

農業環境景觀生態保育之多目標規劃 —以高山農場鳥類生態保育為例

Multi-objective Analysis of Ecological Landscape Planning for Agricultural environments – A Case Study for Conserving Birds in Highland Farm

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士候選人

黃浚璋*

Chun-Wei Huang

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

林裕彬

Yu-Pin Lin

國立台灣大學
森林資源學系
副教授

丁宗蘇

Tzung-Su Ding

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士後研究員

王咏潔

Yung-Chieh Wang

摘要

景觀空間結構變遷影響著各種生態過程，景觀結構動態造成不同物種之棲地適宜性消長，景觀生態保育規劃應考量物種間棲地喜好之競合關係，以提供規劃者支援決策，在土地資源有限之農業生態系統中尤顯其重要性。本研究以國立台灣大學生物資源暨農學院附設山地農場之梅峰農場作為研究區域，選取黃腹仙鶺(*Niltava vivida*)、強腳樹鶺(*Cettia fortipes*)及綠背山雀(*Parus monticolus*) 3種鳥類為目標物種，應用最佳土地利用格局最佳化模式 LUPOLib 進行最佳景觀之多目標規劃分析。研究結果顯示，3種物種具有不同類型之棲地喜好，且在規劃上呈現競合情形。其中，黃腹仙鶺喜好出現於鑲嵌於農業景觀中之小嵌塊體林斑地；強腳樹鶺喜好接近闊葉林之空曠地；而綠背山雀喜好完整之闊葉林斑塊。進一步將非劣勢解群集進行疊圖分析，討論各土地利用類型不可取代性之空間分佈。其中，農場東部的耕地邊緣可提供作為強腳樹鶺棲地而具高度之不可取代性，此處農地與森林邊緣之灌叢為強腳樹鶺之重要棲地；而西半部適合維持或新增小嵌塊體森林以提供黃腹仙鶺活動；最後，農場東南區的闊葉林不可取代性較高，在此可營造人工闊葉林以提供連結性好之森林嵌塊體予綠背山雀。綜整本研究結果，當執行生態補償或棲地復育時，景觀生態多目標規劃可有效提供土地利用規劃者決策支援。

關鍵詞：農業環境，景觀生態，土地利用格局最佳化模式 LUPOLib，多目標規劃、鳥類生態保育。

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系博士候選人，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，yplin@ntu.edu.tw

ABSTRACT

Spatial configuration of landscape structure significantly influences various ecological processes and landscape dynamic strongly changes habitat suitability of species. Ecological landscape planning that account habitat trade-off among species can provide useful recommendations for decision making in landscape planning, especially in agricultural ecosystems. We applied a genetic algorithm based spatial optimization tool, termed Land-Use Pattern Optimisation Library (LUPOLib), to a multi-objective landscape planning intended to protect three bird species that has distinct habitat preference (Vivid Niltava, Brownish-flanked Bush-warbler, and Green-backed Tit) in the highland experimental farm at National Taiwan University (HEF, NTU). Our results showed the three focal species had distinct and conflict habitat preferences. Vivid Niltava preferred small patches of forest embedded in the agricultural landscape, Brownish-flanked Bush-warbler preferred edges of open areas, and Green-backed Tit prefer large patches of broadleaf forests. We conducted an overlapping analysis of the inferior solutions to demonstrate the spatial distributions of the irreplaceability of each replaceable land-use type. The farmlands in the eastside of HEF provided critical habitat for Brownish-flanked Bush-warbler and thus had high irreplaceability. The west side of HEF was suitable to restore some small forest patches for Vivid Niltava. Also the broadleaf forests in southeastern HEF had high irreplaceability and could be improved by restoring broadleaf forests to connect current forest patches for Green-backed Tit. In conclusion, the multi-objective analysis can effectively support the decision-making process of landscape planning with respect to ecological compensation or habitat restoration.

Keywords: Agricultural environments, Landscape Ecological planning, Land-Use Pattern Optimisation Library (LUPOLib), Multi-objective planning, Conservation of birds.

一、前言

景觀生態學(landscape ecology)為研究景觀空間型態(spatial patterns)與生態過程間之相互作用(林等, 2001), 景觀(landscape)組成元素依形狀及功能可分嵌塊體(patch)、廊道(corridor)和基質(matrix)(Forman and Gordon, 1986; 林等, 2001; 林等, 2002)。基質中連結之相同土地利用類型可視為一嵌塊體, 嵌塊體具有提供做為棲地功能。生物群聚的完整與多樣性與景觀中棲地的連續度(connectivity)、支配度(dominance)、碎形維度(fractal dimension)、鑲嵌度、嵌塊體大小、嵌塊體分佈、嵌塊體距離、總邊緣長度、各嵌塊體

邊緣長度、嵌塊體間的廊道、格局尺度等有關(USEPA, 1994; Aspinall and Pearson, 2000; 經濟部水利署, 2011)。因此, 人為或自然造成的景觀空間型態變遷影響生物群聚之消長, 例如, 當森林棲地嵌塊體轉變為農業活動, 造成原核心棲地破碎化、生物群聚消失。為彌補開發所造成的影響, 景觀改造(landscape modification)可作為農業環境之棲地復育(habitat restoration)或生態補償(ecological compensation)之機制。然而, 過去進行相關生態保育規劃時, 多考量景觀中土地利用之組成(composition), 作為目標物種棲地偏好之代表, 主要目的為保留目標物種喜好之土地利用類型, 卻較少將景觀空間結構, 即土地利用之配

置(configuration)與物種棲地適宜性之關聯納入規劃考量。景觀生態保育規劃，便是同時考量景觀中土地利用組成與配置於生態保育規劃中。因此，合宜的景觀生態保育規劃在有限土地資源的區域中(例如，以人類活動類型為主之生態系統)更顯其重要性。

