

壹、前言

由於科技快速發展，地球環境急速的改變，我們對於環境的態度和觀念也逐漸在調整，因此，對於森林經營的方向也不得不重新思考。自 1960 年開始，環境運動就開始日益蓬勃，人們開始主張環境需有完善的管理，反映到森林經營上，在第五屆國際林學研究機構聯合會(International Union of Forest Research Organization, IUFRO)中，首先提到要以森林多目標經營(multiple purpose management)為未來林業經營的方向，以往森林只供木材生產的觀念從此改變，轉而開始重視森林的非木材價值。然而在人口劇增的 1980 年代，工業、經濟迅速發展，對生態和環境產生了嚴重的影響，聯合國有鑑於世界環境問題日趨嚴重，乃組成世界環境發展委員會(World Commission on Environment and Development, WCED)討論全球永續發展的長期環境策略，並於 1987 年提出「我們共同的未來」(our common future)建議書，該建議書指出了全球環境問題及永續經營的理念與策略，企圖為全球環保與經濟間尋求平衡點。

在林業經營方面，同樣面臨生態保育與經濟發展的問題。1992 年在巴西里約召開的地球高峰會議中提出了永續經營的理念，其中在林業方面乃強調生物多樣性公約及森林的永續經營，在此壓力之下，美國於 1993 年成立森林生態系經營評估團隊(Forest Ecosystem Management Assessment Team, FEMAT)，訂定生態系經營關切之議題、生態系經營標準及綱要，期望為森林經營找到合理可行的永續策略。簡單來說，森林生態系經營就是以維持生物多樣性和永續性為目標，在為社會所接受、經濟上可行、以及符合生態之原則下經營森林。其中生物多樣

性，是指生態系中生物體的變異性，涵蓋了所有從基因、個體、族群、物種、群集、生態系到地景(landscape)等各種層次的生命型式，由此可知，生物多樣性的內涵是廣博而複雜的。

在台灣地區，森林經營亦隨環境變遷而歷經木材生產、多目標利用等重要階段，乃至在現階段為因應全球資源永續利用而發展之森林生態系經營。近年來，森林經營強調維持森林生態系的完整，以提供現代人類及下一代所需的服務與財貨，並發展一套符合台灣自然資源與環境特性的永續經營方式。目前我國之林業政策係以生態保育、維護生物多樣性，及國土保安長期利益為目標，積極推動全民造林，厚植森林資源，並規劃林地分級，發展適合台灣地理環境的森林生態系經營模式，充分配合當地的居民的傳統文化，使林業經營能符合世界潮流。我國在新世紀國家建設計畫摘要(民國 90 至 93 年四年計畫暨民國 100 年展望)中明白指出，在落實生態保育方面，應建立森林生態系經營，健全自然資源經營管理制度，由此可知，森林生態系經營在未來十年依然是未來森林經營的主要方向。

森林生態系經營相關資訊包括時間和空間上資訊，不但數量龐雜且格式多樣，在資料收集與處理上往往費時費力。近年來，由於遙感探測和航空攝影技術都大幅進步，加上地理資訊系統 (GIS)的發展，使我們可以更快速且更精確的掌握資料，並組織及更新已經存在的資料，提高其空間評估的能力，使森林經營在資料的存取、分析及展示上都能更有效率，因此地理資訊系統遂成為森林生態系經營的有力工具。

在落實森林生態系經營的方法上，經營者應先將資源調查

所得之基本資料，包括生物、物理和人類向度等資料，配合區域規劃作業方法，將林地劃分為生態單元(ecological units)，使林業人員能全盤地瞭解經營地區的環境特性，供作森林整體經營(integrated management)與管理之依據 (Bailey, 1996)。林地分級的基本目的即在於瞭解各生態系的環境特性，供森林生態系經營、林業政策研擬、以及林地管理之用 (鄭祈全等, 1997)。由於林地分級除可提供上述目的之外，還可提昇不同經營管理階層間的溝通性；就森林經營管理而言，林地分級亦可讓森林經營者將現有的經營技術轉移到類似的地區，供作資源調查、經營區域潛力評估以及經營結果預測之參考，因此，將林地以符合生態原則的方式加以分級，是森林生態系經營之必要工作。

森林生態系經營係以整合性的生態功能為導向，基本上屬於多尺度(multi-scale)的架構，亦即除了重視生態單元本身之外，亦強調生態單元與鄰近單元間之關係，因此，林地分級若擬以集水區作為基本的生態單元時，應有尺度的觀念。Bailey (1987, 1988)曾提出生態多尺度的觀念與架構；Salwasser (1990)對許多國家所提的生態多尺度架構，也有詳細的介紹。國內方面，鄭祈全等人曾就台灣地區的林地分級，建議應考量多尺度的階層式架構，此外，亦利用數值地形模型自動粹取多尺度的生態單元，其目的即在於滿足林地分級多尺度的需求 (鄭祈全等 1997, 2000)。

除了林地分級之外，為了使林地的管理更有效率，近年來有關決策支援系統在森林經營上的應用日漸受到重視，其主要原因在於森林經營者可藉助該系統迅速地掌握林地現況，並針對不同的經營目的將林地作合理的規劃與利用。利用決策支

援系統在進行林地分級以及以知識庫建立基本生態模式的過程中，必然會涉及分級準則的訂定，如何尋求一個合理的準則，一直是規劃上的一大考驗，而數學規劃可以解決資源配置問題，近年來已被廣泛的應用於森林規劃上，例如材積最適收穫量、森林多目標經濟與目標規劃 等（劉浚明，1995）等，故可以視為輔助準則建立之有效方法。

在人類追求自然的喜好和生活品質的提升之下，木材製品的需求量居高不下，且有逐年增加的趨勢，但是在台灣地區自從全面禁伐天然林以及規定年伐木量不得超過 20 萬立方公尺以來，木材自給率已降至 1% 以下，99% 以上得靠進口(楊政川，1999)。由於環保意識已在世界各國普遍興起，要求維護森林生態系完整及其社會公益效用的呼聲日漸加大，國際熱帶木材組織(ITTO)於 1990 年會議中決議至公元 2000 年時，國際間貿易的木材，必需來自永續經營的森林，所以日後木材的來源將有所限制。此外，面對國際森林及木材認證制度，多數歐美國家及東南亞木材主要輸出國，皆已建立國家級的認證制度，近年來並推動互相承認協定，我國若不積極研討因應之道，未來可能影響木材及林產品市場（葉名容，2001）。因此，在森林經營上，應積極實施林地分級，適當經營可劃為林木經營區的森林，選擇適地適木、材質優良、生長良好的樹種，加強造林及中後期撫育，提高林地生產力，以提高木材自給率。

六龜試驗林自 1998 開始進行三年的森林生態系經營示範先驅計畫，期能藉由規劃及監測將生態系經營體系落實於試驗林之施業，目前已著手編定六龜試驗林生態系經營計畫，預定於 2002 年全面實施生態系經營，因此本論文以該地區為研究範

圍，兼具有研究和應用上的意義。藉由多尺度林地分級決策支援系統的建立，可以解決生態系經營中層級規劃的問題，同時在林地分級使用的前題下，進行樹種潛在適宜區的評估，將有利於後續加強林木經營區之規劃，以落實生態系經營。

貳、研究動機及目的

一、研究動機

林地分級可以了解林地應在應用上的潛力與限制，合理的林地分級乃是森林生態系經營的首要工作。在這方面國內研究相當少，在國外，雖然許多國家如美國、澳洲、加拿大、日本等各有其分類系統，但由於台灣地區林地狀況複雜，不能完全引用國外方式，因此研擬一套本土化的林地分級作業體系，不論在理論或實際作業上都有其必要性。

森林生態系經營所包含的層面和議題，廣泛散佈在各種不同的領域和階層中，包含的範圍遍及自然及人文科學，往往使得森林經營難以落實。因此，整合各領域的需求，進而發展一套合宜的決策支援系統以協助決策者做決策、強化經營者和資源使用者之間的溝通管道，為目前森林經營之方向。

如上所述，林地分級和建立決策支援系統都是生態系經營的重要工作，若能將兩者結合，對於森林經營領域必能提供更有效率的規劃與管理。然而，在這方面國內尚未見有相關研究，故本論文的主要動機在以決策支援系統為基礎，建立一套適合不同管理階層及不同經營尺度的林地分級系統，以符合不同管理階層之需要，同時也了解不同單元對林地分級之影響，釐清生態系不同尺度的經營在管理上的意義。

雖然地理資訊系統和數學規劃早已普遍利用在森林經營規劃上，但是僅以地理資訊系統進行森林規劃的結果，雖然可以了解規劃的地理位置，但往往無法驗證規劃結果的正確性；若單純以數學規劃輔助森林規劃，雖有數學理論支持規劃結果，

但卻無法確定規劃結果的地理分佈。在國外，曾有前人研究試圖將數學規劃結合地理資訊系統以了解規劃結果的空間分布 (Emilio 1993、 Erik 1997)，但相關研究在國內尚闕如。因此，在林地分級的過程中，如何納入數學規劃方法，合理訂定評估準則，亦為本論文的主要動機之一。

另如前文所？，為提高國內未來的木材自給率，減少對於進口木材的依賴，有需要加強生態系經營中之林木經營要項，因此，本論文的另一動機是在森林生態系經營決策支援系統下，以台灣杉為例，進行潛在適宜區的評估，期能在未來的森林經營上提供即時、有效、合理之決策輔助工具。本論文選用台灣杉為例的主要原因在於台灣杉為本土重要樹種，在育林作業上如能慎選適宜生育地使符合生態系經營的適地適木原則，則該樹種可生長良好、材質優良且少病害，適合林木經營。

二、 研究目的

基於以上動機，本論文之目的可以歸納如下：

(一)、 建立多尺度之林地分級決策支援系統

以林地分級為基礎，並考慮多尺度的經營觀念，以美國林務署所開發之生態系經營決策支援系統 (EMDS-Ecosystem Management Decision Support) 為框架，建立一套多尺度的林地分級決策支援系統，提供全國林地分級及其他地區作為建立及應用生態系決策支援系統之參考。

在決策支援系統中，由於涉及不同尺度的經營架構，以及林地分級的評估準則，因此本論文擬針對不同尺度的評估結果

和林地分級準則的建立做進一步的研究與探討，主要的目的在於：

(1).探討不同尺度下的評估結果在森林經營管理上的意義

探討不同空間尺度對林地適宜性的影響，以建立一符合不同管理階層需要之多尺度林地分級決策支援系統，期能結合林地分級與不同管理層級間的經營模式，使森林經營管理中的階層式架構能更為明確，供經營者在不同的層級架構中能有不同的參考依據。

(2).評估以線性規劃輔助建立知識庫之應用可行性

利用線性規劃輔助建立決策支援系統知識庫中的評估準則，進行森林決策的規劃，期能以提高知識庫的合理性。

(二)、應用所建立之決策支援系統評估樹種潛在適宜區

在多尺度林地分級決策支援系統建立後，為了適度地規劃木材生產區，降低用材的進口比例，乃以台灣杉適宜潛在適宜區的選擇為例，進一步建立生態系經營決策支援系統的應用模式，以提供樹種潛在適宜區評估之參考。在該目的下，除了比較分析結果與實際現況的差異之外，並比較在林地適宜性分級前、後進行潛在適宜區分析之差異，以驗證林地分級的重要性。

參、前人研究

一、森林生態系經營

生態系是一個廣泛的概念，任何一種生物群落與它周圍環境的組合，都可以形成獨立的生態系統。生態系的組合包括生物及非生物要素，兩者在特定的空間裏(即棲地)產生交互作用，並與其他生物形成能量及物質轉換的動態系統，這個系統就是所謂的生態系 (ecosystem)，其中的關係錯綜複雜且多樣。任何生態系都在能量與物質不斷變化的輸入與輸出下，維持其多樣性的結構及功能，保有生態系的穩定性，並達成平衡，如有任何不當的干擾皆會造成生態系的失衡。

