

氣候變遷對台灣淡水魚多樣性之衝擊評估

(國立台灣大學生態學與演化生物學研究所 白梅玲、李培芬、端木茂甯)

前言

氣候變遷是人類當前所面臨最重大的環境議題之一 (Scott et al. 2002)。陸域生態系統主要由氣候塑造；而生態系統是一個具有階層性的複雜系統，各個層級內、層級與層級之間都具有錯綜複雜的交互作用關係；而此系統又屬於開放系統，會與外在環境、氣候間產生連結並互相影響 (Thomas et al. 2004)。氣候的變化，在個體的層級方面，可能影響個體的形態、生理狀況，或造成行為的改變；在族群層級上，各族群的出生率、死亡率與遷徙率可能發生變化，造成生物族群量的增加或減少、族群結構的改變，並影響物種的空間分布；各族群的變化會進而影響到由這些族群所組成的群聚結構，造成物種與物種之間相互關係的崩解與重新組合；對生態系層級的直接影響則包含了能量、物質循環，以及土地利用、土地覆蓋等。因此，氣候變遷對生態系統的影響貫穿生態系統的各個層級，而各層級的改變又環環相扣；最後，這些生態系統的改變，也會反向回饋而影響大氣組成與氣候狀況。

氣候暖化並不是一個遙遠而理論中的問題，其對生態系統的具體影響已經在世界各地受到關注。已觀察到的現象例如農作物產量改變、鳥類繁殖期提早、遷徙時間改變、森林界線向高海拔移動、湖泊分層結構改變影響魚類垂直分布、生物多樣性下降等 (Ball 1983, Todhunter 1995, Michener et al. 1997, Bradley et al. 1999, Livingstone 2003,

Root et al. 2003, Both et al. 2004, Camarero & Gutierrez 2004, Chmielewski et al. 2004, Gamache & Payette 2004)。而為了及早擬定因應氣候變遷的策略，除了這些對現象的觀察與監測，我們亟需發展預測的方法，以評估氣候變遷可能帶來的衝擊。

隨著氣候模擬技術的進步，人類逐漸能夠描繪出未來氣候的可能型態，使得進一步建立生物模式、預測模擬氣候對生態系統的衝擊成為可能。其中生物分布的預測模式，可以推估物種或生物群聚在氣候變遷時分布範圍的增減、空間位置的推移等，除了分析各物種所受的衝擊程度，這些空間性的資訊更可直接做為經營規劃的參考，例如評估目前的保護區系統未來是否能有效保護生物多樣性、該如何規劃生態廊道以輔助物種在氣候改變下的播遷、現今的各項土地利用計畫是否會影響未來的生物資源等等，因此近年來有愈來愈多的研究投入這類預測模式的發展 (Theurillat & Guisan 2001, Berry et al. 2002, Scott et al. 2002)，且有許多模式所預測的結果已在自然界中觀察到相符的趨勢 (Root et al. 2003)。

淡水魚的分布深受水溫的影響，水溫上升，對冷水性的魚種而言是不利的熱污染，對喜歡溫暖水域的魚種而言卻是擴張分布的時機；總雨量的改變及雨量季節性分布的變化，直接影響河水流量及枯水期、豐水期的週期，也會影響魚種的生存與生殖；氣候變化對植被的影響會改變其對河川的生物量輸入，浮游生物可能因氣候暖化造成物候改變及數量衰減 (Winder & Schindler

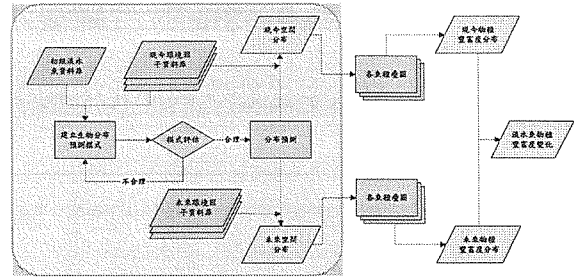
2004)，而這兩者是河川食物網最主要的能量基礎，直接衝擊魚類可使用的資源。由此可見，氣候的改變必然會對淡水魚類生態造成巨大的影響。

研究目的

氣候變遷與變遷所帶來的衝擊是無可避免的，但若能預先瞭解可能的衝擊與影響，以及早規劃因應之道，以充分的知識配合審慎的措施，可以將負面的影響降至最低。因此本研究建立原生初級淡水魚的分布模式來評估氣候變遷所造成的衝擊。我們比較了數種不同方法所建立的模式，嘗試找出適合應用於全球變遷研究的方法；並以此分析特有魚種、保育類魚種的分布改變，預測淡水魚多樣性熱點的推移，討論現有保護區內淡水魚多樣性的變化，從而提出經營管理上的建議。

評估方法

結合已知的初級淡水魚分布資料庫(李培芬等 1998)與環境因子資料庫(李培芬等 1997)，我們建立數種不同的模式，以導出各魚種分布與環境因子的關係。對各模式進行評估並選出適用的模式後，一方面以此模式推估目前全島的魚種分布，而代入氣候變遷下的模擬環境因子後，則可預測該模擬情境下的分布狀況。將各魚種的分布圖疊合，便能進一步評估氣候變遷對初級淡水魚物種豐富度的影響(圖一)。



圖一 研究流程

物種分布資料庫與環境因子資料庫

「台灣地區野生動物資料庫」(李培芬等 1998)，回溯自 1980 年起與野生動物調查相關的可靠文獻紀錄，涵括研究報告、學術論文、環境影響評估等，將可靠的物種出現紀錄加以定位、建檔，再以 2×2 公里的網格為單位整合各物種的空間分布，且迄今持續更新。本研究即擷取其中的初級淡水魚分布資料用於分析。我們以資料庫中出現網格數大於 50 的原生初級淡水魚種為分析對象，計有 25 種(下頁表 1)。