全球農業生態系統分布廣泛，為許多物種棲息之重要場所，在農業環境中棲息的物種往往容易受到土地利用的轉變與集約化(例如，自然棲地轉換為農業)威脅(Holzämper *et al.*, 2006)。其中，農業景觀中鳥類分佈容易受到種植農作物類型、周遭非耕作棲地的結構與型態及人類農業活動等影響(王與許, 2011)。前人研究中，高山地農業開墾環境確實造成鳥類多樣性減少(顧, 2004)。因此，可以鳥類作為農業景觀生態保育規劃的目標物種。為有效地執行生態補償，以最佳景觀改造來執行棲地復育，可求在有限的土地資源中，有效率地恢復鳥類生態多樣性。然而，過去研究指出當農業景觀空間型態改變時，鳥類的棲地適宜性(habitat suitability)亦跟著消長，不同的物種亦有不同景觀空間結構喜好(Holzämper *et al.*, 2006；Holzämper *et al.*, 2007^a)，例如，在農業景觀中，紅背伯勞(*Lanius collurio*)喜好森林邊緣的樹籬；而中斑啄木鳥(*Dendrocopos medius*)喜好森林核心棲地(Holzämper *et al.*, 2006)。當景觀空間型態變遷趨向某一特定物種之棲地偏好，適合其他物種之棲地可能因此減少，為求保護提升生物多樣性，決策者在訂定保育策略時必須同時考量不同目標物種之棲地偏好，以整體保護多元物種。本研究建議以多目標規劃求解景觀生態保育規劃問題，以便將多元物種之棲地喜好競合納入考量。

景觀生態學研究初期以敘述性理論為主。近年來，已運用建立景觀指數(landscape metrics)來量化描述景觀之時空變遷及其景觀生態意義(林等, 2001；林等, 2002)，透過景觀指數可協助規劃者了解土地利用空間分佈如何影響棲地的質與量，包括保育目的價值優先順序(張等, 2011)。景觀指數亦可進一步用於建立物種之棲地適宜性與景觀空間型態之關聯，作為該物種棲地適宜

性模式(habitat suitability model)，可在考量土地利用配置下，推估目標物種在景觀中之空間分佈。此外，在空間規劃議題上，許多研究已發展應用於生態保育之空間規劃優化模式(spatial optimization model)，包括最佳景觀改造(Holzämper *et al.*, 2007^b；Westphal *et al.*, 2007)與保育區劃設(Ball and Possingham, 2000；Linke *et al.*, 2012)。其中，Holzämper 等(2006；2007^a；2007^b)運用遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)所發展之土地利用格局最佳化工具 LUPOLib (Land-Use Pattern Optimization library, LUPOLib)已成功應用於鳥類保育之農業景觀改造案例中。

本研究主要目的為對台灣大學附設山地實驗農場-梅峰農場進行景觀生態保育多目標規劃，重點為在考量不同棲地偏好之目標物種競合下，進行最佳景觀改造。本研究運用土地利用格局最佳化工具 LUPOLib，透過權重法結合各目標物種的目標函數，分析不同的權重組合，探討黃腹仙鶴(*Niltava vivida*)、強腳樹鶯(*Cettia fortipes*)及綠背山雀(*Parus monticolus*)棲地適宜性競合下之最佳景觀改造。在研究結果呈現上，由於多目標規劃問題中各目標通常彼此衝突，不同於單目標規劃問題找到「最佳解」，多目標規劃為從可行解集中，找出多組「非劣勢解」(non-inferior solutions)，非劣勢解中所有目標函數值皆不能同時劣於其他任何解中對應之目標函數值。因此，可提供決策者不同的考量角度，並可從中選擇方案執行。本研究計算分析不同權重組合下，各組非劣勢解景觀中土地利用的組成及配置。在組成之改變上，探討隨各目標物種權重的增加，各土地利用類型之增減情形；在配置改變上，透過將代表所有非劣勢解之景觀改造結果進行疊圖分析(overlap analysis)，探討空間分佈上原生林及人工林區位之不可取代性(irreplaceability)。最後綜合研究成果，提供決策者於高山農場鳥類生態保育之參考。

二、研究方法與材料

2.1 研究區域

本研究場址，國立臺灣大學生物資源暨農學

表 1 梅峰農場土地利用組成百分比

	面積(公頃)	百分比
水體	0.4	0.65%
建地	7.36	11.95%
果園	5.66	9.19%
原生林	27.33	44.36%
耕地	11.94	19.38%
人工針葉林	7.34	11.91%
人工闊葉林	1.58	2.56%

院附設山地實驗農場-梅峰農場(以下簡稱梅峰農場)，位在南投縣仁愛鄉，中橫公路霧社支線(臺14甲)14.5公里處，平均海拔高度為2,100公尺，屬溫帶型氣候，面積約42.68公頃。本研究將研究範圍向外延伸50公尺(蕭，2013)，總研究區域面積約為61.61公頃。並將研究區域切割為6,161個網格，每個網格大小為100平方公尺，以梅峰農場內各個網格為中心，考量延伸半徑50公尺之子景觀(sub-landscape)作為領域範圍，以考量各子景觀中景觀變化對該網格中各目標物種之棲地適宜性影響。梅峰農場位於稜線上，其坡向為西向東逐漸降低。依據林(2011)之地景植被結構調查結果，本研究將土地利用類型分為建地、水體、果園、耕地、人工針葉林、人工闊葉林與原生林等(表1)，以探討農業活動及不同林相之景觀配置對於目標物種棲地適宜性影響。其中，建地包含各類人為建築(包含房屋、溫室)；果園為種植木本植物水果(主要為桃及蘋果)之處所；耕地為各類草本植物(包含葉菜類、及花卉)之種植區域，這些耕地有時會休耕而成為草生地；人工針葉林栽植樹種以柳杉為主；人工闊葉林栽植樹種則相當多樣；而原生林為無人工改變之闊葉林，優勢樹種為殼斗科及樟科植物。各類土地利用分佈配置如圖1所示。