森林是陸地上最龐雜的生態系，其經營理念長久以來被認定為生產和維持特定的商品產出，例如木材、副產品、水等，直到 1972 年起，許多研究指出頻臨滅絕的斑鳩(spotted owl)之生育地為花旗松老林分，而伐木所造成的森林塊狀化(forest fragmentation)，已危及斑鳩的生存；在太平洋西北區的鮭魚，原為當地重要經濟魚類，但是伐木造成河流兩岸及水中鮭魚棲地環境的改變與破壞，將使重要水生資源受到嚴重損耗(洪富文，1995)，這類木材生產與棲地保育的衝突多年來難以解套。一直到 1990 年代初期，永續的觀念興起，生態系經營和永續發展(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED, 1992)在美國成為生物和人類社會經營管理的主要概念及政策(Caldwell *et al.*, 1994)。生態系經營和永續發展具有相同的目標和迫切性，二者的目標都在維持土地、水、生物、人類社會和經濟社會的需求。要滿足這些需求，必需具備健康、高生產力的土地和自然資源，然而人口的增加對資源永續發展產

生了極大的壓力，也危及了達成永續目標的能力 (Silver & DeFries, 1990)。森林生態系經營的目的即在維護森林資源多樣性和永續利用發展，在環境保護前提下，允許日益增加的人口使用資源以維持並增進人類的生活，在環境保護與人類發展之間，找到一個明智中庸的方法，以取得二者之間的平衡。

森林生態系經營強調生態、社會、經濟等因子在不同時間和空間尺度下的整合，以維持生命型態、生態過程和人類文化的多樣性。在此理念下，有六標準可以幫助我們衡量經營的成果：(1)森林資源的擴展(2)生物多樣性的保護(3)森林的健康和活力(4)森林的生產力(5)森林保護功能(6)符合經濟和社會的需求。這些標準並不是絕對的，因為森林生態系經營有不同的尺度和不同的決策層，在不同的尺度和決策層次下，應有不同的評估標準 (Vivek *et al.*, 2000)。事實上，生物、物理以及人的向度應緊密相互連結，由人類來決定生態系中的生物和物理價值，以符合大眾不同的需求。現今的人類除上述的價值之外，尚會關心到經濟、文化、美學、精神等屬於人文的價值 (鄭祈全等, 1997)。

本質上來說，生態系經營的典範和永續生產收穫仍有相當大的差距。至今，生態系經營對於處理大尺度、長時間、合於社會可接受的經濟適宜性以及生態永續性等議題，仍處於一個理想的概念階段，目前最大的挑戰，就是如何將這些理想建立一個具有明確定義且可以實際操作的方法 (Thomas *et al.*, 1997)，生態系經營需符合時間、專業及費用上的限制 (Smith, 1997)其中如何取得生態系經營的龐大費用，亦是生態系經營在理想和現實之間的落差來源 (Oliver *et al.*, 1993)。

一般而言，森林生態系經營的基本方法必需包含六個項目 (Richard *et al.*, 1998)：

1. 設立目標、建立方向及目的
2. 在多種地理尺度及解決方案下評估資源
3. 決定決策變數及做出決策
4. 計劃決策施行的策略
5. 建立監測系統評估決策的結果
6. 使用適應性經營的方式

至於生態系經營中有關適應性經營的過程，則包含問題的定義、替代方案的發展及選擇，最後才是實行，其關係如下圖：

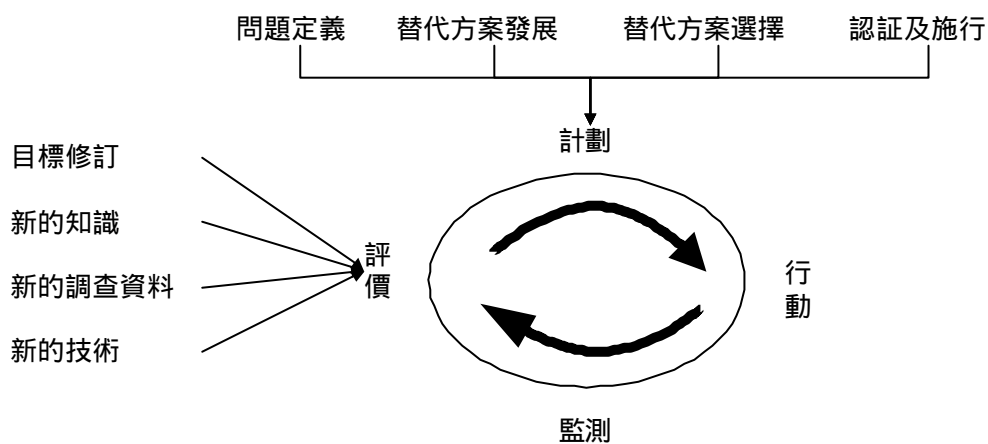


圖 3-1：生態系經營適應性經營的過程(譯自 Michael, 1999)

永續發展的觀念迅速為各方面所接受，主要原因在於它強調開發建設與資源保育之相容性，亦即經濟發展與環境保護可兼籌並顧。台灣數十年來的發展，向以經濟為主軸，國民所得與生活水準皆因而大幅提升，但快速的經濟成長也造成了生態與環境的破壞，加上地狹人稠，土地資源有限，處處發生超限

利用的情形。近年來國際保育聲浪高漲，我們身為地球村的一份子，對於自然資源永續經營亦需盡最大的努力。有鑒於此，行政院經濟建設委員會乃設置國家永續發展論壇，委託工業技術研究院能源與資源研究所辦理，邀集學者專家，分別在經濟、環境與社會三大領域，訂定永續發展策略綱領，做為國家永續發展的基本原則。

在八十六年的永續發展論壇建議案中，對於森林經營部份提出以下原則：

1. 為維持現有生物棲地，應加強保安林（包括國家公園、自然保護區及其他保安林）之維護並繼續限制本省天然林之砍伐。
2. 為提高森林生產力，應推廣實施森林生態系經營。
3. 建立長期生態監測系統以瞭解森林生態運作，並定期修訂森林經營及保育目標。
4. 加強取締林地濫墾及山坡地超限利用，並提高經濟誘因，鼓勵民間造林。
5. 以地景觀點重新配置台灣區域空間，使自然的大區塊（保安林、國家公園及自然保護區）間適當的配置生態通道及城鄉小區塊，以增加連結，並保護生態敏感地區，降低棲地破碎。

由上述原則可知，台灣森林的經營應朝生態系經營的方向前進，然而森林生態系經營所需的資料包括各種不同的向度，資料量多樣且複雜，為處理龐大而複雜的資訊，需加強各領域的人才合作，並積極建立與社會的溝通和互動管道以達成共

識，並找出符合生態原則下的經營原則。此外，生態系的資料大多具有空間屬性，故利用電腦、地理資訊系統、航遙測等科技來協助資料處理和展示，更是在連結民眾和生態的過程中，不可或缺的重要環結。

在國內，森林生態系經營的規劃與執行(楊榮啟，1995)、生態系經營觀念模式的研究(林文亮，1995)、生態系理念與實務作法(馮豐隆，1997)都有相關研究。至於森林生態系經營理念下的生態系分類及生態系決策支援之地理資料庫規劃與整合近年來亦有相關研究(鄭祈全 1997，2000，2001)。

二、 林地分級

林地分級的目的在於使林地的經營能夠具有組織化和溝通性，(Nelson *et al.*，1978)，同時，林地分級可以提供林地的相關資訊，供為林業政策發展上和森林決策上的依據；另一方面，就森林經營管理而言，林地分級可為各種資源調查之依據，也是評估經營區域潛力及預測經營結果之參考，再者，林地分級可以讓經營者將現有的經營技術轉移到類似地區，因此將林地依據符合生態原則的方式加以分類，是為森林經營之首要工作。

目前國外已發展各種不同的林地分級系統，如美國的 Corliss (1974), Daubenmire (1976), Pfister (1976), Smalley (1979), Barnes *et al.*(1982), Pregitzer *et al.* (1983)；澳洲的 Christian and Stewart (1953;1978)；加拿大的 Hills (1952), Jurdant *et al.*(1975), Lacate (1969 & 1981) 與日本的 Kawana (1981), Mashimo (1981) 等。這些分級系統雖可作為本國林地分級之參考，但因本國林地地形陡峭，林地各項生態因子極為複雜，在林地分級上理當

不同於其他國家，故需要自行發展一套適合國內使用的林地分級作業體系和林地管理措施，才能落實國內的林地分級。

林地分級一般是以需求面為導向對林地作分類使用，但是若要考慮生態和環境的永續發展則應改變傳統上以需求導向為分級考量的標準，改由供給面出發，考慮生態或環境所能提供的資源和其容受力，才能使資源利用達到永續的目標。

國內林地分級最早是以地位指數分類方法，透過調查優勢木和次優勢木樹高來評定林地生產力潛力，或透過林地種類的分類，將林地劃分為木材生產林地或非木材生產林地，直到 1970 年代，雖引進數學規劃的計量決策工具，但在數學函式的量化與轉換上，仍有許多的困難及限制，因此並未得到良好的效果。

有鑒於林地分級的重要性，行政院農委會在民國八十年修訂的「國有林事業區經營計畫綱要」中增訂建立地理資訊系統和林地分級二項，並在第三次全省森林資源調查計畫中，要求積極籌劃地理資訊系統之建立與林地分級工作。此外，民國 83 年 6 月和民國 87 年 2 月在國內舉行的第三次和第四次全國農業會議，林業組有關「加強森林資源經營規劃，建立永續發展之經營體系」所作的結論亦強調：建立台灣林地分級作業體系屬立即辦理事項，爾後，有關分級之研究遂逐漸發展，包括郭傳鎮等(1993)，沈昆禧和管立豪(1995)，鄭祈全(1995;2000)，賴晃宇(1995)，廖錦偉(1997)。

林地分級的結果會因不同的分級單元、分級尺度和分級方法而有所不同，因此在林地分級的過程中，首先應考量這些相關的問題。

(一) 分級尺度、分級單元與分級方法

1. 分級尺度

由於生態系組成，可以視為一種時間和空間上不同層級尺度的結合，在生態系經營中所要保存的生物多樣性，亦非指單一層級的多樣性，而是包含：遺傳基因、物種、生態系等多樣性。因此層級關係成為生態系經營所需要考量的基本原則之一 (Richard *et al.*, 1998)。不論是地景或者是生態系，都是一種配套的層級系統，因為地景和生態系都是開放系統，每一個層級內的元素和其上、下層級的元素都有物質和能量移轉而相連結。生態系的特定現象雖然發生在特定的層級，但是生態系的觀念在空間尺度上是開放的，尺度的選擇端視研究者所著重的物種或過程而定。此外，不同的經營目標也會涉及不同的層級，因此在生態系經營的理念之下，必須針對不同層級加以研究。

層級理論是用來描述一個由兩層以上尺度分離功能元素 (discrete functional elements) 所組成之系統運作方式 (Urban *et al.*, 1987)，層級系統中每一個元素都自成一個單元，各自具有其功能與限制，並呈現其自有的穩定與變異特性。就生物層級理論 (hierarchy theory) 而言，第一個層級是分類上的層級 (taxonomic hierarchy)，第二個層級是親緣的層級 (phylogenetic hierarchy)，第三個層級是結構性的層級 (structural hierarchy)，而第四個層級則是功能性的層級 (functional hierarchy) (Wilson, 1992)。在生物組織中，當某一層次所含的組織分子，彼此結合成更高功能整體時，會有新的特性產生，其特徵常與原來單位不同，該特性稱為層級控制原理 (劉棠瑞等，1992)。

環境因子雖可視為許多獨立變數而加以觀測，但這些單一因子之間常有顯著的相關性，例如：氣溫常隨海拔上升而下降、土壤含水量與方位和地形間具有密切相關。因為這些特殊關係的存在，故生育地之環境因子間，係存在某種有次序的系統方式，即所謂之層級系統觀念 (hierarchical system of environment)。綜上所述，環境之層級系統觀念係指環境因子對植物分佈之影響可劃分成許多層次，不同層次之因子可導致不同尺度之植群變異，而不同層次因子之間，常有某種有次序的相關性存在 (蘇鴻傑，1987)。

森林生態系經營係以整合性的生態功能為導向，基本上屬於多尺度 (multi-scale) 的架構，亦即除了重視生態單元本身之外，亦強調生態單元與鄰近單元間之關係，因此，在劃分生態研究的基本單元時，應有尺度的觀念。Bailey (1987, 1988) 曾提出生態多尺度的觀念與架構；Salwasser (1990) 對許多國家所提的生態多尺度架構，也有詳細的介紹。

