

# 土地利用之系統性保育規劃策略及模式研究—集水區生態系統服務面向

林裕彬 洪甄蔚 余佳珍 張文豪 陳冠維 詹婕妤

## 1. 計畫背景、目的及重要性說明

人類社會及福祉之永續發展取決於對地球生態系統之妥善維護與管理，以確保自然環境及生態系統資源得以保存並永續使用。然而，在人類對於自然生態系統所提供的「服務」如食物和乾淨水資源等之需求提高的同時，人為行為亦不斷消耗許多生態系統達到此需求之能力。自 90 年代起，生態系統服務(Ecosystem Services)之概念蓬勃發展，且依其英文涵意可解釋為「生態系統所成就之有形與無形產業」，即泛指生態系統與環境所提供給人類社會之資源、功能與服務。根據聯合國「千禧年生態系統評估組織」(Millennium Ecosystem Assessment)提出之定義，生態系統服務包含：(1) 基本維生(Supporting)如營養循環、土壤成形和初級生產等；(2) 供給(Provisioning)如食物、淡水、木材和木料以及燃料等；(3) 調節(Regulating)如氣候調節、洪災調節、疾病調節和水質淨化等；(4) 文化(Cultural)如美觀、心靈、教育和休閒等(Hassan et al., 2005)；生態系統服務與人類福祉之關聯性如圖 1 所示。

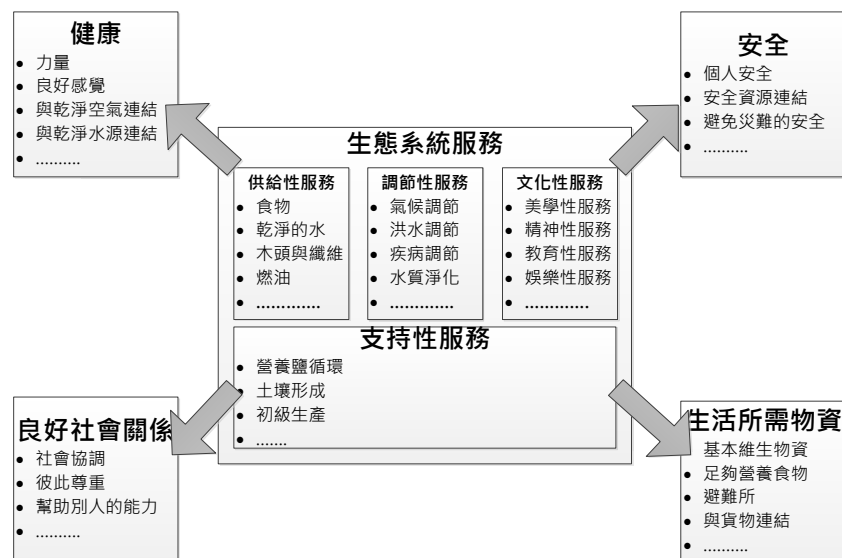


圖 1：生態系統服務與人類福祉之關聯性(改繪自 Hassan et al., 2005)

生態系統服務為人類自生態系統中所獲得之益處，藉生態系統與其生物多樣性產生相關過程與生活環境，以維持並增進人類生存與福祉(Nelson and Daily, 2010)。而生態系統之動態變化受到地區性、區域性及全球性等不同尺度土地利用/覆蓋變遷之影響。另一方面，人類決策與活動直接影響土地利用型態與變遷，使土地利用為人類與自然相互影響最為密切的環節。土地利用型態與空間格局影響生態系統與環境之水文、生態、物理及社會經濟等過程，其變遷亦直接衝擊生態系統服務。例如，砍伐或復育一地區多年生植被等措施造成之土地利用變遷會影響當地生態系統提供之多項服務：如維持土壤健康並減緩土壤沖蝕、保留碳存量、過濾空氣及水中污染物顆粒、保存土層含水量、調節微氣候、提供生物棲息避難場所、食物和纖維，並具有美觀、休閒、科學與文化等教育與價值(Crossman et al., 2013)。然而，生態系統及其服務之動態與變化亦可能反饋於土地利用/覆蓋之空間格局與變遷，進而影響人類與環境的活動及社會經濟狀況。從社會科學之觀點，土地科學之精髓在於探討人類決策對地景和土地系統之衝擊，以及其不同社會角色之交互作用。在人類對於自然之淨初級生產力佔用程度研究中，藉由自然與社會經濟過程之整合分析，探討人類土地利用行為與強度對於生態系統

服務供給造成之衝擊。此外，因自然環境之淨初級生產力受生態系統對其所提供服務之恢復力與涵容力的直接影響，生態系統服務亦取決於淨初級生產力(Crossman et al., 2013)。簡而言之，生態系統服務是人類所擁有的關鍵自然資本，也是人類生存和發展的物質基礎和基本條件；而人類對於土地利用與生態系統服務間關係的認知與價值觀等，為生態系統服務經營管理策略之規劃提供重要參考訊息。因此，土地利用/覆蓋、生態系統及其提供之服務與人類社經活動三者之間關係密切，其交互作用如圖 2 所示。

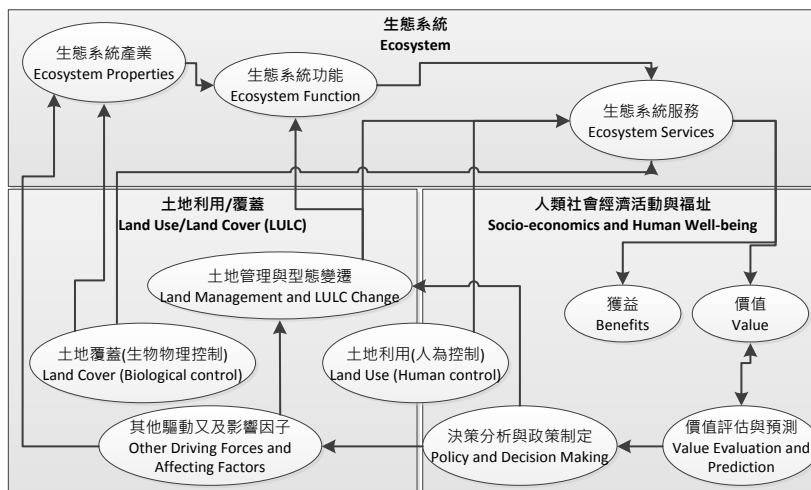


圖 2：土地利用/覆蓋、生態系統與人類社經活動之關聯 (修改自 van Oudenhoven et al., 2012)

土地利用/覆蓋類型除直接影響生態環境特性與功能及其所提供之服務外，亦與大氣情況進行交互作用，影響氣候現況與未來之變化；而一地區之氣候型態與變遷亦同時影響其生態系統之功能與服務，且為改變該地區生態系統之主要直接驅動力(Howe et al., 2013)，相關研究指出近百年在平均氣溫及降雨型態上具區域差異之大規模變動，這些變化影響生態系統結構與空間分布，造成陸域及水域生態系中物種分佈及其他交互作用之變化(Burkhard et al., 2012)。因此，土地利用、氣候變遷與環境生態三者關係密切(圖 3)，且其交互作用隨處可見(Pyke and Andelman, 2007)。Lorencová 等人(2013)指出，氣候與土地利用之變遷為人類行為活動造成之全球性環境壓力中的主要項目，且兩者皆在不同尺度上，對關鍵性生態系統服務之供給影響甚大，如碳儲存量、水文循環及糧食與纖維供給等。Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)將評估氣候變遷對集水區生態系統及其服務之影響視為建立減緩全球暖化影響之策略與政策的重要一環 (IPCC, 2001)。在集水區尺度中，土地利用/覆蓋變遷與區域氣候變異影響集水區的水文循環(Lin et al., 2007; Pyke and Andelman, 2007)如河川流量、地下水、蒸發散等水文現象；且進一步衝擊河川生態系統及其可提供之服務。因此，如何改變土地利用/覆蓋的格局和過程，以增加生態系統之回復力及其服務之永續使用性，並因應未來氣候變遷對生態系統及其服務之影響為當前重要研究課題。

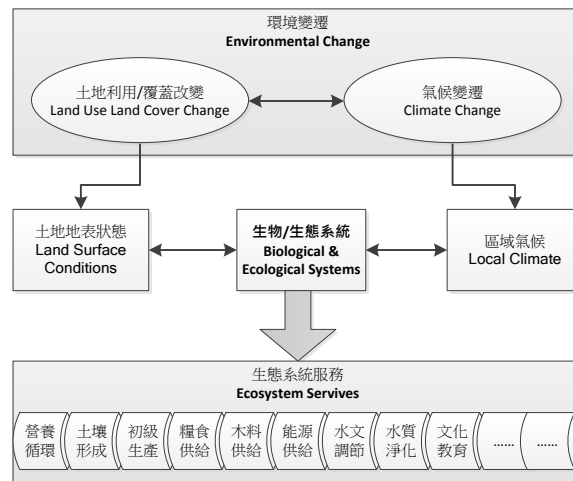


圖 3：土地利用與覆蓋、氣候狀況與生態系統之相關性(參考 Pyke and Andelman, 2007 和 Lorencová et al., 2013 並加以整理修改)

綜合上述討論，研究者需探討並分析如何將土地利用/覆蓋改變、土地管理、生態系統與氣候動態及人類行為與社會對地區景觀之影響與各種過程之交互作用，演繹於生態系統服務之供給、使用情形及其價值上(Kremen, 2005; Nelson and Daily, 2010)。換言之，為確保生態系統服務與環境資源之永續利用，研究者需瞭解並量化由不同自然過程與社會驅力等交互作用造成之土地利用/覆蓋型態與空間格局、氣候狀況和生態系統服務之變化。然而，生態系統所提供之服務與功能，其價值無法直接以人類貨幣衡量，故常被誤解為可免費取用且理所當然；其重要性與珍貴價值往往在失去時才被突顯，使管理階層正視生態系統服務之經營、管理以及保育等議題。事實上，生態系統服務之經營管理為維持此系統服務之重要一環；其藉由適當的經營管理可不斷產出維繫生命之服務(Daily, 2000)，並可藉由適當的會計方法量化其價值。完善的政策與管理計畫被視為可減緩並停止生態系統劣化，進而增加生態系統提供之資源，以增進人類福祉之可行且必要措施。為使完善的管理計畫及決策得以執行，對於生態系統及其服務之瞭解與資訊，為管理計畫擬定與決策制定之先決條件。依據 Hassan et al.(2005)之生態系統服務經營及管理架構(圖 4)評估步驟包含：生態系統服務之確立、生態系統服務之定性與定量、建立保護與管理措施和監測生態系統服務等。相較於物質型與財務型資產，自然資產(如生態系統及其環境特性與結構和物種多樣性等)之存量，不易直觀定義，故施行經營與管理措施前，需先釐清管理之對象及目標，將生態系統服務之資源產出者與消費者作系統化、數量化之條目編列。確立管理與保育對象後，需對其特性進行分析與評估，即生態系統服務之定性與定量研究。獲得各生態系統服務之定性與定量資訊後，再藉由客觀之科學方法進行保護措施之模擬、分析、擬定；並持續監測生態系統服務，利用該服務之實際觀測資料驗證並追蹤經營及管理策略之可行性、適宜性及保育成果等。

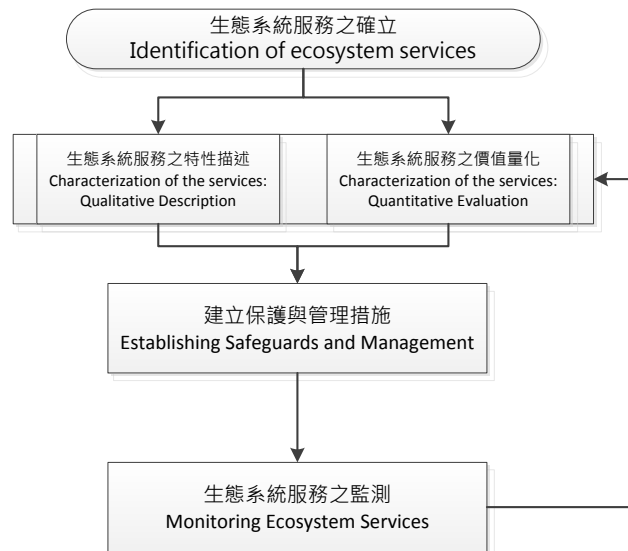


圖 4：生態系統服務經營管理架構(資料參考自 Hassan et al., 2005)