2.2 目標物種

為探討不同棲地喜好之鳥類於最佳景觀改造時之競合，本研究選取黃腹仙鶴、強腳樹鶯及綠背山雀作為目標物種。過去研究指出黃腹仙鶴喜愛棲息於林冠的中、上層，並常停棲於森林邊

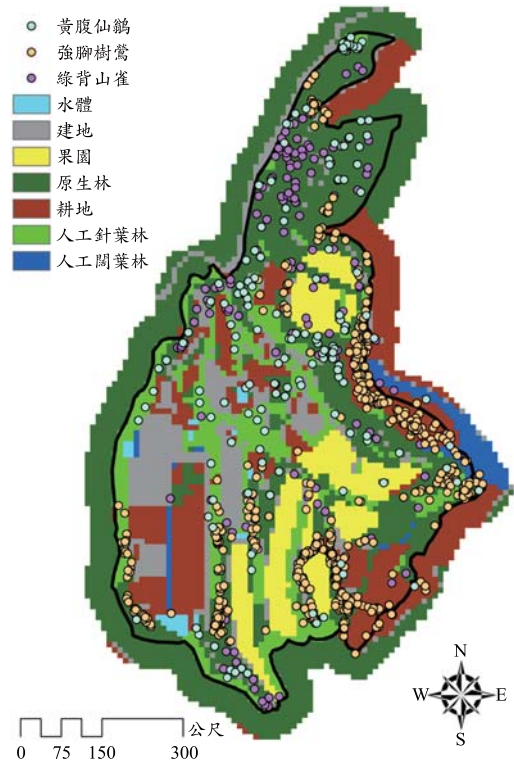


圖 1 梅峰農場土地利用與目標物種空間分佈圖

緣枝椏上(劉等，2010)；而強腳樹鶯則偏好棲息於向陽的森林邊緣以及乾燥地區的草叢中，甚少進入闊葉森林內(劉等，2010)；最後，綠背山雀則喜好闊葉樹林(劉等，2010)。因此，選取此3目標物種可作為不同棲地喜好之代表。此外，本研究所有目標物種皆為台灣特有亞種，並為保育類野生動物(行政院農業委員會，2002)。本研究以定位描圖法(spot mapping)來記錄鳥類的出現位置及其偏好棲地。研究者於2005年至2007年間的繁殖季(四月至七月)，每週調查梅峰農場全域範圍，觀察所有以視覺或聽覺查覺到之鳥隻，並精確記錄其出現位置，標示於地圖(林，2006；林，2011)。研究區域內任何一處離調查路線之距離都在40公尺以內，以確保每個地景形式與鑲嵌體都有同樣之調查密度。3年共44次之調查，共計紀錄163個黃腹仙鶴出現點位、598個強腳樹鶯出現點位、及138個綠背山雀出現點位(圖1)。這些發現點位可以有效呈現這三種鳥類所喜

好之棲地位置，而且這 3 種目標物種在棲地選擇上有著明顯的差異。黃腹仙鶴主要出現於針葉林小嵌塊體，強腳樹鶯主要出現於耕地邊緣空曠區域，綠背山雀主要出現於研究區域北方原生林中(圖 1)。

2.3 研究方法

2.3.1 棲地適宜性模式

棲地適宜性為普遍被使用於描述物種對於特定區位中之環境因子喜好程度，以 0 到 1 數值表示棲地對於生物之適合程度。棲地適宜性之基本假設為物種有較高的機率出現於高棲地適宜性區位，各區位之棲地適宜性受不同的環境因子與土地利用決策制訂過程影響；因此，透過棲地適宜性模型可預測物種於特定區位之出現機率。羅吉斯模式(logistic model)為一統計模型，透過勝算比(odds ratio)的概念來推估類別性資料，如硬幣的正面或反面，故可用以預測鳥類出現與否，本研究應用羅吉斯迴歸建立棲地適宜性模式，可表示為：

$$\text{Log} \left(\frac{hs_i}{1-hs_i} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_n X_{n,i} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$HSI = \sum_{i=1}^m hs_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

hs_i 為地點 i 之棲地適宜性； $X_{n,i}$ 為地點 i 之第 n 個環境因子； β_0 與 β_k 分別代表棲地適宜性模式之截距常數與其他驅動力因子之係數。

本研究於驅動力因子的選擇上，為探討景觀空間格局的改變對於不同物種之影響，除與道路及建地之距離外，納入景觀指數如類別面積(class area, ca_l)、大嵌塊體指數(largest patch index, lpi)、兩土地利用類別邊緣長度總合(edge sum, $es_{l,m}$)、嵌塊體內聚指數(patch cohesion, coh_l)等來描述景觀之空間格局，以考量景觀中土地利用的組成與配置。各方程式描述如下(Holzämper *et al.*, 2006)：

$$ca_l = \sum_{p=1}^n a_{p,l} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$lpi = \frac{1}{A_r} \max(a_{p,l}) \times 100 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$coh_l = \left[1 - \frac{\sum_{p=1}^n P_{p,l}}{\sum_{p=1}^n P_{p,l} \sqrt{C_{p,l}}} \right] \left[1 - \frac{1}{\sqrt{C_r}} \right]^{-1} \times 100 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$es_{l,m} = \sum_{p=1}^n ec_{p,l,m} \quad \dots\dots\dots(6)$$

其中， $a_{p,l}$ (m^2) 為土地利用類型 l 中第 p 個嵌塊體面積； A_r 為考量目標物種領域半徑 r (m) 範圍內子景觀之面積； $P_{p,l}$ 為土地利用類型 l 中第 p 個嵌塊體周長； $c_{p,l}$ 為土地利用類型 l 中第 p 個嵌塊體之網格數； C_p 為目標物種領域半徑 r (m) 範圍內子景觀所佔之網格數； $ec_{p,l,m}$ 為考量第 p 個嵌塊體時，與不同土地利用類型 l 與 m 之邊緣交界網格數。

2.3.2 土地利用格局最佳化工具(Land Use Pattern Optimization Library, LUPOLib)