國內方面，鄭祈全等(1997)曾就台灣地區的林地分級，建議應考量多尺度的階層式架構，以當前林務系統為例，在林務局方面宜發展大尺度的區域單元；在林管處方面宜發展中尺度的地景單元；而轄屬的工作站宜發展小尺度的基地單元。該規劃方式除了在架構上可以考慮到全國性的階層式架構之外，有關林務局與轄屬林管處和工作站間之經營策略亦能具有聯貫性，不論在生態意義或管理層面上都十分符合層級理論。

2.分級單元

林地分級除了考慮分級尺度之外，分級單元的選用亦為影響因子。由於集水區因自然環境具有地理空間差異性，可視為一基本的生態系，故前人研究曾建議以集水區作為基本的分級單元(Odum, 1969 ; Lotspeich, 1980)。國內有黃書禮(1988)、鄭祈全(1993 , 1995)提出以集水區為分級單元之觀念；賴晃宇(1995)、賴晃宇等 (1997)以一級河集水區作為台大實驗林地理資料庫之建置單元。

目前集水區自動粹取方式分為二種，即以一特定面積或以河川級序作為粹取集水區之對象。就生態尺度而言，鄭祈全等(1999)指出以一特定面積粹取集水區的作法，雖簡易可行，但以河川級序為對象所粹取出之集水區，則可完全符合多尺度生態單元之需求，且在技術方面，所粹取出之多尺度生態單元，不論在高級序與低級序集水區之整合，或者是同級序集水區但性質相異之資料庫的整合，都不會發生空間尺度不相容的問題，有利於空間對位和地理資訊之空間分析。

3.分級方法

生態系分類的基本目的在於瞭解各生態系的環境特性，供森林生態系經營、林業政策研擬、以及林地管理之用，其功能為(1)分類後的生態單元可作為森林生態系經營之永久單元(2)可將某一生態系之技術與經驗轉移至另一生態系(3)可作為森林研究 / 實務者、森林經營者、以及公眾間之溝通協調媒介(4)可作為森林資源調查與監測之取樣網點(sampling networks for monitoring) (鄭祈全等 , 1997)。

合理的森林生態系經營有賴於生態單元之劃分。然而單元劃分系統常因不同國家、不同地理區域、或不同層級的政府機構而有所不同，甚至有為不同目的而建立不同分類系統。

以加拿大為例，就有三個主要的分類系統(黃書禮，1988)包括：

(1)生態方法(Hills 系統)：依據氣候、地形、微氣候、微地形等因子，將地區劃分為基地區域(site region)、土地型(land type)、地文基地型(physiographic site types)、以及地文基地相(physiographic site phases)。

(2)生物-物理法(Lacate 系統)：依據植被型反映不同區域之氣候差別，劃定土地區域(land region)；依相似地質、地形、地勢之等級劃分土地分區(land district)；依據微地形所區劃之等級劃分土地系統(land system)；土地型(land type)則以可反映地表排水、土壤質地、及植生之土壤為區劃依據之等級。

(3) 加拿大生態土地分類委員會(Canada Committee on Ecological Land Classification; CCELC)之分類系統：整合加拿大各省所建立之分類系統，其與上述二系統之主要差異為每一階層之區劃，均同時考慮氣候、水文、地形、植被、及土壤因子，而非僅考慮某一環境屬性。

一般在進行生態系分類時，大多根據其屬性之相似性(similarity)而予以分類，其方式有二種，分別為區域分類(regionalization)與基地分類(site classification)(黃書禮，1988)，前者以理則學的觀點，依據研擬的準則如等級、比例尺及資訊種類之劃分準則，將生態系依序區劃為同質性之生態單元，故又稱為演繹法(deductive process)或邏輯分割法(logical

division)；而後者係以分類學的觀點，先將整個區域分割成許多生態小單元，然後再比較單元間屬性之相似性，並將相似的單元聚集成一生態單元，又可稱為歸納法(inductive process)或聚集法(agglomeration)。

近 20 多年來，由於電腦科技和多變值統計分析之發展，使得基地分類方式受到資源規劃者與經營者之重視與應用。雖然有些學者認為藉助多變值分析之分類方法欠缺評級函數(rating function)及生態學理論依據(Hopking, 1977、 Rowe & Sheard, 1981)，但若能針對所選用的環境因子和應用方法提出明確的依據與說明，而且藉助相似性測定方法以避免涉及權重、偏差等主觀性問題的話，應用多變值分析進行基地分類應還是未來發展的主流。

(二) 林地適宜性分析及其分析方法

自然資源具有空間分布的差異性，故在規劃或是利用自然資源時需有土地使用適宜性的概念，亦即考慮其限制和潛力，使資源能作最有效的利用，並減少對環境的負面效果。因此，適宜性分析遂成為環境規劃之工具，可藉分析自然環境對各種土地利用之潛力與限制，確保開發行為與環境保育目標相容，有效地將資源做最適的空間分配。因此，可藉由土地適宜性的分析，瞭解林地資源所能承受實質利用或開發強度之容受力，進而配合林地使用之需求，分析自然資源提供土地使用的適宜性。

早期的土地規劃，是以手繪疊圖法進行，但是環境因素納入土地使用規劃中是在 1960 年代，因為一開始是由

McHarg(1969)所提出，所以稱之為馬哈法。其理念強調土地使用型態必需遵循自然作用，因此又稱為生態規劃法。在馬哈法中假設每一塊土地對於某種土地使用有一定的適宜性，其中某些土地允許多種土地使用共存，並且重視資料收集的順序。由於環境因子之間存在著層階關係，因此可以由氣候與地質的分析，了解該地區的地文特性，從地文特性中，又可以進一步了解其土壤狀況、植生等生育地條件。

1960~1970 年代之後，發展出許多土地使用適宜性分析方法之研究，依 Hopkins(1977)、黃書禮(1988)之整理及分類，主要可以分成：

1. 型態法

2. 數學組合法

(1).序位法

(2).線性組合法

(3).非線性組合法

3. 同質區界定法

(1).因素組合法

(2).群落分析

4. 邏輯組合法

(1).規則組合法

(2).階層組合法

完全型態法是早期發展出來的一種界定同質區的方法，首先是將研究地區劃分成同質性(Homogeneous)之區域，其次是擬定一個表，以口頭描述每一個區域做某種使用時會產生的問題及影響，以此分出其適宜性等級，最後，就每一種土地使用，繪出一張圖，以表示出每一個同質區域做該土地使用之適宜性。此法是最早發展出的一種方法，故做法上較為粗略，在判斷同質區時完全依據經驗，並沒有明顯可依循之方式，故較難令人信服，且在區分適宜性等級時亦是依個人判斷，因而有數學方法之產生。

數學方法中之序位法，是早期研究土地使用適宜性分析之方法，首先繪製每一種自然環境因素(例:土壤、地質、地表水文、土地使用)之不同類型分佈型態(例如:砂土、壤土等土壤種類，以及火山岸流、沖積層等地質型態)。其次是針對每一種自然環境因素中各種類型做某一種土地使用之適宜性等級，並擬定一個表，其適宜性等級表示方式可以顏色深暗或代以數字表之，並將各類型之適宜性等級繪製成圖。最後針對每一種土地使用所繪製的一組圖，重疊套繪出每一種土地使用之綜合適宜性圖。由於序位法中，各因素衡量其各類型之序位標準並不一樣，故不能進行算術運算，且序位法須先假設各因素間是獨立的，無法解決因素間交互影響的問題，此外，若考慮的因素很多時，以明暗表示適宜程度在疊圖時不易明確分辨，故又有組合法之產生。

線性組合法，主要是為了克服序位法中無法做數學運算而發展出之一種方法。各因素之各種類型之適宜性等級是以等距度量 (Interval Scale)，而每一因素又依其重要性給予一個權

數，由每一因素之權數乘以其不同類型之間距度量值，可得各種自然環境因素之不同類型的適宜性等級。線性組合法雖改正了序位法中度量之問題，但卻仍無法解決因素間相依的問題，於是發展出非線性組合法。

非線性組合法，是指在線性組合法中，加入對因素間關係之考量，並能以數學式清楚地界定，而取代了原有的線性組合關係式，故非線性組合法可以克服因素間相依之問題。然而，若干因素間之交互關係往往無法清楚地以量化關係界定出，因為有許多的影響因素及成本無法明確地知道。現今常被使用的非線性組合方程式僅有計算逕流及萬用土壤流失量之估算式，但這僅是在分析適宜性時，因素間交互關係的一小部份。所以非線性組合法雖能解決因素間相依的問題，然仍無法在分析整個土地使用適宜性上有效地操作利用，故有同質區界定法的產生。

同質區界定法中之因素組合法，是組合所有因素的各種類型而得到一個同質性區域的綜合圖；並針對每一特殊類型組合(同質性區域)對每一種土地使用做適宜性分級；最後將所得結果以圖表示。因素組合法僅適用於含有少數因素時，如因素太多，將不容易定出適宜性分級。

群落分析法主要是以統計運算方式計算變異數，比較組間差異及組內差異，來劃分同質性區域。有明顯劃分同質性區域之方法，可解決變數間相依之問題。

規則組合法是另一種處理因素間相依問題之方法，且介於因素組合法和非線性組合法間之綜合，其特性是不必如因素組

合法般對每種類型組合給予適宜性等級，而是改為對一組含有多個不同類型組合之集合，評估其適宜性等級。其表示方式為一種口頭描述之類別或邏輯關係，而非以數字及運算式表示，所以沒有線性組合法之困難。至於階層性規則組合法可視為規則組合法中之特例，其可減少規則組合法中須考慮的因素組合數。

要了解土地使用之適宜性，首先要將土地做分類，土地分類的方法很多，但是可以歸納成二個主要的步驟：

- 1.劃分一區域為同質性之土地單元
- 2.評估每一土地單元對某一種土地使用方式之等級

有關適宜性因素或限制因素之間的差別，完全視分級標準而定，某一項因素之高等級條件，可能對某種土地使用類型是適宜性的因素，而對另一種使用類型則是限制性的因素。

一般來說，土地適宜性的分析須先以輸入地理資訊，進而分析環境特性之空間差異以及人為土地使用之潛力和限制；其結果為一組地理圖，圖中顯示出每一土地單元適宜於該種土地使用之程度(黃書禮，1988)。然而有關環境適宜性因素的等級判斷，往往交由技術專家來決定，惟其判斷結果常受環境變數間之相關與否所影響。因此前人研究(Hopkins, 1977)建議了二種作法，其一為只選擇彼此沒有高相關的因素，另一法就是在分析中加入各種因素的相對重要性，稱為加權因子評分法。此外，在國內，曾有學者採用多變值統計分析之因素分析，群落分析和判別分析並配合地理資訊系統的空間分析功能，應用於林地分級(鄭祈全，1995)以及水源涵養保安林的規劃(賴晃宇，1995)。

三、決策支援系統於森林資源經營之應用

(一)決策支援系統

決策科學(Decision Science)乃研究人類在決策過程之分析及設計能力，透過基礎決策理論之研究，以探討不同決策模式之優缺點，增進決策品質。一般而言決策活動的進行過程可以分成三個階段（即 Simon 的三階段模式）：

- 1.智力(intelligence)：與過去狀況比較、與計劃中狀況比較、與組織中其他單位比較、與同業比較掃描環境的各種狀況以找出問題。
- 2.設計(Design)：依目標來確定有關的人、事、物，找出變數間關係，形成可行方案，包括(1)確認目標，界定範圍(2)找出其中變數並確認關係(3)分析變數組合形成可行方案。
- 3.選擇(Choice)：從可行方案中，選擇一個方案。如：(1)最佳解(2)決策樹(3)統計推估(4)償付矩陣.....。

在 1970 年代早期，Scott Morton 首先建立決策支援系統(Decision Support System, DSS)的主要觀念。他定義 DSS 為 "互動式電腦化系統"，即此系統幫助決策制定者利用資料(data)與模式(models)以解決非結構化問題"(Scott, 1971)。爾後，DSS 典型的概念漸漸完整，其定義為：結合個人智力資源與電腦能力以改善決策品質。意即一個以電腦為基礎，幫助管理決策制定者處理半結構化問題的支援系統。

決策支援系統可以視為一種可以提供互動資訊以支援管理者決策過程的電腦系統。決策支援系統使用分析模式、資料庫、互動介面、模型的處理功能配合決策者本身對問題之洞察力與判斷力，可用以直接支援特殊型態的決策，也可支援管理者之