環境因子是以「台灣地區生態與環境因子地理資訊資料庫」(李培芬等 1997)為基礎。該資料庫集結了全島大尺度的環境資訊，並應用遙測資訊與 GIS 的分析、整合功能，建立了大量的環境因子圖層，包括地形、氣候、植被、土地利用等類別及其他衍生性資訊，計有約 140 個變數。刪除類別變數及相關性過高的變數後，以 16 個較具代表性的因子做為預測用的變數(第 26 頁表 2)。

至於氣候變遷下的情境，國內的大氣學者已根據美國國家環境所中心發展的「區域光譜模式」(Regional Spectral Model, RSM)，推導出「當空氣中二氧化碳濃度成為現今兩倍時」台灣全島各月的氣溫雨量分布(Chen et al. 2002)。該模擬結果依其空間解析度，又分為 40×40 公里的 RSM1 和

表 1、本研究所分析之 25 種原生初級淡水魚

代號	中文名	學名	特有性	保育等級	臺灣分布	網格數
F0007	臺灣纓口鰍	<i>Crossostoma lacustre</i>	台灣特有種		北,中	148
F0008	臺灣間爬岩鰍	<i>Hemimyzon formosanum</i>	台灣特有種		北,中,南	169
F0010	埔里中華爬岩鰍	<i>Sinogastromyzon puliensis</i>	台灣特有種	珍貴稀有	中,南	51
F0011	花鰍	<i>Cobitis taenia taenia</i>			北,中,南	212
F0012	泥鰍	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>			北,中,南,東,恆春	85
F0018	鯽	<i>Carassius auratus auratus</i>			北,中,南,東,恆春	257
F0020	何氏棘魷	<i>Spinibarbus hollandi</i>	台灣特有種		南,東	105
F0022	臺灣石鱚	<i>Acrossocheilus paradoxus</i>	台灣特有種		北,中,南,東	497
F0024	臺灣鏟頰魚	<i>Varicorhinus barbatulus</i>			北,中,南,東	317
F0025	高身鏟頰魚	<i>Varicorhinus alticorpus</i>	台灣特有種	瀕臨絕種	南,東	126
F0028	革條副鱚	<i>Paracheilognathus himantegus</i>			北,中,南,東,恆春	84
F0030	條	<i>Hemiculter leucisculus</i>			北,中,南,恆春	51
F0035	短吻鏟柄魚	<i>Microphysogobio brevirostris</i>	台灣特有種		北	110
F0041	粗首鱻	<i>Zacco pachycephalus</i>	台灣特有種		北,中,南,東,恆春	624
F0042	平頰鱻	<i>Zacco platypus</i>			北,東	146
F0043	臺灣馬口魚	<i>Zacco barbatus</i>	台灣特有種		北,中,南,東,恆春	275
F0047	羅漢魚	<i>Pseudorasbora parva</i>			北,中,南,東,恆春	75
F0048	鯰魚	<i>Silurus asotus</i>			北,中,南,東	138
F0049	塘蝨魚	<i>Clarias fuscus</i>			北,中,南	58
F0050	脂鯢	<i>Pseudobagrus adiposalis</i>			北,中	134
F0081	鱧魚	<i>Channa maculata</i>			北,中,南	84
F0095	赤斑吻鰕虎	<i>Rhinogobius rubromaculatus</i>	台灣特有種		北,中,南	85
F0101	南臺吻鰕虎	<i>Rhinogobius nantaiensis</i>	台灣特有種		南	71
F0137	高身鏟柄魚	<i>Microphysogobio alticorpus</i>	台灣特有種		中,南	88
F0242	明潭吻鰕虎	<i>Rhinogobius candidianus</i>	台灣特有種		北,中,南	150

15 × 15 公里的 RSM2。取用解析度較高的 RSM2 模擬氣候資料，以距離反比權重法 (inverse distance weighting) 進行降尺度，將其內插並再取樣成 2 × 2 公里的系統，使其解析度與物種分布資料庫及環境因子資料庫一致。

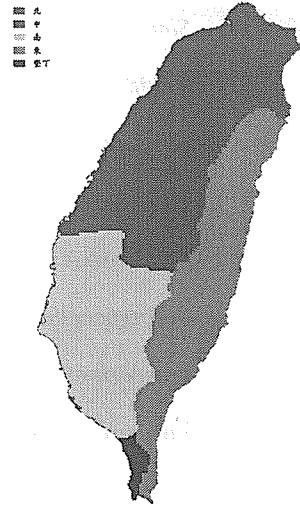
表 2、本研究用於分析之環境變數

代號	意義
Dtm	海拔高度 (m)
Slope	坡度 (°)
D2_3000	至海拔 3000 公尺及以上區域距離 (m)
D2_city	至城市距離 (m)
D2_sea	至海岸線距離 (m)
NDVI	由 SPOT 衛星影像計算之植生指數
NDVI_sd	植生指數標準偏差
R_tot	年總雨量 (mm)
R_std	雨量標準偏差 (mm)
R_pc1	雨量變異主成分第一軸
R_pc2	雨量變異主成分第二軸
R_pc3	雨量變異主成分第三軸
T_mean	年均溫 (°C)
T_std	氣溫標準偏差 (°C)
T_pc1	氣溫變異主成分第一軸
Warm	溫室指數

生物空間分布模式的建構

在進行分析前，首先必須建立空間性的遮罩 (mask)，以篩選適合進入模式的資料範圍。由於淡水魚只分布於溪流中，首先必須將線段式的河川資料予以網格化，建立河川遮罩。而除了環境因子之外，台灣初級淡水魚的分布深受播遷歷史與地理區隔的影響，主要可分為五個生物地理區 (Tzeng 1986; 圖二)，大部分的魚種都不是全島分布，而是侷限於特定數個地理區；這種現象