近年來，生態系統服務已被建議應為保育規劃者評估保育優先區域時之重要考量(Egoh et al., 2007)，生態系統服務之分析模擬亦逐漸應用於決策分析相關研究，在景觀尺度上以生態系統供給和其價值以及各服務間之權衡關係為模擬目標之模式亦蓬勃發展(Nelson and Daily, 2010)，其中，不少研究致力於如何更完善的量化並評定生態系統服務之價值與其對人類福祉之貢獻，使生態系統服務價值成為土地利用決策分析時的重要考量(Crossman et al., 2013)。生態系統服務之模擬、空間分布分析(mapping) (Kareiva et al., 2011)和價值評估(Gomez-Baggethun et al., 2010; TEEB, 2010)等分析方法與資料，也愈發應用於瞭解生態系統對土地系統供給上之競合關係以及已改善之管理政策如何支持生態系統服務永續利用或多元功能等研究(Power, 2010; Bryan and Crossman, 2013)。生態系統服務之空間分布分析與制圖為將其納入保育評估之直接方法之一，且有益於對生態系統服務之生態特性和空間區位瞭解，使規劃者得以有效率管理這些服務(Kremen and Ostfeld, 2005)。然而，許多生態系統服務因其之間關聯性及測量方法尚未釐清，其空間分析之研究不易以現地方式進行。僅管如此，仍有相關研究致力於生態系統服務空間分佈與區域特性之模擬分析，如 Egoh 等人(2008)研究南非地區地表水供給、水文循環、土壤堆積、土壤保留與碳存量等五項生態系統服務之空間分佈特性並繪製地圖，藉由各服務之熱點(hotspot)分佈圖，相互比較，探討其交互作用，並將分佈圖相乘，提供南非地區全國尺度之環境生態管理與保育之規劃參考。Chiang 等人(2013)以臺灣中部為研究區域，量化該地區之生態系統服務及其受颱風、地震等自然干擾後，土地利用/覆蓋等變化造成之時、空間改變；並藉由生態系統服務之熱點分析提供其管理策略參考。

在保育評估相關研究中所發展的技術與軟體亦提供生態系統服務規劃管理之分析工具，如近二十年來廣泛應用於生物物種及其生存環境保育區規劃之系統性保育規劃(Systematic conservation planning)(Pressey et al., 1993; Noss and Cooperrider, 1994; Davey and Phillips, 1998; Pressey, 1999; Margules and Pressey, 2000; Groves, 2003; Noss, 2003; Leslie, 2005)。為實現生態及物種保育規劃之目標，此方法考量研究區域之需求、限制和預算等因素對於保護區在大小、形狀與如何劃分等不同層面，制定適當之管理政策(Smith et al., 2006)，藉以達成區域尺度之設定目標，以確保生態系統的健全。此規劃方法重點在於針對保護目標，考量研究區域全面的生態環境與生物多樣性，如何選取、設計並管理其保護區域，以達到目標之保育需求(Mace et al., 2007)。系統性保育規劃不僅可以單一或多個特定生物物種為保育目標，近年來更有研究將環境生態特性，如生態系統(e.g. Kremen et al., 2008; Lehtomäki et al., 2009)和生態系統服務(e.g. van Jaarsveld, 2005; Chan et al., 2011; Moilanen et al., 2011a; Thomas et al., 2012)作為目標，進行保護區規劃分析；例如 van Jaarsveld 等人(2005)以不可取代性(irreplaceability)分析規劃生態系統服務之優先保護區地圖。系統性保育規劃研究概念及其對應方法如圖 5 所示；其

分析步驟包括：確認保育規劃之利益相關者、確認保育規劃之目的、收集資料、建立保育目標之保護區設計原則、複查現存之保護區且評估與目標之差距、選擇額外保護區位址、實施保育政策與管理和維護並監測保護區等八個主要步驟，以達到保育目標之保護區規劃與管理(Hale and Lamb, 1997; Margules and Pressey, 2000; Tear et al., 2005; Smith et al., 2006; Mace et al., 2007; Ardron et al., 2008)。本計畫參考 Margules and Pressey(2000)、Moilanen et al.(2009a)和 Watson et al.(2011)之系統性保育規劃概念與分析步驟，統整為圖 5。

綜合以上論述，生態系統服務與土地利用/覆蓋、人類行為及土地管理，以及氣候型態和變遷等息息相關並互相影響，形成錯綜複雜之交互作用，影響人類社會經濟與福祉。近年來，更有許多跨領域研究團致力於發展並升級預測生態系統服務之相關模式；因此，發展以技術基礎工具如地理資訊系統(GIS)模式之易於使用者操作之土地利用/覆蓋和生態系統服務整合型模式成為如何有效率評估不同決策情境下之生態系統服務永續使用性的熱門關鍵議題。然而，目前雖有多種研究方法及工具致力於上述各領域，如生態系統服務之評估、價值量化及其空間分布；土地利用/覆蓋之現況分析、管理政策之影響與未來變化及其與對環境生態造成之衝擊；氣候變遷對生態環境、生物族群、地景結構和土地覆蓋管理政治之影響等，卻少有研究進行生態系統服務、土地利用與管理和氣候變遷之整合性研究及分析，並應用系統性保育規劃方法模擬，提出為因應極端氣候事件日趨頻繁與都市化日益嚴重等情況下，可維持甚至增加生態系統功能及其服務之保育策略。而為達此目標，除應用多種現有分析工具及模式如生態系統服務量化計算模式、系統性保育規劃模式、土地利用與變遷模式和氣候變遷情境等外，更需將上述工具和模式整合成以GIS為介面之整合型分析工具，提供研究人員一使用者導向之生態系統服務系統性保育規劃整合工具，進行連貫性分析研究。

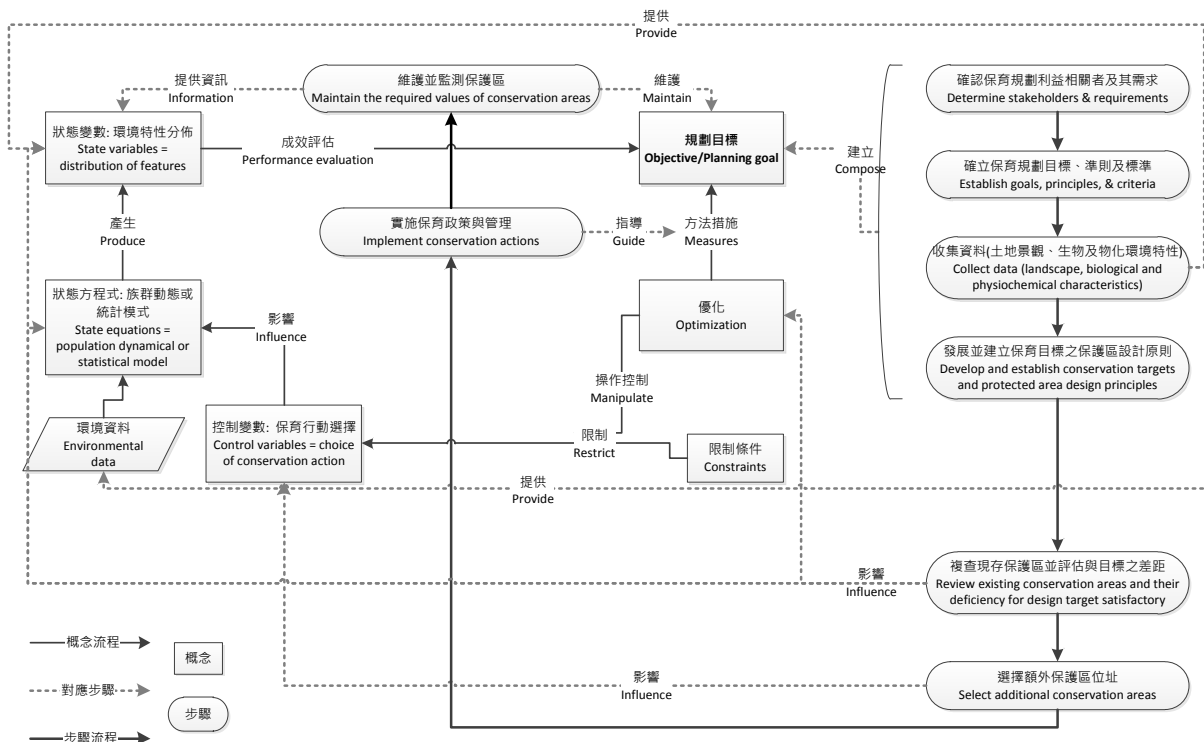


圖 5：系統性保育區規劃概念圖及分析步驟 (整理並修改自 Margules and Pressey, 2000; Moilanen et al., 2009a; Watson et al., 2011)

因此，本研究延續計畫主持人近年來之國科會計畫成果，擬以三年為期，以陳有蘭溪和大屯溪等兩個集水區為操作案例，分析研究區域在氣候現況與未來不同氣候變遷情境下，提供之生態系統服務(ES)；並以區域空間相關量測指標(Local Indicators of Spatial Association,

LISA) 分析ES之空間相關係，找出其ES熱點。將ES熱點依其特性以分組和不分組兩種方式，進行其熱點時、空間分佈與特性分析，並針對分析結果進行ES保育目標之系統性保育規劃，再以土地利用與覆蓋改變為策略，提出欲達到目標ES之保育成果，未來土地利用及保育區規劃之決策參考方案。此外，於研究期間邀請德國、荷蘭、澳大利亞國際知名學者擔任諮詢委員。除利用目前已流通之相關分析工具和電腦模式進行研究外，本計畫將同時進行整合型模式開發與建立，以期將多個不同分析工具與模式串聯並整合為一套GIS介面之生態系統服務系統性保育規劃模式。研究架構與流程如圖 6所示：第一年回顧並分析集水區生態水文現況、土地利用與覆蓋串列、生態系統服務、未來氣候變遷對土地利用與環境生態可能造成之衝擊、區域空間相關量測指標、多目標分析與多元迴歸樹、以及系統性保育規劃方法及模式等相關文獻。藉由上述回顧與資料收集，進行研究區域生態系統服務現況之評估與量化，接著以多元迴歸樹(Multivariate regression tree) 之統計方法將不同的ES進行分組，並利用區域空間相關量測指標(LISA)分析各ES熱點之空間聚集程度與特性；邀請國際學者進行實質交流，並申請為全球土地計畫之Endorsed Project。第二年接續上述研究，根據分析結果，擬定欲保育之ES項目，以系統性保育規劃模式(Marxan 和 Zonation)進行目標ES之生態系統服務保育區規劃，並以土地利用型態變遷模式CLUE-s模擬欲達保育規劃目標之未來土地利用情境；並與歐盟計畫交流。第三年致力於前兩年結果與開發整合之模式驗證；重新計算土地利用變遷情境下之ES價值，與現況下之ES比較，分析經保育規劃之情境是否達成ES之保育目標，以期提供決策者針對一項或多項生態系統服務之保育策略規劃參考意見。此外，以不同氣候變遷情境作為未來氣象資料之參考依據，重複前兩年之生態系統服務量化、價值評估、空間熱點分佈及保護區規劃等分析，探討氣候變遷對未來生態系統服務及土地利用/覆蓋之影響和交互作用。同時，將研究期間開發之GIS整合型生態系統服務系統性保育規劃模式應用於研究案例，比較其規劃結果，作為保育區規劃系統之驗證。