個人需要與決策所需的資訊，其目的是如何有效地支援決策，並不取代決策者而做決策。

現今的決策支援系統可定義為：「應用可用的或合適的電腦技術來輔助管理者處理半結構性的問題，並提高其決策的效能」(梁定澎，1991)。因此，廣義來說，決策支援系統包括各種不同類型的系統、工具和技術。只要是透過電腦上的軟體運作，而達到協助管理決策訂定的系統都可為決策支援系統。決策支援系統協助決策者作出正確決策時提供所需資訊的系統，這個系統強調友好使用者介面、即時查詢、報表和分析能力。

空間決策支援系統的概念，係由上述決策支援系統衍生而來。當決策因子涉及空間分布屬性時，傳統的決策支援系統將無法有效整合相關資訊，而地理資訊系統雖可提供強大的空間資訊處理能力，但是在模式功能及介面親和力上，有其欠缺之處。為有效結合兩者優點，故有空間決策支援系統之發展。所謂的空間決策支援系統(SDSS)，其實便是承襲企業界決策支援系統(DSS)的理論，以及地理資訊系統(GIS)的相關技術，二者結合發展而成(孫志鴻，1991)，空間決策支援系統與決策支援系統主要差異，在於使用建構軟體之不同，其他在發展的架構與組成上，並無太大差異(鄭惠丹，1994)。

空間決策支援系統能整合不同的空間及非空間性資料，使用地理資訊系統之分析及統計的功能模式，藉由圖形輸出介面將資訊傳給決策者，該系統不僅可以配合不同決策者的問題解決風格，亦可輕易地修正進而擴充決策者所需的新功能(Denshamand & Goodchild, 1989)。地理資訊系統發展於1960年代，初期因為價格昂貴，且電腦技術不發達，應用上受到比

較大的限制，但是由於能夠處理大量的空間資訊，仍常被用在自然資源的規劃上。近年來，隨著電腦科技的進步，地理資訊系統在各領域的應用日益廣泛，在自然資源的經營規劃上更是一不可或缺的工具。地理資訊系統具有資料輸入與驗證、資料儲存與管理、資料輸出與展示、資料轉換以及資料查詢等五大功能(Burrough, 1987)因此，地理資訊系統是一套具有空間資訊整合以及協助解決真實世界問題的決策支援系統。

(二)生態系經營決策支援系統

生態系經營決策支援系統(Ecosystem Management Decision Support ; EMDS)是美國林務署於 1998 年所發展的一套生態系經營決策支援系統，主要功能在將知識基礎推論的邏輯形式整合到 GIS 環境中，提供生態決策訂定之評估和評價。其中知識推論的形式，是以物件和模糊邏輯為基礎所組成的網路，對欲研究的議題做一層級架構的知識庫，這種建構方式較傳統知識庫(如 rule-base expert system)更能呈現複雜且抽象的生態問題。該系統的研發者將 EMDS 定義成一個應用框架，因為這個系統提供一般性解決問題的方法(即架構)，來引導生態系經營決策的評估。

EMDS 的評估主要是透過知識庫將所關切的問題具體化，它提供一個相依網路之層級架構，用以連結使用者和推論機制(inference engine)，本身是一種詮釋資料，並不進行運算。知識庫本身和推論機制是知識庫系統中二個重要的部份，知識庫本身定義了問題領域的實體，包括它們之間的關係和狀態，而推論機制則在知識庫中連結外界資料執行運作並對系統狀態下結

論，以 EMDS 所搭配的 Netweaver 知識庫為例，使用者在 Netweaver 描述問題的狀態及之間的關連性，執行運算評估則在推論機制中進行。

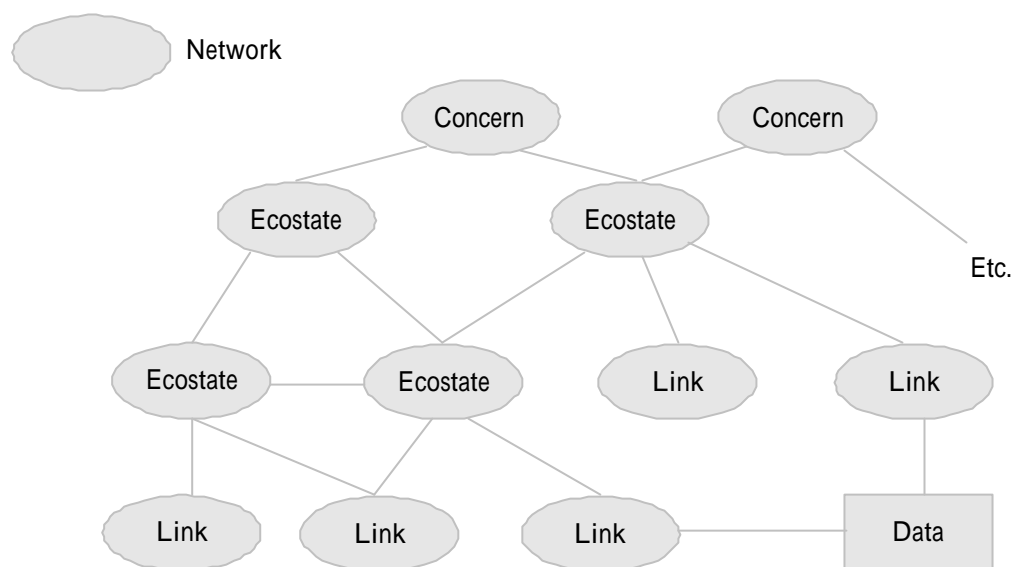


圖 3-2：以物件為基礎之階層式網路架構(摘自 Reynolds, 1998)

在評估過程中經常會面臨資訊不完全的問題，這些不完全資訊可能是因為某些漏失的觀測值所造成的。知識庫中對於不完全資料，是以模式建立的方式來處理，這個模式必須能夠反應生態狀況、生態過程和生態評估間的最適關係。這種處理方式較以往資料修補方式，更能合理解決具有交互作用的環境或生態問題。以 Netweaver 為例，在處理不完全資料的過程中是以知識庫的邏輯結構、漏失資訊影響多少狀態和結構以及這些資訊在那個層次架構下進入知識庫等三個準則，計算漏失資料的影響，並就其影響性協助使用者預測資訊。

知識庫 1983 年(Jackson & Waterman)開始大量用在自然資源的管理及研究上，在 Durkin(1993)的研究中指出有超過 100 種

以上的知識庫被應用在環境科學上，因此我們可以預見知識庫在決策支援系統中所扮演的角色將日益重要。

(三) 決策支援系統在林業上之應用

適應性經營是達成生態系經營的一種方式 (Alan and Rebecca, 1996)，所謂適應性經營是指計劃、監測、評估、修正經營方式的一連串過程，故生態系決策支援系統也是依此過程來發展。因為生態問題的尺度和議題都是多樣性的，所以生態系決策支援系統的發展也因此顯得複雜。生態系經營決策支援系統的基本目標，在於提供經營者有關生態系經營及公眾價值的法律、規定、科學原則等相關資訊以維持或增進森林生態系的健康及其生產力 (Reynolds *et al.*, 1996)。

由於決策系統適用於半結構化或非結構化的決策支援，而森林資源經營亦有類似的問題，因此，相關決策工具在林業上的應用逐漸受重視，譬如 1979-1996 年間線性規劃和收穫預定模式被用在森林經營上當成基本的分析工具。從 FORPLAN、森林經營決策系統 (Forest Management Decision Support System; FMDSS) (Shih & Mills, 1993) 乃至於 EMDS (Reynold *et al.*, 1998) 都是決策支援系統的一種。

FORPLAN 是森林規劃的數學模組，對於規劃策略是很有用的，但是在實施上，必需要有互補的模式，為了解決實施上的問題，決策模式和地理資訊系統的連結成為重要的工作，在相關研究方面，1988 年 Covington 等人發展 TEMAS (Terrestrial Ecosystem Analysis and Modeling System) 是一套典型的 DSS 用來協助規劃者和林業從業人員建立森林計畫與實施之間的橋

樑，這套軟體結合評估、修正、產生報告，並在資料上加入模擬和決策模組引導分析，該系統尚包含選擇測試及敏感度分析 (Covington *et al.*, 1988)。

現在的生態學和自然科學已經發展出許多數學模式來定義生態系狀況和過程間的特殊關係，這種發展明顯的擴充了對自然資源不確定資訊處理的能力。在美國方面，和生態系經營相關的決策支援系統至少有 33 種，前人曾就其中 24 種進行整理比較 (Mower *et al.*, 1997)，結果發現在這些系統中，尚有一個系統可以包含所有生態系經營的議題，也沒有一個系統可以呈現不同尺度之間的交互作用，更重要的是目前這些系統對於社會因子的發展都遠少於生物因子，也缺乏團體的協商 (Rauscher, 1999)。

大致來說，生態系相關的決策支援系統可以分成依整體做分析 (full-service) 和針對功能分析 (function-service) 二大類，在整體分析中又可以依尺度大小分成不同的評估，例如：區域評估、森林規劃.....等等；在功能取向的分析中則依提供分析的對象和方法不同可以分成群體磋商、植生動態、干擾模擬、空間視覺、經濟影響分析.....等等。(Mower *et al.*, 1997)。

除了美國之外，許多國家亦投注人力與金錢在自然資源相關決策支援系統的開發上，例如加拿大安大略省自然資源部之下就有一森林經營決策支援系統計劃，該計劃的目的在於發展一組軟體工具以建立森林經營的決策支援系統，而決策過程的知識、森林知識和基本決策技術的功能是建立該系統三個主要的元素。在報告中亦指出，相關知識遍及各社會經濟及科學技

術領域，對系統開發成沈重的負擔。然而除非有足夠的資源和夠長的時間去實際驗證，否則一個決策支援系統的開發成功與否是很難衡量的(Dan, 1991)。

森林生態系經營是許多國家所重視的資源經營方向，除了學術上的研究之外，尚有一些針對森林經營進行決策支援系統研究的大型整合計劃，主要目的在建造森林經營的楷模。例如加拿大的綠色計畫，在計畫中提出決策支援系統之需求架構，目的在使森林經營達到模範林(model forest)，目前該計劃已有初步的成果。美國方面亦有類似的大型整合計畫，譬如西北地區研發的生態評估知識庫決策支援系統 (Knowledge-based decision support for ecological assessment)、東北地區研發的決策模式(northeast decision model)，其目的都是研發設計供森林經營使用之決策支援系統，協助林業人員整合資料庫、知識庫及模式庫，作為經營作業上判斷的依據，進而解決森林資源經營問題，提高森林經營的決策效率。

四、模糊邏輯於自然資源管理之應用

在傳統的集合觀念裏，對於一般問題求解的過程，是以二分法來決定答案元素的集合，但是在現實生活中，許多事件及觀念都是無法明確定義的，我們熟知而且長期相處的真實世界，普遍存在著各種模糊現象。產生模糊現象的可能原因如下：

1. 資訊不完整：因為對於知識瞭解得不夠透徹，或是能掌握的資訊不夠完整，導致無法完整表達全貌所造成的模糊現象，例如語言不通導致無法理解對方所要表達的意思。
2. 本質曖昧:同一種語言，符號或圖案，有很多種解釋而無法

確知應屬於那一種。

3. 資料不精確:由於量測或傳達的過程中含有誤差或夾帶雜訊，導致資訊傳遞所發生的不精確現象；例如電波受到干擾，使得收訊效果不佳。
4. 隨機事件或現象：明知事件必然會發生，但是對於事件確定發生的時機無法獲知。
5. 模糊性:對事件的定義因人而異無法客觀而確定的表達出來，導致意念溝通時發生障礙；例如：天氣很熱、學生很聰明、環境品質很差……等，這些事件都具有模糊的觀念在內，究竟攝氏幾度稱為很熱？智商多少稱為聰明？環境受污染的程度多寡令人難以忍受？諸如此類的問題都是沒有切確答案的模糊事件。

為了克服傳統二分法中難以解決的問題，美國控制論專家查德(Zadeh, 1965)首先提出模糊集合理論，經過多年的發展，其理論方法日臻完善，已廣泛應用在各領域中，由於模糊數學拓展了經典精確數學中非此即彼的特性，並且找到了一個解決概念上劃分不確定性的描述方法，因此成為一門新興的科學(蓋壩，1991)。