不符合生態模式「物種分布反映其環境需求」的平衡假設，因此必須進一步針對各魚種的出現地理區建立個別遮罩，限制進入模式的資料範圍，以減除歷史因素的效應。



圖二 台灣淡水魚類的地理分區

各魚種篩選後的資料再隨機等分成兩組，其中一組作為訓練資料 (training data)，用以塑造模式，計算模式的參數；另一組作為測試資料 (testing data)，用來進行模式的評估。

在本研究中，我們嘗試了六種不同的方法來建立淡水魚分布模式，包括：邏輯迴歸 (logistic regression)、判別分析 (discriminant function analysis)、耐受範圍 (range) 分析、累計分布函數 (cumulative distribution function) 差值法、模糊分類 (fuzzy classification) 與遺傳演算法 (genetic algorithms)。

邏輯迴歸和判別分析屬於多變數統計的範疇，可在一般統計軟體裡直接操作，有公式解，運算速度快，因此廣為使用 (e.g. Mladenoff et al. 1995, Buckland et al. 1996)。然而，能套用公式解的方法對資料結構必有其特定的預設：邏輯迴歸需要應變

數（物種出現機率）對自變數（環境因子）呈單調性增加（monotonic increase），判別分析則需要物種出現「與/否」這兩個類群中的環境變數各呈常態分布。然而在較大的空間尺度下，物種分布與環境梯度的關係往往呈鐘形（bell-shaped），並不符合這兩種模式方法的預設。

耐受範圍分析法、累計分布函數差值法、模糊分類法則屬於 rule-based models；這一類的方法從生態學中的生境（niche）的觀念出發，根據現有的分布資料，分別界定物種在各個環境因子上的出現規則，再以邏輯運算元疊加各環境因子的作用。三個方法的差別在於其定義「規則」的方式：其中最單純的為耐受範圍分析法，以物種在各環境梯度上所能耐受的最大值與最小值來界定該物種可生存的範圍（e.g. Busby 1991）。累計分布函數差值法則以「物種在該環境梯度區間出現的機率，大於該環境梯度區間在全區中所佔的比例」，來定義合適棲地（e.g. Dettmers & Bart 1999）。模糊分類法則更進一步先模擬物種在每一環境梯度上的分布，為其量身訂做一則歸屬函數（membership function），各歸屬函數再以模糊集合的原則相疊加（e.g. Robertson et al 2004）。上述的五種方法以 SAS 編寫程式執行。

遺傳演算法屬於人工智慧的一支，可綜合數種預測規則並使之朝向最佳預測正確率的方向演化（e.g. Anderson & Peterson 2003）。Stockwell & Peters (1999) 針對生物分布預測發展了軟體 GARP（Genetic Algorithm for Rule-set Prediction），結合了上述兩大類方法（邏輯迴歸與耐受範圍分析），本研究即使用 GARP 建立遺傳演算法之模式。

將測試資料代入以上各方法導出的模

式，所得的預測出現情況與實際出現情況比對，可計算 kappa 值，作為評估模式的指標（Fielding & Bell 1997）。而除了耐受範圍分析法以外，其他模式均有選擇最佳因子組合的功能；我們也以已知該魚種的屬性檢視所選出的變數組合，來評估模式的合理性。

氣候變遷之衝擊評估

將現今與 RSM2 模擬情境下的環境因子分別代入表現最佳的模式，可導出各物種目前與模擬情境下的分布；我們針對保育類魚種及台灣特有種，檢視在氣候改變後，各魚種的空間分布是否有範圍的擴張或收縮、以及地理位置的遷移等。

將各魚種的分布圖層疊加，即可導出初級淡水魚物種豐富度（species richness）的圖層；比較現今與未來豐富度圖層，可分析氣候變遷對生物多樣性的影響，包括數量上與空間上的變化。生物多樣性或物種豐富度特別高的地區，在保育生物學上稱之為「熱點」（hotspot），具有優先的保育地位；本研究以豐富度的前 5% 定義生物多樣性熱點，檢視氣候變遷所造成的熱點推移。

而將物種豐富度的圖層與保護區系統的圖層相疊，可評估現行的保護區系統在氣候改變時，是否仍有效保護生物多樣性。

結果

不同模式之比較

所測試的六種模式中，GARP 模式平均的 kappa 值較其他模式高出許多。不過，必須注意輸入 GARP 的僅為出現紀錄，因此其計算 kappa 值時，是使用軟體自動從背景資料中抽出的 pseudo-absence data，和其他

模式把「有調查過但未記錄到該魚種」的網格當作 absence 不同。其餘五種模式的平均 kappa 值相近，其中耐受範圍分析法以極值做最寬鬆的生境定義，因此有較大的 commission error（即實際未出現但被預測為出現）；使用統計法則的邏輯迴歸與鑑別分析常會選出較多的預測變數，而累計分布函數差值法和 GARP 則大約在使用四個左右的預測變數時有最好的表現。

以下以 kappa 值最高的 GARP 為主，配合表現最佳的累計分布函數差值法，以其預測結果來評估氣候變遷的影響。

保育類魚種及台灣特有魚種所受的衝擊

所分析的 25 種初級淡水魚中，有 13 種為台灣特有種，其中名列保育名錄上的有埔里中華爬岩鰍（珍貴稀有）及高身鏟頰魚（瀕臨絕種）。

比較 GARP 與累計分布函數差值法，對台灣間爬岩鰍、高身鏟頰魚、粗首鱖、赤斑吻鰕虎及南台吻鰕虎所受的衝擊預測，兩種模式出現較不一致的結果。除此之外，各魚種在 RSM2 模擬情境下的分布範圍均縮減，出現的網格數較現今減少 20%~90% 不等，且兩模式的預測相當一致。

