyon-juniper community)崩解的例子(Breshears et al. 2005)。美國中部霧林帶，由於捕食鳳尾綠咬鵲(*Pharomachus moccino*)幼雛的巨嘴鳥(*Ramphastos sulfuratus*)分布區，隨著氣候暖化逐步上移，也迫使鳳尾綠咬鵲族群不斷往更高海拔處移動(Pounds et al. 1999)。而在北極地區，紅狐(*Vulpes vulpes*)隨著氣候暖化而往北擴張，因競爭作用的關係，也導致其近親北極狐(*Alopex lagopus*)分布區不斷往北退縮(Hersteinsson and Macdonald 1992)。近年來，也有越來越多的疾病及入侵物種，隨著氣候變遷不斷擴張，導致其他受影響的物種數量嚴重下降，或是分布區退縮等的案例發生，這些入侵生物與各種病蟲害的大發生，也成為全球氣候變遷下最嚴重的生態問題之一(Gibbons et al. 2000, Logan and Powell 2001, Reiter 2001, Benning et al. 2002, Harvell et al. 2002, Patz et al. 2005, Garrett et al. 2006, Hellmann et al. 2008, Rahel and Olden 2008, Rohr et al. 2008)。

小結

氣候變化除了影響生物的生理、分布區、物候與生物互動模式外，也可能影響生物的行為、生長、發育、型態、遺傳及族群數量等(Hughes 2000)。例如許多植物的葉片，在長期高溫缺水的環境下，會變得更小更厚，以降低水分蒸散；氣候的變化，也使越來越多的昆蟲出現飛翅型個體，以利族群的遷移。儘管部份變化似乎有利於生物適應，但是對大多數物種而言，氣候如果變化的太快，這些適應機制所能發揮的效果仍十分有限，因此有些生物對氣候的調適反應，能否應付近年來快速的氣候變化，仍有待更深入的觀察(Thomas et al. 2001, Parmesan 2006, Hoffmann and Sgrò 2011)。有時看似單純的氣候影響現象，背後卻是十分複

雜的機制在運作，生物本身或是生物與生物之間的生理、物候、分布區與生物互動性變化，彼此之間也常常互相影響。這些都容易干擾科學研究的進行，而導致本已十分複雜、困難的氣候變化研究，充斥了各種不確定性與悖論。當受到氣候影響的生物，是生態系統內的關鍵物種時，甚至有可能導致整個生態系統的異常或崩解，本文將在後面針對這部份的問題，進行更深入的探討。

氣候變遷對生態系統的影響

南極生態系

嚴格來說，只要氣候變化影響了生態系統內的任何一個物種，該物種即可能透過蝴蝶效應，影響系統內的其他生物，尤其是當系統內食物鏈越短，且受影響的物種，越是生態系統內的關鍵物種時，這種放大效應將會更為顯著。目前這種影響模式表現最明顯的，是南極海洋生態系。由於受到全球氣候暖化的影響，南極生態系統中的浮冰正大大面積的減少，這也使得依附於浮冰下側的浮游生物隨之減少，進而使其為食的南極磷蝦(*Euphausia superba*)數量大減。由於磷蝦是南極海洋食物鏈中的基礎，磷蝦的大量減少，使的南極海洋生態系統中的各種哺乳動物、海鳥、企鵝等多種生物，在過去短短數十年內數量銳減，以南極地區的7種企鵝為例，數量最稀少的帝王企鵝(*Aptenodytes forster*)數量已下降了50%，數量最多的阿德利企鵝(*Pygoscelis adeliae*)數量下降了70%，南喬治亞島上的長冠企鵝(*Eudyptes chrysolophus*)，更從超過1200隻，劇降至不足500隻(Atkinson et al. 2004, Murphy et al. 2007, Flores et al. 2012)。而同樣是浮冰減少，由於受到衝擊的物種不同，在北極卻出現了截然不同的另外一番景象。

北極生態系

受到氣候暖化的影響，北極海冰開始逐年變薄，使躲藏於冰洞中的海豹，更容易被北極熊所獵食，而最先受到衝擊(McMahon and

Burton 2005)。然而隨著暖化加劇，海冰開始出現提前裂解及融化的現象，這讓依賴海冰來獵捕海豹的北極熊，因海冰距離加大而溺斃，或是在儲存足夠的脂肪前，就被迫提前返回陸地，因而餓死，成為目前北極地區，受到氣候變遷影響最大的物種之一(Stirling et al. 1999, Derocher et al. 2004, Hunter et al. 2010)。隨著北極海洋水溫的升高，海洋底層的腐食性底棲生物組成也正發生變化，具有高營養價值的薄殼蛤蜊，正逐漸被營養價值較低或較難捕食的厚殼蛤蜊、多毛類及蛇尾類生物所取代，這讓以底棲生物為主食的海象及絨鴨等許多生物面臨缺糧，或是必須潛到更冷的海水深層中去覓食，而增加自身被捕食的風險，導致這些生物的族群數量銳減，例如白眶絨鴨(*Somateria fischeri*)，在短短30年內，數量就減少了90%以上(Macdonald et al. 2005, Grebmeier et al. 2006, Hannah 2010)。

熱帶海洋生態系

從南、北極海洋生態系的變化可以看出，氣候改變了極地海洋的物理性質，對其生態系統造成衝擊。然而到了熱帶地區，氣候卻改變了海洋的化學性質，而衝擊著熱帶海洋生態系統。隨著大氣中CO₂的增加，高濃度的CO₂溶解於海水中，改變了海水中的化學性質，造成海水酸化，使大量的貝類與珊瑚難以形成碳酸鈣外殼或是骨骼，嚴重威脅熱帶珊瑚及貝類的生存。對熱帶珊瑚而言，來自氣候變化的另一個主要威脅，則是暖化所造成的海水表面升溫現象，海水升溫打破珊瑚與蟲黃藻的共生關係，使得大量的珊瑚白化死亡。由於珊瑚礁是熱帶海洋生物最主要的棲地，也是海洋生物多樣性最高的地區，因此近年來氣候變遷對珊瑚的影響，將使熱帶海洋的基礎生產力與生物多樣性均受到嚴重的衝擊(Glynn 1993, Anthony et al. 2008, Baker et al. 2008, Pratchett et al. 2008)。

山地生態系

升溫的海水不僅影響熱帶珊瑚礁，同時也影響了鄰近地區的山地霧林帶，導致山地雲

霧基線(cloud bases)抬升，為喜歡常年溼潤氣候的霧林帶物種，帶來了巨大的災難。以1987年哥斯大黎加的山地霧林帶為例，由於受到聖嬰現象影響，附近海水表面溫度升高，造成當地山地雲霧基線抬升，使蒙特維霧林帶受到乾旱影響，當年就有約40%的兩棲類物種，在當地滅絕，其中也包含了前面所提到的金蟾蜍。在這次大滅絕事件中，剩下一些沒有消失的物種，數量也急遽下降，或是表現出明顯向上遷移的行為，然而要注意的是，這種遷移行為，是由山地雲霧基線抬升所導致，而非暖化所造成的直接結果(Still et al. 1999)。即使如此，暖化和乾旱依然可能共同作用，影響著山地生態系統中的其他物種。近年來，在全球山地生態系中，均觀察到大量物種分布區，由低海拔往高海拔處變動的例子(Parmesan 1996, Pauli et al. 1996, Pounds et al. 1999, Beniston 2003, Seimon et al. 2007, Lenoir et al. 2008, Chen et al. 2009, Chou et al. 2011)。不過這並不代表所有的物種，在遭遇氣候暖化時，都有機會成功往高海拔處遷移，其中有許多物種是因為氣候變化、人為活動、森林砍伐、生物競爭或是環境污染等多種原因，導致低海拔族群崩潰，而僅存於高海拔地區所造成的假象。此外在瑞典、加拿大與美國部份山區，已觀察到一些林線(treeline)向高海拔處移動的例子，但是林線的變化，受到許多因子的共同作用(Malanson 2001)，因此林線受到升溫的影響，有時並沒有生物分布區變化那麼明顯，目前也有不少山地林線，並沒有出現明顯的變化。一般而言，如果升溫伴隨著雨水的增加，則林線很可能有機會往上移動，但是如果升溫伴隨著乾旱，林線可能不會發生改變，甚至還有可能向下移動(Taylor 1995, Pellatt et al. 2000, Theurillat and Guisan 2001, Grace et al. 2002, Dullinger et al. 2004, Moen et al. 2004, Gehrig-Fasel et al. 2007, Gottfried et al. 2012)。而在林線以上，受到暖化影響，全球山地冰川及積雪圈正在快速融化中，並影響鄰近的其他生態系統，其中又以熱帶冰川及積雪圈所受到的衝擊最為嚴重。以非洲東部的肯亞山為例，自1900~1983

年間，原有的18個冰川，已經消失了7個，原有冰川覆蓋面積也縮小了75%。近年來全球山地積雪量快速下降，融雪時間也比以前提早，導致春季山地溪流的融雪徑流量減少，年均水溫也明顯提昇，這些現象使全球山地冷水性生物，如鮭魚及鱒魚等，不管是分布區域及族群數量，均明顯大幅縮減，嚴重危及全球山地冷水性生物的生存(Chinn 1996, Singh and Kumar 1997, Bradford and Irvine 2000, Dyrgerov and Meier 2000, Francou et al. 2003, Kaser et al. 2004, Oerlemans 2005, Hari et al. 2006, Akhtar et al. 2008, Jonsson and Jonsson 2009, Kusky 2009, Wenger et al. 2011, IPCC 2013)。此外山地過早的融雪與暖化，也使得山區生長季的森林更為乾燥，導致更頻繁的林火發生，造成大面積的森林損失，大幅改變山地森林的景觀、生產力、碳儲量、透光度、林冠覆蓋率及植群組成(Westerling et al. 2006, Zhao and Running 2010)。

寒、溫帶生態系

相較於熱帶生態系統對水分的敏感，溫、寒帶生態系統則是對溫度更為敏感。在溫、寒帶地區，受到暖化的影響，同樣觀察到許多物種自低緯度向高緯度地區移動，還有林線北移的例子(Crick 2004, Hinzman et al. 2005, Hickling et al. 2006)。歐洲一項針對35種蝴蝶的大型調查研究顯示，受到氣候暖化的影響，已有63%的蝴蝶分布區發生北移的現象，移動的範圍大概在35~240 km之間(Parmesan et al. 1999)。荷蘭一項長期的地衣調查研究顯示，受到氣候暖化的影響，荷蘭的地衣相在過去22年間，正發生明顯改變，源自寒帶或極地的地衣物種正大量消失，而源自南方的地衣物種，已有高達77種擴散至荷蘭境內(Herk et al. 2002)。在英國已觀察到37種非遷移性豆娘及蜻蜓的分布區，在40年內平均北移了74 km，其中條斑赤蜻(*Sympetrum striolatum*)北移的範圍甚至高達了346 km(Hickling et al. 2005)。另一項長達20年的鳥類調查結果也顯示，受到暖化影響，英國鳥類分布區在過去20年間，平均北移了18.9

km (Thomas and Lennon 1999)。儘管生物分布區的變化，可能增加族群分布區破碎化及滅絕的風險(Pounds et al. 1999, Honnay et al. 2002, Opdam and Wascher 2004, Thomas et al. 2004)，但是對於溫、寒帶生態系統而言，當前更迫切的另一個危機，卻是來自於物候的改變。