為規劃考量保育各目標物種之最佳景觀改造，本研究運用 Holzämper 等(2006、2007^a、2007^b)發展之土地利用格局最佳化工具 LUPOLib 進行最佳景觀改造。LUPOLib 為 c/c++開發之軟體，以遺傳演算法(Genetic Algorithms, GA)為基礎進行最佳土地利用格局優選。遺傳演算法為一仿生之最佳化演算法(Goldberg, 1989)，目前已廣泛成功地運用於各類規劃中之最佳化問題(黃，2005)，其概念為仿效族群遺傳學中的基因庫變化過程，最終物競天擇找到最佳解，作為求解最佳化問題中數學計算之基礎，其程序為透過 2 進位編碼方式將決策變數值編碼為 0 與 1 組成之染色體，透過複製(production)、交配(crossover)及突變(mutation)等概念建構遺傳運算元(genetic operators)，計算產生下一代之染色體(編碼後之決策變數)，反覆運用遺傳運算元進行疊代計算來調整決策變數值，直至達成收斂條件來決定最佳決策

變數解為止。本研究以下所指之複製、交配及突變等，係指遺傳運算法數學運算時之仿生過程，並非實際上的生態過程；而染色體係指遺傳運算法將決策變數編碼模仿為染色體之仿生技術，並非生物學之染色體；母代、子代係指數學疊代運算時之前後代數，並非生物學之親緣關係；代數係指數學疊代計算次數，並非生物學上之親緣關係。

在景觀生態保育規劃問題中，決策變數為土地利用組成矩陣，決策者可依據限制條件來改變矩陣中之元素(對應區位之土地利用)，來進行景觀改造(土地利用規劃)，並計算改造後之目標函數值，以檢視該否朝向保育之期望。LUPolib 為嵌塊體層級(patch level)之土地利用格局最佳化工具，亦即最小規劃單元為嵌塊體，其將土地利用組成矩陣轉換為向量，向量中的元素代表為景觀中各嵌塊體之土地利用類型，進而將此向量做為遺傳演算法中之染色體(決策變數)，透過遺傳運算元疊代運算，最後收斂至最佳景觀，步驟如下所示：

- (1) 定義目標函數：與一般最佳化流程相同，首先須定義欲最佳化之目標，並將目標量化。本研究以不同權重組合下各目標物種之棲地適宜性平均值總和作為目標函數。
- (2) 染色體(決策變數)編碼：由於 LUPolib 為嵌塊體層級之景觀改造最佳化工具，其決策變數由景觀中各嵌塊體之土地利用類型組成，與傳統的 0、1 編碼不同。LUPolib 透過整數編碼的方式(意即以不同整數代表不同的土地利用類型)編入遺傳運算法之染色體中，代表最佳化問題中之決策變數，編碼後之染色體 g_{ai} 為代表景觀組成之向量，表示景觀中各嵌塊體之土地利用類型。
- (3) 隨機產生 100 組染色體作為初始解群集，並以目標函數值最佳之組作為現行解(current solution)。
- (4) 遺傳運算元執行：遺傳運算元包括交配(crossover)、突變(mutation)，透過遺傳運算元的執行，求得子代之染色體，並計算找

尋較現行解佳者，若找到較佳解則更新。交配計算過程為兩兩成對選取母代染色體，依據交配率選取該對染色體中相對位置之元素(嵌塊體之土地利用類型)交換，以產生子代染色體；突變為選取任一母代染色體，依據突變率選取該染色體中之元素，隨機改變其土地利用類型以產生子代染色體。因此，可透過遺傳演算元計算下一代之決策變數值。本研究設定交配率 p_{Cross} 為 0.5、突變率 p_{Mut} 為 0.01。

- (5) 收斂條件達成：LUPolib 包含兩類收斂條件設定，即達到最大計算收斂代數(maximum iteration number)與連續收斂偏差維持值最小代數。本研究中分別設定最多執行 1,000 代及連續 100 代之目標函數誤差小於 0.01%，在達成任一狀況下視為收斂。

2.3.2 多目標規劃

多目標決策問題廣泛出現在各類規劃問題中，其普遍的特徵為規劃問題中具有多個目標，且各目標間價值體系通常無法比較且彼此衝突，故在滿足單一目標狀況下，便無法滿足其他目標。因此求取非劣勢解可提供決策者不同角度的決策支援。多目標決策問題有許多解法，本研究採取權重法，給予各目標函數值權重，將其合併成單一目標函數，求解出該目標函數極值，所得之解即非劣勢解。不同權重組合可得到不同之非劣勢解，權重組合愈多，所得結果愈趨近真正非劣勢解集合(楊，2002)。LUPolib 為一具有彈性的最佳土地利用格局優選工具，透過目標函數的權重設定，可考量一個或多個目標進行土地利用配置之最佳化，權衡各目標後(trade-off)提出優化土地利用配置最佳方案，本研究目標函數如下所示：

$$\text{Max}_{\bar{a}} \{W_V HSI_V + W_S HSI_S + W_G HSI_G\} \dots\dots\dots (7)$$

其中， \bar{a} 為決策變數向量，亦即景觀組成向量； HSI_V 、 HSI_S 、 HSI_G 分別代表黃腹仙鶴、強腳樹鶯與綠背山雀之平均棲地適宜性； W_V 、 W_S 、 W_G 分別代表各目標之權重，且 $W_V + W_S + W_G = 1$ ；在