模糊理論有狹義與廣義兩種，狹義的模糊理論是一種邏輯系統，主要用在正規化近似推理。廣義來說，是指模糊集合理論，舉凡模糊演譯法，模糊數學程式設計，以及模糊資料分析均屬其中。模糊邏輯是以不確定性為基礎，當一個系統的複雜性增加，我們無法很詳盡的描述這個系統上的一切，通常在字彙上會用很多不確定性的字眼，例如：大概、可能 等概化的

方式，將系統模糊化，待其輸出時再加以還原成較精確的東西。

在傳統集合論中，元素和集合之間是以屬於和不屬於的關係存在，但是在模糊觀念中，無法明確決定元素和集合之間的關係，因此在模糊集中，由隸屬函數 $m_A(x)$ 來表示，其中 $m_A(x)$ 在實軸閉區間 $[0,1]$ 中取值，其大小反映 x 對於模糊集合 A 的隸屬程度。也就是 x 中具有某種性質的元素整體，這些元素具有某個不明確的界限，對於任一元素，皆能根據此種性質，用一個 $[0,1]$ 間的數來表示該元素隸屬於 A 的程度， $m_A(x)$ 的值愈接近 1 表示 x 隸屬於 A 的程度愈高，反之愈接近 0 則表示隸屬 A 的程度愈低。在論域 (Universe of discourse) X 中的任一模糊集合 A ，可由以下的隸屬函數加以描述：

$$m_A: X \rightarrow [0, 1] \quad (3.1)$$

其中 $x \in X$ ， $m_A(x)$ 代表 x 隸屬於 A 的隸屬度。

所謂隸屬函數是以一函數來表示某元素對集合的隸屬程度。幾種常見的標準型隸屬函數整理如下(林信成，2000)：

1. S 型 (S-Shape) 隸屬函數：

$$S(x;l,r) = \begin{cases} 0, & \text{for } x \leq l \\ 2\left(\frac{x-l}{r-l}\right)^2, & \text{for } l \leq x \leq \frac{l+r}{2} \\ 1-2\left(\frac{r-x}{r-l}\right)^2, & \text{for } \frac{l+r}{2} \leq x \leq r \\ 1, & \text{for } x \geq r \end{cases} \quad (3.2)$$

S 型隸屬函數常用於表示較高數量級的模糊概念，例如大、多、長、好...等，其中 l 和 r 分別代表其左、右端點。

2. Z 型 (Z-Shape) 隸屬函數：

$$Z(x; l, r) = \begin{cases} 1, & \text{for } x \leq l \\ 1 - 2\left(\frac{x-l}{r-l}\right)^2, & \text{for } l \leq x \leq \frac{l+r}{2} \\ 2\left(\frac{r-x}{r-l}\right)^2, & \text{for } \frac{l+r}{2} \leq x \leq r \\ 0, & \text{for } x \geq r \end{cases} \quad (3.3)$$

由定義可知 Z 型隸屬函數和 S 型隸屬函數互為模糊補集，即 $Z(x; l, r) = 1 - S(x; l, r)$ 。因此，Z 型隸屬函數常用於表述諸如輕、薄、短、小...等代表較低數量級的模糊概念。

3. 型 (-Shape) 隸屬函數：

$$p(x; b, m) = \begin{cases} S(x; m - b, m - \frac{b}{2}, m), & \text{for } x \leq m \\ Z(x; m, m + \frac{b}{2}, m + b), & \text{for } x \geq m \end{cases} \quad (3.4)$$

型隸屬函數常用於表示中等數量級(如：普通、中等、差不多... 等)或近似某個數值 m 的模糊概念。其中， m 為函數的中點， b 為變異度。

4. 三角型 (Triangular) 隸屬函數：

$$Tri(x; l, m, r) = \begin{cases} (x-l)/(m-l), & l \leq x < m \\ 1, & x = m \\ (r-x)/(r-m), & m < x \leq r \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3.5)$$

其中， l, m, r 分別代表該函數的左端點、中點、右端點。

5. 梯型 (Trapezoidal) 隸屬函數：

$$Trap(x; l, m, n, r) = \begin{cases} (x-l)/(m-l), & l \leq x < m \\ 1, & m \leq x \leq n \\ (r-x)/(r-n), & n < x \leq r \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (3.6)$$

其中, l, m, n, r 分別代表該函數的左端點、左肩點、右肩點、右端點。

6. 高斯型 (Gaussian-Shape) 隸屬函數 :

$$G(x; m, b) = \exp\left(-\left(\frac{x-m}{b}\right)^2\right) \quad (3.7)$$

m 代表該函數的中點, b 為其變異度。

三角型、梯型和高斯型隸屬函數都是屬於泛用型的隸屬函數, 只要妥善調整其參數值便可以表達各種不同的模糊概念。

7. 對於隸屬函數無法寫成任何函數形式的任一模糊集合 A , 可將各點 x_i 的隸屬度 m_i 條列出來, 借用連加符號表成如下的離散型式:

$$A = \sum_{i=1}^n m_i / x_i = m_1 / x_1 + m_2 / x_2 + \dots + m_n / x_n \quad (3.8)$$

隸屬函數是模糊集合應用於實際問題之基石, 一個具體之模糊對象首先應確定其切合實際之隸屬函數, 才能應用模糊數學方法進行定量分析。隸屬函數本質上是客觀存在的, 但是在確定的過程是容許有一定的主觀意識和人為操作在內, 因此, 隸屬函數的確定並非唯一的, 但過程中必需要求合理性和科學性 (陳朝圳, 1994)。在某些情形下, 隸屬函數可以經由模糊統計試驗加以確定或以推論的方式來決定, 其過程可分以下步驟 (馮德益等, 1988):

1. 簡化問題: 將多元的問題化為一元問題, 唯有如此才能考慮隸屬函數的類型。
2. 依問題性質決定隸屬度為 0 或 1 的關鍵點, 即可大致確定隸

屬函數的形狀。

3. 選擇最接近關鍵點的隸屬函數分佈型態，初步決定隸屬函數。
4. 根據實際情況，儘可能客觀地假設以確定未知的參數，並作必要的修正。

推論在形式上計有直接推論、演繹推論、歸納推論與類比推論等方式。其中以演繹推論最常用，但是在實際應用上常會遇到困難(馮德益等，1988)，為解決演繹推論在實際應用上的問題，模糊推論因應而生，模糊推論是依據近似推論的概念發展出來的，模糊推論係將問題經隸屬函數，轉換成模糊集合後，利用相關的模糊集合交集、聯集、補集之運算，根據知識庫保存規則和所給予的事實推導出新的結論，與傳統推論不同的地方，在於模糊推論不只可以處理明確議題，也可以處理模糊的議題。

在模糊集合運算的過程中，若 A 和 B 分別為論域 X 中的兩個模糊集合，則不論透過何種運算，其結果仍為 X 中的一個模糊集合

$$1. \text{交集運算} \quad m_{A \cap B}(x) = T(m_A(x), m_B(x)) \quad (3.9)$$

其中 T 是一個從 $[0, 1] \times [0, 1]$ 映射至 $[0, 1]$ 的函數，稱為 T 範數 (T-norm)。

$$2. \text{聯集運算} \quad m_{A \cup B}(x) = C(m_A(x), m_B(x)) \quad (3.10)$$

其中 C 為 T -共範數 (T-conorm)，是一個從 $[0, 1] \times [0, 1]$ 映射至 $[0, 1]$ 的函數。

$$3. \text{補集運算} \quad m_{\bar{A}}(x) = 1 - m_A(x) \quad (3.11)$$

模糊邏輯發展的時間短，因此在自然資源管理上的應用相較於其他科學是較新的，但是模糊邏輯能符合自然資源在評估上的不明確性，因此近年來，不論在遙影像的分類、環境風險的管理、生態系研究、環境評估以及土地對作物生產適宜性的分析等研究國外都有相關報告(Reynolds, 1998)。國內在林業方面，也有利用模糊數學分類法應用於衛星影像上林分鬱閉度推估之研究（王韻皓，1996）以及模糊地理資訊系統應用於野生動物之棲地分析（陳朝圳，1998）。

五、數學規劃於森林資源經營之應用

數學規劃為是管理科學的一部份，乃運用數學方法透過模式的建立，解決與決策、管理、規劃等相關問題。最早在 1939 年由俄羅斯數學和經濟學大師 Kantorovich 所提出，利用線性規劃方法探討有關組織和規劃的問題，1940 年代二次世界大戰期間，為因應後勤支援和武器系統發展之所需，始有其研究方法的開發及應用（劉浚明，1995）。

數學規劃在作業研究的領域中，目前已有相當完整的技術，其中廣泛用於資源分配上的有線性規劃、多目標規劃、網路規劃、整數規劃及非線性規劃等，其共同點是將問題轉化成目標函數和各種限制式，然後建立演算法來計算最佳解。此外尚有動態規劃，是將問題轉換成一序列多階段的決策問題，可以協助問題的解決。

規劃方法一般用於有限資源的分配，並達成所希望的目標，因此線性規劃是著眼於最佳化一個具有線性關係的目標函數，同時要滿足一組線性的限制式，可應用於資源的使用及分

配，希望能在成本最小化或利益最大化的目標下，獲得最佳方案。由於線性規劃具有現成的套裝軟體，對於模式整合相當方便，故常用於模式庫的建立(林俊宏，1998)。

由於森林的效益往往是多種同時存在或產出的，因此由線性規劃所發展而來的目標規劃，也被廣泛的應用於森林經營上。數學規劃應用於森林資源管理上，前人研究和應用甚多，例如：可以線性規劃的面積控制及材積最適收穫量、同齡林經營之經濟目標與木材產量政策、異齡林之經濟收穫及回歸期、森林多目標經營與目標規劃、林務員工作指派、多階段決策與動態規劃……等(劉俊明，1995)。在森林經營中，不論是沿用何種經營理念，應用數學規劃來輔助決策的過程是一有力的工具，因為森林經營的問題大致可以分成二個部分，分別為目標和限制條件：

1. 目標：使森林的效用最大，以提供人民所需的服務並滿足人民的需求。
2. 限制條件：在達成目標的同時所受實際的森林環境限制，例如環境容受力以及或是政策上的一些限制。

雖然資源的經營規劃中，線性規劃是被廣泛應用的技術之一，但是在模式中所使用的係數及常數都是確定的數值，而真實世界的條件，大部份具有不確定性，因此隨機規劃(stochastic programming)和模糊規劃(fuzzy programming)的應用和求解技巧，是目前重要研究方向(雷雅琦，1999)。

由於數學規劃的結果並不提供空間上的分佈，因此為了解規劃上空間分布的情形，逐漸發展將數學規劃與地理資訊系統

結合之研究方法，例如 Emilio 於 1993 年整合線性規劃和地理資訊系統於土地利用模式中，研究上以網格為分析單元，將地理的限制轉成數學規劃中的決策變數，決定各種土地利用型的面積，將所得面積轉成網格數，以各種土地利用型態在地理上的限制為參考值，選擇土地利用型之網格單元在圖層上填繪的位置，再依循相關準則，逐一決定網格在空間上的分佈。

網格資料雖易於分析處理，但在資料結構上仍以向量單元較接近實際地面狀況，因此地景及生態的研究多以向量資料為基本資料結構，在資料庫的建立上大多也以向量方式紀錄；再者，以網格為基礎的分析工具，由於網格資料會佔用較大的資料庫空間，因此較不適合於大面積的研究。

Erik 於 1997 年將數學規劃和地理資訊系統整合至長期森林經營計劃的決策支援系統中，該研究乃以數學規劃的方式將伐採量的淨現值最大化，並將所得結果納入地理資訊系統中作為規劃之參考。在做法上乃是以數學規劃方式為主，並將一些地理上的限制因子納入線性規劃的決策變數當中，雖可以結合線性規劃與地理資訊系統的觀念，但是在操作上卻過於繁複，難以進行整體的生態系經營規劃。

六、台灣杉生育地選擇

台灣杉 (*Taiwania cryptomerioides* Hay.) 又名亞杉，為松柏類常綠喬木，在分類地位上，台灣杉屬杉科，台灣杉屬，為自第三紀子遺下來之活化石，目前這一屬之植物僅剩下台灣杉一種，分布於本省以及大陸雲南、貴州和緬甸北部，成為不連續之雙中心分布，似乎是屬於分化性弱、分地區逐漸退縮之種類，