在 RSM2 模擬情境下，台灣纓口鰍為受衝擊最大的魚種，空間分布縮減 90% 以上，且將成為所分析的 25 種魚中分布範圍最小的魚種，所出現的網格數在 100 格以下，並侷限於北部山區（圖三）；其次為何氏棘魷及高身鏟柄魚。屬於珍貴稀有種的埔里中華爬岩鰍空間分布將減少 50% 左右，分布範圍顯著向高海拔遷移。

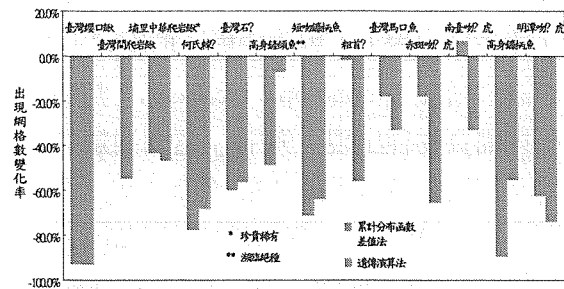


圖 3、保育類魚種及台灣特有魚種的分布量變化

初級淡水魚物種豐富度的分布變化

以 GARP 模式所導出的淡水魚物種豐富度之空間分布及變化趨勢（下頁圖四）。現今的魚種豐富度在西部低海拔地區最高，若以豐富度的前 5% 為多樣性熱點，以遺傳演算法之模式預測為例（下頁圖五），出現種數 16 種以上的網格為熱點，主要落於海拔 50~250 m 之間，熱點區域的平均種數為 16.8 種。而在 RSM2 的摹擬氣候情境下，若以原來的標準（16 種以上）訂定熱點，則熱點幾乎完全消失；此預設情境下豐富度為前 5% 的區域（9 種以上）向上推移到海拔 200~750 m 之間（第 30 頁圖六），而這些新的「熱點」平均每網格種數為 9.9 種，較現今少了 7 種左右。

就全島而言，RSM2 模擬情境下的魚種豐富度較之目前平均每網格減少約 4.8 種，而不同區域所受到的衝擊各有不同（第 30 頁圖七）：現今魚種最豐富的低海拔地區（< 500 m）豐富度大幅下滑，每網格種數平均減少約 7 種；中海拔地區（1000~2000 m）魚種豐富度卻出現微幅增加的情況；而 2000 m 以上的高海拔地區原本魚種豐富度就低，氣候變化帶來的改變不明顯。

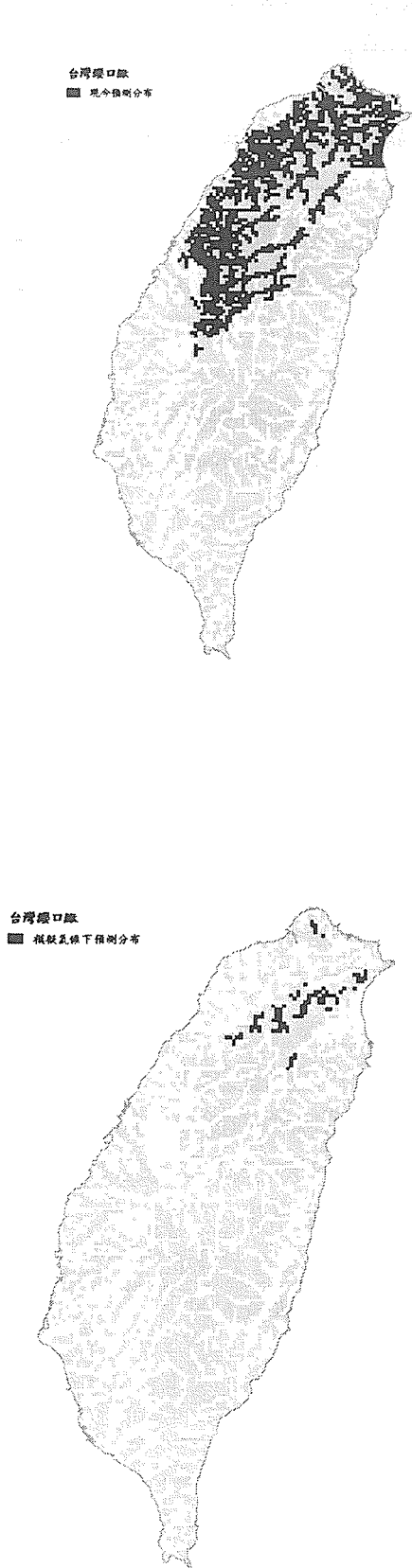
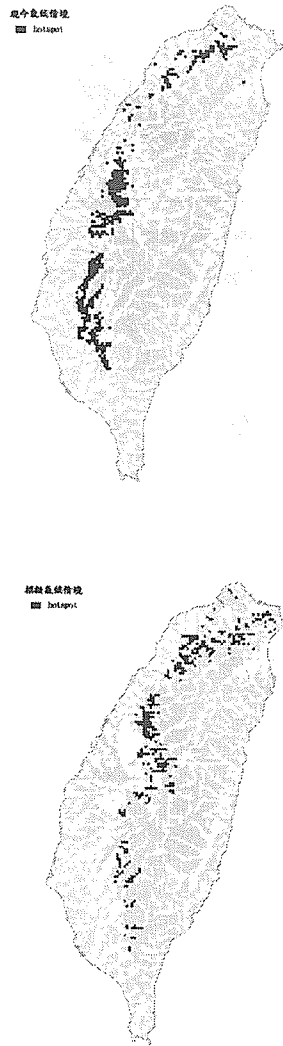


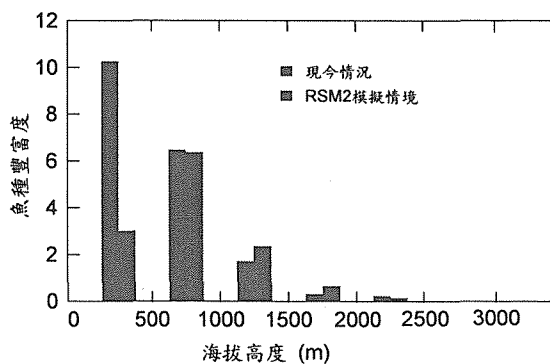
圖 4、台灣纓口鰍在現今（上）與 RSM2 模擬環境下（下），以 GARP 預測之分布