近年來許多研究證據均顯示，氣候變遷導致各營養層的物候不同步(asynchrony)現象，對全球所有生態系統，均造成極大的影響，其中又以溫、寒帶與水生生態系統所受到的衝擊最為嚴重。在日本已觀察到，暖化造成植物春季開花提前的年份，由於授粉昆蟲沒有同步出現，許多蟲媒花無法結果，而嚴重影響植物族群的更新能力(Kudo et al. 2004)。歐洲一項長期研究也指出，在過去25年間，因氣候變化導致冬蛾(*Operophtera brumata*)卵孵化時間，與其食草-歐洲白櫟(*Quercus robur*)萌芽時間的物候不匹配，已使冬蛾幼蟲死亡率大幅上升，一般而言，冬蛾卵孵化早於食草萌芽的年份，初生幼蟲容易因無食物而餓死，晚於食草萌芽孵化的年份，則因幼蟲取食單寧含量高且不適口的葉片，而使幼蟲生長遲緩，被捕食及寄生的機率大幅提高(Visser and Holleman 2001)。美國的研究也指出，在過去120年間，因為氣候變化的影響，授粉昆蟲發生期與其授粉樹種開花期的物候不同步，已導致當地溫帶森林中，高達半數的蜂種消失(Burkle et al. 2013)。格陵蘭的一項研究發現，受到暖化影響，春季植物物候在馴鹿遷移路徑上的改變，已導致幼鹿死亡率提高與族群數量衰減(Post et al. 2008)。歐洲一項針對候鳥的調查指出，受到暖化影響，歐洲斑姬鶉(*Ficedula hypoleuca*)取食的昆蟲數量，提前在斑姬鶉返回育雛前達到高峰，這種物候錯位影響斑姬鶉的育雛成功率，導致歐洲斑姬鶉在短短20年內，數量銳減了90% (Both et al. 2006)。1992年6月加州的一次晚霜，凍死愛得薩蛺蝶的食草，造成當地愛得薩蛺蝶所有族群完全滅絕(Singer and Wee 2005)。氣候變化所導致的物候錯位，不僅對陸生生態系統造成影響，也普遍影響溫、寒帶的水生生態系，導致食物鏈內不同營養階層間的生物，

因物候不同步而受到影響。例如在北大西洋受到暖化影響，異根管藻(*Rhizosolenia alata*)發生期已提前了33天，三角角藻(*Ceratium tripos*)提前了27天，然而以其為食的飛馬哲水蚤(*Calanus finmarchicus*)發生期僅提前11天，這種物候錯位導致飛馬哲水蚤的數量逐年下降，連帶使以飛馬哲水蚤為主食的鯧鯨(*Balaenoptera borealis*)等多種大型海洋生物也受到衝擊(Edwards and Richardson 2004, Winder and Schindler 2004, Hays et al. 2005, Mooij et al. 2005, Both et al. 2009, Singer and Parmesan 2010, Thackeray et al. 2010, Woodward et al. 2010, Yang and Rudolf 2010)。

寒、溫帶生態系統所面臨的另外一個威脅，是暖化導致許多病蟲害繁殖世代增加，並往高緯度地區擴散，造成嚴重的經濟及生態問題。目前影響層面最大的，是山松甲蟲(*Dendroctonus ponderosae*)的危害。在北美西部，因暖冬及早春造成山松甲蟲的年世代數增加而大爆發，已經導致一億多株山地松(*Pinus contorta*)枯死。加拿大哥倫比亞省也有超過450,000 ha的松樹，因山松甲蟲大發生而受害死亡。山松甲蟲的危害，不但造成當地林業的經濟損失，也導致當地森林景觀、初級生產力、光透射度、碳儲量及林冠覆蓋率的大幅改變，出現許多由枯立木所形成的幽靈森林(ghost forests)，更對溫、寒帶森林中，以松樹為食各種生物，如灰熊、松鼠等，造成不同程度的衝擊，並使以松林為主要棲地的許多生物，分布區發生改變(Logan and Powell 2001, Nigh et al. 2004, Nigh et al. 2008)。

小結

回顧近年來相關的研究文獻，可以發現氣候變遷已對全球大多數的生態系統造成衝擊，然而各種生態系統受到影響的程度不同，限於篇幅，本文僅能挑選部份的生態系統進行闡述。儘管極地氣候變化的程度大於熱帶地區，但是熱帶生物對於氣候變化的敏感程度卻遠大於寒、溫帶及極地，因此更容易發生嚴重的生態事件(Deutsch et al. 2008)。受益於歐美地區

完整的物候園及物候網路建設(Hsieh and Chiou 2013)，目前寒、溫帶生物受氣候變遷影響的長期研究，遠較其他地區更為完整，相形之下，氣候變遷對熱帶生物的影響研究則十分不足。台灣及中國南方位於東亞的亞熱帶及熱帶地區(以下簡稱為本區)，也屬於全球氣候變遷影響最敏感的區域之一，然而不但缺乏完整的物候園及物候網路建設，相較於歐美地區，也鮮少關於氣候變遷對本區生物影響的觀察報告，顯見本區對氣候變遷的重視，尚遠不及歐美各國。為改善此一現象，本文下面針對作者近年來，觀察到氣候變遷對本區生物的影響，作簡要的報告，希望能起拋磚引玉之效，喚起大家對氣候變遷威脅的重視。

氣候變遷對亞熱帶及熱帶東亞地區生物的影響

對植物的影響

從前面文獻的回顧可知，氣候變遷對全球生物及生態系統的威脅，已經是不容忽視的事實。作者很早就關注氣候變遷對生物的影響，並在經費有限的情形下，在台灣及中國南方地區進行野外調查。調查結果發現，儘管在北半球已觀察到許多物種往高緯度移動的案例，然而對植物而言，受到本區多山地的影響，本區植物往高海拔處移動的例子(Chou et al. 2011)，遠比往高緯度遷移的更多，例如中國南方的檫樹(*Sassafras tsumu*)，已在多處山區被觀察到，其幼樹在近幾年間，紛紛上移至原本沒有母樹存在的高海拔地區(Fig. 1a)。在台灣山區，由於暖化之故，較低海拔處的台灣檫樹(*S. randaiense*)因冬季低溫不足，無法打破芽體休眠，導致台灣檫樹逐漸枯死(Fig. 1b)的案例也越來越多。在本區同樣受到冬季低溫不足威脅的，還有其他許多溫帶落葉性植物，以山櫻花(*Prunus campanulata*)為例，作者於2007年迄今，參與過的相關調查研究(Nee 2007, Chiou and Chu 2014)皆顯示，在阿里山地區，受到暖冬的影響，越來越多的山櫻花成株，因冬季低

溫不足而死亡(Fig. 1c)，而存活下來的個體，則表現出生長勢越來越衰弱，或花期越來越提前的趨勢，例如作者於2007年秋、冬季期間，在阿里山地區並未見到當年提前開花的植株，到2014年秋季，最早於10月即可見山櫻花開花，短短7年間，花期已可提前達2個月。而山櫻花的困境不只如此，作者調查還發現，由於冬季暖化的速度比夏季還快，不同季節間的升溫不對等，已導致高海拔地區幼樹因夏季高溫不足，而出現花芽分化不易、幼年期延長、物候混亂等涼害現象(Fig. 1d)，反之暖冬所導致的低溫不足，在2007年以低海拔地區表現最嚴重，高海拔地區則尚未出現低溫不足的現象，但是到了2015年春季，即使在高海拔山區，也可觀察到許多因低溫不足而死亡的植株。同樣受到暖化影響的，還有本區雌雄異株的許多獼猴桃(*Actinidia*)族群。作者的長期調查(Hsieh et al. 2004, Hsieh 2011a, b, Hsieh et al. 2011)發現，由於獼猴桃雌、雄株低溫需求不同，在春季提前而導致生態性休眠(eco-dormancy)消失的狀況下，內生性休眠(endo-dormancy)較淺的雄株往往提前開花，而休眠性較深的雌株則延後開花，嚴重時雌、雄株花期甚至可間隔長達1個月(Fig. 1e, f)，影響獼猴桃的授粉與結果率(Warrington and Weston 1990, Nee and Tsay 1991)，尤其以數量越少的族群，受影響越嚴重，許多小族群已多年未曾有結果的紀錄(Fig. 1g, h)。

春季提前或是秋季延後，也可能導致植物更容易受到霜害影響。作者調查發現，近幾年越來越頻繁的早、晚霜危害在本區發生，導致許多植物被凍死。例如作者2014年早春，於阿里山地區調查到包括阿里山菝葜(*Smilax arisanensis*)、通脫木(*Tetrapanax papyriferus*) (Fig. 1i)、水麻(*Debregeasia orientalis*)、高山鳳丫蕨(*Coniogramme procera*)、大葉溲疏(*Deutzia pulchra*)、大葉楠(*Machilus kusanoi*) (Fig. 1j)等在內的數百種植物，受到嚴重的霜害影響，連極為耐寒的阿里山十大功勞(*Mahonia oiwakensis*)也被凍死(Fig. 1k)。同年秋季，作者於安徽黃山也調查到嚴重的霜害，同樣有數

百種植物受到影響，連當地極為耐寒的溫帶植物-水青岡(*Fagus longipetiolata*)也大面積被凍死(Fig. 1l)。這些現象顯示，暖化所導致的植物生長季延長，反而可能為植物帶來更大的滅絕風險。從1992年加州一次晚霜，即可造成當地愛得薩蛺蝶滅絕的事件(Singer and Wee 2005)看來，氣候災害所引起的生態後果往往十分嚴重，然而各國政府缺乏長期氣候災害對野生動植物影響的調查，因此可能仍有更嚴重的氣候

災害影響未見紀錄，有關這部份的調查與研究，未來也仍待各國政府相關部門投入更多的努力。

對動物的影響

受到植物物候紊亂的影響，本區許多蝴蝶也出現生活史與食草物候不一致的現象。作者近年來調查發現，許多溫帶性小灰蝶已出現，卵孵化與食草萌芽期不一致的情形，例如2007

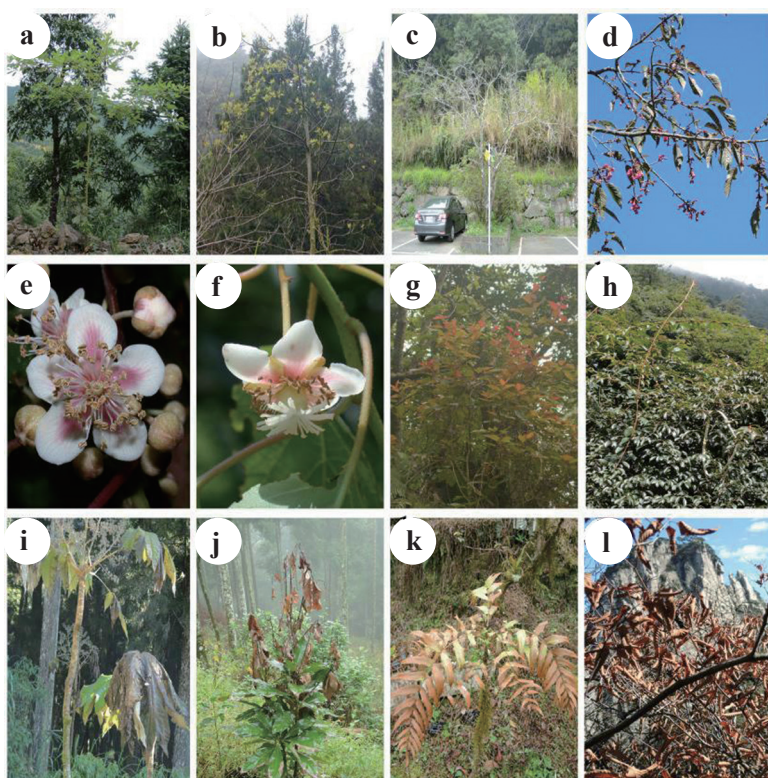


Fig. 1. Impacts of climate change on plants in tropical and subtropical East Asia. a, Climate change-caused upslope range shifts are taking place on seedlings of *Sassafras tsumu* (photo from Mt. Tianhua (天華山), Fujian Province, China). b-c, Heat damage to *S. randaiense* at Mingchi (明池) (b) and *Prunus campanulata* at Alishan (阿里山) (c) due to the insufficient accumulation of effective low temperatures required during their dormancy periods in Taiwan. d, *Prunus campanulata* was affected by cool damage at Alishan, resulting in old leaves clinging to the plant and flowering at the same time. e-g, Asynchronies of male (e) and female (f) flowering led to a lack of fruit of *Actinidia rufa* at Gongguan (公館), Taiwan (g). h, The same situation of *A. lanceolata* was found at Fenghuangyuan (鳳凰源), Anhui Province, China. i-k, Spring frost damage to *Tetrapanax papyriferus* (i), *Machilus kusanoi* (j), and *Mahonia oiwakensis* (k) at Alishan, Taiwan. l, Early frost damage to *Fagus longipetiolata* at Huangshan (黃山), Anhui Province, China.