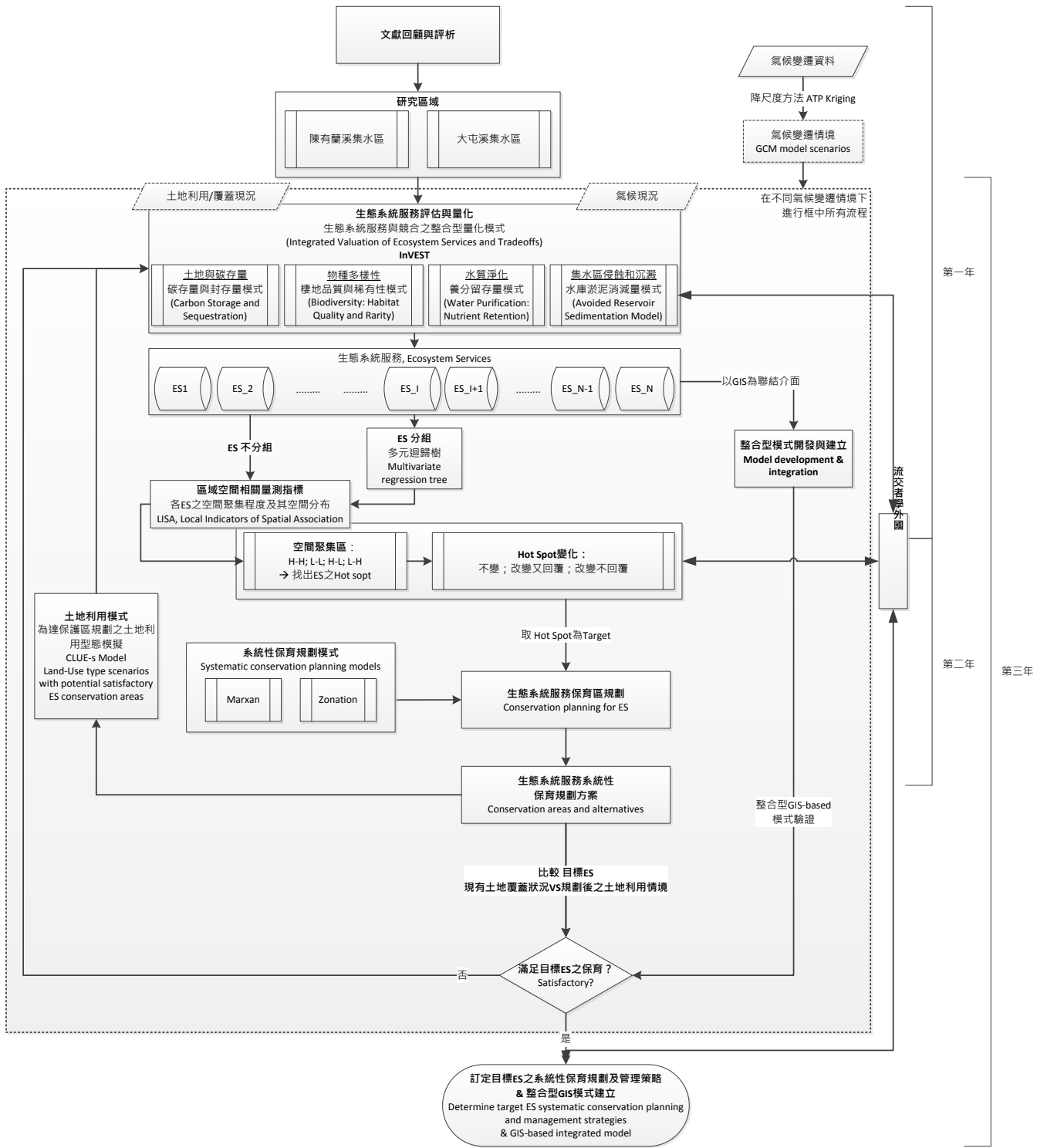


圖 6：研究架構與概念

## 2. 研究方法

本研究以現有之土地利用型態與氣候狀況為基準，應用生態系統服務計算模式InVEST進行研究區域生態系統服務現況之評估與量化。接著，進行以ES分組與不分組兩種方式，利用區域空間相關量測指標(LISA)分析各ES熱點之空間聚集程度與特性；其中ES之分組以多元迴歸樹統計方法進行。依ES熱點分析之結果，擬定欲保育之ES項目，以系統性保育規劃模式(Marxan和Zonation)進行目標ES之生態系統服務保育區規劃模擬；將保護區規劃結果為未來土地利用型態之目標，以土地利用變遷模式CLUE-s模擬欲達到此目標之土地利用變遷過程。再將CLUE-s模擬之未來土地利用型態帶回InVEST，模擬在考量以目標ES為保育對象之土地利用變遷情境下，其目標ES之量化價值是否維持或提高，進而達到ES保育之目標。藉此分析流程，本研究可提供決策者針對一項或多項生態系統服務之保育策略規劃參考意見。此外，為考量氣候變遷對生態系統及其服務之影響，將不同氣候變遷情境作為InVEST分析之氣候狀態輸入資料，再進行上述生態系統服務系統性保育規劃研究流程。探討各ES熱點受不同氣候條件變化之影響，並根據分析結果探氣候變遷對為達目標ES保育目的之保護區規劃及相關土地利用變遷過程與型態之影響。此研究結果可更進一步提供決策者考量未來氣候變遷衝擊下，對生態系統服務保育規劃與管理策略研擬之參考。同時，研究期間將利用電腦程式語言平行開發並串聯上述研究方法與模式（如LISA、多元迴歸樹、Marxan、Zonation、CLUE-s等），並以Python整合至ArcGIS介面，作為生態系統服務系統性保育規劃GIS整合模式；再以研究案例，比較此整合模式與利用上述多項模式之規劃結果，進行交叉比較與驗證。

### (1) 生態系統服務計算模式

本研究採用生態系統服務與競合之整合型量化模式，InVEST，計算並量化研究區域生態系統服務及其價值，其管理與模式概念架構如圖 17所示。InVEST功能包含棲地風險評估(Habitat risk assessment)、漁業與娛樂業的重疊分析(Overlap analysis for fisheries and recreation)、森林木材收成的管理(Managed timber production)、碳存量與封存量模式(Carbon Storage and Sequestration)、物種多樣性：棲地品質與稀有性模式(Biodiversity: Habitat Quality and Rarity)、水質淨化：養分留存量模式(Water Purification: Nutrient Retention)、水庫淤泥消減量模式(Avoided Reservoir Sedimentation Model)等，並由五個子模式進行計算，分述如下(Tallis et al., 2010)：

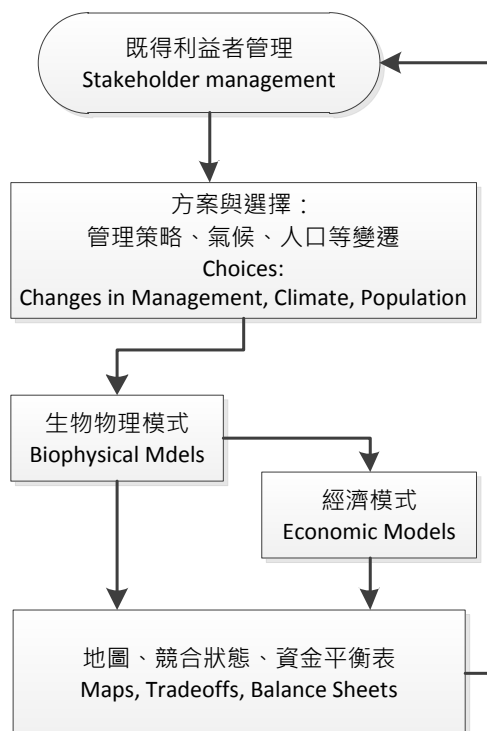


圖 7：InVEST 管理與模式概念(改繪自 Tallis, H. T. et al., 2010)



#### A. 碳貯存量和碳封存

生態系統透過如二氧化碳等溫室氣體(greenhouse gases GHG)的增減來調節地球的氣候，陸域生態系統可容納之碳量較大氣層來得多，因此成為影響氣候變遷中二氧化碳驅動的重要因子。除了儲存碳以外，許多系統也會在植物和土壤中繼續累積碳量，從而每年「封存」另外的碳量。在 InVEST 模式中，碳分為兩個計算量：碳封存量是計算每年增加到現存碳庫中的碳淨增加量，而碳貯存量是指儲存在植被(包含地上與地下)中的量，這兩種方式都能使碳不被排放到大氣層中(Naidoo et al., 2008)。此模式根據不同的土地利用圖層/土地覆蓋類型(Land use/Land cover)以及木材砍伐之速率(wood harvest rates)、砍伐之產品的降解速率(harvested product degradation rates)以及儲存在四個「碳庫」(carbon pool)等資料去估計當下貯存於景觀中的碳貯存量或是經過一段時間的封存碳總量。其中，市場中的額外資訊或封存中的碳之社會價值、封存碳的每年變化和折現率可作為模式中的額外資料，若具有相關資料，可以進一步估量此生態系統服務對於社會的價值。此模式是以地理資訊系統(Geographic Information System)的網格形式對碳的貯存及封存量進行模擬，每一網格都會被指定一種土地利用及土地覆蓋類型。對於每個土地利用/覆蓋類型，模式需要至少一個碳庫估計碳的總量，故使用者的資料超過一個碳庫，此模式結果將更為完整。

#### B. 生物多樣性:棲地品質與稀有性

針對各種不同面相的生態多樣性的特性與動態發展，發展出了許多判別保育優先順序的權衡辦法，而其中 InVEST 所採用的辦法較偏向於棲地為主，且是與「粗糙解析度」較為相近的一種。InVEST 以棲地品質與稀有度來估計地景上棲地的範圍、植栽種類以及退化的情形，做為生物多樣性的替代指標。棲地品質與稀有性由四個因素構成影響，分別為:各威脅之間相對之影響、各威脅種類之間的相對敏感度、威脅源與棲地之間的距離、土地被合法保護的程度。對於管理者來說，必須要了解到地景上個別或總合來看的圖案分布與豐富度，目前的土地利用與管理如何去影響到各項要素的存在，也是必須要被評估的，如此才能夠進一步設計適當的保育策略與鼓勵管理者最大化地區內的生物多樣性。在此項生態系統服務的計算當中假定土地的合法保護是有效用的，且各項對土地利用的威脅是可以相加的。

#### C. 出水量

出水量模式包含三個組成要素：流域出水量、用水消耗量、水力發電價值評估。InVEST 可以評估不同區域地景之間水力的相對貢獻，了解不同的土地利用地景如何去影響年出水量及水庫發電產量，因而可以估計出每年平均水庫水力產量與價值，並且可量測出其中有多少是出自於景觀上的流域出水量。土地利用變遷可以改變水文循環，影響到蒸發散、入滲與保水模式，並且改變可供產出水力發電的水體積與時間點(Dams, 2000; Ennaanay, 2006)。然而此生物物理模式並沒有考慮到表面水與地下水之間的交互作用或是降雨時間維度。出水量模擬模式是根據 Budyko 曲線與年平均降雨量作為其運算的基本，其計算公式如下(Tallis et al., 2011)：

$$Y_{gj} = \left(1 - \frac{AET_{gj}}{P_g}\right) \cdot P_g \quad [1]$$

其中， $Y_{gj}$  是地景上每個網格的年出水量(以  $g=1,2,\dots,g$  為網格索引值)

$AET_{gj}$  是土地利用類型  $j$  與網格  $x$  的每年實際蒸發散

$P_g$  則是網格  $g$  上的年降雨量。

#### D. 水質淨化:營養鹽留存

良好的水生棲地是建立於擁有適切的營養鹽平衡環境底下且同時可以提供水質淨化作為生態系循環中的一項重要功能。InVEST 根據從逕流中所能移除的營養鹽汙染物來估計植栽或

土壤淨化水質的貢獻，此生物物理模式使用的資料包括：流域出水量、土地利用資料、營養負荷量以及過濾速度等來決定在現在或未來土地利用情境底下的營養鹽留存承載量。於模式中第一步是算出年平均出水量的空間分佈，第二步則是計算地景中每個子區域所留存的汙染量，模式計算每個網格所留存的營養鹽量並以子集水區作為單位來計算總營養鹽出口量與平均出口量。此外，模式中更加入了水文敏感分數的計算來反映不同地景的現實狀況，如下式所示(Tallis et al., 2011)：

$$ALV_g = HSS_g \cdot pol_g \quad [2]$$

$$HSS_g = \frac{\lambda_g}{\lambda_w} \quad [3]$$

$$\lambda_\alpha = \log\left(\sum_u Y_u\right) \quad [4]$$

其中， $ALV_g$  = 網格  $g$  的營養鹽負荷量校正值(Adjusted Loading Value)

$HSS_g$  = 網格  $g$  的水文敏感分數

$pol_g$  = 網格  $g$  的營養鹽輸出量

$\lambda_g$  = 網格  $g$  的逕流指數

$\lambda_w$  = 集水區之平均逕流指數

$\sum_u Y_u$  = 河川流線上高於網格  $g$  的總出水量總和(包含網格  $g$  自身的出水量)

#### E. 沉積物留存

InVEST 利用地形學、氣候與植栽等資料來估計土地利用單元對土壤沉積物之保留能力。土壤侵蝕與沉積作用是維持生態系運作的自然過程，但當過量土壤侵蝕作用產生時，會降低農業產量，增加洪水發生的機率以及汙染物傳輸，甚至嚴重會導致橋樑、道路、水工構造物等基礎建設之損壞與變形。沉積物留存模擬模式提供了使用者依據不同土地使用來計算年平均土壤流失的一個工具，InVEST 模式採用之計算方式為通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)(Wischmeier & Smith, 1978)，計算單位為網格，其估算土壤流失主要是根據地形學以及氣象情況，可同時結合土地利用格局，高程資料，降雨與氣候資料。USLE 計算公式如下所示，其中  $R$  為年平均降雨沖蝕指數， $K$  為土壤沖蝕指數， $LS$  為坡長坡度因子， $C$  是覆蓋與管理因子， $P$  為水土保持處理因子，計算出之 USLE 為每公頃之年平均土壤流失量。