圖 5、以 GARP 導出的初級淡水魚物種豐富度預測：(a) 現今分布，(b) RSM2 情境下之分布，(c) 分布變化



圖六、現今(上)與 RSM2 模擬情境下(下)的淡水魚魚種豐富度熱點預測



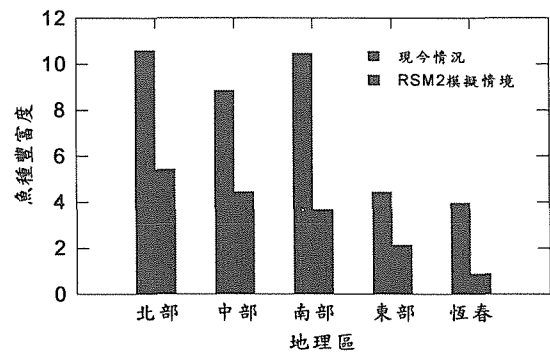
圖七、在現今情境與 RSM2 模擬情境下，GARP 所預測之淡水魚種豐富度沿海拔的分布

若分成北、中、南、東、恆春五個魚類地理區來看，各區的魚種豐富度在 RSM2 模擬情境下均下降，減少的種數從東部的平均 2.3 種到南部的平均 6.8 種，而原本種數

就少的恆春半島物種豐富度減少逾 70%，所受影響最劇。

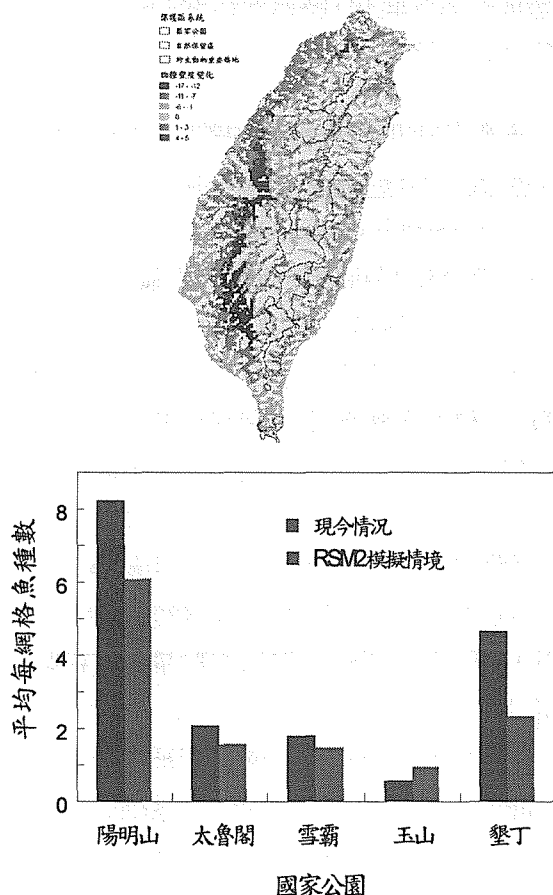
氣候變遷對保護區內淡水魚豐富度的衝擊

將國家公園、自然保留區、野生動物重要棲地的圖層與魚種豐富度變化的圖層疊合(圖八)，可以看出面積較大的保護區大多位在高海拔，是淡水魚物種豐富度較低的區域，也是受到氣候變遷衝擊較小的地方；其他保護區則面積太小，難以在這個空間尺度分析。



圖八、在現今情境與 RSM2 模擬情境下，GARP 所預測之各地理區淡水魚種豐富度變化情形

以國家公園為例，在 RSM2 模擬情境下，台灣本島的五個國家公園中，低海拔的陽明山與墾丁國家公園平均魚種數均較現今減少兩種左右，而高海拔的玉山國家公園平均每網格的魚種數則微幅增加(下頁圖九)；以改變幅度來看，墾丁國家公園的平均種數減少約 50%，所受的衝擊最大。



圖九 在 RSM2 模擬情境下，台灣各保護區初級淡水魚種豐富度變化的情形

討論

模式適用性的探討

比比起其他陸生動物，台灣淡水魚的野外調查資料相對缺乏。在本研究室收錄的 66 種原生淡水魚中，只有 25 種有大於 50 筆的出現網格紀錄可供分析。資料筆數太少，將無法充分描摹該物種的環境需求，並影響模式的穩定性；能分析的物種數太少，在探討物種豐富度分布、熱點位置時，可能錯失其全貌。

除了調查資料的數量，調查地點的時空分布也對模式的品質影響甚鉅。調查點必須在各個生態區平均分布，模式預測才不會有

以偏概全之誤；但台灣高海拔地區的調查仍嚴重不足。時間軸上的變化在短程上包括物種分布的季節性變化，長程則可監測人類活動、外來種入侵、氣候變遷等干擾因子；但目前由於資料的不足，我們無法對資料作進一步的時間性分析。補充規劃周詳的野外調查，是改進與檢驗模式的重要步驟。

台灣的淡水魚分布深受播遷歷史與地理區隔的影響，這成為建立淡水魚模式時較其他物種困難之處。台灣淡水魚的種源分別在不同地質年代由不同地區遷入，再加上初級淡水魚只生活在純淡水的環境，其播遷機會遠較其他物種受限，因此其組成成分成北、中、南、東、恆春半島五個生物地理區。這意味著當資料庫中某一魚種在某一地點不出現時，未必代表該地的環境不適合該魚種，而可能是歷史因素所導致；這在建立模式時必須加以區隔，否則會混淆物種分布與環境因子的關係。本研究使用文獻所記載各魚種的生物地理區為遮罩，不過一魚種在所屬地理區內也未必完全達到分布平衡。因此我們也嘗試了數種只使用出現資料的模式，以減除歷史因素的影響。