年於思源埡口調查寬邊綠小灰蝶(*Neozephyrus taiwanus*)約有32%的卵(Fig. 2a)孵化與食草-台灣赤楊(*Alnus formosana*)萌芽不同步,到了2013年則提昇至57%,然而不同年度、不同地點,物候錯位的程度也不相同,在太平山2004年為35%、2007年則為49%;拉拉山1996年為24%、1999年為38%、2001年33%、2007年42%;棲蘭山2004年49%、2008年35%、2010年63%、2011年57%、2013年則為67%,從以上趨勢可以看出,儘管每年物候錯位的程度都不相同,但是整體而言,各地都出現物候錯位越來越嚴重的趨勢,而隨後夏季成蟲(Fig. 2b)數量的調查,則表現出與物候錯位一致的趨勢,也就是當年春季該地的物候錯位越嚴重,則夏季調查到的成蟲數量就越少。作者選擇寬邊綠小灰蝶作為例子,是因為寬邊綠小灰蝶數量較多,調查比較容易,其他綠小灰蝶儘管數量及調查紀錄較少,然而大多數情況也和寬邊綠小灰蝶一樣,都呈現越來越嚴重的物候錯位現象,導致原本就已十分稀少的綠小灰蝶類,在近幾年都呈現數量急遽下降的情形。不過並非所有的溫帶性小灰蝶,都會出現物候錯位的現象,例如成蝶於春季羽化的歪紋小灰蝶(*Amblopala avidiena y-fasciata*) (Fig. 2c),在臺灣及中國南方地區,都尚未觀察到卵與其食草-合歡(*Albizia julibrissin*)發生明顯的物候錯位情形。除了溫帶性小灰蝶類外,其他許多蝴蝶也受到氣候變遷不同程度的影響,例如2004年,作者於梨山曾調查到,當地胡麻斑粉蝶(*Delias lativitta formosana*)因雌蝶過晚產卵,導致幼蟲來不及成長至適合越冬的齡期,即因早霜而被大量凍死(Fig. 2d),次年當地胡麻斑粉蝶族群亦出現明顯減少的現象。除了蝴蝶以外,受到氣候變遷導致山區降雪減少及融雪提早影響,本區各種山地冷水性生物也已受到衝擊。作者透過實地調查及訪談,發現中國南方部份山區,許多兩棲類生物,隨著水溫升高及高山溪流徑流量減少的影響,不論是數量或是分布區域,都有大幅縮減的趨勢,例如無斑肥螈(*Pachytriton labiatus*) (Fig. 2e)分布區已縮減了31%、黑斑肥螈(*P. brevipes*) (Fig. 2f)

已縮減了44%。類似的情況很可能也發生在台灣鱒(*Oncorhynchus masou formosanus*)身上,儘管許多調查研究均指出,人為開發及環境破壞是導致台灣鱒數量劇減的元兇(Healey et al. 2001),但是作者根據多年調查與當地原住民訪談,發現即使是像南湖溪、合歡溪上游等,以往台灣鱒數量豐富,且未經人為開發的溪流環境,也已很難再找到該魚的蹤跡,且其受影響的模式,與目前全球高山冷水性鮭、鱒魚受到氣候變遷影響的模式幾乎一模一樣,因此合理懷疑,除了人為環境破壞以外,氣候變遷很可能也是造成台灣鱒瀕危的主因。

幾種本區常見的氣候變遷影響模式

氣候變遷對生物的影響,充滿許多不確定的變數,加上需要大範圍、長期觀察等特點,導致這方面研究進行的難度很高,限於人力、物力及財力的不足,作者個人能觀察到的現象仍十分有限,然而他山之石可以攻玉,結合國外的研究案例,可以發現本區除了台灣鱒以外,還有其他許多生物,也表現出受到氣候變遷危害的典型模式。例如包含台灣的湖北海棠(*Malus hupehensis*)、早田氏山毛櫸(*Fagus hayatae*)等在內的數十種植物,就是非常典型的一種氣候變遷危害模式-活死樹(living dead)。所謂「活死樹」指的是因氣候變遷,導致植株雖然處於生理存活狀態,但是在新氣候下已無法成功繁殖或是更替的個體或族群。近年來隨著全球氣候變遷,不少樹種因能夠繁殖、更新的氣候條件已消失,但是維持植株存活的氣候條件仍存在的情況下,在其死亡並被其他物種取代前,這些處於潛在滅絕狀態下的活死樹,仍可能是該地植被結構中的主要樹種,也是證實該地氣候已發生變化的有力證據(Wilson 1988, Janzen 2001, Hannah 2010)。此外還有另一種氣候變遷危害模式,容易發生在本區土地利用密集之處,那就是領域需求型模式。許多生態系中的頂級肉食動物,如灰熊、北極熊、美洲虎、雲豹等,都需要一定範圍的廣大巢域,作為捕食維持生存及繁衍後代的領土,這些物種往往擁有跨越多種不同生境的活動範

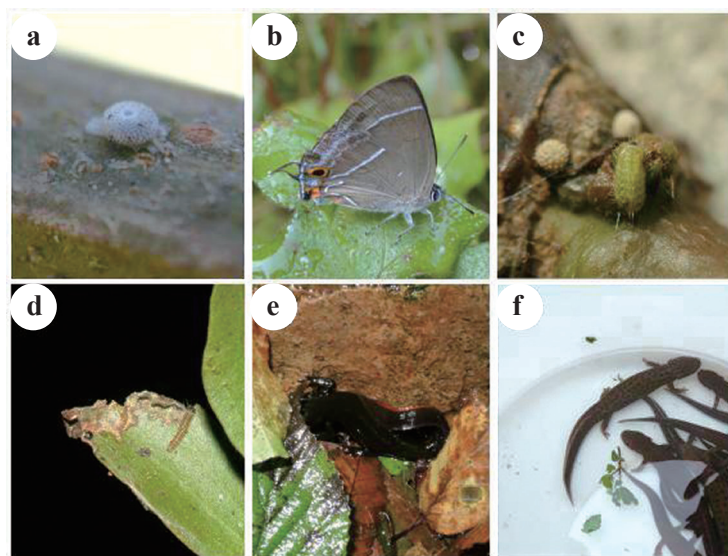


Fig. 2. Impacts of climate change on the animals in tropical and subtropical East Asia. a-b, Climate change has disrupted the synchrony of *Alnus formosana*, and egg hatching (a) of *Neozephyrus taiwanus* phenology, resulting in population declines of adults (b). (Photos a, b from Szuyuanyakou (思源埡口), Taiwan). c, The synchrony of *Albizia julibrissin*, and egg hatching of *Amblopala avidiena y-fasciata* phenology are still matched under climate change in recent years. (photo from Hangzhou (杭州), Zhejiang Province, China). d, Early frost damage to premature larvae of *Delias lativitta formosana* at Lishan (梨山), Taiwan. e-f, The populations of *Pachytriton labiatus* (e, photo from Qingliangfeng Natural Reserve (清涼峰自然保護區), Zhejiang Province, China) and *P. brevipes* (f, photo from Yashushan Natural Reserve (牙梳山自然保護區), Fujian Province, China) are both declining rapidly due to climate change.

圍，然而受到氣候變遷影響，導致領域內食物品質下降或供應不足，將迫使這些物種必須擴大其領域，以維持生存及繁衍所需，在人類土地利用密集的区域，這種情況往往會導致物種因入侵人類活動區域，而造成衝突並喪生，長期食物供應不足，且領域無法順利擴張的情況下，也將導致族群崩潰而滅絕。目前這種模式表現最明顯的，就是前陣子新聞上鬧的沸沸揚揚的苗栗三義石虎(*Prionailurus bengalensis chinensis*)事件，如果石虎真如銅鑼鄉代會副主席所說，已「多到」常入侵農戶偷吃家禽的地步，那麼也代表氣候變遷已正式為當地石虎敲響了喪鐘，因為這正是氣候變遷危害領域需求型物種最典型的特徵，而更早以前，在日人鹿野雄雄的記載中，同樣出現過這種狀況，且現

在已經滅絕的物種，正是石虎的近親-台灣雲豹(*Neofelis nebulosa brachyura*) (Kano 1929, 1930, Chiang et al. 2015)。除了石虎之外，其餘領域需求型生物，如黑熊、胡蜂等，在氣候條件不好的狀況下，近年來也常出現領域或分布區擴張的行為，但是並非所有具領域需求性的生物，在其領域擴張的過程中，都會出現與人類發生衝突的情形，如鉛色水鵝(*Rhyacornis fuliginosus*)等，這些物種即使受害，往往也很難被察覺，因此都是未來必須特別加以關注的對象。

氣候變遷除了直接對生物造成影響外，還可能透過影響生態系統來造成危害，例如前面的高山冷水性模式，和接下來要談的熱帶山地霧林帶(TMCFs: tropical montane cloud forests)

模式。由於本區到處都是山地，因此TMCFs模式也是本區氣候變遷對生態系統最常見的危害模式。該模式最早是因金蟾蜍滅絕事件而為人所熟知。本區山地雲霧基線，同時受到附近海面水溫升高，及雲霧帶下方森林砍伐的影響(Lawton et al. 2001)，其抬升問題在近幾年越來越嚴重，作者在台灣南部老佛山、大漢山、里龍山、扇平(Fig. 3a)及海南五指山(Fig. 3b)、霸王嶺、尖峰嶺等多處山地，都觀察到日益嚴重的雲霧基線抬升問題。雲霧基線抬升將使雲霧帶濕度下降、乾早日數增加、降雨量及溪流徑流量減少，雲霧帶下層喜歡長年溼潤環境的生物，將最先受到衝擊，而往更高海拔，或是往溪谷附近等，濕度較高處遷移，然而並非所有物種都能成功遷移，移動緩慢或是遷移不及的物種，則出現族群數量急遽下降的情形。作者長期的相關調查(Hsieh et al. 2007, 2012)發現，包含保亭金線蓮(*Anoectochilus baotingensis*)、牛角蘭(*Ceratostylis hainanensis*)、短柄禾葉蕨(*Grammitis dorsipila*)、昌江擬石斛(*Oxystophyllum changjiangense*)、窗格狀瓶蕨(*Trichomanes clathratum*)、小垂枝石松(*Lycopodium salvinoides*)、連孢一條線蕨(*Monogramma paradoxa*)、蜂窩馬兜鈴(*Aristolochia foveolata*)、台灣芙樂蘭(*Phreatia taiwaniana*)、毛桿蕨(*Cephalomanes apiifolium*) (Figs 3c-l)等，在內的數百種霧林帶植物，在近幾年的數量，都隨著當地的乾旱程度而急遽下降，而少數能遷移至更高海拔的物種，仍有其極限，一旦山頂高度不夠，雲霧基線上升高度超過山頂時，所有物種將無處可逃，類似哥斯大黎加蒙特維霧林保護區的大滅絕事件，將有可能在本區內再次發生。