極待珍惜與保護。

在形態上，與柳杉相近，樹幹通直，胸徑可達 3 公尺，樹高可達 60 公尺，樹皮灰褐色，有極長縱溝，葉有兩形，生長於老枝上呈鱗狀，生長於幼枝上呈短針狀，先端尖基部闊對生排成四列，色綠幼時枝極細長下垂。

台灣杉材質輕軟，邊材淡黃色，心材帶紫暗褐色，紋理通直加工容易，為極佳之建築及傢俱材料。幹材圓整，利用率甚高，且對白蟻之抵抗能力不亞於檜木，對海港蝕材蟲抵抗力特強，因此木材用途甚廣，為本省甚有經濟價值之樹種(林照松與洪富文，1991)。

台灣杉在本省之自然分布區域為中央山脈海拔 1500~2600 公尺之間，但人工栽培則低至 800 公尺仍可生長良好。喜好生長於濕潤的山谷低窪地區，在天然林中常與紅檜、扁柏、昆蘭樹等混生，很少形成純林，由於大量開發，天然生台灣杉的數量所剩不多，而經人工育苗造林後，幼林生長迅速，抵抗病蟲害的能力強所以被列為本省主要造林樹之一(黃進睦，1995)。人工造林後，生長極為迅速良好，在本省中、高海拔林區均可造林，對病蟲害之抵抗力強，抗風力亦大，又可免松鼠危害，故近十年來本省即積極推廣造林。至 1998 年底止，累計面積已達 11488 公頃(林務局，1998)。

林業試驗所六龜分所自 1972 年開始大量栽植台灣杉，為六龜試驗林最重要的造林樹種，其造林地點在 820 公尺到 1800 公尺左右，為了解其生長狀況及各種試驗對台灣杉生長的影響，自 1993 年開始設置台灣杉的永久樣區調查相關生長資料。依據

六龜分所 1992 年台帳資料統計人工林為 1560 公頃，台灣杉人工林約 800 公頃，足見台灣杉在六龜驗林的重要性（陳麗琴，1997）。

台灣杉雖為生長迅速、材質優良的本土樹種，但是若欲使台灣杉達到最佳的生長狀況，則需根據適地適木的原則，審慎選擇其潛在之適宜地區，進行造林及撫育，才能收事半功倍之效果。

在生育地因子的研究方面，國內曾有學者研究自然保護區之台灣穗花杉生育地環境因子，結果顯示其生育地的最適界受海拔高、水分梯度及全天光空域影響最大，而坡度影響較小（陳朝圳，1993）。廖錦偉(1997)則是利用地理資訊系統，以環境因子推估的方式進行台灣杉造林地的選擇，其中使用的環境因子為海拔高、坡向、全天光空域和水份梯度。

肆、研究方法

一、研究試區

本次研究的試區位於六龜試驗林，本試區共分 25 林班。其地理環境簡介如下：

1. 地理位置

六龜試驗林區位於台灣本島南部，荖濃溪以東，中央山脈以西之狹長地帶，全區屬荖濃溪流域，自東經 120° 39' 59" 至 120° 45' 2"，北緯 22° 50' 2" 至 23° 00' 3"，南北長共計約 19.5 公里，東西寬約 13 公里，中央最狹處僅 1.5 公里。

2. 氣候

六龜試驗林區內高程差達 2000 公尺以上，地形複雜，故全區局部氣候差異明顯，北半部嶺線東側及南面日照量較多，故較為乾燥；西側及北面則較為濕潤，其中降雨集中於 5-10 月。區內之平均氣溫在 16-23° 之間、濕相對度在 71%-86% 之間、雨量約 2000-3700mm，皆隨海拔變化而有明顯差異。

3. 土壤

本試驗林之地質岩層，大部份為中生代之上部粘板岩層，僅試區南端在 2000 公尺以上嶺線為中生代之下部粘板岩，本岩系可以分二層，上層由黝黑色至黑色的粘板岩及灰色砂岩構成，下層則是由黑色粘板岩和硬砂岩交互構成。

土壤方面，扇平附近 1~5 林班之土壤為濕潤性或淺乾性之紅黃棕色森林土，PH 值約在 7.0 左右，近稜線之土壤深度極淺。以三合溪流域地區屬紅黃色灰化土，土壤呈酸性，表面具深厚

的腐植質，表土為暗灰色，底土為黃棕色。此外濁口溪水系為灰棕色灰化土，土壤表面具枯枝落葉層，表土呈暗灰色，為團粒構造，亞表層淺灰棕色，核狀至團粒構造，底土黃棕色，壁狀構造。

4. 林況

六龜試驗林之海拔高在 350 公尺到 2400 公尺之間，主要林型為暖溫帶天然闊葉林，海拔 1500 公尺以上，有少部分的針、闊葉混淆林，以及針葉林。本試區之闊葉林已達到演替的極盛相，所以樹種組成十分安定；針葉樹部份，因樹齡較長，演替緩慢不易形成極盛相，主要的闊葉樹為樟科和殼斗科，針葉樹則以檜木、松類和鐵杉為主。

二、研究材料及設備

(一) 圖籍資料：

1. 數值地形資料(DTM)：取自農林航空測量所，每一像元解像力為地面 40 × 40 m。
2. 土壤調查資料：由林試所及林務局人員組成之土壤調查隊所完成，方法係利用地形圖、航空照片、地質資料等繪製地形單元，依地形單元決定採樣點，根據土壤調查報告資料作出標準範圍的土壤性質原圖，考慮 pH 值、坡度、土壤深度、有效深度、陽離子交換能力、有機質及排水等因子對原圖加以修正，最後完成土壤性質圖。
3. 85 年林型圖：係將航空照片掃描成影像，藉由數位航測工作站系統(Digital Photogrammetric Workstation，簡稱

DPW)，將每二張影像配對，產生正射投影圖之後，再判讀土地利用型態並加以數化，經地面實際核對修正後，輸出成為 GIS 可以處理之格式。

(二) 軟、硬體設備：

1. 個人電腦(98 作業系統)
2. ArcView 3.0a 以上
3. ARC/INFO8.0
4. EMDS 2.0 版
5. NetWeaver 知識庫
6. SAS 統計軟體
7. LINDO

三、研究方法

本論文以美國林務署所發展的生態系決策支援系統為工具，結合多尺度之林地分級架構，並以數學規劃輔助林地分級準則訂定，和以模糊邏輯為準則訂定的基本原則，建構一符合生態原則之林地分級決策支援系統，期能在地理資訊系統的架構下，將多尺度林地分級、決策支援系統及數學規劃做一連結。

研究方法主要可以分成三大部份，第一部份係以 EMDS 為工具，建構一林地分級決策支援系統，這部份包括：多尺度林地分級作業體系的建立、數學規劃於林地分級最適面積的推估、知識庫和資料庫的建立。在建立分級作業體系方面，主要是輸入數值地形資料(DTM)後，利用自動化粹取集水區程式，產生基本生態系單元，再利用多變值統計方法產生多尺度生態

單元；數學規劃推估最適林地分級面積的目的，在於提供林地分級準則訂定時之參考，以加強知識庫的正確性，提高多尺度林地分級決策支援系統評估結果的可信度；而在建立資料庫和知識庫方面，資料庫係依基本生態單元和多尺度單元分別建立，知識庫則包括分級準則的訂定、利用不同的演算法將評估準則轉成知識庫供林地分級使用，最後並結合知識庫與資料庫，建立多尺度的林地分級決策支援系統。

第二部份係以所建立的決策支援系統進行林地適宜性的評估。在該部份中除比較不同演算法在林地適宜性分析上所造成的影響外，另外比較不同尺度單元在林地適宜性分析結果的差異。

第三部份則是以台灣杉適宜地的評估為例，探討在林地分級之下，以所建立的生態系經營決策支援系統評估樹種潛在適宜區的應用可行性。本論文之研究方法整體架構如圖 4-1 所示。

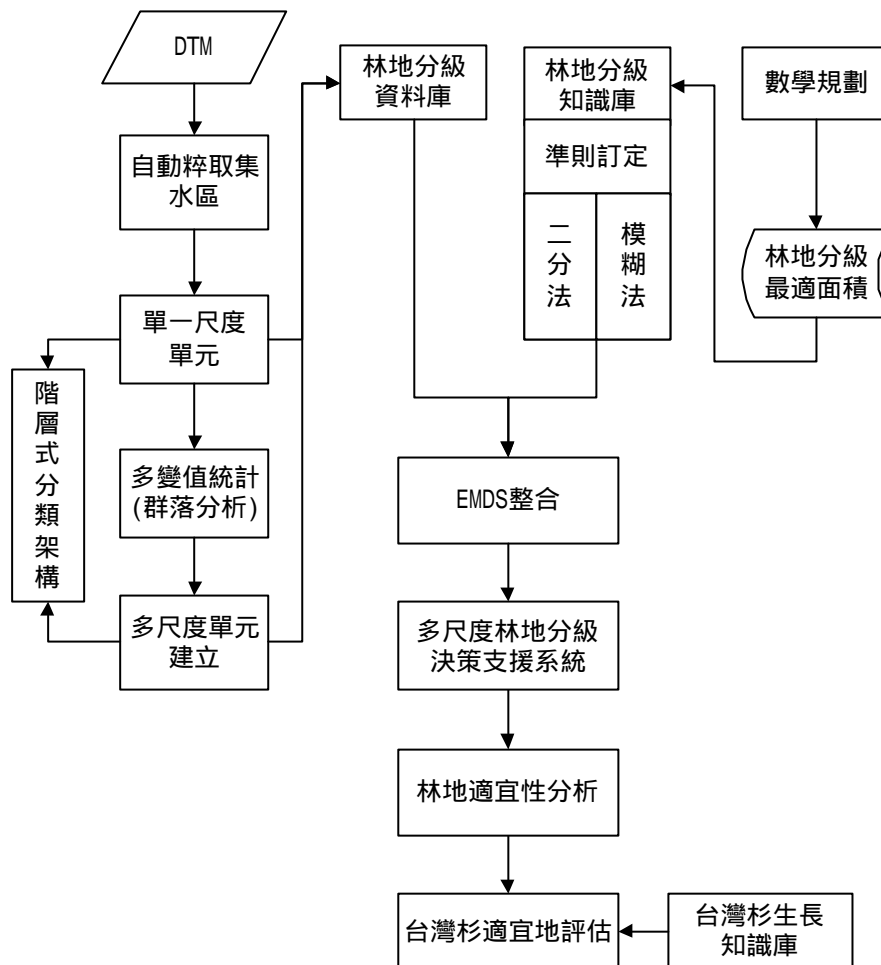


圖 4-1：研究流程圖

(一) 多尺度林地分級決策支援系統之建立

1. 林地分級作業體系之建立

近年來的森林經營，不論在資料收集或分析上，都逐漸強調應考慮其生態意義，以往受限於調查技術或生態量化理論與技術之發展，在作法上較難？到以生態單元為基本單元的的要求。但是藉由航空測量、遙感探測與地理資訊系統之密切結合，以生態單元為基本單元建置資料庫已成為森林經營者建置地理資料庫之首要工作。因此，生態單元或地景單元之決定為本論文之第一步驟。

(1).單一尺度生態單元粹取

如前人研究所述，集水區因地理空間差異性而具有地形、水文及生態上的意義，可視為一基本的生態單元，因此，集水區適合作為林地分級的分級單元。基於上述理由，本論文在分級單元之選取上，乃以集水區為主，並利用六龜試驗林之數值地形模型，經過濾處理、窪洞處理、排水匯集量之計算、河川網路之粹取、河川編碼等步驟，以自動化粹取方式分別產生不同級序之集水區單元。

自動粹取不同河川級序之集水區單元，係依賴晃宇(1997)年所發表的方法，利用 40m × 40m 之數值地形模型，以累積流量等於 400 個網格點為粹取河川網路之門檻值，根據排水方向計算某點之累積流量與其下游點累積流量之差(Delta 值)，當該點之累積流量及 Delta 值均大於門檻值時，該點即定義為出水口，再配合排水方向往上游追尋，即可找出屬於該點之集水區範圍，並以電腦疊代方式搜尋出水口。由本步驟所粹取出之不同級序的集水區均視為單一尺度的分級單元，彼此間之差別僅在於集水區單元大小之不同。