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad [5]$$

其中， $LS$  是 USLE 式子當中非常重要的參數之一，坡長代表的是流線的源頭到最終沉積物匯集點的距離，其反映了坡度與土地管理的間接關係(比如說梯田、溝渠)，而  $LS$  實際上為沉積物從一開始沉降直到其能量完全消散為止的距離，若坡度越陡或是坡長越長，則可能造成侵蝕的風險則越高。於此模式，根據使用者給定之地理資料特性，模式會自動給定符合地理資料特性之  $LS$  參數，標準狀況為坡度為 9%，坡長為 72.6 呎，高於或低於此標準，則  $LS$  係數必須做修訂的動作(Tallis et al., 2011)。USLE 公式所描述的土壤留存機制與營養鹽留存機制類似，順著河川的流線，往下游累積計算土壤沉積量，上游土地利用不同會累積不同的土壤沉積量而根據下游土地利用類型之植被抓取土壤能力之不同，不同網格下的沉積物留存與流失量均相異。

## (2) 多元迴歸樹

多元迴歸樹(Multivariate regression trees, MRT)為一將多組應變數(dependent variables,  $y_i$ )與依不其對應之多組自變數(independent variables,  $x_j$ )，加以分組之多對多迴歸分析法，目前已應用於生態環境及物種之相關研究，如 Davidson et al. (2010)、Lennert-Cody et al. (2010)、Hamann et al. (2011)、Uthicke et al. (2012)和 Fenton and Bergeron (2013)等。本研究將 InVEST 模式之各 ES 量化結果利用多元迴歸樹加以分組，即將不同的 ES 為應變數  $y_i$ ，而研究區域之環境特性為自變數  $x_j$ ，進行迴歸。其數學運算(Larsen and Speckman, 2004)說明如後：

### 目標函式

多元迴歸樹分析的目標為使所有分割後的節點內部的偏差之總和最小，目標函式為：

$$D = \sum_{N=1}^n \sum_{i \in N} \{y_i - \bar{y}(N)\}^t V_N^{-1} \{y_i - \bar{y}(N)\} \quad [6]$$

最後分組的結果總共有  $n$  個節點，其中  $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ir})^t$ ，為在第  $N$  個節點中第  $i$  個反應變項，其中反應變項為  $r$  維度的資料， $V_N$  為一正定矩陣，通常可由第  $N$  個節點內  $y$  的協方差矩陣取代。

### 注意事項

- ✓ 如果  $x_j$  (環境變數  $j$ ) 為連續型變數，則分割的情形為：  $N_{left} = \{i \in N: x_{ij} \leq t\}$ ,  $N_{right} = \{i \in N: x_{ij} > t\}$ ,  $t$  為常數。
- ✓ 若  $x_j$  為有序變量，則分割的情形為：  $N_{left} = \{i \in N: x_{ij} \leq c\}$ ,  $N_{right} = \{i \in N: x_{ij} > c\}$ ,  $c$  為常數。
- ✓ 若  $x_j$  為具有  $L$  種類的類別變量，扣除空集合的情形，則總共有  $(2^{L-1} - 1)$  種分割情況，分割的情形為：  $N_{left} = \{i \in N: x_{ij} = G\}$ ,  $N_{right} = \{i \in N: x_{ij} = L - G\}$ ,  $G$  為  $(2^{L-1} - 1)$  種分割情況中的一個集合。

## (3) 空間自相關分析方法

全域型 Moran's I 計算方式，是基於統計學相關係數的共變數 (covariance) 關係推算得來，全域型的 Moran's I 的公式如下：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ji}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

[7]

依照以上步驟計算出的 Moran's I 值結果一定介於 -1 到 1 之間，大於 0 為正相關，小於 0 為負相關，且值越大表示空間分佈的相關性越大，即空間上有聚集分佈的現象。反之，值越小代表空間分佈相關性小，而當值趨於 0 時，即代表此時空間分佈呈現隨機分佈的情形。

空間自相關係數圖即是在全域型空間自相關加入空間區隔的概念(即 Spatial Lag)，將全部空間分成同等大小的區域間隔，以其作為運算者間的距離。在全域型空間自相關的分析方法中， $W_{ij}$  是相鄰權重矩陣。而每個  $W_{ij}$  其實都是以一個空間單元為基礎，以一定距離所含蓋的範圍作為矩陣運算的範圍。因此， $W_{ij}$  其實皆可以改寫為  $W(d)_{ij}$ ，其中  $d$  就是距離。如果將  $d$  的基本單位同設為一規則方格形空間單元的邊長，那麼每一個  $d$  的基本單位就可以視為一個空間間隔 (spatial lag)。以此規則計算不同空間間隔的全域型空間自相關值，再把每個對應空間間隔順序的值連成一線，就可以得到空間自相關係數圖 (Spatial Autocorrelation Coefficient Correlogram)。

Anselin (1995) 曾歸納各種空間聚集的研究方法，也就是區域空間相關量測指標 (Local Indicators of Spatial Association, LISA)，可檢視空間中離群值(outliers)的現象，度量空間單元相對於整個研究區域之空間自相關值的影響程度，除了可以顯示空間聚集程度，亦能顯示聚集區在空間的分布位置。透過拒絕無空間相關的虛無假設來判定是否具有空間聚集性，其 LISA 值公式如下 (李振綱, 2012)：

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\frac{1}{n} \sum_i (X_i - \bar{X})^2} \sum_j W_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad [8]$$

若結果皆通過顯著性檢定，且顯著水準為正，則代表其屬性與周邊地區屬性相似，有空間相關的現象；若顯著水準為負，則代表周邊屬性不相似，屬於空間負相關單元。若結果不顯著則表示無空間相關性。綜合分析後得到表 1 的五種結果。

表 1：LISA 相關性分析表(資料來源:李振綱，2012)

空間相關性	屬性	檢定結果
不相關	不顯著	
High-High,HH	X <sub>i</sub> 高於平均，且區域 i 周邊區域之觀察值亦高於平均	正相關
Low-Low,LL	X <sub>i</sub> 低於平均，且區域 i 周邊區域之觀察值亦低於平均	
High-Low,HL	X <sub>i</sub> 高於平均，且區域 i 周邊區域之觀察值低於平均	負相關
Low-High,LH	X <sub>i</sub> 低於平均，且區域 i 周邊區域之觀察值高於平均	

#### (4) 系統性保育規劃模式

近年來有許多支援決策工具以系統性保育規劃方式之概念，應用於生態環境及物種保護等相關研究中，如 Marxan、Zonation、ConsNet、C-Plan 等，而其中以 Marxan 與 Zonation 較廣為人應用並當作新保護區位址選取之支援決策工具(Moilanen et al., 2009)。本研究以 InVEST 量化之研究區域 ES 為保育目標，使用 Marxan 與 Zonation 兩種系統性保育規劃模式(其比較如所示表 2)，進行保育目標之保護區規劃模擬。模式分述如下：

表 2：Marxan 與 Zonation 模式比較

模式	Marxan	Zonation
演算方法	最小成本方法 Minimum-set approach	最大涵蓋面積方法 Maximum-cover approach
特點	成本： (1)規劃單元成本 (2)物種懲罰值(Species penalty) (3)空間限制成本	計算規劃區域每一網格邊際損失，接著依據最大化剩餘面積整體的保育價值條件下，依序排除網格。

#### A. Marxan

Marxan 為一用於系統性保育規劃中之支援決策模式，它能找尋滿足使用者所設定之生態、社經目標之空間規劃單元組合，使用者常為生態保護區規劃者和生態學研究學家等等。此模式研發目的在於為解決早期保護區規劃選址時之評估方法常依靠直接手工繪圖劃定地點，且過度依賴專家意見和需滿足之目標函數複雜而類型眾多等問題，提供一個更有系統和有效率的選址程式。Marxan 可提供專家在上千個候選規劃單元(planning unit)中，以生物多樣性為目標選擇利於上百種生物物種之保護區，其選取之規劃單元的組合有一定程度的彈性空間能符合真實環境情況。模擬退火演算法(Simulated Annealing, SA)為 Marxan 主要用來優選最佳保護區域之演算法，在選取過程中，會指定一個代表的值於每個規劃單元並加上空間限制因素之設定，而退火演算法會以最小化規劃單元組合的總「成本」之方向來選擇保護區位址。

Marxan 中，退火演算法的目標函數為各個成本組合成之總成本，而總成本為三個使用者定義的「成本」組合而成，此函數如下(Schill and Raber, 2006)：

$$Total Cost = \sum Unit Cost + \sum Species Penalties + BLM \sum Boundary Length \quad [9]$$

其中，Total Cost 為最小化的總目標也就是總成本；Unit Cost 為每一個規劃單元分配到的成本，

任何測量或估計出的數值都可以當作規劃單元所被分配的成本，像是威脅(例如：與道路、人類活動區域距離)或是保育對策的適合程度，亦或是真正成本的代理數值，例如面積或是實際地區之房產價值等；Species Penalties為無法達到目標設定時所強加的懲罰值，而Boundary Length為選取之規劃單元組合的總外圍邊緣長度，當邊緣長度越短時，其保護區結構就會越緊密，而邊緣長度權重(Boundary Length Modifier, BLM)即是平衡保護區緊密度之參數，BLM愈小，則結果愈不考慮緊密聚集程度，以面積最小化為目標；BLM愈大，結果則會愈緊密聚集，將邊緣長度最小化加入選取規劃單元考慮因素。

此外，為了衡量各個規劃單元重要性，在保護區選取中引入不可取代性(Irreplaceability)來做為規劃優先順序之指引，不可取代性主要以兩種方式來定義(Pressey et al., 1993)：(A) 此規劃單元區域對於保育目的所能產生之貢獻；(B) 若此規劃單元區域不被選擇，保育效果的損失程度。能達成保育目的之保護區通常不只一組規劃單元組合，而各規劃單元在所有可達成目的之組合所出現的頻率，可作為評估各個單元重要度之有用數值(Pressey et al., 1994)，因此，Marxan 定義被選取幾次之結果也就是每個網格之選取頻率(selection frequency)為各個規劃單元之不可取代性(Irreplaceability)，以衡量區域熱點，而除了選取頻率以外，Marxan 輸出結果還包括了所有執行次數最小成本之結果來衡量能達到保育目標之區域選擇範圍。

## B. Zonation

Zonation 為 Moilanen 等人在 2006 年發展的一支援決策並適用於大範圍的系統性保育規劃模式，它可以同時考慮多個物種下如何保持棲地品質以及棲地間的連接度，利用量化的方法進行物種永續保育規劃，提供生態研究學者與保護區規劃者一個有系統的工具有效的解決生態、經濟和社會多方目標的規劃問題。Zonation 屬於最大涵蓋範圍(Maximal coverage approach)程式((Delavenne et al., 2012)，其不僅適用於傳統的保育區選擇問題，亦能夠進行各種保育區土地規劃分析。其分析問題包括：(1)辨別連接度適宜的保育區；(2)擴大原有的保育區域；(3)評估現有的保育區的效益；(4)辨別生態價值低的區域以用於經濟發展；(5)根據不同的目標決定優先保育次序。Zonation 將目標區域依據其生態價值進行排序，其演算法為每一次移除生態價值最低的網格，並且使移除所造成保育價值的邊際損失達到最小，以維持最大的連接度與生物多樣性；經過這樣的演算方式，可以產生高度連接的景觀結構，移除次序後的區域為物種分布的中心，移除次序先的則為物種中心的緩衝帶，也可視為較不需要保育的區域，人類活動在此對生態造成的影響較小。透過排序，可依據所需的目的，針對目標區域中的各小區分別做不同程度的保育措施。此規劃模式目的並不是提供詳細的保育規劃方案，而是辨別出優先保育的區域，而後才將此區域進行更精細的分析。

Zonation 可以直接輸入網格資料，並且其資料都可以直接在地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)上進行編輯及圖層之輸出，操作上十分簡單，除了輸入目標物種分布和目標規劃區域土地覆蓋等必須的生態資料，亦可以將土地利用的商業價值等有關決策的資訊，加在成本資料上一併考慮。Zonation 利用一個新的演算法(The Zonation meta-algorithm)將目標區域內的網格進行優先次序的排序，排序的方式為迭代移除每一個網格，計算每個網格移除後所造成的邊際損失(marginal loss)，邊際損失最小的網格即為下一個被移除的網格，演算法的流程如圖 18 所示 (Lehtomaki and Moilanen, 2013)。