小結

熱帶及亞熱帶東亞地區，擁有三分之二以上的山地，且隨著海拔高度的不同，同時具有橫跨熱帶、亞熱帶、溫帶、寒帶等，多個不同氣候帶的生態系統及生物群系，因此目前常見的幾種氣候變遷對生物，及生態系統影響的類型，都能夠在本區被觀察到，是研究全球氣

候變遷最理想的區域之一。然而受限於本區缺乏物候網路系統，加上氣候對生物的影響十分複雜，往往導致氣候危害難以被發現，這也使一般人對於氣候變遷缺乏警覺與認識。從前面的文獻回顧及作者的調查，可以發現氣候變遷對本區生物的影響，已是不容忽視，也無法避免的事實，建議相關單位應借鑒國外氣候變遷研究的經驗，儘快成立獨立的氣候變遷研究機構，全力培養相關的研究人才，並完成本區物候網路系統的建設，釐清氣候變遷的各種為害機制，發展氣候變遷下的生物調適技術，以降低本區生物受氣候變遷衝擊的程度，減少未來生物多樣性的損失。

氣候變遷下的物種及生態系統管理對策

利用有效的管理手段，協助生物適應氣候變化，是降低氣候變遷對生物影響的主要方式。自氣候變遷受到重視以來，許多科學家即十分關注這方面的議題，並根據氣候變遷的可能影響，提出各種生物保護策略，之後隨著對氣候變遷影響模式的瞭解，逐漸修訂各種可能的管理策略，以期降低氣候變遷影響的程度與風險。本文回顧包括以「國際自然保育聯盟」(IUCN: International Union for Conservation of Nature)、IPCC系列為主的國際組織報告，及加拿大、美國、英國等，世界多個國家的政府及非營利組織文件，應對氣候變遷之調適性策略研究，經去蕪存菁後，分成基於生態系統尺度的保護區管理策略、基於物種尺度的管理策略二部份，整理如下，以供相關研究工作者參考：

一、保護區管理策略：

早期物種受到來自於人為開發及獵捕的壓力，保護區的設立對保護物種多樣性起到非常重要的關鍵性作用，因此面對氣候變遷的新威脅，科學家最先想到的就是如何透過保護區經營管理，來降低氣候變遷對生物影響的程度(Peters and Darling 1985)。該理念主要是基於氣候導致物種分布區變化情況下，保護區管理

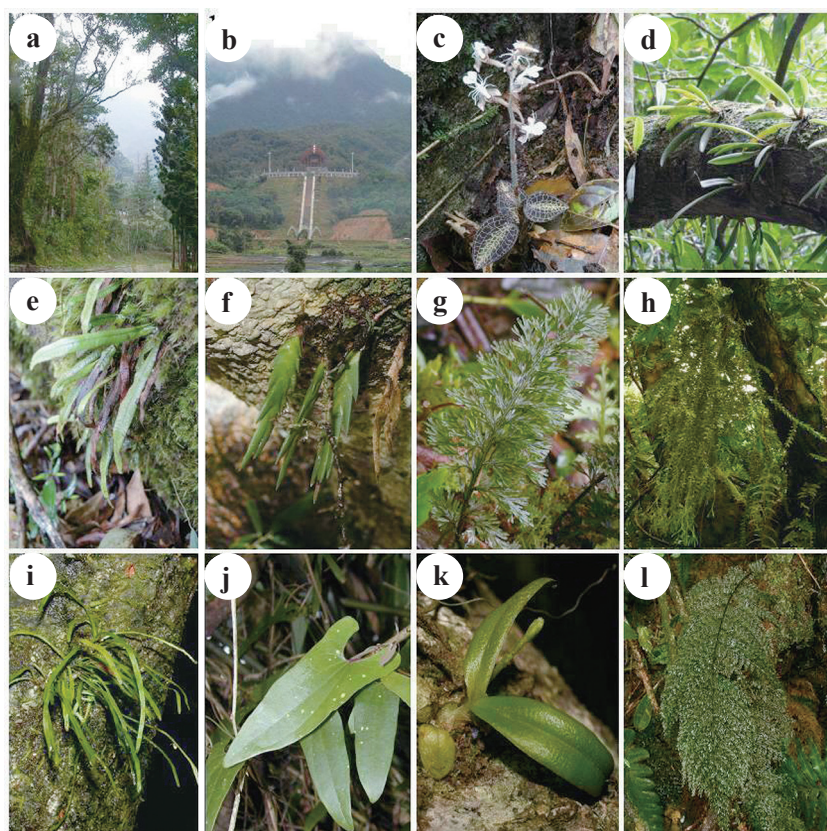


Fig. 3. Impacts of climate change on tropical montane cloud forests of East Asia. Habitats (a-b) and species (c-l) of tropical montane cloud forests are severely affected by the lifting of the cloud base. a, Photo from Shanping (扇平), Taiwan, showing the higher cloud base above the top of the trees. b, photo from Mt. Wuzhi (五指山), Hainan Province, China, showing the clear cloud base above Li's Temple. c-l, Photos show some vulnerable species under climate change in tropical montane cloud forests of East Asia. (c, *Anoectochilus baotingensis*, d, *Ceratostylis hainanensis*, e, *Grammitis dorsipila*, f, *Oxystophyllum changjiangense*, g, *Trichomanes clathratum*, h, *Lycopodium salvinoides*, i, *Monogramma paradoxa*, j, *Aristolochia foveolata*, k, *Phreatia taiwaniana*, l, *Cephalomanes apiifolium*).

能一次性的保護大量物種及生態系統，被認為是早期最有效的物種保護策略。而當部份物種分布區移出保護區範圍時，只要提供適當的生態廊道、擴大保護區範圍，或是建立新的保護區等，即可協助生物遷移，降低氣候變遷對生物的衝擊(Halpin 1997, Soto 2002, Hannah et al. 2007, Heller and Zavaleta 2009, Mawdsley et al. 2009)。於此概念下，近年許多生態學家，紛紛提出許多有關氣候變遷下，基於保護區管理的相關保護策略，本文將其整理如下：

- (一) 應考慮到物種分布區因氣候變遷，遷移至保護區外的可能性，適時適地擴充保護區的範圍，以防止物種因分布區變化，卻無地遷移而滅絕(Bruner et al. 2001, McNeely and Schutyser 2003, Lemieux and Scott 2005, Scott and Lemieux 2005, Lovejoy and Hannah 2006, Mitchell et al. 2007)。
- (二) 透過景觀矩陣的設計，建立生物移動廊道，並進行良好的管理，保護棲地間生態網路連通、再現與重複性，保持各種物

種在不同棲地間移動的能力，以防止物種受到氣候變遷影響下，因對棲地連通性需求的不足而滅絕(Pringle 2001, Soto 2002, Chu et al. 2005, Williams et al. 2005, Donald and Evans 2006, Giliomee 2006, Harris et al. 2006, Lovejoy and Hannah 2006, Battin et al. 2007, Hodgson et al. 2009, Mawdsley et al. 2009, Knowlton and Graham 2010)。

- (三) 強化保護區的管理與生態功能恢復，以增強保護區對生物及生態系統的保護能力，如增加對溪流的遮陰以減少水體增溫，或是增加森林內的濕度，降低野火發生的機率，以提高生物及生態系統對氣候變遷的適應性(Harris et al. 2006, IPCC 2007, Mitchell et al. 2007, Mawdsley et al. 2009)。
- (四) 建立新的天然保護區，或是人為建立新的物種棲地、庇護所等，增加生物族群及棲地數量，以降低生物在氣候變遷下滅絕的風險(Harris et al. 2006, Lovejoy and Hannah 2006, IPCC 2007, Mawdsley et al. 2009)。

二、物種管理策略：

早期應對氣候變遷的生物保育策略，主要是以物種遷移與分布區變化為中心理論，針對保護區規劃與管理進行設計，以期減少氣候變遷對生物及生態系統的影響程度，降低生物滅絕的風險。然而哥斯大黎加蒙特維霧林保護區內，兩棲類的大滅絕事件，讓全球科學家警覺到，氣候變遷似乎不只是驅動生物遷移，影響生物分布區變化這麼簡單，良好的保護區設計與管理，已不足以協助生物應對氣候變遷的威脅，隨著對氣候變化影響認識的加深，有更多科學家開始關注面向物種的管理策略研究，並提出各種協助物種應對氣候變遷威脅的方法，本文將這類方法整理摘錄如下：

- (一) 物種監控：應發展氣候變遷下的生物監控技術與系統，並預測氣候對生物的可能影響，以協助管理者採用適當的決策與

技術，減少未來物種受氣候變遷威脅的程度，降低物種滅絕的風險(Margoluis and Salafsky 1998, Adger et al. 2003, Mawdsley et al. 2009)。

- (二) 原位管理：對受氣候變遷威脅的物種，應保持對其族群及棲地的良好管理，平時即做好預防氣候因子威脅的措施，在發現影響物種的任何不利因子時，應設法協助物種移除具威脅性的影響因子或調適之，以降低物種受影響的程度(Bruner et al. 2001, McNeely and Schutyser 2003, Mitchell et al. 2007)。
- (三) 遷地保育：當生物對影響因子無法移除或調適時，則必須考慮輔助物種遷移至其他現存棲地、適當的庇護所，或是其他天然、人為建立的新棲地，以保存種源的遺傳多樣性，防止物種滅絕的發生(Griffith et al. 1989, Haight et al. 2000, Tenhumberg et al. 2004, McLachlan et al. 2007, Mitchell et al. 2007, Hoegh-Guldberg et al. 2008, Guerrant et al. 2013)。
- (四) 種源保存與物種拯救：當原位管理及移地保育皆無法發揮效用時，最後必須考慮各種種源保存的方法，或以人工圈養、栽培的方式，維持健康的種群數量及其遺傳多樣性，等找到適合的新棲地、人為建立的新棲地已完成，或是原棲地氣候恢復正常時，再將族群放歸自然(Kleiman 1989, Hansen et al. 2003, Kleiman et al. 2010, Guerrant et al. 2013)。

小結

對大多數科學家而言，氣候變遷是一種新的、陌生的威脅，人們對其瞭解的還十分有限，儘管已有許多的應對策略被提出，希望能減輕氣候變遷對生物所帶來的傷害，但是大多數策略的可行性及其效果，都尚未經過驗證，或是經實踐一段時間後，才被發現無法達成效果(Hannah et al. 2005, Zacharias et al. 2006)。因此許多應對策略，也隨著科學家們對氣候影響的瞭解，而不斷的被修改。本文從