表 2 羅吉斯迴歸結果

驅動力因子	黃腹仙鶺	強腳樹鶺	綠背山雀
原生林面積(m ²)	3.59	-4.169	2.305
人工針葉林面積(m ²)	4.278	-5.173	-3.575
人工闊葉林面積(m ²)	-	-	-
原生林嵌塊體內聚指數	-	0.025	-
人工針葉林內聚指數	-	0.01	-
人工闊葉林內聚指數	-	0.012	-
建物及果園邊界總長(m)	-0.117	-	-
建物及耕地邊界總長(m)	-	0.046	-0.105
果園及耕地邊界總長(m)	-0.256	-	-
果園及人工針葉林邊界總長(m)	-0.094	-0.082	-
果園及人工闊葉林邊界總長(m)	-	-	-
原生林及耕地邊界總長(m)	-	0.064	-0.089
耕地與人工針葉林邊界總長(m)	-	-0.057	0.14
耕地與人工闊葉林邊界總長(m)	-	-0.08	-
大嵌塊體指數(lpi)	-0.022	-0.01	-
與建地距離(m)	0.003	0.008	-
與道路距離(m)	-	0.022	-0.028
常數截距項	-4.001	-3.589	-3.521
ROC	0.706	0.766	0.749

權重設定上，以每 1/9 為間隔，因此共計分析 28 組案例來代表非劣勢解。

由於原生林禁止砍伐，而水體及建地不易被改變，在規劃案例設定上，本研究設定可被變動的土地利用類型包含果園、耕地、人工針葉林及人工闊葉林；假定果園和耕地最大可提供其 35% (6.6 公頃)面積進行棲地復育植被重建 (revegetation) 工作，也可將人工針葉林或人工闊葉林改造作為邊緣棲地營造。

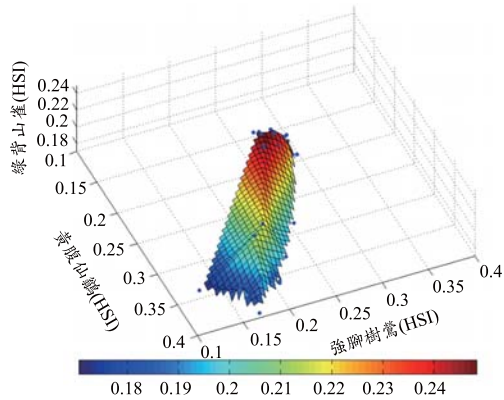
三、結果與討論

3.1 棲地適宜性分析

本研究透過羅吉斯迴歸分析建立各目標物種之棲地適宜性模式，截距常數與其他驅動力因子之參數推估結果如表 2 所示。透過分析接收操作特徵曲線 (Receiver operating characteristic, ROC)，各模式之 ROC 曲線下面積值 (Area under the Curve of ROC, AUC) 皆大於 0.7，可用以推估目標物種棲地適宜性之空間分佈。羅吉斯迴歸各項趨動性因子之係數，可作為喜好或厭惡之表

示。迴歸結果顯示，黃腹仙鶺喜好原生林及針葉林 (原生林及人工針葉林面積指數係數皆為正值)，排斥人類活動頻繁土地利用類別之邊緣，如建地、果園及耕地及建物 (邊緣長度指數及距建物距離係數皆為負值)，最後，黃腹仙鶺喜好小塊棲地嵌塊體 (大嵌塊體指數 (lpi) 係數為負)；強腳樹鶺喜好耕地與連結性較高原生林的邊緣 (邊緣長度指數為正、原生林內聚指數係數為正)、排斥大面積原生林或人工針葉林嵌塊體 (面積指數、大嵌塊體指數係數為負) 與建物及道路 (與道路、建地距離係數為正)；綠背山雀則偏好原生林、排斥針葉林 (原生林及人工針葉林類別面積指數分別為正與負)。

與過去文獻相比，各物種棲地偏好與前人研究大致相同。在黃腹仙鶺棲地喜好上，劉等 (2010) 指出其喜愛闊葉樹林的中上層，甚少停棲於針葉樹上。相較之下，本研究分析結果發現黃腹仙鶺雖確實偏好原生林，但在梅峰地區仍發現黃腹仙鶺亦活動於針葉林嵌塊體中；此現象與顧 (2004) 探討武陵地區鳥類群聚與土地利用之關係結果



註：HSI代表棲地適宜性，不同顏色(Z軸)代表綠背山雀棲地適宜性指數值。

圖 2 28 種權重組合下最佳景觀改造之非劣勢解集合

類似，顧(2004)亦曾於繁殖季於針葉林中發現黃腹仙鶴的行蹤(1.66 隻/公頃，於針葉林中層發現頻度為 0.24)。另外，顧(2004)並未在菜園與果園中發現黃腹仙鶴，此結果與本研究指出黃腹仙鶴排斥人類活動嵌塊體邊緣結果相符。聚焦於景觀尺度(Landscape scale)，本研究亦發現黃腹仙鶴可能喜好鑲嵌於不同土地利用形態中之原生林或針葉林嵌塊體。在強腳樹鶯棲地喜好上，劉等(2004)指出強腳樹鶯甚少進入闊葉森林內且經常活動於密叢中；顧(2004)亦發現強腳樹鶯於草本及灌叢間出現的頻度較高，兩篇研究結果皆可支持強腳樹鶯喜好耕地邊緣灌叢之結果。最後，在綠背山雀棲地喜好上，劉等(2004)指出其喜好於闊葉樹林中活動，會利用森林、庭園或耕作區；顧(2004)的分析指出於繁殖季，綠背山雀於天然混合林中發現的平均密度最高。與前人文獻比較結果，本研究除了可以支持前人研究外，更重要的是提供了景觀尺度下，目標物種喜好的棲地型態與景觀配置。

3.2 非劣勢解群集

圖 2 為多目標規劃 28 個非劣勢解內插求得之三維曲面。在給定不同的權重組合下，28 組非劣勢解集合皆能適度地提升各目標物種之棲地適宜性(黃腹仙鶴、強腳樹鶯及綠背山雀之原棲地適宜性分別為 0.19、0.13、0.18)。進一步兩兩配