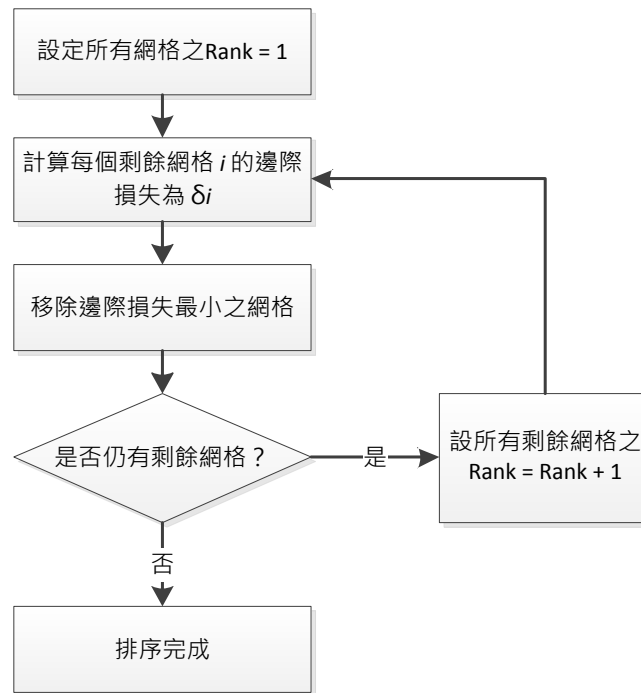


圖 8：Zonation 演算法流程圖（改繪自 Lehtomaki and Moilanen, 2013）

每一網格之移除等級即為其保育區選址的優先次序，也就是說最先移除的網格為最不重要的區域，而最後移除的網格便是優先保育的區域。相較於一般的演算法將網格依序加入預定保育區，先將所有目標規劃區域之決策單元作為保育區而後移除邊損失較小的網格，此法所得結果有較佳連接度。若決策單元數較大之規劃問題則可以利用增加每次動作移除網格數以達到較快演算時間，但相對的較高移除網格數所得結果則較為不精細。此外，本演算法除了記錄所有網格之移除等級，亦記錄演算過程中網格移除後的目標區域生態價值變化或物種剩餘比例變化，故此演算法可解決(1)哪個區域擁有優先保育的次序？(2)劃出保育區可以保留多少的物種？等問題(Moilanen and Kujala., 2008)。

#### (5) 土地利用變遷模式

土地利用模式的模擬或方法可檢視其描寫空間、時間與人類決策三種面向之精確度與能力。為達生態系統服務保育區規劃之目標，本研究採用經驗式土地利用變遷模式(Conversion of Land Use and its Effect at Small regional extent, CLUE-s)模擬為達成標 ES 之保護區劃設之土地利用型態與變遷過程。CLUE-s 模式為荷蘭瓦根尼罕大學 Dr. Verburg 與其研究團隊研發之 CLUE 改良模式，為一以小尺度地區為主的尺度土地利用變遷預測模型(Verburg et al., 2002)。CLUE-s 模式以土地利用系統空間與時間動態的競爭與交互作用關係為基礎，考量區位適宜性進行區域性土地利用變遷模擬；其特點在於可進行多種情境模擬，包括模擬多種土地利用類別之競爭情形、不同時間與非空間策略等，將土地利用視為整體進行模擬 (Verburg, 2004)，CLUE-s 模式架構如圖 19 所示，可分為非空間需求模式與空間分派模式兩個次模組。

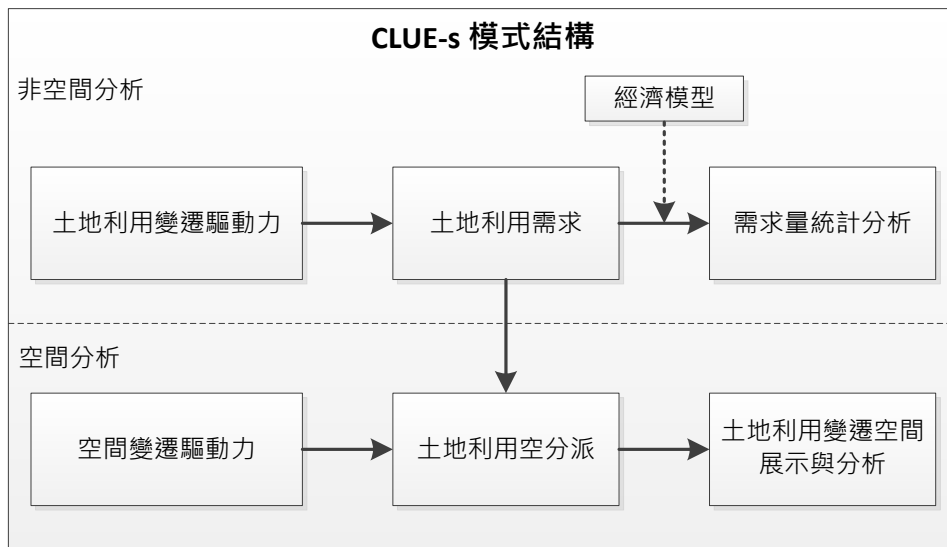


圖 9：CLUE-s 模式架構圖(改繪自 Verburg, 2004)

非空間需求模式計算所有土地利用類型之總面積變化量，將變化量轉化為不同區位土地利用變化，主要以網格系統(raster-based system) 進行。此外，非空間需求模式可結合其他經濟模型，進行需求量預測，並將逐年土地變化量預測結果投入空間分派模式。空間分派模式結合經驗性(empirical)、空間分析與動態模式等，主要考量空間政策與限制、土地利用類型特殊轉換設定、土地利用需求及區位特性等四個面向，產生一系列的條件與機率，透過搜尋過程尋求土地利用的空間分佈；此四面面向分述如下(圖 20)：

#### A. 空間策略與限制

空間策略與土地產權會影響土地利用變遷格局，空間策略與限制是指因空間發展政策或產權限制土地利用變遷於的區域。此外，透過政策可指定特定土地利用變遷區域，如建築物興建於特定農業用地。CLUE-s模式透過土地利用轉移矩陣表示土地利用類型間的轉換關係。

#### B. 土地利用類型特殊轉換設定

土地利用類型特殊轉換設定以轉換彈性(conversion elasticities)與土地利用轉移矩陣(land use transition sequences) 呈現個別土地利用類型之特性。轉換彈性代表土地利用類型之可被轉換性，通常以高資本投資的土地利用類型較不易被轉換為其他類型。CLUE-s 模式以介於0與1之間數值表示，0 表示極易改變，1 表示不可改變。轉移矩陣探討土地利用是否允許轉移？哪些區域允許或禁止特定的土地利用類型轉換？一區域現況土地利用型態可維持多久或可維持相同土地利用型態的最大年限為何？等問題。此外，可藉由土地利用轉移矩陣表示土地利用類型轉移的最大與最小年限，而區位條件與土地利用壓力會增加或縮短年限，結合轉移矩陣中不同的限制設定，可模擬出產生土地利用型態轉移的時間長度。

#### C. 土地利用需求

土地利用需求計算總體需求量，可透過案例分析、情境模擬或其他分析預測模型取得。需求量預測變化的趨勢可配合人口數、土地資源耗竭量進行修正；此外，進行與土地利用變遷相關政策分析時，土地需求量的預測可以總體經濟模型預測其變化。

#### D. 區位特性

在時空間條件特性上，土地利用型態改變可能發生於高轉變機率的區域，而高轉變機率區域為不同影響因子與決策制訂過程交互作用之產物，其結果可繪製成土地利用圖。二元邏輯特模式(binomial logistic model) 常被應用於討論某一地點土地利用型態改變與否之預測，此模式透過與空間、區位相關的生物物理及社會經濟函數進行土地利用型態變化預測，模式可表示為：

$$\text{Log}\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 K_{1,i} + \beta_2 K_{2,i} + \dots + \beta_n K_{n,i} \quad [10]$$

$P_i$ ：地點*i*土地利用型態轉變機率； $K_n$ ：與區位相關因子； $\beta_n$ ：羅吉特迴歸(logistic regression)係數。

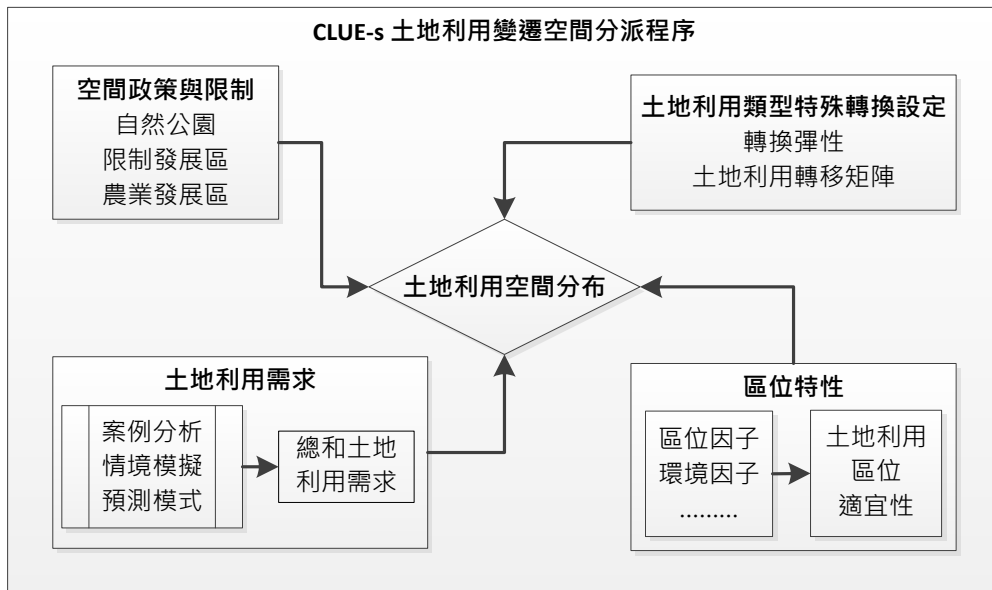


圖 10：CLUE-s 模式土地利用變遷空間分派程序(改繪自 Verburg, 2004)

#### (6) 氣候變遷情境

為探討氣候因子之變化對研究區域生態系統及其服務之影響，以及此影響是否亦造成目標ES之保護區規劃結果，本計畫採用國家災害防救科技中心(NCDR)執行國科會計畫「台灣氣候變遷情境推估與資訊平台建置」(TCCIP)產出之25km ×25km解析度之A2、A1B及B1三個SRES情境資料於研究區域，由IPCC之24個GCM模式中，依據臺灣地區所涵之網格、東亞季風特性及測站歷史降雨資料與GCMs基期降雨資料之豐枯水期平均降雨改變率等特性，挑選CSMK35、MRCGCM、MIMR、GFCM21及MPEH5共5個GCM模式(水利規劃試驗所, 2013)，並以面到點克利金法進行氣候變遷情境下氣資料之降尺度分析，作為InVEST之氣象輸入值。後續則進行研究區域生態系統服務價值計算、空間相關性及熱點分布以及系統性保育規劃等分析，並以CLUE-s模式模擬在不同氣候變遷情境下，欲達目標ES保育之保護區規劃之土地利用型態變遷過程。



(四) 預期完成之工作項目、成果及績效

1. 預期完成之工作項目

(1) 第一年：

工作項目	工作 比重 %	年 月	2014年					2015年						
			8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
文獻回顧、理論評估架構確立	10	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重	2	2	2	2	2							
土地利用、生態水文、環境因子資料收集整理與建檔	15	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重			3	3	3	3	3					
分析與修正InVEST模式、量化生態系統服務現況	15	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重						3	3	3	3	3		
生態系統服務依其特性分組	10	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重					2	2	2	2	2			
生態系統服務空間相關性與聚集/離散程度分析	15	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重							3	3	3	3	3	
比較生態系統服務不分組及分組空間分析與熱點分佈	15	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重								3	3	3	3	3
整合型模式開發與建立	15	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重				1	2	2	2	2	2	2	1	1
撰寫第一年工作成果報告	5	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重											2	3
		單月比重%	2	2	5	6	9	10	13	13	13	11	9	7
		累積比重%	2	4	9	15	24	34	47	60	73	84	93	100

(2) 第二年：

工作項目	工作 比重 %	年 月	2015年					2016年						
			8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
文獻回顧與評析	10	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重	2	2	2	2	2							
選定欲保護之生態系統服務項目	5	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重	5											
生態系統服務系統性保育規劃(Marxan & Zonation)	25	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重		5	5	5	5	5						
生態系統保護區劃設比較	20	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重					4	4	4	4	4			
模擬保護區規劃政策下之土地利用類型	20	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重								4	4	4	4	4
整合型模式開發與建立	15	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重						3	3	3	3	3		
撰寫第二年工作成果報告	5	工作進度	[Progress bar]											
		月工作比重											2	3
		單月比重%	7	7	7	7	11	12	7	11	11	7	6	7
		累積比重%	7	14	21	28	39	51	58	69	80	87	93	100