以往相關參考文獻中，挑選出目前比較重要的管理策略進行說明，此外還有許多政策、法律、教育等，配套性的輔助策略，也在這幾年中陸續被提出(Lemieux and Scott 2005, Scott and Lemieux 2005, Lovejoy and Hannah 2006, Mawdsley et al. 2009)。這些相關配套策略的重要性，並不亞於任何實際的管理行動，例如立法可使政府部門的相關行動及經費使用編列，有其法源依據，教育可使政府及民間，都能瞭解氣候變遷對生物的威脅，及生物多樣性保育的重要性，而從各種層面上，一起支持對抗氣候變遷的行動。然而本文篇幅有限，在各種對抗氣候變遷的策略中，必須有所取捨，但是那並不代表其他沒有提到的策略就不重要，這點必須在此特別強調，避免未來相關研究工作者，忽視了其他輔助性策略的重要性。

從歷年應對氣候變遷對策的文獻回顧中，也可以發現隨著人們對氣候變遷影響的瞭解，對管理策略的觀念也不斷在改變。早期人們以保護區作為對抗氣候變遷威脅，減輕其對生物影響的主要工具，但是從實際的狀況看來，保護區對抗氣候變遷的效果仍有其限制，因為在快速的氣候變化下，許多生物並非無處遷移，而是來不及遷移，而且保護區的設計，只能應付生物分布區發生變化的情況，其他如生理衝擊、生物互動性變化、物候改變等，對生物所帶來的傷害，都是保護區所無法應付的，而後面這些才是氣候變遷對生物造成影響的主要類型，儘管有關物種管理策略的提出，可以彌補保護區的不足，但是在實際執行層面上，仍有許多技術尚待克服，例如人們是否具有氣候變遷對生物影響的監控及預測系統？是否有修正生物間物候錯位的技術？是否有協助生物對抗氣候變遷對生理衝擊的技術？如果這些都沒有，那麼即使有再好的策略，對於協助生物氣候變遷調適，恐怕仍是力有未逮，於事無補。

討論

從前面的文獻回顧可以看出，生物對於氣候的反應十分敏感，早在人類對氣候變遷有所

感應之前，生物已經透過物候、分布、生理、行為、豐度等種種變化，反應了全球氣候變遷的情形(Hughes 2000)。這其中又以物候的變化，對氣候的反應最為敏銳，也最容易被觀察，許多生物的物候變化在數百年來，也透過歐美各國的物候網路系統，被長期記錄下來，成為近代研究氣候變遷對生物影響最珍貴的史料(Hsieh and Chiou 2013)。相較於一般生物，人們對於氣候變遷的覺察，則是遲鈍的令人吃驚。直到上世紀末，少數人才開始關注氣候變遷的影響，而到本世紀初，氣候變遷的存在，仍是許多人心中不願面對的真相。但是不管人們願不願意承認，從實際證據看來，它不但已經存在，而且正嚴重威脅著全球的生物與生態系統。

直到2004年，刊登於Nature上的一篇論文，開始改變了大多數人的想法，該研究使用氣候封包模型(CEMs: climate-envelope models)，對全球多個高生物多樣性區域中的大量物種，進行生物分布區變化的評估，這項當時最大規模的研究估算出，氣候變遷將可能導致未來一百多萬種生物因而滅絕(Thomas et al. 2004)。這篇文章帶來了正反兩面的效果，好的一面是，它開始讓更多人願意面對氣候變遷的真相，壞的一面是，後面眾人爭相模仿的使用CEMs，造成了另外一種災難。儘管從理論而言，CEMs似乎並無不妥，但是從生物學的角度而言，CEMs卻是頗具爭議的一種模型(Woodward and Beerling 1997, Davis et al. 1998a, b)，能適用該模型的實際生物案例，可說少之又少。隨便舉幾個例子，當兩種生物分布在一起，而分別是領域需求型與非領域需求型物種時，CEMs評估的結果，兩種是一樣的，但是實際上，一種會擴大其分布，另一種可能反而會縮小，由此看來，至少領域需求型物種，並不適合使用CEMs。活死樹則是另一種不適用CEMs的例子，原因很簡單，因為現有物種的分布區氣候，本身就不是該物種最適合生存的氣候，用這樣的資料進行CEMs定模，那評估結果又如何可信呢？同樣的山地霧林帶物種的分布，也不適用CEMs進行評估，因為影響其分

布的，不是這些物種現有分布點的氣候條件，而是附近海面的表面海水溫度，及山地霧林帶下方森林受砍伐的程度，因此用現有分布點的氣候資料，去進行CEMs的定模，其評估結果根本就不可信。換言之，本區最常見的幾種氣候變遷危害模式，都不適合使用CEMs進行評估，更遑論CEMs只能評估氣候變化對物種分布的影響而已，對於生物生理所受的衝擊、物候變化的影響、生物互動模式的改變等，這幾種目前氣候對生物最主要的影響類型，CEMs根本都沒有評估的能力。從這些現象看來，氣候變遷造成百萬物種滅絕的評估結果，可能是過於樂觀的，因為其他幾種主要的氣候影響類型，都沒有被該研究所用的模型考慮到。而CEMs如果能被正確使用的話，對於規劃保護區可能會有一定的效果，但是絕不能在使用者對氣候影響機制，及模型建模原理都不瞭解的情形下，被拿來濫用(Chiou et al. 2015)。

儘管近年來已有許多氣候變遷調適策略被提出，但是在實際行動上，這些管理策略的執行效果仍待驗證。以保護區策略為例，現有的保護區與保護政策，似乎已難以完全協助生物調適源自氣候變遷的威脅，而必須透過良好的生態廊道設計，才能保護部份物種，減輕源自氣候變遷的壓力。然而生態廊道的建設，在人類土地利用密集的区域，並沒有這麼簡單，更何况生態廊道的保護作用有其極限，例如領域需求型物種的擴張範圍，可能受限於個體的能力與體力，萬一維持生存所需的領域範圍，已超出個體的體力與能力所能負荷，那麼物種滅絕的情況同樣會降臨。遷移性物種所面臨的風險就更大，因為只要遷移路線上，任何一個地點的物候錯位，導致食物供應不足，而又沒有其他可以替代的位點時，物種依然會面臨滅絕的風險。由此可以看出，即使有良好的保護區與生態廊道建設，對於生物氣候變遷的調適作用，可能仍有其限制，更遑論人們還必須面對生態廊道可能帶來的不利後果，例如狂犬病如果透過生態廊道而擴散，那時又該怎麼辦？是否反而會導致更多的物種，面臨因狂犬病而來的滅絕風險呢？當然這並不代表保護區與生

態廊道的建設就不重要，而是作者必須提醒相關研究工作者，注意許多管理策略儘管不可或缺，但是仍有其效果上的限制，更不能忽視這些策略可能帶來的不利影響。

從近代氣候變遷的相關理論發展趨勢中，可以歸納出要執行保護區管理策略，大部分必須依靠恢復生態學(Restoration Ecology)中的相關理論與技術，用以修復生態系中受損的生態功能，或是建設生態廊道，以提供生物移動的空間(Harris et al. 2006)。但是若要執行物種管理策略，則必須從物候學著手，利用早期物候學家所設計，用於研究氣候變化，對生物影響的物候園與物候網路技術，進行氣候變遷對生物影響的監測、發展物種原位管理技術、輔助遷移評估，還有種源保存與物種拯救等各項工作。在這兩門學科中，恢復生態學由於其實際功能受到重視，在近幾年發展十分快速，反觀物候學則因長期不受重視，而逐漸沒落，儘管近年來已有科學家指出，應重新重視物候學，用以應付氣候變遷(Lechowicz and Koike 1995, Hsieh and Chiou 2013)。但是就現有狀況看來，就算物候園與物候網路系統，仍完整保存於歐、美各國，並留下了許多珍貴的紀錄，但是當前科學家們，卻無法進一步利用這套系統，發展出各種氣候變遷監測與調適技術，顯見物候學家與物候技術的凋零，已是既成的事實，未來人才與技術的缺乏，相信會是科學家們在應付氣候變遷方面，所遇到的最大困境之一。

以往用於評估物種是否需要保育，主要都是根據IUCN所提出的評估標準(IUCN 2005)，諸如物種在一定時間或一定世代數內，分布區是否會減少至一定範圍？或族群是否會減少至一定數量？這些都是根據生物受環境開發，或人為獵捕壓力下，所訂定出的標準，然而氣候變化對物種的影響十分複雜，加上目前已知許多受氣候變化而滅絕或受威脅的物種，事前大多沒有出現這些徵兆，甚至是出現了相反的徵兆，例如分布區反而擴大等，因此氣候變化也為傳統的物種保育評估標準，帶來了新的挑戰，許多受氣候變化威脅的物種保育評估，都可能被迫必須捨棄舊有的評估標準。2007年，美國國家瀕危物種法案

(ESA: *Endangered Species Act*)對北極熊的立法保育，就是一個十分經典的例子。該法案捨棄以往常用的IUCN評估標準，根據北極熊受氣候威脅的現況，及氣候模型顯示未來氣候變化的程度，將北極熊列入必須受保護的受威脅物種名單內，該項立法對於協助生物對抗氣候變遷，有著非凡的意義，因為美國瀕危物種的立法是非常謹慎而嚴格的，一旦立法成功，代表美國政府即必須立刻透過實際行動，阻止任何直接或間接影響該物種族群及棲地的行為，並積極為移除物種受脅條件、協助物種調適氣候變遷威脅，及恢復其種群數量等工作而努力，包括在棲地的石油探勘、油氣開採、遊憩行為，或是企業的溫室氣體排放等，危及北極熊的任何直接或是間接行為，都可能面臨美國政府的行政處罰或是法律控訴，若是美國政府沒有積極保護已立法保護的物種，並提出實際的成效，則任何美國公民都可控訴政府的瀆職。可以想見這在立法之初，所遭遇到的反對聲浪是如何之大，不只許多財團、政府官員和保守派團體反對，連加拿大政府都反對這項立法，因為這會讓很多付出高價，到加拿大獵殺北極熊取樂的美國富豪們裹足不前，減少加拿大許多的額外財政收入(Hannah 2010)。幸好ESA是必須完全根據科學證據，才能決定是否將物種列入受脅名單，而減少許多立法上的阻力，否則以當時北極熊數量正處於40多年來的高峰，加上這許多阻力看來，北極熊要被列入受威脅的物種，可能是一項遙不可及的任務。而在該法案成功之後多年，再來看看現在北極熊在北極，所遭遇的氣候變遷困境，不得不讓人佩服，當時美國環保團體的先見之明，與他們協助生物對抗氣候變遷所付出的努力。這項立法的成功，不只使北極熊成為全球第一例，因氣候變遷而受到ESA保護的物種，也是少數代表法治戰勝政治、保育戰勝經濟的案例，值得未來其他各國學習借鑒。

結論

自工業革命以來，人類活動所引起的氣候變化，已逐漸威脅各種生物及其賴以維生的生態系統。到了上世紀末，氣候變遷所造成的影

響更為明顯，除了暖化以外，各種百年一遇，或是千年一遇的極端氣候，在過去數十年內頻繁發生。從IPCC到IPBES等，各種國際組織的相繼成立，顯示在日漸惡化的氣候條件下，協助各種生物調適氣候變遷的威脅，以減少生物多樣性的損失，已經成為全球當下刻不容緩的重要任務。然而氣候變化對生物的影響十分複雜，生物應對氣候變遷的反應也各有不同，有的生物是分布區發生變化，有的是生理受到衝擊，有的則是物候發生改變，也有許多是生物互動模式發生變化。氣候變遷也對各種生態系統，帶來不同的衝擊，其中尤以熱帶海洋與山地霧林帶對氣候變遷最為敏感，海水酸化與海面溫度上升，造成珊瑚大面積死亡，嚴重衝擊海洋生物多樣性；山地霧林帶下方森林被伐除，及附近海面溫度上升，導致山地雲霧基線抬升，造成嚴重乾旱，已有許多霧林帶物種因此而滅絕。