另外，此分析所使用的環境資料庫在人為干擾因子方面有待充實。許多小尺度的研究指出，週邊土地利用型態、河川污染程度、外來種的入侵等，均對淡水魚物種豐富度有重大影響。本研究的分析中包括人口數、植生指數、自然度、都市化程度等因子做為干擾指標，不過在各種方法中，這些變數都很少被選入最適模式裡。這一方面可能是這些指標未能充分反映河川所受的干擾，一方面也可能是在大尺度的空間分布上，干擾因子對淡水魚豐富度的影響尚是次要的。

本研究採用多種不同的方法建立模

式，最後選用累計分布函數差值法和遺傳演算法所建立的模式進行預測。這兩種模式對現今魚種豐富度分布預測的一致性頗高，其空間分布圖也獲得魚類學者的認同，表示上述的幾個問題造成的影響仍在可接受的範圍內，所建立的模式能在現今情境做可靠的應用。然而，進行全球變遷的推估時，還有其他的不確定性必須考量。

本研究採用的方法為經驗模型，這是建立在生態平衡系統的前提及概念下的，其基於三個基礎假設，即：1. 物種的反應和現在及未來的氣候因子為平衡狀態；2. 未來的氣候因子變化後，物種和氣候的關係也不會改變；3. 被選入的氣候因子和其他環境因子無交互作用。然而，生物面臨氣候變遷的衝擊時，有可能以生理或行為的機制來調適，未必只以如今的固定關係來調整其分布。而如第 24 頁圖一所示，氣候因子和其他環境因子間其實存在複雜的交互作用，且其交互作用的形式亦有可能受到氣候變遷的影響而改變。

此外，還有生物方面的因子。不同生物間、生物與其棲地間存在著複雜的交互作用，當氣候改變而各物種的調適步調不一致時，可能會有例如食物來源短缺、天敵突然消失、競爭物種大量出現之類的生物環境變化，造成額外的衝擊。例如曾有研究發現，由於氣候的變化，湖泊中的浮游植物以及以之為食的浮游動物其物候現象變得不同步，造成浮游動物的大量衰減 (Winder & Schindler 2004)。這些因素已超過本研究能夠探討的範圍，需要加強對各物種、種間關係及生態系統結構的研究，才能探究這些機制。

氣候變遷對原生初級淡水魚的衝擊

本研究的結果顯示，未來二氧化碳倍增

所造成的氣候暖化，將導致台灣初級淡水魚生物多樣性降低。

衝擊的程度有魚種間的差別，也有空間上的變異。台灣初級淡水魚的特有性相當高；在所分析的 13 種特有種中，幾乎所有魚種在 RSM2 模擬情境下的分布範圍均縮減，各魚種預測減少的網格數多在 20~90% 間。然而，這常常伴隨著其分布範圍向高海拔移動，使各魚種所受的實際威脅將遠比由網格數所估算的情境來得嚴重。河川愈往上游，愈是漸次分支成廣佈而細小的支流，而且水深漸減；這意味著同樣的河川網格數，在高海拔區域所包含的實際水體空間較低海拔為低，因此所能支持的族群量或魚種數也隨之下降。同時各支流上游並不直接相連，使得往上游分布的魚種逐漸被分割成破碎而隔離的小族群，各小族群的滅絕機率可能因為基因單調化或隨機事件而提高。而每一種特有種的滅絕，都將是全球獨一無二珍貴生物資源的喪失。

當氣候變化時，台灣魚種豐富度呈現「低海拔劇減，中海拔微幅增加，高海拔變化不顯著」的型態；以全島而言，平均每網格魚種豐富度減少近 5 種。目前初級淡水魚物種豐富度最高的區域為西部低海拔地區，在 RSM2 模擬情境下，高豐富度的區域向高海拔處移動了約 300 公尺。個別物種或多樣性熱點分布向高海拔推移，這與其它氣候變遷研究的結論一致 (Berry et al. 2002, Konvicka et al. 2003, Tryjanowski 2005)。而有許多研究指出，高海拔地區常是氣候暖化時受到最大衝擊的區域；這在本研究對淡水魚的探討中並未發現。其主要原因是高海拔的魚類調查紀錄太少，因此許多高海拔的魚種沒有足夠的資料可供分析，而未被包含在本研究的分析範圍內所致。

在魚種向上游遷徙的過程中，可能還有一些目前環境因子資料庫所無法掌握的變數。例如，台灣地形變化大，河川中段水流湍急、溶氧量高，這對適應穩定水域的魚種而言會造成播遷上的困難；又如台灣的溪流有眾多水庫、攔砂壩，而魚梯的設置常常並不完善，這也會成爲魚類因應氣候變遷的障礙。

因此，即使目前所建立的模式已指出未來適合各魚種的棲地，但其間的動態過程中會有其他因子介入，各魚種未必能順利達到新的平衡；所以目前所預測的結果應該被視爲一個最樂觀的狀態。未來應一方面加強對重要魚種播遷能力的研究，一方面將影響播遷的因素納入模式考量，以建立符合動態的模式。

結論與建議

針對氣候變遷可能對台灣原生初級淡水魚、以至整個生態系統帶來的衝擊，我們基於此研究提出以下建議，以期緩和氣候變遷所帶來的負面效應，保護生物多樣性和生態系統的完整性：

加強基礎研究

1. 累積長期與標準的研究資料

相較於農業與森林資源，過去生物資源長期受到忽視，10 到 20 年以上的長期資料極端缺乏，因此難以分析這些生態系變遷的速率、影響的範圍等。而零星與短期的調查，其資料收集的地點、時間、頻率、內容與準確度會受到調查者、人力、時間、計畫進行方式等因素的影響，欠缺量化、標準化的記錄，將難以應用於氣候變遷分析之用。因此，累積長期的研究資料，並採取標準的