(3)第三年：

工作項目	工作比重 %	年	2016年					2017年						
		月	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
計算未來土地利用情境下生態系統服務及其價值	10	工作進度	■											
		月工作比重	5	5										
評量在ES保護區規劃下之生態系統服務變化情形	15	工作進度	■											
		月工作比重	2	8	5									
提出生態系統服務系統性保育規劃決策建議	10	工作進度	■											
		月工作比重			5	5								
建立氣候變遷情境	5	工作進度	■											
		月工作比重						5						
分析未來氣候變遷情境下之生態系統服務價值及其系統性保育方案	20	工作進度	■											
		月工作比重					4	4	4	4	4			
討論生態系統服務之現況及其受氣候變遷之影響	10	工作進度	■											
		月工作比重										5	5	
整合型模式驗證	20	工作進度	■											
		月工作比重					4	4	4	4	4			
研究成果整合與報告書撰寫	10	工作進度	■											
		月工作比重											5	5
		單月比重%	5	7	8	10	10	8	8	8	8	13	10	5
		累積比重%	5	12	20	30	40	48	56	64	72	85	95	100

## 2. 預期完成之工作項目及成果

第一年預期完成之工作項目及成果：

- (1) 整合研究區域土地利用及覆蓋、生態水文、環境物理化學特性調查資料，建立研究區域生態環境現況資料庫。
- (2) 完成生態系統服務計算模式InVEST之模式校正，計算研究區域現況之生態系統服務與價值並完成量化分析。
- (3) 完成生態系統服務特性分組。
- (4) 完成生態系統服務在不分組與分組方式中，其空間相關性與聚集/離散程度分析。
- (5) 完成各項生態系統服務熱點之空間分布標定及其時、空間變異圖。
- (6) 完成整合型模式第一部分：以GIS介面與InVEST結合，並進行ES空間相關性與熱點分佈分析。
- (7) 透過小型研討與國外學者進行交流及學術討論和合作。
- (8) 完成撰寫第一年度研究成果報告。

第二年預期完成之工作項目及成果：

- (1) 完成生態系統服務不分組與依其特性分組之空間相關性與聚集/離散程度分析和空間熱點比較。
- (2) 完成利用Marxan模擬之目標生態系統服務系統性保護區規劃策略及方案。
- (3) 完成利用Zonation模擬之目標生態系統服務系統性保護區規劃策略及方案。
- (4) 完成Marxan和Zonation模擬之生態系統保護區劃設方案比較與綜合分析討論。
- (5) 建立土地利用與土地利用驅動因子之關聯，應用CLUE-s 模式及土地利用情境與策略，模擬為達成生態系統服務保護區規劃之未來土地利用情境。
- (6) 完成整合型模式第二部分：以GIS介面與進行生態系統服務系統性保育規劃。
- (7) 透過小型研討與國外學者進行交流及學術討論和合作。
- (8) 完成撰寫第二年度研究成果報告。

第三年預期完成之工作項目及成果：

- (1) 完成整合「第一年成果」與「第二年成果」，檢核目標ES保護區規劃方案是否達到生態系統服務維持或改善之目標，並提出其系統性保育規劃決策建議。
- (2) 完成氣象資料之降尺度分析，擬定並建立氣候變遷情境。
- (3) 完成在未來不同氣候變遷情境下，研究區域生態系統服務與價值之計算與量化分析。
- (4) 完成生態系統服務之現況與不同氣候變遷情境下之價值比較與分析，綜合討論其受氣候變遷之影響。
- (5) 完成在研究區域環境現況與不同氣候變遷情境下之生態系統服務保護區規劃方案。
- (6) 完成整合型模式各部份模組之串聯，以GIS介面呈現並以案例應用加以驗證。
- (7) 透過小型研討與國外學者進行交流及學術討論和合作。
- (8) 完成研究成果整合與第三年年度報告撰寫。

### 3. 對於學術研究、國家發展及其他應用方面預期之貢獻

- (1) 本計畫為國內、外生態水文及生態保育研究領域中，首次嘗試以生態系統服務為保育目標，結合氣候變遷、土地利用對生態系統服務之影響評估，分析生態系統服務空間熱點分布及其時、空間之變化；並以系統性保育規劃方法進行集水區生態系統服務及價值量化分析，並提出為保護並持續生態系統之服務功能與價值，需採取之土地利用管理與規劃策略方案。
- (2) 本計畫整合跨層級之生態系統服務模式、氣候變遷情境相關模式、土地利用變遷相關模式、及系統性保育規劃模式，探討氣候變遷對生態系統服務之衝擊評估，並且進一步延探生態系統服務的時、空間變化，計算各項生態系統服務之空間相關性與聚集熱點，探討為因應未來氣候變遷下對集水區生態系統功能及服務造成之衝擊，可採取之系統性保育方法與策略。
- (3) 本研究開發並整合之生態系統服務系統性保育規劃模式考量流域生態系統服務、生態水文、土地利用管理策略、氣候變遷影響等，可做為集水區生態系統服務功能與價值之維持、管理、規劃和集水區土地利用與河川整治與復育之參考依據，同時提供環境管制政策、策略、法令之支援決策，並可應用於政策評估階段之土地利用變遷影響評估，有助於國家政策與法令制訂合理性之提昇。
- (4) 本研究成果將有助於後續研究了解氣候變遷對於集水區生態系統服務之關係，以及保護並維持集水區生態系統服務功能與價值之可行策略方案，提供後續研究學者和學生氣候變遷與生態系統服務、系統性保育規劃相關知識與技術之學習。
- (5) 本研究相關研究方法之流程及所建立之整合型模式可提供相關單位如營建署、水利署、環保署及農委會水土保持局等相關單位，作為集水區生態系統服務保護與管理之決策訂定依據。

### 4. 對於參與之工作人員，預期可獲之訓練

#### (1) 第一年：

##### A. 計畫主持人

- (a) 建立跨尺度集水區生態系統服務量化分析理論架構。
- (b) 應用空間相關性分析生態系統服務並探討其時、空間變化。
- (c) 撰寫成果報告。
- (d) 撰寫相關研討會及SCI 期刊論文。
- (e) 與國外學者進行交流及學術討論和合作。

##### B. 研究生及助理人員

- (a) 瞭解生態水文、土地利用、生態系統服務理論。
- (b) 瞭解與分析溪流生態水文分析方法。
- (c) 學習生態系統服務量化計算模式。
- (d) 瞭解生態系統服務量化及空間相關性分析方法。
- (e) 建立方法及架構與學習建模過程。

(f) 參與相關研討會及SCI 期刊論文撰寫。

(2) 第二年：

A. 計畫主持人

(a) 建構生態系統服務系統性保護區規劃決策分析之架構。

(b) 整合生態系統服務與土地利用變遷情境。

(c) 討論與分析成果與撰寫報告。

(d) 撰寫SCI 期刊論文。

(e) 與國外學者進行交流及學術討論和合作。

B. 研究生及助理人員

(a) 研究區域現地調查。

(b) 評估生態系統服務之空間相關性及其時、空間變化。

(c) 應用系統性保育規劃模式分析生態系統服務保護區劃設之可行方案。

(d) 持續開發生態系統服務系統性保育模式。

(e) 分析結果。

(3) 第三年：

A. 計畫主持人

(a) 整合生態系統服務、土地利用和氣候變遷情境。

(b) 分析生態系統服務系統性保護區規劃受氣候變遷之影響，提出土地利用管理的可行策略。

(c) 撰寫成果報告。

(d) SCI 期刊論文撰寫。

(e) 與國外學者進行交流及學術討論和合作。

B. 研究生及助理人員

(a) 整合生態系統服務量化、氣候變遷影響、空間相關性分析、系統性保育規劃模式。

(b) 分析結果與驗證。

(c) 學習生態系統服務系統性保育規劃模式之整合與案例應用操作。

(d) 參與SCI期刊論文與成果報告資料準備與撰寫。

**5. 預期完成之研究成果及績效（如期刊論文、研討會論文、專書、技術報告、專利或技術移轉等質與量之預期績效）**

(1) 發表至少五篇屬於生態系統服務與價值、氣候變遷和土地利用影響、及系統性保育規劃相關領域之國際SCI期刊論文。

(2) 發表至少五篇國內、外研討會論文。

(3) 出席國內外生態系統服務與價值、氣候變遷和土地利用影響、及系統性保育規劃等相關研討會。

(4) 與國內外學者意見交流與技術合作。

(5) 技術發展：發展適用於集水區生態水文與環境之生態系統服務系統性保育規劃整合型決策管理模式。

(6) 應用與推廣成果於相關學術及政府機關。

**（四）參考文獻**

1. Andreas Hamann & Tim Gylander & Pei-yu Chen. Developing seed zones and transfer guidelines with multivariate regression trees. (2011) *Tree Genetics & Genomes*, 7:399–408
2. Anselin, L. Local indicators of spatial association -lisa. (1995) *Geographical Analysis*, 27:115.
3. Araujo MB, Cabeza M, Thuiller W, Hannah L, Williams PH. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. (2004) *Global Change Biology* 10:1618–1626
4. Ardron JA, Possingham HP, Klein CJ. *Marxan Good Practices Handbook*. (2008) Victoria, BC. 155 p.

5. Arponen, A., Kondelin, H., Moilanen, A. Area-Based Refinement for Selection of Reserve Sites with the Benefit-Function Approach. (2007) *Conservation Biology*, 21(2), 527-533.
6. Ball IR. Possingham HP MARXAN (V1.8.2): Marine Reserve Design Using Spatially Explicit Annealing, a Manual. (2000)
7. Bohensky, E.L., Reyers, B., Van J., Albert S. Future ecosystem services in a Southern African river basin: a scenario planning approach to uncertainty. (2006) *Conservation Biology*, 20(4), 1051-1061.
8. Bojie Fu, Martin Forsius and Jian Liu. Ecosystem services: climate change and policy impacts. (2013) *Environmental Sustainability* , 5:1–3
9. Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., da Fonseca, G. A., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., Rodrigues, A. S. Global biodiversity conservation priorities. (2006) *Science*, 313(5783), 58-61.
10. Bryan BA, Crossman ND. Exploring the impacts of multiple interacting financial incentives on the supply of ecosystem services. (2013) *Ecosyst Serv*, 4:60-72.
11. Burkhard B, deGroot RS, Costanza R, Seppelt R, Jorgensen SE, Potschin M. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. (2012) *Ecol Indic*, 21:1-6.
12. Cabeza, M. Habitat loss and connectivity of reserve networks in probability approaches to reserve design. (2003) *Ecology Letters*, 6(7), 665-672.
13. Cabeza, M., Moilanen, A. Replacement cost: a useful measure of site value for conservation planning. (2006) *Biological Conservation* 132, 336–342.
14. Cambridge University Press, Cambridge. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. (2001a) Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Cambridge University Press, Cambridge  
Climate Change 2001: Mitigation. (2001b) Contribution of Working Group III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Cambridge University Press, Cambridge.  
Climate Change 2001: The Scientific Basis. (2001c) Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC).
15. Camm, J. D., Polasky, S., Solow, A., Csuti, B. A note on optimal algorithms for reserve site selection. (1996) *Biological Conservation*, 78(3), 353-355.
16. Chan, K. M., Hoshizaki, L., & Klinkenberg, B. Ecosystem services in conservation planning: targeted benefits vs. co-benefits or costs? (2011) *PloS one*, 6(9), e24378.
17. Chan, K. M., Shaw, M. R., Cameron, D. R., Underwood, E. C., & Daily, G. C. Conservation planning for ecosystem services. (2006) *PloS biology*, 4(11), e379.
18. Chan KMA, Goldstein J, Satterfield T, Hannahs N, Kikiloi K, et al. Cultural services and non-use values. In: Kareiva P, Tallis H, Ricketts TH, Daily GC, Polasky S, eds. *Natural Capital: Theory & Practice of Mapping Ecosystem Services*. (2011) Oxford, UK: Oxford University Press. pp 206–228.
19. Chiang, L.-C., Y.-P. Lin, T. Huang, Y.-L. Liu, D. Schmeller, P.H. Verburg. Simulation of Ecosystem Service Responses to Multiple Disturbances from an Earthquake and Several Typhoons, Landscape and Urban Planning (SCI, SSCI) :corresponding author (Accepted). (2013)
20. Chris D Thomas, Barbara J Anderson, Atte Moilanen, Felix Eigenbrod, Andreas Heinemeyer, Tristan Quaiife, David B Roy, Simon Gillings, Paul R Armsworth and Kevin J Gaston. Reconciling biodiversity and carbon conservation. (2013) *Ecology Letters*, 16: 39–47
21. Chuang, L.C., Shieh, B.S., Liu, C.C., Lin, Y.S., & Liang, S.H. Effects of typhoon disturbance on the abundances of two mid-water fish species in a mountain stream of northern Taiwan. (2008) *Zoological Studies*, 47(5), 564-573.
22. Cleridy E, Lennert-Cody, Mihoko Minami, Patrick K. Tomlinson, Mark N. Maunder. Exploratory analysis of spatial–temporal patterns in length–frequency data:An example of distributional regression trees. (2010) *Fisheries Research*, 102, 323–326