台灣及中國南方位處熱帶與亞熱帶東亞地區，加上境內多山地，擁有極高的生物多樣性，及橫跨不同氣候帶下的各類型生態系統，大多數目前常見的氣候變遷影響模式，都能在本區內被觀察到，是研究全球氣候變遷，對生物影響最理想的區域之一。然而氣候變遷對生物影響複雜且觀察不易，加上本區缺乏物候園及物候網路系統，導致人們長期以來，對氣候變遷危害缺乏應有的警覺與認識。近年來隨著全球科學家們的努力，氣候變遷對生物影響的證據也隨之快速累積中，然而氣候對生物的影響遠不只此，未來隨著更多研究人力及經費的投入，相信還會有更多證據仍待發現。

儘管近年來人們已開始重視氣候變遷，對生物多樣性的影響，並分別提出許多生物管理策略，希望能協助各種生物調適氣候變遷的衝擊，然而保護區對抗氣候變遷的能力有其限制，物種管理策略則缺乏人才與技術，形成對抗氣候變遷工作最大的隱憂。各種物候模型被濫用，則進一步使問題雪上加霜，氣候都已惡化到了甚至可以在短期之內，忽然滅絕物種的地步，許多科學家還沉溺於研究數十年或數百年後，氣候會對物種分布造成怎樣的衝擊，

而忽視了當前其他更可能發生的威脅。以上種種情形，也使氣候變遷的影響力一直被嚴重低估，而讓問題長期以來，得不到應有的重視與處理。建議未來各國政府，應儘快成立獨立的氣候變遷研究機構，積極建構國際物候園與物候網路系統，加強相關的人才培育與技術發展，以因應日益惡化的氣候變遷問題，儘可能減少未來全球生物多樣性的損失。

謝誌

本文承中國科學院計畫「2013TW2SA0003, 2015TW1SA0001」經費補助，得以順利完成，特此致謝。

引用文獻

- Adger WN, Huq S, Brown K, Conway D, Hulme M. 2003.** Adaptation to climate change in the developing world. *Prog Dev Stud* 3(3): 179-95.
- Aitken SN, Yeaman S, Holliday JA, Wang T, Curtis-McLane S. 2008.** Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evol Appl* 1(1):95-111.
- Akhtar M, Ahmad N, Booij MJ. 2008.** The impact of climate change on the water resources of Hindukush-Karakorum-Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *J Hydrol* 355(1):148-63.
- Anthony KRN, Kline DI, Diaz-Pulido G, Dove S, Hoegh-Guldberg O. 2008.** Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proc Natl Acad Sci USA* 105(45):17442-6.
- Aono Y, Kazui K. 2008.** Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of spring-time temperatures since the 9th century. *Int J Climatol* 28:905-14.
- Aono Y, Saito S. 2010.** Clarifying springtime temperature reconstruction of the Medieval period by gap-filling the cherry blossom phenological data series at Kyoto, Japan. *Int J Biometeorol* 54:211-9.
- Araújo MB, Thuiller W, Pearson RG. 2006.** Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *J Biogeogr* 33(10): 1712-28.
- Atkinson A, Siegel V, Pakhomov E, Rothery P. 2004.** Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432(7013):100-3.
- Baker AC, Glynn PW, Riegl B. 2008.** Climate change and coral reef bleaching: an ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuar Coast Shelf Sci* 80(4):435-71.
- Battin J, Wiley MW, Ruckelshaus MH, Palmer RN, Korb E, Bartz KK, Imaki H. 2007.** Projected impacts of climate change on salmon habitat restoration. *Proc Natl Acad Sci USA* 104(16):6720-5.
- Beniston M. 2003.** Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts climate variability and change in high elevation regions: past, present & future. New York: Springer. p 5-31.
- Benning TL, LaPointe D, Atkinson CT, Vitousek PM. 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. *Proc Natl Acad Sci USA* 99(22): 14246-9.
- Bickford D, Howard SD, Ng DJJ, Sheridan JA. 2010.** Impacts of climate change on the amphibians and reptiles of Southeast Asia. *Biodivers Conserv* 19(4):1043-62.
- Bond WJ. 1995.** Assessing the risk of plant extinction due to pollinator and disperser failure. In: Lawton JH, May RM editors. *Extinction rates*. Oxford, UK: Oxford University Press. p 131-46.

- Both C, Bouwhuis S, Lessells CM, Visser ME. 2006.** Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature* 441(7089):81-3.
- Both C, Asch MV, Bijlsma RG, Burg ABVD, Visser ME. 2009.** Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations? *J Anim Ecol* 78(1):73-83.
- Bouwer LM. 2011.** Have disaster losses increased due to anthropogenic climate change? *Bull Am Meteorol Soc* 92(1):39-46.
- Boyd C, Brooks TM, Butchart SHM, Edgar GJ, Fonseca GABD, Hawkins F, et al. 2008.** Spatial scale and the conservation of threatened species. *Conserv Lett* 1(1):37-43.
- Bradford MJ, Irvine JR. 2000.** Land use, fishing, climate change, and the decline of Thompson River, British Columbia, coho salmon. *Can J Fish Aquat Sci* 57(1):13-6.
- Breshears DD, Cobb NS, Rich PM, Price KP, Allen CD, Balice RG, et al. 2005.** Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proc Natl Acad Sci USA* 102(42):15144-8.
- Bruner AG, Gullison RE, Rice RE, Fonseca GABD. 2001.** Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. *Science* 291(5501):125-8.
- Burkle LA, Marlin JC, Knight TM. 2013.** Plant-pollinator interactions over 120 years: loss of species, co-occurrence and function. *Science* 339:1611-5.
- Chen IC, Shiu HJ, Benedick S, Holloway JD, Chey VK, Barlow HS, et al. 2009.** Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain. *Proc Natl Acad Sci USA* 106(5):1479-83.
- Chiang PJ, Pei KJC, Vaughan MR, Li CF, Chen MT, Liu JN, Lin CY, et al. 2015.** Is the clouded leopard *Neofelis nebulosa* extinct in Taiwan, and could it be reintroduced? An assessment of prey and habitat. *Oryx* 49(2):261-9.
- Chinn TJ. 1996.** New Zealand glacier responses to climate change of the past century. *New Zeal J Geol Geop* 39(3):415-28.
- Chiou CR, Chu FH. 2014.** A Study on the phenology and the adaptability to climate change of *Prunus campanulata* Maxim. Report. Taipei, Taiwan: National Taiwan Univ. 44 p. [in Chinese with English abstract].
- Chiou CR, Hsieh TY, Chien CC. 2015.** Plant bioclimatic models in climate change research. *Bot Stud* 56(1):e26.
- Chou CH, Huang TJ, Lee YP, Chen CY, Hsu TW, Chen CH. 2011.** Diversity of the alpine vegetation in central Taiwan is affected by climate change based on a century of floristic inventories. *Bot Stud* 52(4):503-16.
- Chu C, Mandrak NE, Minns CK. 2005.** Potential impacts of climate change on the distributions of several common and rare freshwater fishes in Canada. *Divers Distrib* 11(4):299-310.
- Cleland EE, Chuine I, Menzel A, Mooney HA, Schwartz MD. 2007.** Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol Evol* 22(7):357-65.
- Crick HQP. 2004.** The impact of climate change on birds. *Ibis* 146(S1):48-56.
- Crump M. 2000.** In search of the golden frog. Chicago, IL: Univ. of Chicago Press. Chicago. 299 p.
- Crump ML, Hensley FR, Clark KL. 1992.** Apparent decline of the golden toad: underground or extinct? *Copeia* 1992(2):413-20.
- Davis AJ, Lawton JH, Shorrocks B, Jenkinson LS. 1998a.** Individualistic species responses invalidate simple physiological models of community dynamics under global environmental change. *J Anim Ecol* 67(4):600-12.
- Davis AJ, Jenkinson LS, Lawton JH, Shorrocks B, Wood S. 1998b.** Making mistakes

when predicting shifts in species range in response to global warming. *Nature* 391(6669): 783-6.

Derocher AE, Lunn NJ, Stirling I. 2004. Polar bears in a warming climate. *Integr Comp Biol* 44(2):163-76.

Deutsch CA, Tewksbury JJ, Huey RB, Sheldon KS, Ghalambor CK, Haak DC, Martin PR. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proc Natl Acad Sci USA* 105(18):6668-72.

Donald PF, Evans AD. 2006. Habitat connectivity and matrix restoration: the wider implications of agri-environment schemes. *J Appl Ecol* 43(2):209-18.

Donner SD, Skirving WJ, Little CM, Oppenheimer M, Hoegh-Guldberg O. 2005. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Glob Change Biol* 11(12):2251-65.

Dullinger S, Dirnböck T, Grabherr G. 2004. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *J Ecol* 92(2):241-52.

Dyurgerov MB, Meier MF. 2000. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers. *Proc Natl Acad Sci USA* 97(4):1406-11.

Edwards M, Richardson AJ. 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430(7002):881-4.

Flannery T. 2006. *The weather makers: how man is changing the climate and what it means for life on earth.* Toronto: Harper Collins Publishers. 359 p.

Flores H, Atkinson A, Kawaguchi S, Krafft BA, Milinevsky G, Nicol S, et al. 2012. Impact of climate change on Antarctic krill. *Mar Ecol Progr Ser* 458:1-19.

Franco A, Hill JK, Kitchin C, Collingham YC, Roy DB, Fox R, et al. 2006. Impacts of climate warming and habitat loss on extinc-

tions at species' low-latitude range boundaries. *Glob Change Biol* 12(8):1545-53.

Francou B, Vuille M, Wagnon P, Mendoza J, Sicart JE. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16 S. *J Geophys Res* 108(D5): 4154.

Garrett KA, Denny SP, Frank EE, Rouse MN, Travers SE. 2006. Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annu Rev Phytopathol* 44:489-509.

Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann NE. 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment? *J Veg Sci* 18(4):571-82.

Gibbons JW, Scott DE, Ryan TJ, Buhlmann KA, Tuberville TD, Metts BS, et al. 2000. The global decline of reptiles, déjà vu, amphibians reptile species are declining on a global scale. Six significant threats to reptile populations are habitat loss and degradation, introduced invasive species, environmental pollution, disease, unsustainable use, and global climate change. *BioScience* 50(8):653-66.

Giliomee JH. 2006. Conserving and increasing biodiversity in the large-scale, intensive farming systems of the Western Cape, South Africa. *S Afr J Sci* 102:375-8.

Glynn PW. 1991. Coral reef bleaching in the 1980s and possible connections with global warming. *Trends Ecol Evol* 6(6):175-9.

Glynn PW. 1993. Coral reef bleaching: ecological perspectives. *Coral Reefs* 12(1):1-17.

Glynn PW. 1996. Coral reef bleaching: facts, hypotheses and implications. *Glob Change Biol* 2(6):495-509.

Gottfried M, Pauli H, Futschik A, Akhalkatsi M, Barančok P, Alonso JLB, et al. 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nat Clim Change* 2(2): 111-5.