(2).多尺度生態單元建立

如前人研究所述，林地分級的方法有區域分類與基地分類二種，本論文因以集水區作為生態基本單元，故選擇以基地分類的方式進行分類。在上述基地單元產生後，根據其屬性之相似性予以歸類，產生地景單元。

由於基地分類作業方式可同時考量數個環境因子，因此，在歸類的過程中，本論文為避免使用過多的環境因子，

故先利用地景型態變數探討生態單元的地理空間差異性，其作法係選擇地景型態模型中的 11 個因子(含坡度、海拔高、坡向多樣化指標、地形位置、剖面曲率、平面曲率、曲率、潤濕指標、水份梯度、坡長-坡度指數、蝕溝指數等，詳如附錄五)，7 個因子(含坡度、海拔高、坡向多樣化指標、地形位置、剖面曲率、平面曲率、曲率等)以及 3 個因子(坡度、海拔高、坡向多樣化指標等)以二級河集水區為單元，測試其地理空間差異之差異性。經測試結果顯示 3 個因子所分類出的地景單元和 7 個因子、11 個因子的分類結果皆相同，即海拔高、坡度及坡向多樣性指標 3 個地形因子為地景型態變數中最具影響力的因子，且可以完全取代其他因子，故本論文在地景分類上，係選用這 3 個因子，針對二級河集水區單元，透過多變值統計之群落分析方法(cluster analysis)，產生六龜試驗林的多尺度單元，以符合試驗林經營管理所需之階層式架構。

本論文以非階層式群落分析方法中的 K-means 方法進行群落分析，研究過程係利用 SAS 統計軟體 FASTCLUS 模組，利用環境因子間的類似程度，將研究區域中的集水區單元歸類為數個地景單元，其計算步驟為：

1. 將二級河 20 個集水區單元初步分成 K 個群落
2. 計算每一群落中心，並判斷每一單元和所屬的群落中心的距離是否為最近，如果不是，則重新分配到較近的群落。
3. 重覆步驟 2 直到每個單元都歸類到其較近的群落為止。

在計算過程中所使用的距離，為歐幾理德距離法(Euclidian Distance)：

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \Lambda + (x_p - y_p)^2} \quad (4-1)$$

在 SAS 軟體中並指供立方群落指標值(cubic clustering criterion-ccc)的資訊可供組數決定之參考,所謂的 ccc 值是以群落內變異的比例和群落間變異數構面(dimensionality)的推估值計算而得的,當 ccc 值呈現最高點並驟降時,即可決定最佳的群落組數,亦為地景單元數目。

本論文在規劃六龜試驗林的生態系分類架構上係參考 Miller& Laflamme(1958)的分類架構,再將整個試驗林視為大尺度的區域單元,使林地分級的體系能符合大尺度、中尺度及小尺度之層級的架構,不同尺度生態單元產生及劃分過程如下圖:

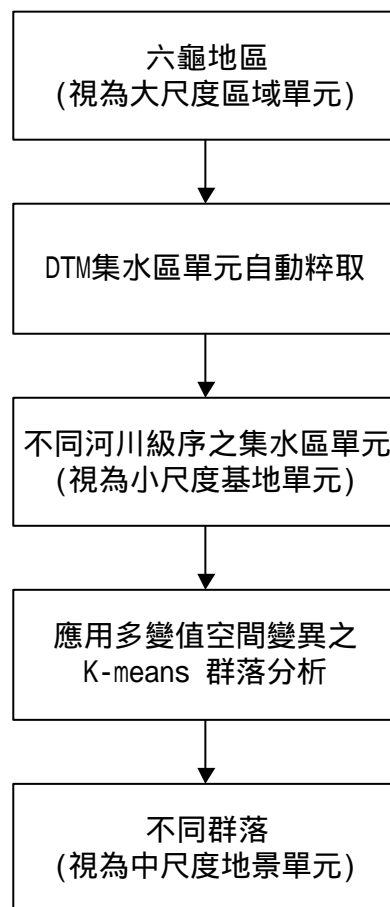


圖 4-2 : 多尺度生態單元劃分

2. 林地分級決策支援系統之建立

以林地分級為基礎，並考慮多尺度的經營觀念，以美國林務署所開發之生態系經營決策支援系統(EMDS)為框架，進行林地分級決策支援系統的建立。在 EMDS 的框架之下，首先必需先確定評估的主題及準則，其次需建立一個包含所有評估所需 GIS 圖層的資料庫，以及一個用來描述評估主題之生態狀況和過程間之關係的知識庫，本論文亦依該原則，先確定林地適宜性分級準則，再分別建立資料庫和知識庫。

(1). 數學規劃於林地分級最適面積之推估

林地分級的準則可隨隸屬函數的指定而改變，也就是決策者在決策過程具有主觀的控制權，在知識庫中可以建立多組評估的準則，然而必需考慮其合理性，因此為提高準則的合理性，本論文乃以線性規劃的結果做為隸屬函數指定的參考。

線性規劃模式所決定最佳的林地分級適宜性面積，除了可以協助準則的訂定之外，還可以當成一個比較標準，用來驗證後續有關傳統二分法和模糊邏輯法在林地分級適宜性評估的合理性。

本論文所使用的線性規劃程式為 LINDO，其變數訂定、目標式和限制式如下：

(A)變數決定：

決策變數的設定是建立線性規劃模式的首要工作，決策變數決定後才能設定目標函式和限制式。決策變數需視欲解

決的問題來設定,在本規劃中所要達成的目標為林地生產力最大化,但是在資料庫中只能粹取面積資料,因此需在面積與生產力之間另設一個轉換因子,以利規劃進行。

在規劃中以 X_{ij} 、 Y_{ij} 為林地分級的決策變數,其中 X 代表面積, Y 代表林地生產力,下標中的 i, j 表示坡度和土壤特性,其中坡度以 35 為界可分成二級 (即 $i = 1,2$); 土壤特性分 9 級(即 $j = 1-9$), 共可得 36 個變數。 Y_{ij} 表示在坡度級 i、土壤特性為 j 之生產力; X_{ij} : 坡度級 i; 土壤特性為 j 之面積。另外再設定 A_i 為不同坡度級下,面積與生產力間的關係轉換數, P_j 為不同土壤特性下的轉換因子。其變數對應的意義如下表:

表 4-1: 林地分級線性規劃之決策變數對照表

面積變數	生產力變數	坡度 (°)	土壤特性
X ₁₁	Y ₁₁	>35	1
X ₁₂	Y ₁₂	>35	2
X ₁₃	Y ₁₃	>35	3
X ₁₄	Y ₁₄	>35	4
X ₁₅	Y ₁₅	>35	5
X ₁₆	Y ₁₆	>35	6
X ₁₇	Y ₁₇	>35	7
X ₁₈	Y ₁₈	>35	8
X ₁₉	Y ₁₉	>35	9
X ₂₁	Y ₂₁	<35	1
X ₂₂	Y ₂₂	<35	2
X ₂₃	Y ₂₃	<35	3
X ₂₄	Y ₂₄	<35	4
X ₂₅	Y ₂₅	<35	5
X ₂₆	Y ₂₆	<35	6
X ₂₇	Y ₂₇	<35	7
X ₂₈	Y ₂₈	<35	8
X ₂₉	Y ₂₉	<35	9

(B)目標式：總生產力最大

$$\text{MAX } \sum Y_{ij} \quad i, j \in \text{all}$$

(C)限制式：

面積計算式

$$\sum X_{ij} = \sum \text{Area}_{ij} \quad i, j \in \text{all}$$

坡度小於 35 度之面積限制

$$\sum X_{ij} = \sum \text{Area}_{ij} \quad i = 2, j \in \text{all}$$

土壤特性大於 4 之面積限制

$$\sum X_{ij} = \sum \text{Area}_{ij} \quad i \in 1-2, j = 4,5,6,7,8,9$$

同一土壤特性下，不同坡度的生產力差異

$$Y_{ij} - Y_{i+1,j} \leq 0 \quad i = 1, j \in 1-9$$

同一坡度下，不同土壤特性的生產力差異

$$P_j \cdot Y_{ij} - P_{j+1} \cdot Y_{i,j+1} \leq 0 \quad i \in 1-2, j = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

面積與生產力間的關係轉換

$$Y_{ij} - P_j \cdot A_i \cdot X_{ij} = 0 \quad i \in 1-2, j = 1,2,3,4,5,6,7,8,9$$

$$A_i - A_{i+1} < 0 \quad i = 1$$

(2). 知識庫之建立

知識庫是決策支援系統中用來評估問題的主要部份，也是影響評估結果良窳的關鍵，使用者在這部份具有主觀的決定權，評估及分析的結果會依不同的使用者而有不同的結果。大致而言，知識庫建立及評估問題的過程中，每一個處

理程序都包含決策者的主觀意識在內，這也是決策支援系統不能取代決策者做決策的主要原因。有關本論文生態議題評估程序的流程如圖 4-3。在建立知識庫的過程中，首先必需選擇林地分級之影響因子，並確定其評估準則。

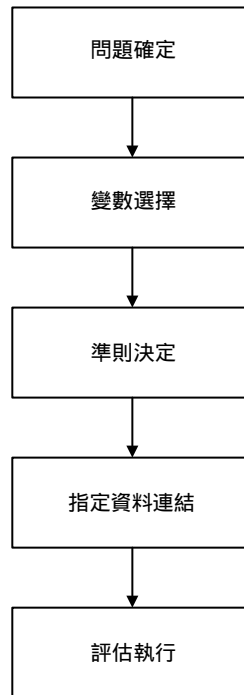


圖 4-3：生態議題評估程序

(A). 林地分級因子訂定

林地分級應以相關的法律及規定為前提，因此在準則訂定上優先適用「國家公園或風景特定區內森林區域管理配合辦法」海拔 2500 公尺以上或坡度大於 35° 以上地區禁止砍伐之規定，選擇海拔 2500 公尺以下且坡度小於 35° 的地區為可以從事林木經營之區域。在本論文研究試區中，海拔高在 2400 公尺以下，因此不納入林地分級之限制條件。

林地分級以劃分林地生產力為目標，在限制因子決定後需選擇林地分級的主要因子，根據國內學者對於林地生產力

的評估報告，以柳杉為例，影響地位級最大的因子包括土壤因子、方位及坡向(林子玉，1973)，又目前林務局之林地分級標準是以坡度和土壤二個因子進行。因此，本論文選擇坡度和土壤特性做為林地生產力之主要影響因子，並假設二者對於林地生產力的影響權重是相同的。在坡度因子方面，依上述限制條件以 35° 為林木經營可行區的上限，即坡度大於 35° 者視為不適於生產的地區；土壤方面，以土壤特性為林地分級的土壤因子。土壤特性係以土壤調查結果為根本，依據 pH 值、坡度、土壤深度、有效深度、陽離子交換能力、有機質及排水等因子決定土壤特性的等級，總共分成九級，由 1-9 分別代表最差到最好，為了簡化級數，本論文參酌台灣森林土壤調查報告：六龜試驗林(Taiwan Forestry Research Institute 1997)內所記錄之土地利用適合度，將土壤特性依 7-9、4-6、1-3 三個級距分成 1.2.3 級，分別代表土壤特性的優等、中等、劣等。本論文另比對土壤特性資料與土壤調查手冊(林試所，1998)中所記載之林地適合程度，目的在檢測以分成 3 級之土壤特性資料取代土壤因子的可信度。

首先，將原本分成九級(1-9 分別代表最差到最好)之土壤特性資料分成 3 級，其中級別 1 含永春里系、南蘇澳山系、南蘇澳山系-永春里系 3 個土系類別；級別 2 含萬山系-永春里系、永春里系、吉田山系-美瓏系、三地門系-永春里系、三地門系、萬山系、雜地-霧台村系、美瓏系等 9 個土系類別；級別 3 則含南山系-永春里系、南山系-霧台村系、南山系、雜地-霧台村系、歡喜山系、吉田山系-美瓏系、雜地等

7 個土系類別，其中永春里系因為土壤質地不同在級別 1 和 2 都出現，而雜地-霧台村系亦因同樣的理由出現在級別 2 和 3。與土壤調查手冊中所記載分成 1-3 級之林地適合程度比較如表 4-2。