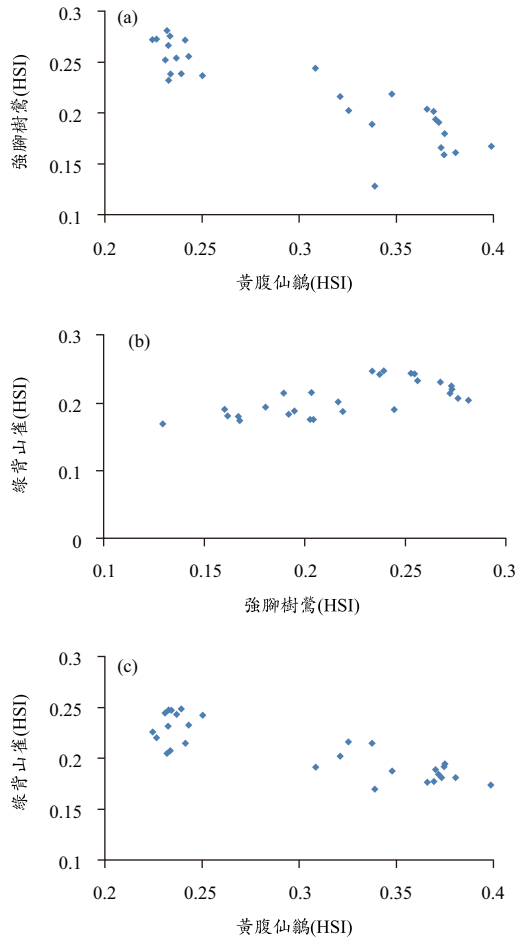


圖 3 各指標物種間目標函數值競合情形。其中，(a)黃腹仙鶴與強腳樹鶯目標函數競合情形；(b)強腳樹鶯與綠背山雀目標函數競合情形；(c)黃腹仙鶴與綠背山雀目標函數競合情形

對分析以探討三個目標物種之棲地適宜性值於多目標規劃中之競爭合作情形(以下競爭係指在不同的權重組合下兩目標指數值呈現負相關趨勢，而非生態學上兩物種競爭之定義；而合作係指不同權重組合下兩目標函數值呈現正相關趨勢，而非生態學上合作共生之定義)，以圖 3 表示目標函數個別配對之非劣勢解。由圖 3(a)顯示，黃腹仙鶴與強腳樹鶯之目標函數值呈現競爭的情形，當黃腹仙鶴之棲地適宜性隨權重增加而增加時，強腳樹鶯之棲地適宜性則下降；圖 3(b)則顯示強腳樹鶯與綠背山雀之目標函數值則略為

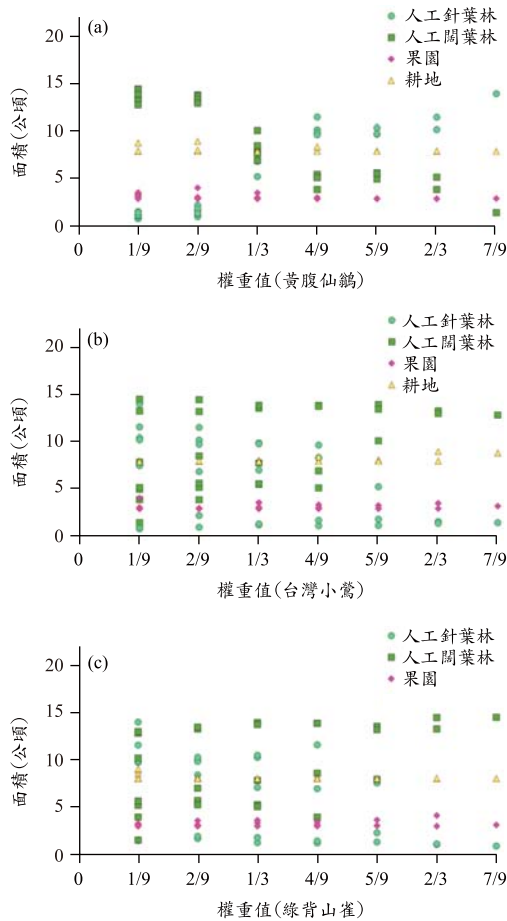


圖 4 非劣勢解土地利用組成分析(a)隨黃腹仙鶴權重改變；(b)隨強腳樹鶯權重改變；(c)隨綠背山雀權重改變

呈現合作情形，強腳樹鶯之棲地適宜性增加時，綠背山雀之棲地適宜性亦略為上升；最後，由圖 3(c)顯示綠背山雀與黃腹仙鶴之目標函數值則呈現競爭，當綠背山雀之棲地適宜性上升時，黃腹仙鶴之棲地適宜性則下降。

進一步探討分析，當黃腹仙鶴目標函數權重越高時(圖 4(a))，景觀中較多區域將被改造為針葉林，人工闊葉林面積因此減少，導致綠背山雀之棲地適宜性下降；而耕地雖無明顯隨黃腹仙鶴權重增加而變化，但耕地面積減少使耕地與原生林之邊緣長度亦減少，造成強腳樹鶯棲地適宜性下降。因此，黃腹仙鶴分別與強腳樹鶯及綠背山雀之目標函數值呈現競爭情形。反之當強腳樹鶯

及綠背山雀之權重增加時(圖 4(b)、圖 4(C))，人工針葉林的面積減少而人工闊葉林面積增加。因此，排斥人工針葉林為棲地嵌塊體之結果，使強腳樹鶯與綠背山雀之目標函數值呈現略為合作的情形。

3.3 非劣勢解土地利用配置不可取代性分析

本研究進一步將 28 組非劣勢解(即不同權重組合下之最佳景觀)進行疊圖分析，即將 28 組非劣勢解疊圖，分析各嵌塊體被指配成何種土地利用類型，及被指配成該類型的次數。藉此探討 4 種可變動的土地利用類型之不可取代性之空間分佈。其中，圖 5 顯示分佈於西半部之人工針葉林嵌塊體有較高的不可取代性；相較於人工針葉林不可取代性分佈，圖 6 則顯示分佈於東半部的人工闊葉林嵌塊體有較高的不可取代性；圖 7 顯示分佈於東部、東南部及西北部之耕地嵌塊體有較高的不可取代性；最後，圖 8 顯示分佈於南部之果園嵌塊體有較高的不可取代性。