資料收集方式，將是未來針對氣候變遷相關研究的基礎。

我國長期生態研究始於 1992 年，至今包含了福山、關刀溪、南仁山、塔塔加、墾丁與鴛鴦湖等 6 個長期生態研究試驗地。雖然在早期缺乏統一的研究標準，但在相關參與學者的努力之下，已漸有改善，而其累積的資料也已有一定的數量。未來除了持續收集相關資料、擴大研究範圍與地區外，亦應致力於與氣候變遷研究相關的聯結，俾使研究資源得到最有效率的利用。

2. 深入對生態系統各個層級的研究

氣候變遷的衝擊並非集中於單一物種或單一層面，物種的播遷能力、物種在不同環境下生理、行爲的調適機制，以及種間交互作用等等，每一個環節都可能在氣候變遷的過程中發生關鍵性的作用。對這些基礎知識有了充分瞭解，則可望建立以因果關係爲架構的機制性模式，深入瞭解生態系統，才能訂定完善的調適策略。

3. 加強國內外各研究網路間資料與技術的交流

在氣候變遷這樣一個時空尺度廣大、影響層面廣泛的課題下，資料的共享與整合極爲重要。國際間近年來已漸漸體認到氣候變遷在各面向間造成的綜合性衝擊，也開始針對不同面向間相互影響的關係，進行研究與分析探討。國內近五年來已開始重視資料統合的重要性，有許多大型的資料庫建置計畫正在進行中；然而在不同學門間的合作與交流仍嫌不足，相關的資訊也常缺乏。未來應持續針對不同面向間，進行跨領域的研究。

落實監測

生物由於其對溫度、濕度等氣候環境在

生理上的限制，使得他們可以有效地作為氣候變遷的指標 (indicator) (Root, 1988)。若能找出適合作為指標的物種，並對這些物種進行持續的監測，便可以藉此建立早期預警系統，提供早期的防範措施，將調適策略的效能發揮到最大。

根據本研究的結果，以初級淡水魚為例，對監測的方向有以下建議：

1. 監測對變遷特別敏感的物種：目前的模式顯示，台灣纓口鰻、何氏棘魷及高身鎌柄魚在氣候暖化時，其分布範圍的縮減會特別明顯；因此建議評估以這些魚種作為生態指標的可行性，對其族群數量及分布範圍做定期的調查，以監測氣候變遷的進程。
2. 監測外來種：外來種魚類在部分地區對台灣原生淡水魚造成極大的衝擊 (陳榮宗等 1993, Wang et al. 1999)。其中許多外來種均是從熱帶引入、喜歡溫暖水域的種類，因此氣候暖化極可能會助長外來種的入侵，應持續監測其分布的變化。
3. 沿海拔梯度監測淡水魚群聚：建議選擇合適的河川設立永久樣區，沿海拔梯度設定樣區，長期監測魚類族群動態、群聚組成變化及空間分布的改變。

保育策略

1. 建立沿海拔梯度的生態廊道

台灣的保護區系統雖已沿中央山脈完成生態廊道，但只涵蓋了高海拔地區，魚類及兩生類物種最豐富的低海拔區域被嚴重忽視；而氣候暖化時生物分布將向高海拔推移，從低海拔到高海拔建立連續的生態廊道將是物種順利播遷的關鍵。

2. 評估移地保育的可行性

初級淡水魚的播遷能力相當受限，不同河流間無法互通，同一河流的各河段也可能受到急流、瀑布或其他人工設施的阻絕；因此在氣候暖化時，魚群未必能順利逐漸遷徙到合適的新棲地。在必要情況下，可以考慮以人工將其移到合適的環境，而本研究對各魚種的預測模式可作為選址的參考。但移地保育相當耗費經費，也有可能帶來新的生態問題，須審慎評估。

3. 將氣候變遷對生態系的衝擊納入國家資源管理的考量

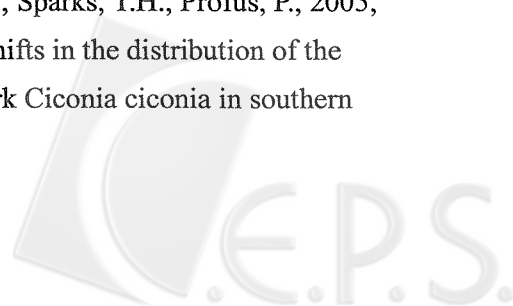
未來從中央的政策擬定到區域性的土地利用，均應將氣候變遷的動態納入考慮，而不是僅只考慮對現今生態的衝擊，才能達成對自然資源的永續利用。

參考文獻

- 李培芬、廖倩瑜、李玉琪、潘彥宏、傅維馨、陳宣汶，1997，“台灣地區生態與環境因子地理資訊資料庫”，國立台灣大學動物系空間生態研究室。
- 李培芬、呂光洋、李玉琪、謝佳君、潘彥宏、陳宣汶、潘天祺、丁宗蘇，1998，“台灣地區野生動物分布資料庫之建立”，行政院農業委員會。
- 陳榮宗、何平合、李訓煌，1993，“外來種淡水魚類及蝦類在臺灣河川之分布概況”，特有生物研究，5，33-46
- Ball, T., 1983, "The migration of geese as an indicator of climate change in the southern Hudson Bay region between 1715 and 1851", *Climatic Change*, 5, 85-93.
- Root, T.L., 1988, "Environmental factors