23. Cocks, K. D. and Baird, I. A. Using mathematical programming to address the multiple reserve selection problem: an example from the Eyre Peninsula, South Australia. (1989) *Biological Conservation*, 49(2), 113-130.
24. Cook, R. R. and Auster, P. J. Use of simulated annealing for identifying essential fish habitat in a multispecies context. (2005) *Conservation Biology*, 19(3), 876-886.
25. Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M.. The value of the world's ecosystem services and natural capital. (1997) *Nature* 387, 253–260.
26. Crossman, N.D., Bryan, B.A., de Groot, R.S., Y.-P. Lin, Minang, P.A. Ecosystem services and land change impacts, 5, 509-514. (2013) *Current Opinion in Environmental Sustainability (SCD)*.
27. Csuti, B., Polasky, S., Williams, P. H., Pressey, R. L., Camm, J. D., Kershaw, M., Kiester, A. R., Downs, B., Hamilton, R., Huso, M., Sahr, K. A comparison of reserve selection algorithms using data on terrestrial vertebrates in Oregon. (1997) *Biological Conservation*, 80(1), 83-97.
28. Dai Erfu, Yang Yuanyuan, and Fu Hua. The Assessment Framework of Ecosystem Service Value Based on InVEST Model. (2012) *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)* 3: 012.
29. Daily, G. Management objectives for the protection of ecosystem services. (2000) *Environmental Science & Policy* 3, 333-339.
30. Daily, G. C. (Ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. (1997) Island Press, Washington, DC, 392 pp.
31. Davey, A. G. and Phillips, A. *National system planning for protected areas (Vol. 1): Iucn GlandCambridge*. (1998)
32. Davidson T.A., Sayer C.D., Langdon P.G., Burgess A. & Jackson M.J. Inferring past zooplanktivorous fish and macrophyte density in a shallow lake: application of a new regression tree model. (2010) *FreshwaterBiology*, 55, 584–599.
33. Davis, F. W., Costello, C., Stoms, D. Efficient conservation in a utility-maximization framework. (2006) *Ecology and Society*, 11(1), 33.
34. de Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., L. Hein a, L. Willemen. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. (2010) *Ecological Complexity*, 7 (3), 260-272.
35. de Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M.J.. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. (2002) *Ecological Economics* 41, 393–408.
36. Delavenne, J., Metcalfe, K., Smith, R. J., Vaz, S., Martin, C. S., Dupuis, L. Carpentier, A. Systematic conservation planning in the eastern English Channel: comparing the Marxan and Zonation decision-support tools. (2012) *Ices Journal of Marine Science*, 69(1), 75-83.
37. Egoh, B. N., Reyers, B., Carwardine, J., Bode, M., O'FARRELL, P. J., Wilson, K. A., Richardson, D. M.. Safeguarding biodiversity and ecosystem services in the Little Karoo. (2010) *South Africa. Conservation Biology*, 24(4), 1021-1030.
38. Egoh, B., Reyers, B., Rouget, M., Bode, M., & Richardson, D. M.. Spatial congruence between biodiversity and ecosystem services in South Africa. (2009) *Biological Conservation*, 142(3), 553-562.
39. Egoh, B., Reyers, B., Rouget, M., Richardson, D.M., Le Maitre, D.C., van Jaarsveld, A.S. Mapping ecosystem services for planning and management. (2008) *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127, 135–140
40. Egoh, B., Rouget, M., Reyers, B., Knight, A. T., Cowling, R. M., van Jaarsveld, A. S., & Welz, A. Integrating ecosystem services into conservation assessments: a review. (2007) *Ecological Economics*, 63(4), 714-721.
41. Eike Luedeling, Roeland Kindt, Neil I Huth and Konstantin Koenig. Agroforestry systems in a changing climate — challenges in projecting future performance.

42. Ennaanay, D. Impacts of land use changes on the hydrologic regime in the Minnesota River basin. University of Minnesota. (2006) Major: Water resources science.
43. Fisher, B., Turner, K.R., Morling, P.. Defining and classifying ecosystem services for decision making. (2009) *Ecol. Econ.* 68 (3), 643–653.
44. Fitzsimons M.J., & Nishimoto, R.T. Use of fish behavior in assessing the effects of hurricane Iniki on the Hawaiian island of Kaua'i. (1995) *Environmental Biology of Fishes*, 43, 39-50.
45. Forsius M, Anttila S, Arvola L, Bergström I, Hakola H, Heikkinen HI, Helenius J, Hyvärinen M, Jylhä K, Karjalainen J et al. Impacts and adaptation options of climate change on ecosystem services in Finland: a model based study. (2013) *Curr Opin Environ Sustain*, 5:26-40.
46. Geneletti D. Assessing the impact of alternative land-use zoning policies on future ecosystem services. (2012) *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 40, April, Pages 25-35, ISSN 0195-9255
47. Gomez-Baggethun E, de Groot R, Lomas PL, Montes C. The history of ecosystem services in economic theory and practice: from early notions to markets and payment schemes. (2010) *Ecol Econ*, 69:1209-1218.
48. Gordon, A., Simons, D., White, M., Moilanen, A., & Bekessy, S. A. Integrating conservation planning and land use planning in urban landscapes. (2009) *Landscape and Urban Planning*, 91(4), 183-194.
49. Grêt-Regamey et al. Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region, 89(3), 197–208. (2008)
50. Groves, C. Drafting a conservation blueprint: a practitioner's guide to planning for biodiversity. (2003) Island Press.
51. Hale, P. T. and Lamb, D. Conservation outside nature reserves. (1997) Centre for Conservation Biology, University of Queensland Brisbane.
52. Harini Nagendra, Belinda Reyers and Sandra Lavorel. Impacts of land change on biodiversity: making the link to ecosystem services. (2013) *Environmental Sustainability*, 5:503–508
53. Hassan, R.; Scholes, R. & Ash, N. (ed.). Findings of the Condition & Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment, Volume I, Ecosystems and human well-being: current state and trends. (2005) Island Press.
54. Hof, J. G. and Raphael, M. G. Some mathematical programming approaches for optimizing timber age-class distributions to meet multispecies wildlife population objectives. (1993) *Canadian Journal of Forest Research*, 23(5), 828-834.
55. Hong, N.-M., Chu, H.-J., Lin, Y.-P., Deng, D.-P. Effects of Land cover changes induced by large physical disturbances on hydrological responses in Central Taiwan. (2010) *Environmental Monitoring and Assessment* 166 (1-3), 503-520.
56. Horn, H. L. Strategic conservation planning for terrestrial animal species in the Central Interior of British Columbia. (2011) *Journal of Ecosystems and Management*, 12(1).
57. Houlton, B.Z., Driscoll, C.T., Fahey, T.J., Likens, G.E., Groffman, P.M., Bernhardt, E.S., & Buso, D.C. Nitrogen dynamics in ice storm-damaged forest ecosystems: Implications for nitrogen limitation theory. (2003) *Ecosystems*, 6, 431-443.
58. Howe, C., Suich, H., van Gardingen, P., Rahman, A., & Mace, G. M. Elucidating the pathways between climate change, ecosystem services and poverty alleviation. (2013) *Current Opinion in Environmental Sustainability*.
59. Island Press, Washington, DC. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment. (2003) Millennium Ecosystem Assessment
60. Izquierdo, A. E., & Clark, M. L. Spatial Analysis of Conservation Priorities Based on Ecosystem Services in the Atlantic Forest Region of Misiones. (2012) *Argentina. Forests*, 3(3), 764-786.
61. Izquierdo, A. E., & Grau, H. R. Agriculture adjustment, land-use transition and protected areas in Northwestern Argentina. (2009) *Journal of environmental management*, 90(2), 858-865.

62. Kremen C. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? (2005) *Ecol Letters*, 8:468-79.
63. Kremen, C., Cameron, A., Moilanen, A., Phillips, S.J., Thomas, C.D., Beentje, H., Dransfield, J., Fisher, B., Glaw, F., Good, T.C., Harper, G., Hijmans, R., Lees, D., Louis Jr., E., Nussbaum, R., Raxworthy, C., Razafimpahanana, A., Schatz, G., Vences, M., Vieites, D., Wright, P., Zjhra, M. Aligning conservation priorities across taxa in Madagascar with high-resolution planning tools. (2008) *Science*
64. Kremen, C., Ostfeld, R.S. A call to ecologists: measuring, analyzing, and managing ecosystem services. (2005) *Frontiers in Ecology and the Environment* 3 (10), 540–548.
65. Kumar P. London and Washington. TEEB: In *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. (2010)
66. Larsen, D. R., and P. L. Speckman. Multivariate regression trees for analysis of abundance data. (2004) *Biometrics* 60:543–549.
67. Lautenbach, S., Kugel, C., Lausch, A., Seppelt, R. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. (2011) *Ecological Indicators*, 11(2), 676-687.
68. Leathwick, J., Moilanen, A., Francis, M., Elith, J., Taylor, P., Julian, K., Duffy, C.. Novel methods for the design and evaluation of marine protected areas in offshore waters. (2008) *Conservation Letters*, 1(2), 91-102.
69. Lehtomaki, J., & Moilanen, A. Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. (2013) *Environmental Modelling & Software*, 47, 128-137.
70. Lehtomäki, J., Tomppo, E., Kuokkanen, P., Hanski, I., Moilanen, A. Applying spatial conservation prioritization software and high-resolution GIS data to a national-scale study in forest conservation. (2009) *Forest Ecology and Management* 258, 2439e2449.
71. Leslie, H. M. A synthesis of marine conservation planning approaches. (2005) *Conservation Biology*, 19(6), 1701-1713.
72. Leslie H, Ruckelshaus M, Ball IR, Andelman S, Possingham HP. Using siting algorithms in the design of marine reserve networks. (2003) *Ecological Applications* 13: S185–S198.
73. Lindenmayer, D.B., Likens, G.E., & Franklin, J.F. Rapid responses to facilitate ecological discoveries from major disturbances. (2010) *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8, 527-532.
74. Lin, Y.-P., Chu, H.-J., Wang, C.-L., Yu, H.-H., & Wang, Y.-C. Remote sensing data with the conditional latin hypercube sampling and geostatistical approach to delineate landscape changes induced by large chronological physical disturbances. (2009) *Sensors*, 9, 148-174.
75. Lin, Y.P., Hong, N.M., Wu, P.J., Wu, C.F., Verburg, P.H. Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use pattern in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan. (2007) *Landscape and Urban Planning*, 80: 111-126.
76. Lindenmayer, D.B., Steffen, W., Burbidge, A.A., Hughes, L., Kitching, R.L., Musgrave, W., Smith, M.S., Werner, P.A. Conservation strategies in response to rapid climate change: Australia as a case study. (2010) *Biological Conservation*, 143(7), 1587-1593.
77. Lorencová, E., Frélichová, J., Nelson, E., & Vačkář, D. Past and future impacts of land use and climate change on agricultural ecosystem services in the Czech Republic. (2013) *Land Use Policy*, 33, 183-194.
78. Luck GW, Chan KMA, Fay JP. Protecting ecosystem services and biodiversity in the world's watersheds. (2009) *Conservation Letters* 2: 179–188.
79. Mace, G. M., Possingham, H. P., Leader-Williams, N., McDonald, D. W., Service, K. Prioritizing choices in conservation. (2007) *Key topics in conservation biology*, 17-34.
80. Margules, C. R., & Pressey, R. L. Systematic conservation planning. (2000) *Nature*, 405(6783), 243-253.
81. McDonnell, M. D, Possingham, H. P., Ball, I. R., Cousins, E. A. Mathematical methods for spatially cohesive reserve design. (2002) *Environmental Modeling & Assessment*, 7(2), 107-114.