比較人工針葉林不可取代性之空間分佈，可發現研究區域西半部之小嵌塊體較東半部較大嵌塊體之不可取代性高，其原因為研究區域中部之小嵌塊體可以維持或轉變為人工針葉林型態，以滿足黃腹仙鶴偏好農業景觀中小針葉林鑲嵌體的特性，藉此提升黃腹仙鶴之棲地適宜性。因此，研究區域西半部之人工針葉林的不可取代性較高。在人工闊葉林不可取代性之空間分佈上，相較於人工針葉林，人工闊葉林則以研究區域東半部較大嵌塊體之不可取代性較高，其原因為將研究區域東半部的較大嵌塊體改造為人工闊葉林容易增加森林棲地面積並使森林嵌塊體有較高的連結性，可藉此提升綠背山雀及部分提升強腳樹鶯(增加森林，可能順代增加森林的邊緣)之棲地適宜性。在耕地不可取代性空間分佈上，以研究區域東部、東南部兩塊較大耕地嵌塊體不可取代性較高，原因為此兩嵌塊體與原生林的邊緣長度較長，其邊緣提供強腳樹鶯棲息活動之所，故不可取代性較高。最後，果園嵌塊體不可取代性位置雖與增進 3 個目標物種的棲地適宜性無直接關聯，但為維護農場經濟收入，此結果

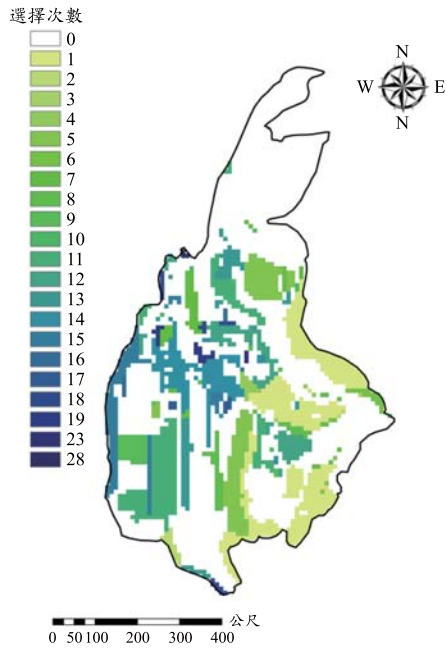


圖 5 人工針葉林不可取代性空間分佈圖

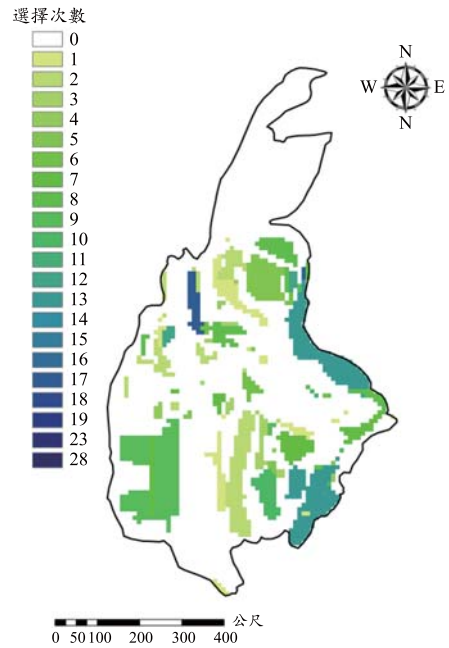


圖 7 耕地不可取代性空間分佈圖

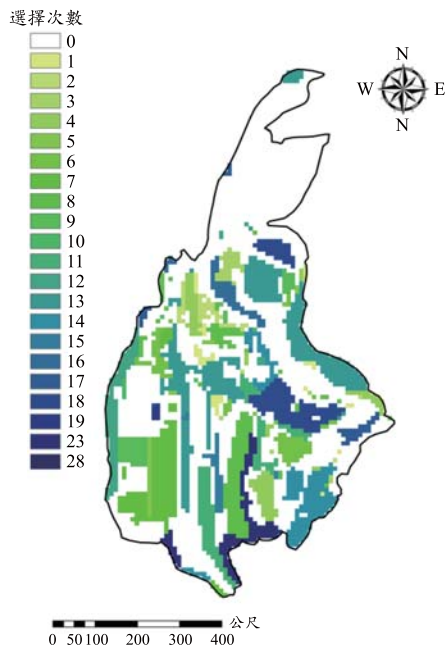


圖 6 人工闊葉林不可取代性空間分佈圖

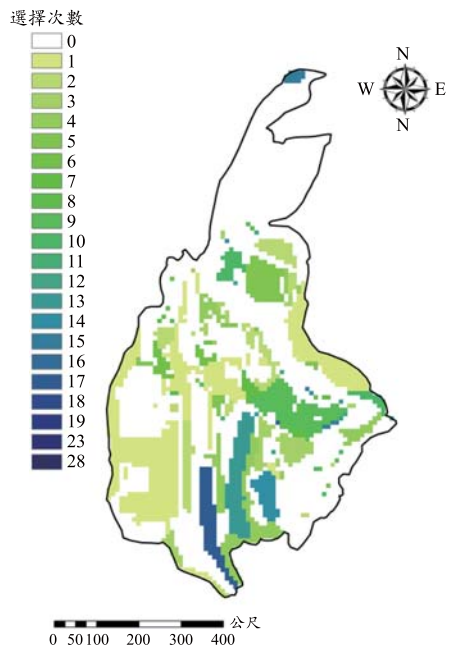


圖 8 果園不可取代性空間分佈圖

可提供決策支援於土地利用規劃政策，告訴決策者維護哪些果園嵌塊體對於目標物種棲地適宜

性影響最小。以上不可取代性地圖可作為土地利用規劃者考量棲地復育決策之支援依據。

四、結論與建議

本研究成功透過景觀生態保育多目標規劃分析提供 28 組非劣勢解，提供土地利用規劃者不同角度進行最佳景觀改造。除此之外，本研究亦完成梅峰地區黃腹仙鶴、強腳樹鶯及綠背山雀的棲地偏好與景觀空間結構的關聯分析。最後，分析彼此棲地適宜性間的競合關係，獲得結論與建議歸納如下：