- Grace J, Berninger F, Nagy L. 2002.** Impacts of climate change on the tree line. *Ann Bot* 90(4):537-44.
- Grebmeier JM, Overland JE, Moore SE, Farley EV, Carmack EC, Cooper LW, et al. 2006.** A major ecosystem shift in the northern Bering Sea. *Science* 311(5766):1461-4.
- Griffith B, Scott JM, Carpenter JW, Reed C. 1989.** Translocation as a species conservation tool: status and strategy. *Science* 245(4917):477-80.
- Guerrant EO, Havens K, Maunder M, Raven PH, Conservation CP. 2013.** Ex situ plant conservation: supporting species survival in the wild. Washington, DC: Island Press. 536 p.
- Haight RG, Ralls K, Starfield AM. 2000.** Designing species translocation strategies when population growth and future funding are uncertain. *Conserv Biol* 14(5):1298-307.
- Halpin PN. 1997.** Global climate change and natural-area protection: management responses and research directions. *Ecol Appl* 7(3):828-43.
- Hamann A, Wang T. 2006.** Potential effects of climate change on ecosystem and tree species distribution in British Columbia. *Ecology* 87(11):2773-86.
- Hannah L. 2010.** Climate change biology. Saint Louis, MO: Elsevier Science & Technology. 402 p.
- Hannah L, Midgley G, Hughes G, Bomhard B. 2005.** The view from the Cape: extinction risk, protected areas, and climate change. *BioScience* 55(3):231-42.
- Hannah L, Midgley G, Andelman S, Araújo M, Hughes G, Martinez-Meyer E, et al. 2007.** Protected area needs in a changing climate. *Front Ecol Environ* 5(3):131-8.
- Hansen LJ, Biringer JL, Hoffman J. 2003.** Buying time: a user's manual for building resistance and resilience to climate change in natural systems. Berlin: WWF Climate Change Program. 242 p.
- Hari RE, Livingstone DM, Siber R, Burkhardt-Holm P, Guettinger H. 2006.** Consequences of climate change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Glob Change Biol* 12(1):10-26.
- Harris JA, Hobbs RJ, Higgs E, Aronson J. 2006.** Ecological restoration and global climate change. *Restor Ecol* 14(2):170-6.
- Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, Samuel MD. 2002.** Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* 296(5576):2158-62.
- Hays GC, Richardson AJ, Robinson C. 2005.** Climate change and marine plankton. *Trends Ecol Evol* 20(6):337-44.
- Healey M, Kline P, Tsai CF. 2001.** Saving the endangered Formosa landlocked salmon. *Fisheries* 26(4):6-14.
- Heide OM, Sønsteby A. 2007.** Interactions of temperature and photoperiod in the control of flowering of latitudinal and altitudinal populations of wild strawberry (*Fragaria vesca*). *Physiol Plant* 130(2):280-9.
- Heller NE, Zavaleta ES. 2009.** Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biol Conserv* 142(1):14-32.
- Hellmann JJ, Byers JE, Bierwagen BG, Dukes JS. 2008.** Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conserv Biol* 22(3):534-43.
- Herk CM, Aptroot A, Dobben HF. 2002.** Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming. *Lichenologist* 34(2):141-54.
- Hersteinsson P, Macdonald DW. 1992.** Interspecific competition and the geographical distribution of red and arctic foxes *Vulpes vulpes* and *Alopex lagopus*. *Oikos* 64(3):505-15.

- Hickling R, Roy DB, Hill JK, Thomas CD. 2005.** A northward shift of range margins in British Odonata. *Glob Change Biol* 11(3):502-6.
- Hickling R, Roy DB, Hill JK, Fox R, Thomas CD. 2006.** The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob Change Biol* 12(3):450-5.
- Hinzman LD, Bettez ND, Bolton WR, Chapin FS, Dyrgerov MB, Fastie CL, et al. 2005.** Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other arctic regions. *Clim Change* 72(3):251-98.
- Hodgson JA, Thomas CD, Wintle BA, Moilanen A. 2009.** Climate change, connectivity and conservation decision making: back to basics. *J Appl Ecol* 46(5):964-9.
- Hoegh-Guldberg O, Hughes L, McIntyre S, Lindenmayer DB, Parmesan C, Possingham HP, Thomas CD. 2008.** Assisted colonization and rapid climate change. *Science* 321(5887):345-6.
- Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, et al. 2007.** Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318(5857):1737-42.
- Hoffmann AA, Sgrò CM. 2011.** Climate change and evolutionary adaptation. *Nature* 470(7335):479-85.
- Honnay O, Verheyen K, Butaye J, Jacquemyn H, Bossuyt B, Hermy M. 2002.** Possible effects of habitat fragmentation and climate change on the range of forest plant species. *Ecol Lett* 5(4):525-30.
- Hsieh TY. 2011a.** Distribution of indigenous *Actinidia* in Taiwan. *Horticult NCHU* 36(2):1-8. [in Chinese with English abstract].
- Hsieh TY. 2011b.** Taxonomy and distribution of indigenous *Actinidia* in Taiwan. dissertation, Taichung, Taiwan: National Chung Hsing Univ. 99 p. [in Chinese with English abstract].
- Hsieh TY, Chiou CR. 2013.** Phytophenology and its applications in climate change research: review and perspectives. *Q J Chin For* 46(3):391-410. [in Chinese with English abstract].
- Hsieh TY, Hatch KA, Chang YM. 2012.** *Phlegmariurus changii* (Huperziaceae), a new hanging firmoss from Taiwan. *Am Fern J* 102(4):283-8.
- Hsieh TY, Hsu TC, Kono Y, Ku SM, Peng CI. 2007.** *Gentiana bambuseti* (Gentianaceae), a new species from Taiwan. *Bot Stud* 48(3):349-55.
- Hsieh TY, Ku SM, Chien CT, Liou YT. 2011.** Classifier modeling and numerical taxonomy of *Actinidia* (Actinidiaceae) in Taiwan. *Bot Stud* 52(3):337-57.
- Hsieh TY, Nee CC, Chien CT. 2004.** Seed germination of Taiwanese *Actinidia latifolia* (Gardn. & Champ.) Merr. *Taiwan J For Sci* 19(2):173-6. [in Chinese with English abstract].
- Hughes L. 2000.** Biological consequences of global warming: Is the signal already apparent? *Trends Ecol Evol* 15(2):56-61.
- Hunter CM, Caswell H, Runge MC, Regehr EV, Amstrup SC, Stirling I. 2010.** Climate change threatens polar bear populations: a stochastic demographic analysis. *Ecology* 91(10):2883-97.
- IPCC. 1990.** Climate change: The IPCC impacts assessment. Canberra: Australian Government Publishing Service. 294 p.
- IPCC. 1995.** Climate change 1995- impacts, adaptation and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 878 p.
- IPCC. 1996.** IPCC second assessment: climate change 1995. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 63 p.
- IPCC. 2001a.** Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK:

- Cambridge Univ. Press. 1032 p.
- IPCC. 2001b.** Climate change 2001: synthesis report. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 397 p.
- IPCC. 2007.** Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 976 p.
- IPCC. 2013.** Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 1535 p.
- IPCC. 2014a.** Climate change 2014: synthesis report. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 133 p.
- IPCC. 2014b.** Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press. 1131 p.
- IUCN. 2005.** Guidelines for using the IUCN Red List categories and criteria. Gland, Switzerland: IUCN. 60 p.
- Jacobson SK, Vandenberg JJ. 1991.** Reproductive ecology of the endangered golden toad (*Bufo periglenes*). *J Herpetol* 25(3):321-7.
- Janzen DH. 2001.** Latent extinction—the living dead. *Encyclopedia Biodivers* 3:689-99.
- Janzen FJ. 1994.** Climate change and temperature-dependent sex determination in reptiles. *Proc Natl Acad Sci USA* 91(16):7487-90.
- Jonsson B, Jonsson N. 2009.** A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *J Fish Biol* 75(10):2381-447.
- Körner C, Basler D. 2010.** Phenology under global warming. *Science* 327(5972):1461-2.
- Kano T. 1929.** Distribution and habits of mammals in Taiwan (I). *Doubutsugaku Z* 41(489): 332-40.
- Kano T. 1930.** Distribution and habits of mammals in Taiwan (II). *Doubutsugaku Z* 42(499): 165-73.
- Kaser G, Hardy DR, Mölg T, Bradley RS, Hyera TM. 2004.** Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts. *Int J Climatol* 24(3):329-39.
- Kelly AE, Goulden ML. 2008.** Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 105(33):11823-6.
- Kelmo F, Attrill MJ. 2013.** Severe impact and subsequent recovery of a coral assemblage following the 1997-8 El Niño event: a 17-year study from Bahia, Brazil. *PloS One* 8(5):e65073.
- Kleiman DG. 1989.** Reintroduction of captive mammals for conservation. *BioScience* 39(3): 152-61.
- Kleiman DG, Thompson KV, Baer CK. 2010.** Wild mammals in captivity: principles and techniques for zoo management, 2nd ed. Chicago, IL: Univ. of Chicago Press. 720 p.
- Knowlton JL, Graham CH. 2010.** Using behavioral landscape ecology to predict species' responses to land-use and climate change. *Biol Conserv* 143(6):1342-54.
- Kudo G, Nishikawa Y, Kasagi T, Kosuge S. 2004.** Does seed production of spring ephemerals decrease when spring comes early? *Ecol Res* 19(2):255-9.
- Kusky T. 2009.** Climate change: shifting glaciers, deserts, and climate belts. New York: Facts On File. 156 p.
- La Sorte FA, Jetz W. 2012.** Tracking of climatic niche boundaries under recent climate change. *J Anim Ecol* 81(4):914-25.
- Larigauderie A, Mooney HA. 2010.** The intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services: moving a step closer to an IPCC-like mechanism for biodiversity. *Curr Opin Environ Sustain* 2(1):9-14.
- Lawton RO, Nair US, Pielke RA, Welch RM. 2001.** Climatic impact of tropical lowland deforestation on nearby montane cloud forests. *Science* 294(5542):584-7.

- Lechowicz MJ, Koike T. 1995.** Phenology and seasonality of woody plants: an unappreciated element in global change research? *Can J Bot* 73(2):147-8.
- Lemieux CJ, Scott DJ. 2005.** Climate change, biodiversity conservation and protected area planning in Canada. *Can Geogr* 49(4):384-97.
- Lenoir J, Gégout JC, Marquet PA, De Ruffray P, Brisse H. 2008.** A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320(5884):1768-71.
- Logan JA, Powell JA. 2001.** Ghost forests, global warming, and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *Am Entomol* 47(3):160-73.
- Lovejoy TE, Hannah L. 2006.** Climate change and biodiversity. New Haven, CT: Yale Univ. Press. 418 p.
- Macdonald RW, Harner T, Fyfe J. 2005.** Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Sci Total Environ* 342(1):5-86.
- Malanson GP. 2001.** Complex responses to global change at alpine treeline. *Phys Geogr* 22(4):333-42.
- Margoluis R, Salafsky N. 1998.** Measures of success: designing, managing, and monitoring conservation and development projects. Washington, DC: Island Press. 362 p.
- Mawdsley JR, O'Malley R, Ojima DS. 2009.** A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conserv Biol* 23(5):1080-9.
- McClanahan TR, Ateweberhan M, Muhandu CA, Maina J, Mohammed MS. 2007.** Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality. *Ecol Monogr* 77(4):503-25.
- McKenney DW, Pedlar JH, Lawrence K, Campbell K, Hutchinson MF. 2007.** Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees. *BioScience* 57(11):939-48.
- McLachlan JS, Hellmann JJ, Schwartz MW. 2007.** A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conserv Biol* 21(2):297-302.
- McMahon CR, Burton HR. 2005.** Climate change and seal survival: evidence for environmentally mediated changes in elephant seal, *Mirounga leonina*, pup survival. *Proc Roy Soc B-Biol Sci* 272(1566):923-8.
- McNeely JA, Schutyser F. 2003.** Protected areas in 2023: scenarios for an uncertain future. Gland, Switzerland: International Union for the Conservation of Nature. 51 p.
- Menzel A, Estrella N, Fabian P. 2001.** Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Glob Change Biol* 7(6):657-66.
- Miao MM, Li Q, Cao BS, Chen XH. 2000.** Effect of high temperature on reproductive growth and yield formation of *Cucumis sativus* L. *Acta Horticult Sin* 27(6):412-7. [in Chinese with English abstract].
- Mitchell RJ, Morecroft MD, Acreman M, Crick HQP, Frost M, Harley M, et al. 2007.** England biodiversity strategy-towards adaptation to climate change. London: Department of Environment Food and World Affairs. 177 p.
- Moen J, Aune K, Edenius L, Angerbjörn A. 2004.** Potential effects of climate change on treeline position in the Swedish mountains. *Ecol Soc* 9(1):16-26.
- Mooij WM, Hülsmann S, Domis LNDS, Nolet BA, Bodelier PLE, Boers PCM, et al. 2005.** The impact of climate change on lakes in the Netherlands: a review. *Aquat Ecol* 39(4):381-400.
- Moritz C, Patton JL, Conroy CJ, Parra JL, White GC, Beissinger SR. 2008.** Impact of a century of climate change on small-mammal communities in Yosemite National Park, USA.