82. Mikkonen, N., & Moilanen, A.. Identification of top priority areas and management landscapes from a national Natura 2000 network. (2013) *Environmental Science & Policy*, 27, 11-20.
83. Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report. (2005) MA Board
84. Millward, A.A., & Kraft, C.E. Physical influences of landscape on a large-extent ecological disturbance: the northeastern North American ice storm of 1998. (2004) *Landscape Ecology*, 19, 99-111.
85. Metzger , M.J., Rounsevell, M.D.A., Acosta-Michlik, L., Leemans, R., Schröter, D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. (2006) *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114 ,69–85
86. Moilanen, A. Landscape Zonation, benefit functions and target-based planning: Unifying reserve selection strategies. (2007) *Biological Conservation*, 134(4), 571-579.
87. Moilanen, A., Anderson, B. J., Eigenbrod, F., Heinemeyer, A., Roy, D. B., Gillings, S., Thomas, C. D. Balancing alternative land uses in conservation prioritization. (2011) *Ecological Applications*, 21(5), 1419-1426.
88. Moilanen, A., Anderson, B.J., Eigenbrod, F., Heinemeyer, A., Roy, D.B., Gillings, S., Armsworth, P.R., Gaston, K.J., Thomas, C.D. Balancing alternative land uses in conservation prioritization. (2011a) *Ecological Applications* 21, 1419e 1426.
89. Moilanen, A. and H. Kujala. Zonation spatial conservation planning framework and software v. 2.0. (2008) User manual, 136 pp.
90. Moilanen, A., Leathwick, J., & Elith, J. A method for spatial freshwater conservation prioritization. (2008) *Freshwater Biology*, 53(3), 577-592.
91. Moilanen, A., Possingham, H.P., and Polasky, S. A Mathematical Classification of Conservation Prioritization Problems. (2009a) *Spatial Conservation Prioritization: Quantitative Methods & Computational Tools* (editors: A. Moilanen, K. A. Wilson, and H. P. Possingham), Oxford University Press, pp. 29.
92. MPA news <http://depts.washington.edu/mpanews/issues.html>
93. Munang R, Liu J. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction. (2013) *Curr Opin Environ Sustain*, 5:47-52.
94. Naidoo, R., Balmford, A., Costanza, R., Fisher, B., Green, R. E., Lehner, B., Ricketts, T. H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. (2008) *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28), 9495-9500.
95. Nakamura, F., Swanson, F.J., & Wondzell, S.M. Disturbance regimes of stream and riparian systems - a disturbance-cascade perspective. (2000) *Hydrological Processes*, 14, 2849-2860.
96. Nelson EJ, Daily GC. Modelling ecosystem services in terrestrial systems. (2010) *F1000 Biology Reports* 2: 53. doi: 10.3410/B2-53.
97. Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D.R., Kareiva, P.M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. (2009) *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 4-11.
98. Fenton, N.J., Bergeron, Y. Stochastic processes dominate during boreal bryophyte community assembly. (2013) *Ecology*, 94(9), pp. 1993–2006.
99. Noss, R. F. A checklist for wildlands network designs. (2003) *Conservation biology*, 17(5), 1270-1275.
100. Noss, R. F., & Cooperrider, Allen. *Saving nature's legacy: protecting and restoring biodiversity* (1994) Island Press.
101. Paviolo, A., De Angelo, C. D., Di Blanco, Y. E., & Di Bitetti, M. S. Jaguar *Panthera onca* population decline in the Upper Paraná Atlantic Forest of Argentina and Brazil. (2008) *Oryx*, 42(4), 554.
102. Paviolo, A., Di Blanco, Y. E., De Angelo, C. D., & Di Bitetti, M. S. Protection affects the abundance and activity patterns of pumas in the Atlantic Forest. (2009) *Journal of Mammalogy*, 90(4), 926-934.

103. Polasky, S., Nelson, E., Pennington, D., Johnson, K. A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the State of Minnesota. (2011) *Environmental and Resource Economics*, 48(2), 219-242.
104. Possingham, H.P., Ball, I., Andelman, S. Mathematical methods for identifying Representative reserve networks. In: Ferson, S., Burgman, M. (Eds.), *Quantitative Methods for Conservation Biology*. (2000) Springer-Verlag, pp. 291e305.
105. Power AG. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. (2010) *Philos Trans R Soc B Biol Sci*, 365:2959-2971.
106. Power, M.E., Matthews, W.J., & Stewart, A.J. Grazing minnows, piscivorous bass and strea algae: dynamics of a strong interaction. (1985) *Ecology*, 66, 1448-1456.
107. Pressey, R. L. Possingham, H. P., Day, J. R. Effectiveness of alternative heuristic algorithms for identifying indicative minimum requirements for conservation reserves. (1997) *Biological Conservation*, 80(2), 207-219.
108. Pressey, R. L. Systematic conservation planning for the realworld. (1999) *Parks* 9:1–6.
109. Pressey RL, Humphries CJ, Margules CR, Vane-Wright RI, Williams PH. Beyond opportunism: key principles for systematic reserve selection. (1993) *Trends in Ecology and Evolution* 8:124–128
110. Pressey RL, Johnson IR, Wilson PD. Shades of irreplaceability: Towards a measure of the contribution of sites to a reservation goal. (1994) *Biodiversity and Conservation* 3: 242–262.
111. Pyke, C.R., Andelman, S.J.. Land use and land cover tools for climate adaption. (2007) *Climatic Change*, 80(3-4): 239-251.
112. Ralf Seppelt, Sven Lautenbach and Martin Volk. Identifying trade-offs between ecosystem services, land use, and biodiversity: a plea for combining scenario analysis and optimization on different spatial scales. (2013) *Environmental Sustainability*, 5:458–463
113. Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G.D., & Bennett, EM. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. (2010) *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(11), 5242-5247.
114. ReVelle, C. S., Williams, J. C., Boland, J. J. Counterpart models in facility location science and reserve selection science. (2002) *Environmental Modeling & Assessment*, 7(2), 71-80.
115. Reyers, B., O'Farrell, Patrick J., Cowling, R.M., Egoh, B.N., Le Maitre, David C., Vlok, J.H.J., Ecosystem services, land-cover change, and stakeholders: finding a sustainable foothold for a semiarid biodiversity hotspot. (2009).
116. Running, S.W. Climate change - Ecosystem disturbance, carbon, and climate. (2008) *Science*, 321, 652-653.
117. Sarkar, S., Pappas, C., Garson, J., Aggarwal, A., Cameron, S. Place prioritization for biodiversity conservation using probabilistic surrogate distribution data. (2004) *Diversity and Distributions*, 10(2), 125-133.
118. Schill, S. and Raber, G. User Manual and Tutorial. (2006) *Nature Conservancy*, 2.
119. Sinclair, A.R.E., & Byrom, A.E. Understanding ecosystem dynamics for conservation of biota. (2006) *Journal of Animal Ecology*, 75, 64-79.
120. Smith, J. L., Lewis, K., Laughren, J. A policy and planning framework for marine protected area networks in Canada's Oceans. (2006) *WWF-Canada. Atlantic Region Office*.
121. Snyder, S. A., Tyrrell, L. E., Haight, R. G. An optimization approach to selecting research natural areas in national forests. (1999) *Forest science*, 45(3), 458-469.
122. Stewart RR, Possingham HP. Efficiency, costs and trade-offs in marine Reserve system design. (2005) *Environmental Modeling and Assessment* 10: 203–213.
123. Summers, D. M., Bryan, B. A., Crossman, N. D., & Meyer, A. S. Species vulnerability to climate change: impacts on spatial conservation priorities and species representation (vol 18, pg 2335, 2012). (2012) *Global Change Biology*, 18(10), 3268-3268.
124. Uthiche, S., Patel, F., Ditchburn, R. Elevated land runoff after European settlement perturbs persistent foraminiferal assemblages on the Great Barrier Reef. (2012) *Ecology*, 93(1), pp. 111–121

125. Tallis, H. et al.. InVEST 1.005 beta User's Guide. (2010) The Natural Capital Project, Stanford.
126. Tear, T. H., Kareiva, P., Angermeier, P. L., Comer, P., Czech, B., Kautz, R., Landonm L., Mehlman, D., Murphy, K., Ruckelshaus, M. How much is enough? The recurrent problem of setting measurable objectives in conservation. (2005) *BioScience*, 55(10), 835-849.
127. Thomas, C.D., Anderson, B.J., Moilanen, A., Eigenbrod, F., Heinemeyer, A., Quaife, T., Roy, D.B., Gillings, S., Armsworth, P.R., Gaston, K.J. Reconciling biodiversity and carbon conservation. (2012) *Ecology Letters*. <http://dx.doi.org/10.1111/ele.12054>. early view.
128. Troy, A; Wilson, MA. Mapping ecosystem services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. (2006) *Ecological Economics*, 60( 2): 435-449
129. Turner, M.G., & Dale, V.H. Comparing large, infrequent disturbances: What have we learned? (1998) *Ecosystems*, 1, 493-496.
130. Turner, M.G. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. (2010) *Ecology*, 91, 2833-2849.
131. Turner, W. R., Brandon, K., Brooks, T. M., Costanza, R., Da Fonseca, G. A., & Portela, R.. Global conservation of biodiversity and ecosystem services. (2007) *BioScience*, 57(10), 868-873.
132. Vanhala P, Repo A, Liski J. Forest bioenergy at the cost of carbon sequestration? (2013) *Curr Opin Environ Sustain*, 5:41-46.
133. van Jaarsveld, A.S., Biggs, R., Scholes, R., Bohensky, E., Reyers, B., Lynam, T., Musvoto, C., Fabricius, C. Measuring conditions and trends in ecosystem services at multiple scales: the Southern African Millennium Ecosystem Assessment (SAfMA) experience. *Philosophical Transactions – Royal Society*. (2005) *Biological Sciences* 360, 425–441.
134. van Oudenhoven, A. P., Petz, K., Alkemade, R., Hein, L., & de Groot, R. S. Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. (2012) *Ecological Indicators*, 21, 110-122.
135. Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V. and Sharifah Mastura, S.A. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Model. (2002) *Environmental Management*, 30(3): 391-405.
136. Verburg, P.H., van Eck, J.R.R., de Nijs, T.C.M. and Schot, M.J D P. Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. (2004) *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31: 125-150.
137. Vihervaara P, D'Amato D, Forsius M, Angelstam P, Baessler C, Balvanera P, Boldgiv B, Bourgeron P, Dick J, Kanka R et al. Using long-term ecosystem service and biodiversity data to study the impacts and adaptation options in response to climate change: insights from the global ILTER sites network. (2013) *Curr Opin Environ Sustain*, 5:53-66.
138. Wallace, K.J. Classification of ecosystem services: problems and solutions. (2007) *Biol. Conserv.* 139, 235–246.
139. Watson, J.E.M., Grantham, H., Wilson, K.A. and H.P. Possingham. *Systematic Conservation Planning: Past, Present and Future*. (2011) *Conservation Biogeography* (editors: R. Whittaker and R. Ladle), Wiley-Blackwell, Oxford, pp. 136-160.
140. Wendland, KJ; Honzak, M; Portela, R, et al. Targeting and implementing payments for ecosystem services: Opportunities for bundling biodiversity conservation with carbon and water services in Madagascar. (2010) *Ecological Economics*, 69 (11): 2093-2107
141. Wilson, K. A., McBride, M. F., Bode, M., Possingham, H. P. Prioritizing global conservation efforts. (2006) *Nature*, 440(7082), 337-340.
142. Wilson, S.K., Graham, N.A.J., Pratchett, M.S., Jones, G.P., & Polunin, N.V.C. Multiple disturbances and the global degradation of coral reefs: are reef fishes at risk or resilient? (2006) *Global Change Biology*, 12, 2220-2234.
143. Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. (1978)

144. World Commission on Dams. Dams and Development: A New Framework for decision-making: the Report of the World Commission on Dams, November 2000: Routledge. (2000)
145. Zhang Canqiang, Li Wenhua, Zhang Biao and Liu Moucheng, et al. Water Yield of Xitiaoxi River Basin Based on InVEST Modeling. (2012) Journal of Resources and Ecology 3.1: 50-54.
146. 水利規劃試驗所，台灣地區各水資源分區因應氣候變遷水資源管理調適能力綜合研究，(2013)，水利規劃試驗所。
147. 林裕彬、黃韜、朱宏杰、許涵皓、陳虹螢，土地利用變遷對生態系統服務價值與其空間分布之影響-以台北都會區為例，(2010)，農工研討會。
148. 洪崢珮，台灣西海岸平原土地使用變遷與生態系統服務之研究，(2010)，國立台北大學都市計劃研究所98 年度碩士學位論文。
149. 陳佑樺，都市周邊地區生態系統服務之生態能量分析研究—以臺北-桃園地區為例，(2007)，國立台北大學都市計劃研究所97 年度碩士學位論文。
150. 黃韜，地景變遷對生態系統服務影響之研究，(2012)，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
151. 楊敏嘉，都市化對農地地表覆蓋景觀及生態系統服務變化之影響研究，(2008)，國立臺北大學都市計劃研究所碩士論文。
152. 蕭戎雯，不同單元尺度對土地利用及生態系統服務模擬之影響-以大屯溪流域為例，(2013)，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。
153. 劉雲漢，土石流發生之空間特性研究—以陳有蘭溪集水區為例，(2001)，國立台灣大學地理環境資源研究所碩士論文。
154. 李振綱，大學周邊的產業群聚現象，(2012)，國立成功大學都市計劃學系碩博士班學位論文年，1-105。