1. 具有明顯棲地喜好差異之物種於景觀改造時可能為競爭或合作情形。因此，當進行景觀生態保育規劃時，建議將多元物種之棲地適宜性納入考量，進行多目標規劃分析，以保育整體之生物多樣性。
2. 羅吉斯迴歸分析指出，在梅峰農場區域，黃腹仙鶴喜好鑲嵌於景觀基質之小型森林嵌塊體；強腳樹鶯喜好耕地與森林邊緣之灌叢；綠背山雀則喜好大塊闊葉林嵌塊體。過去研究分析多僅考量鳥類出現與土地利用組成或植被結構之關係，本研究運用成功運用羅吉斯迴歸建立景觀空間結構與鳥類棲地適宜性關聯，建議未來相關研究可更進一步聚焦於景觀尺度，將景觀空間結構納入考量，以利整體土地利用規劃。
3. 透過多目標規劃分析，可了解各目標函數於棲地偏好上為競爭或者合作，提供景觀改造參考。於梅峰農場，黃腹仙鶴分別與強腳樹鶯及綠背山雀之棲地適宜性呈競爭情形，而綠背山雀與強腳樹鶯之棲地適宜性則略呈合作共同上升之情形。因此，在景觀改造時必須將不同棲地喜好之物種納入考量，避免土地利用規劃朝向特定物種喜好之景觀配置，導致其他物種的棲地適宜性下降。
4. 透過非劣勢解疊圖分析，可了解各土地利用類型不可取代性之空間分佈，可提供決策者決策支援。於梅峰地區，依據疊圖分析結果，可考量於中部及西半部增加小嵌塊體針葉林棲地；於東半部較大嵌塊體可考慮改造為人工闊葉林；東部兩塊耕地可保留以維持較長之森林與耕地邊緣；若以經濟觀點欲維持果園，則可

考量南部區域。非劣勢解分析結果可提供決策者較全面的觀點，可由多角度決策支援中(不同權重組合)，了解需要維護重點，在實際操作，比全面更新景觀來的即時且可操作性高。

5. 未來研究可利用景觀生態保育多目標規劃分析於其他區域棲地復育選擇或在現地(on-site)之生態補償以平衡人為開發造成之棲地破壞與威脅。

參考文獻

1. Aspinall, R. J., and Pearson, D. M. 2000. Integrated Geographical Assessment of Environmental Condition in Water Catchments: Linking landscape ecology, environmental modelling and GIS. *Journal of Environmental Management*. 59, 299-319
2. Forman, R. T. T., and Godron, M. (Eds.). 1986. *Landscape Ecology*. New York - John Wiley & Sons, Inc.
3. Goldberg, D.E., 1989. *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading.
4. Holzkämper, A., Lausch, A. and Seppelt, R. 2006. Optimizing landscape configuration to enhance habitat suitability for species with contrasting habitat requirements. *Ecological Modelling*, 198, 277-292.
5. Holzkämper, A., and Seppelt, R. 2007a. Evaluating cost-effectiveness of conservation management actions in an agricultural landscape on a regional scale. *Biological Conservation*, 136, 117-127.
6. Holzkämper, A., and Seppelt, R. 2007b. A generic tool for optimising land-use patterns and landscape structures. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1801-1804.
7. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1994. *Landscape Monitoring and Assessment Research Plan*. US EPA 620/R-

- 94/009.
8. Westphal, M. I., Field, S. A., and Possingham, H. P. 2007. Optimizing landscape configuration: A case study of woodland birds in the Mount Lofty Ranges, South Australia. *Landscape and Urban Planning*, 81, 56-66.
 9. 王維辰、許育誠，2011，太魯閣地區農地與廢耕地之鳥類群聚，*國家公園學報*，21:9-20。
 10. 林裕彬、鄧東波、吳振發，2001，景觀生態計量方法於農業景觀生態系統之空間結構探討，*農業工程學報*，47:74-91。
 11. 林裕彬、曾正輝、鄧東波，2002，景觀生態指數於集水區整體景觀時空間型態變遷探討，*農工學報*，48:58-82。
 12. 林貞瑋，2006，以領域描圖法研究梅峰地區繁殖鳥類密度，*國立台灣大學森林環境暨資源學系碩士論文*。
 13. 林大利，2011，破碎地景中鳥類群聚組成及棲地偏好，*國立台灣大學森林環境暨資源學系碩士論文*。
 14. Botequilha 等著，張俊彥、林裕彬等譯，2011，*景觀量測*，五南圖書出版公司。
 15. 黃浚璋，2005，應用遺傳演算法及類神經網路於地表地下聯合營運，*國立交通大學土木工程研究所碩士論文*。
 16. 楊朝仲，2002，應用遺傳演算法與可微分動態規劃於地表地下聯合營運之多目標規劃，*國立交通大學土木工程研究所博士論文*。
 17. 劉小如、丁宗蘇、方偉宏、林文宏、蔡牧起、顏重威，2010，*台灣鳥類誌*。
 18. 蕭維德，2013，農場尺度生物多樣性保育系統性優化規劃方法-以梅峰農場為例，*國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士論文*。
 19. 顧芝寧，2004，武陵地區鳥類群聚與土地利用類型之關係，*國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文*。
 20. 行政院農業委員會，*野生動物保育法*，2002。
 21. 經濟部水利署，*水庫永續性與支援決策系統之整合評估*，2011。

收稿日期：民國 102 年 12 月 6 日

接受日期：民國 103 年 2 月 13 日