- associated with avian distributional boundaries”, *Journal of Biogeography*, 15, 489-505.
- Bradley, N.L., Leopold, A.C., Ross, J., Huffaker, W., 1999, “Phenological changes reflect climate change in Wisconsin.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 9701-9704.
- Anderson, R.P., Lew, D., Peterson, A.T., 2003, “Evaluating predictive models of species' distributions: Criteria for selecting optimal models”, *Ecological Modelling*, 162, 211-232.
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C., Pounds, J.A., 2003, “Fingerprints of global warming on wild animals and plants”, *Nature*, 421, 57-60.
- Berry, P.M., Dawson, T.P., Harrison, P.A., Pearson, R.G., 2002, “Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland”, *Global Ecology and Biogeography*, 11, 453-462.
- Michener, W.K., Blood, E.R., Bildstein, K.L., Brinson, M.M., Gardner, L.R., 1997, “Climate change, hurricanes and tropical storms and rising sea level in coastal wetlands (review).”, *Ecological Adaptations*, 7, 770-801.
- Todhunter, P., 1995, “Hydroclimate perspectives on waterfowl production in the North Dakota prairie pothole region.”, *Great Plains Research*, 5, 137-162.
- Berry, P. M., Dawson, T. P., Harrison, P.A., Pearson, R.G., 2002, “Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland”, *Global Ecology & Biogeography*, 11, 453-462.
- Both, C., Artemyev, A.V., Blaauw, B., Cowie, R.J., Dekhuijzen, A.J., Eeva, T., Enemar, A., Gustafsson, L., Ivankina, E.V., Jarvinen, A., Metcalfe, N.B., Nyholm, N.E.I., Potti, J., Ravussin, P-A., Sanz, J.J., Silverin, B., Slater, F.M., Sokolov, L.V., Torok, J., Winkel, W., Wright, J., Zang, H., Visser, M., 2004, “Large-scale geographical variation confirms that climate change causes birds to lay earlier”, *Proceedings of the Royal Society of London - Series B: Biological Sciences*, 271, 1657-1662.
- Buckland, S.T., Elston, D.A., Beaney, S.J., 1996, “Predicting distributional change, with application to bird distributions in northeast Scotland”, *Global Ecology and Biogeography Letters*, 5, 66-84.
- Busby, J.R., 1991, “BIOCLIM — a bioclimatic analysis and prediction system”, pp. 64–68 in: *Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis* (ed. by Margules, C.R. and Austin, M.P.), CSIRO, Melbourne.
- Camarero, J.J. and Gutierrez, E., 2004, “Pace and pattern of recent treeline dynamics: Response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees”, *Climatic Change*, 63, 181-200.
- Chen, S.C., Wu, M.C., Marshall, S., Juang, H.H.M., Roads, J.O., 2002, “2×CO₂ Eastern Asia Regional Responses in the RSM/CCM3 Modeling System”, *Global*

- and Planetary Change - A Special Issue, 782, 1-9.
- Chmielewski, F.-M., Mueller, A., Bruns, E., 2004, "Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000", *Agricultural & Forest Meteorology*, 121, 69-78.
- Dettmers, R. and Bart, J., 1999, "A GIS modeling method applied to predicting forest songbird habitat", *Ecological Applications*, 9, 152-163.
- Fielding, A.H. and Bell, J.F., 1997, "A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models", *Environmental Conservation*, 24, 38-49.
- Gamache, I. and Payette, S., 2004, "Height growth response of tree line black spruce to recent climate warming across the forest-tundra of eastern Canada", *Journal of Ecology*, 92, 835-845.
- Guisan, A. and Zimmermann, N.E., 2000, "Predictive habitat distribution models in ecology", *Ecol. Model.*, 135, 147-186.
- Konvicka, M., Maradova, M., Benes, J., Fric, Z., Kepka, P., 2003, "Uphill shifts in distribution of butterflies in the Czech Republic: Effects of changing climate detected on a regional scale", *Global Ecology & Biogeography*, 12, 403-410.
- Livingstone, D.A., 2003, "Global climate change strikes a tropical lake". *Science*, 301, 468-469.
- Mladenoff, D.J., Sickley, T.H., Haight, R.G., Wydeven, A.P., 1995, "A regional landscape analysis and prediction of favorable gray wolf habitat in the northern Great Lakes region", *Conservation Biology*, 9, 279-294.
- Munoz, J. and Felicisimo, A.M., 2004, "Comparison of statistical methods commonly used in predictive modeling", *Journal of Vegetation Science*, 15, 285-292.
- Robertson, M.P., Villet, M.H., Palmer, A.R., 2004., "A fuzzy classification technique for predicting species' distributions: applications using invasive alien plants and indigenous insects", *Diversity and Distributions*, 10, 461-474.
- Scott, D, Malcolm, J.R., Lemieux, C. 2002, "Climate change and modelled biome representation in Canada's national park system: implications for system planning and park mandates", *Global Ecology & Biogeography*, 11, 475-484.
- Stockwell, D.R.B. and Peters, D. P., 1999, "The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction", *International Journal of Geographic Information Systems*, 13, 143-158.
- Theurillat, J-P. and Guisan, A., 2001, "Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review", *Climatic Change*, 50, 77-109.
- Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., Erasmus, B.F.N., de Siqueira, M.F., Grainger, A., 2004, "Extinction risk from climate change", *Nature*, 427, 145-148.
- Tryjanowski, P., Sparks, T.H., Profus, P., 2005, "Uphill shifts in the distribution of the white stork *Ciconia ciconia* in southern



- Poland: the importance of nest quality”,
Diversity and Distributions, 11,
219-223.
- Tzeng, C.S. 1986. “Distribution of freshwater
fishes of Taiwan”, J. Taiwan Mus., 39,
127-146.
- Wang, T.Y., Tzeng, C.S., Shen, S.C., 1999,
“Conservation and phylogeography of
Taiwan paradise fish, *Macropodus
opercularis Linnaeus*”, Acta Zoologica
Taiwanica, 10, 121-134.
- Winder, M., Schindler, D., 2004, “Climate
change uncouples trophic interactions in an
aquatic ecosystem”, Ecology, 85,
2100-2106.