Science 322(5899):261-4.

Murphy EJ, Watkins JL, Trathan PN, Reid K, Meredith MP, Thorpe SE, et al. 2007. Spatial and temporal operation of the Scotia Sea ecosystem: a review of large-scale links in a krill centred food web. *Phil Trans Roy Soc B* 362(1477):113-48.

Nee CC. 2007. Phytophenology study of Taiwan cherry (*Prunus campanulata* Maxim.). Report. Taichung, Taiwan: National Chung Hsing Univ. 22 p. [in Chinese with English abstract].

Nee CC, Tsay TT. 1991. Kiwifruit in Taiwan. *Acta Horticult* 297:175-82.

Nigh GD, Ying CC, Qian H. 2004. Climate and productivity of major conifer species in the interior of British Columbia, Canada. *For Sci* 50(5):659-71.

Nigh GD, Antos JA, Parish R. 2008. Density and distribution of advance regeneration in mountain pine beetle killed lodgepole pine stands of the montane spruce zone of southern British Columbia. *Can J For Res* 38(11):2826-36.

Nitsch JP, Kurtz EB, Liverman JL, Went FW. 1952. The development of sex expression in cucurbit flowers. *Am J Bot* 39(1):32-43.

Oerlemans J. 2005. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science* 308(5722):675-7.

Opdam P, Wascher D. 2004. Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biol Conserv* 117(3):285-97.

Pörtner HO, Knust R. 2007. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science* 315(5808):95-7.

Pörtner HO, Farrell AP. 2008. Physiology and climate change. *Science* 322(5902):690-2.

Parmesan C. 1996. Climate and species' range. *Nature* 382(6594):765-6.

Parmesan C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 37:637-69.

Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill JK, Thomas CD, Descimon H, et al. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399(6736):579-83.

Patz JA, Campbell-Lendrum D, Holloway T, Foley JA. 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature* 438(7066):310-7.

Pauli H, Gottfried M, Grabherr G. 1996. Effects of climate change on mountain ecosystems—upward shifting of alpine plants. *World Resour Rev* 8(3):382-90.

Pellatt MG, Smith MJ, Mathewes RW, Walker IR, Palmer SL. 2000. Holocene tree-line and climate change in the subalpine zone near Stoyoma Mountain, Cascade Mountains, southwestern British Columbia, Canada. *Arct Antarct Alp Res* 32(1):73-83.

Perrings C, Duraiappah A, Larigauderie A, Mooney H. 2011. The biodiversity and ecosystem services science-policy interface. *Science* 331(6021):1139-40.

Perry AL, Low PJ, Ellis JR, Reynolds JD. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308(5730):1912-5.

Peters RL, Darling JDS. 1985. The greenhouse effect and nature reserves. *BioScience* 35(11):707-17.

Post E, Pedersen C, Wilmers CC, Forchhammer MC. 2008. Warming, plant phenology and the spatial dimension of trophic mismatch for large herbivores. *Proc Roy Soc B-Biol Sci* 275(1646):2005-13.

Pounds JA. 2001. Climate and amphibian declines. *Nature* 410(6829):639-40.

Pounds JA, Bustamante MR, Coloma LA, Consuegra JA, Fogden MPL, Foster PN, et al. 2006. Widespread amphibian extinctions

from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 439(7073):161-7.

Pounds JA, Coloma LA. 2008. Beware the lone killer. *Nat Rep Clim Change* 2:57-9.

Pounds JA, Crump ML. 1994. Amphibian declines and climate disturbance: the case of the golden toad and the harlequin frog. *Conserv Biol* 8(1):72-85.

Pounds JA, Fogden MPL, Campbell JH. 1999. Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature* 398(6728):611-5.

Pounds JA, Masters KL. 2009. Amphibian mystery misread. *Nature* 462(7269):38-9.

Pratchett MS, Munday P, Wilson SK, Graham NAJ, Cinner JE, Bellwood DR, et al. Effects of climate-induced coral bleaching on coral-reef fishes: ecological and economic consequences. *Oceanogr Mar Biol* 46:251-96.

Primack RB, Higuchi H, Miller-Rushing AJ. 2009. The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan. *Biol Conserv* 142(9):1943-9.

Pringle CM. 2001. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. *Ecol Appl* 11(4):981-98.

Rahel FJ, Olden JD. 2008. Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conserv Biol* 22(3):521-33.

Reiter P. 2001. Climate change and mosquito-borne disease. *Environ Health Perspect* 109(S1):141-61.

Rohr JR, Raffel TR, Romansic JM, McCallum H, Hudson PJ. 2008. Evaluating the links between climate, disease spread, and amphibian declines. *Proc Natl Acad Sci USA* 105(45):17436-41.

Rudich J, Peles A. 1976. Sex expression in watermelon as affected by photoperiod and temperature. *Sci Horticult* 5(4):339-44.

Savage JM. 1966. An extraordinary new toad (*Bufo*) from Costa Rica. *Rev Biol Trop* 14:153-67.

Schmidt G, Schnörock S, Schröder W. 2014. Plant phenology as a biomonitor for climate change in Germany: a modelling and mapping approach. New York: Springer. 64 p.

Scott D, Lemieux C. 2005. Climate change and protected area policy and planning in Canada. *For Chron* 81(5):696-703.

Seimon TA, Seimon A, Daszak P, Halloy SRP, Schloegel LM, Aguilar CA, et al. 2007. Upward range extension of Andean anurans and chytridiomycosis to extreme elevations in response to tropical deglaciation. *Glob Change Biol* 13(1):288-99.

Selig ER, Casey KS, Bruno JF. 2012. Temperature-driven coral decline: the role of marine protected areas. *Glob Change Biol* 18(5):1561-70.

Singer MC, Parmesan C. 2010. Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy? *Phil Trans Roy Soc B* 365(1555):3161-76.

Singer MC, Wee B. 2005. Spatial pattern in checkerspot butterfly-host plant association at local, metapopulation and regional scales. *Ann Zool Fenn* 42(4):347-61.

Singh P, Kumar N. 1997. Impact assessment of climate change on the hydrological response of a snow and glacier melt runoff dominated Himalayan river. *J Hydrol* 193:316-50.

Soto CG. 2002. The potential impacts of global climate change on marine protected areas. *Rev Fish Biol Fisher* 11(3):181-95.

Still CJ, Foster PN, Schneider SH. 1999. Simulating the effects of climate change on tropical montane cloud forests. *Nature* 398(6728):608-10.

Stirling I, Lunn NJ, Iacozza J. 1999. Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climate change. *Arctic* 52(3):294-306.

Stott PA, Stone DA, Allen MR. 2004. Hu-

man contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* 432:610-14.

Taylor AH. 1995. Forest expansion and climate change in the mountain hemlock (*Tsuga mertensiana*) zone, Lassen Volcanic National Park, California, USA. *Arc Alp Res* 27(3):207-16.

Tenhumberg B, Tyre AJ, Shea K, Possingham HP. 2004. Linking wild and captive populations to maximize species persistence: optimal translocation strategies. *Conserv Biol* 18(5):1304-14.

Thackeray SJ, Sparks TH, Frederiksen M, Burthe S, Bacon PJ, Bell JR, et al. 2010. Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Glob Change Biol* 16(12):3304-13.

Theurillat JP, Guisan A. 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. *Clim Change* 50:77-109.

Thomas CD, Lennon JJ. 1999. Birds extend their ranges northwards. *Nature* 399(6733): 213-3.

Thomas CD, Bodsworth EJ, Wilson RJ, Simmons AD, Davies ZG, Musche M, Conradt L. 2001. Ecological and evolutionary processes at expanding range margins. *Nature* 411(6837):577-81.

Thomas CD, Cameron A, Green RE, Bakkenes M, Beaumont LJ, Collingham YC, et al. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427(6970):145-8.

Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc Natl Acad Sci USA* 102(23):8245-50.

Verheul MJ, Sønsteby A, Grimstad SO. 2006. Interactions of photoperiod, temperature, duration of short-day treatment and plant age on flowering of *Fragaria x ananassa* Duch. cv. Korona. *Sci Hortic* 107(2):164-70.

Visser ME, Holleman LJM. 2001. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proc Roy Soc Lond B Biol* 268(1464):289-94.

Visser ME, Noordwijk AJ, Tinbergen JM, Lessells CM. 1998. Warmer springs lead to mistimed reproduction in Great Tits (*Parus major*). *Proc Roy Soc Lond B Biol* 265(1408): 1867-70.

Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, et al. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416(6879):389-95.

Warren MS, Hill JK, Thomas JA, Asher J, Fox R, Huntley B, et al. 2001. Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. *Nature* 414(6859): 65-9.

Warrington IJ, Weston GC. 1990. Kiwifruit: science and management. Auckland: Ray Richards in association with the New Zealand Society for Horticultural Science. 576 p.

Wenger SJ, Isaak DJ, Luce CH, Neville HM, Fausch KD, Dunham JB, et al. 2011. Flow regime, temperature, and biotic interactions drive differential declines of trout species under climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 108(34):14175-80.

Westerling AL, Hidalgo HG, Cayan DR, Swetnam TW. 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science* 313(5789):940-3.

Williams P, Hannah L, Andelman S, Midgley G, Araújo M, Hughes G, et al. Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the Cape Proteaceae. *Conserv Biol* 19(4):1063-74.

Wilson EO. 1988. Biodiversity. Washington, DC: National Academy Press. 538 p.

Winder M, Schindler DE. 2004. Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85(8):2100-6.

Woodward FI, Beerling DJ. 1997. The dynamics of vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models. *Glob Ecol Biogeogr Lett* 6(6):413-8.

Woodward G, Perkins DM, Brown LE. 2010. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Phil Trans Roy Soc B* 365(1549):2093-106.

Yang LH, Rudolf VHW. 2010. Phenology, ontogeny and the effects of climate change on

the timing of species interactions. *Ecol Lett* 13(1):1-10.

Zacharias MA, Gerber LR, Hyrenbach KD. 2006. Review of the Southern Ocean Sanctuary: marine protected areas in the context of the International Whaling Commission Sanctuary Programme. *J Cetacean Res Manag* 8(1):1-12.

Zhao M, Running SW. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329(5994):940-3.