就六龜試驗林 19 個土系類別而言，有 14 個土系類別的土壤特性級別和土壤調查之造林適宜性相符，利用混淆表可以得知，將土壤特性當成土壤因子之綜合指標，具有 74% 的代表性(如表 4-3)，亦即所使用的土壤特性資料與高山土壤調查隊實際地面調查是否適合造林的情況大致符合，因此，本論文根據土壤特性進行林地之適宜性分析，應為可行。

表 4-2：土壤特性分級結果與土壤調查之土地生產力比較表

土壤特性	級別	土系 * ¹	質地 * ²	土壤調查適宜性	土壤調查適宜性重分類
7-9	1	Ycl	CL-SiCL	1~2	1
		Nsa	SiL-CL	1	1
		Nsa-Ycl	SiCL	1	1
4-6	2	Wss-Ycl	CL-SiL	1~2	2
		Ycl	SiL-CL	1~2	2
		Gts-Mls	CL-SiCL	1~2	2
		Stm-Ycl	SiCL-SiL	1~2	2
		Stm	SiL-SiCL	1~2	2
		Wss	CL	1~2	2
		ML-Wat	SL-L	3	3
		Mls	SiCL	1	1
		1-3	3	Nsh-Ycl	L-CL
Nsh-Wat	SL-L			3	3
ML-Wat	ML			3	3
Fcs	SiCL			1	1
Gts-Mls	CL-SiCL			1~2	2
Nsh	L-SL			3	3
ML	ML			3	3

*1: Ycl:永春里系、Nsa:南蘇澳山系、Wss:萬山系、Gts:吉田山系、Mls -美瓏系、Stm:三地門系、MLt:雜地、Mls:美瓏系、Nsh:南山系、Wat:霧台村系、Fcs:歡喜山系、Gts:吉田山系

*2: CL:粘質壤土、SiCL:玢質粘壤土、SiL:玢質壤土、CL:粘壤土、SL:砂質壤土、L:壤土、ML:雜地

表 4-3：土壤特性對林地生產力之代表性

土壤特性級別				
土壤調查造林適宜性	1	2	3	Total
1	3	1	1	5
2	0	6	2	8
3	0	1	5	6
Total	3	8	8	19

(B).林地分級準則訂定

在知識庫準則部份，本論文依上述標準選擇坡度和土壤特性做為林地生產力之影響因子，依據數學規劃所推估的最適面積為準則訂定的參考，訂定合理的分級標準。作為探討傳統二分法和模糊邏輯法二種不同演算法對於林地適宜性分析的影響，以及瞭解模糊邏輯法在林地分級決策支援系統中所扮演的角色及價值，本論文於知識庫建立的過程中，乃就傳統二分法和模糊邏輯等二種演算法，分別建立評估準則。

在研究中係以 EMDS 所提供的 NetWeaver 作為知識庫，以相依網路(dependency network)和資料連結(data link)等二種物件為基礎，將林地生產力相關因子和評估準則予以結合。

由於 NetWeaver 是一個層級架構的相依網路，每一個網路和評估系統中的分析主題，具有一對一的關係，因此本論文在知識庫的建立上，亦以物件為基礎，將林地生產力相關因子和準則以及其中的關連性以網路架構的方式表現出

來，如圖 4-4 所示。

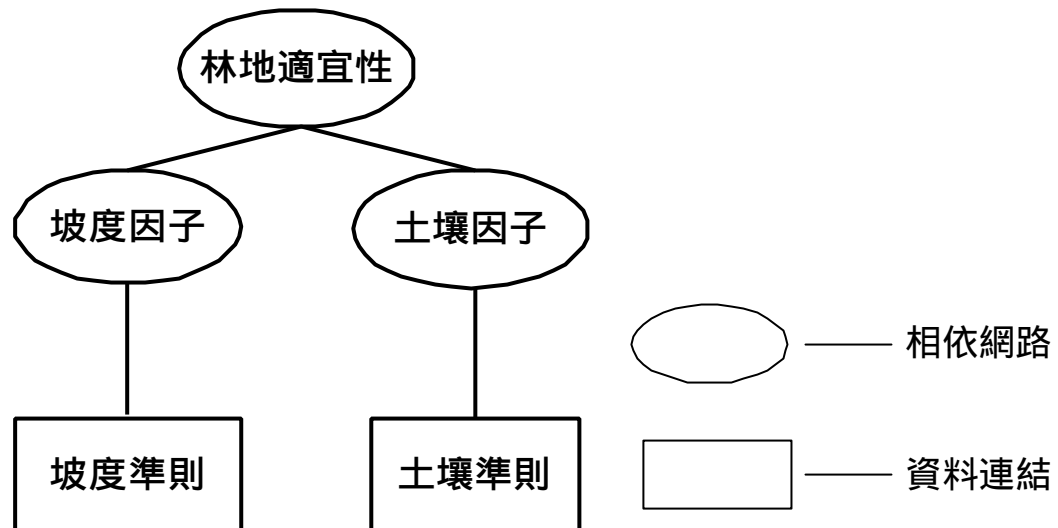


圖 4-4：林地分級知識庫架構

(a) 傳統二分法

國內林地分級傳統的作法，在坡度方面是以 35° 為臨界值，在 35° 以上為限制林木經營的地區， 35° 以下表示可以做為林木經營的地區；土壤方面，選擇土壤特性中等以上(即 1、2 級)為適合林木經營的地區。

(b) 模糊邏輯法

模糊邏輯法主要是利用隸屬函數的指定，對問題做出評估，在 Netweaver 的知識庫中，只要指定準則的關鍵值 (-1, 0, 1)，知識庫就會依這些關鍵值之間的線性關係，自動產生評估所需的隸屬函數。這一組 -1 到 1 之間的數，在系統中稱為真值(true value)。指定評估準則的關鍵值，需考

慮其合理性，首先考慮幾組可能的情形，逐一進行測試，並選擇最合理的評估準則。

(3). 資料庫之建立

在資料庫方面，為建立完整的決策支援系統資料庫，本論文將不同來源及不同格式的地理資料加以整合，其中包括基本圖層、向量圖層、網格圖層及衛星影像資料等四大類，由於地理資訊系統為一數值化系統，資料庫整合之最大問題在於圖層的建立，會因不同單位或不同時間數化而有所差異，其中包括圖紙誤差、人為判釋誤差、數化儀器或系統等差異，而造成邊界對位或資料整合上的問題。為避免這類的問題，本論文所建立的資料庫係採用鄭祈全等人於 2000 年所建議之複合式邊界修訂的方式，以無法變更的試驗林舊有之邊界為底圖，利用圖層套疊，將原始圖層與粹取之多尺度生態單元圖加以套疊，再依序修圖，以產生一具有複合式邊界的圖層。

為了瞭解不同尺度在林地分級中所扮演的角色和探討其對林地適宜性之影響，在資料庫建立方面，除了建立相關的主題圖層(如土壤特性和坡度等)和依分級單元方式建立屬性資料之外，另將上述所粹取之各種尺度的分級單元圖，建成一個 ArcView 的主題圖層。在完成知識庫和資料庫圖層的建立之後，隨即將林地分級之資料庫和知識庫相連結成林地分級決策支援系統。

(二) 林地分級決策支援系統於林地適宜性之分析

在建立林地分級決策支援系統之後，進行林地適宜性的分析，因為生態的評估極為複雜，一個整體的評估，可能包含多個規劃，在一個規劃下可具有多種評估，在每一評估中亦需要進行不同的分析，因此 EMDS 在結構的設計上是一組具有層級架構的系統。

EMDS 在處理不同尺度的問題時，可以用單一規劃或多規劃的方式來進行，依尺度將問題劃分成不同的規劃，其最大的優點在於多個評估的次群組可以在不同尺度下同時進行評估，雖然本論文為多尺度的分析，但由於初步只進行林地適宜性的評估，故單一個規劃即可以儲存及分析不同尺度的相關資料，因此擬以單一規劃的設計來進行評估。

在單一規劃下進行多尺度的評估，必需將不同的尺度視為不同的評估，因為在資料庫中，許多屬性表的欄位名稱是相同的，為了配合評估資料的連結和擷取，在 EMDS 的架構下，一個評估需對應一組分析單元，以利分析進行和資料管理。此外，EMDS 評估區域大小可以依需要而隨時調整大小，但每一評估也只對應一個分析區域，在本論文中，所有的評估都是以全部試區為分析範圍，圖 4-5 為執行評估的系統畫面。

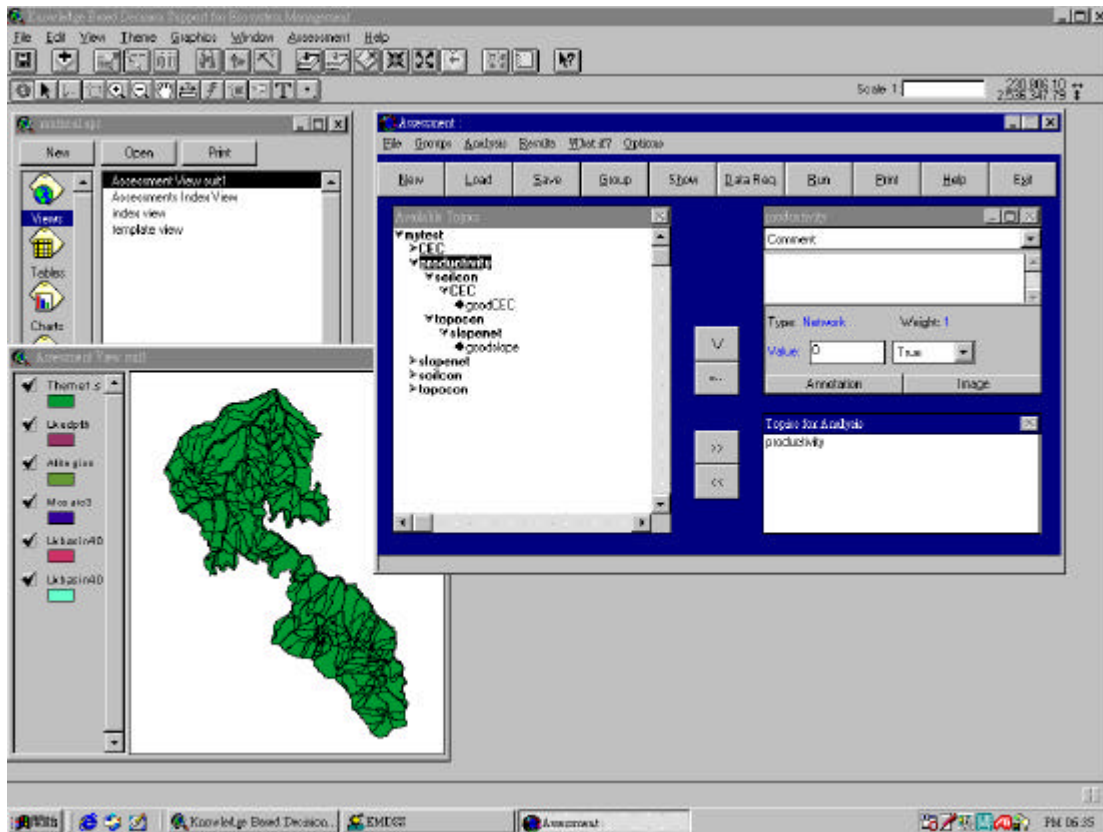


圖 4-5：EMDS 評估執行界面

規劃之下的評估建立完成後，即可根據不同尺度的分級單元，進行六龜試驗林之林地適宜性分析，其中，以一級河集水區單元、二級河集水區單元、地景單元和區域單元進行模糊邏輯法的評估，因傳統二分法為對照分析，故僅以一級河集水區單元和二級河集水區元進行評估。

知識庫的評估過程係以模糊推論機制進行推論，模糊推論機制主要以近似推理為方法，根據知識庫中的預備知識進行模糊推論得出結果。近似推理衍生自模糊邏輯，其主要的邏輯運算雖然也使用 AND、OR、NOT 等，但相較於傳統二值運算（Binary Computing）的結果只有 1（邏輯真值 True）、0（邏輯假值 False）兩種情況，模糊邏輯運算結果介於 0~1 之間，代表著不同程度的真偽，可提供生態特性一個更合理的運算方式。

適宜性分析在知識庫中的每個物件都以模糊運算子加以結合，在此所使用的模糊運算值是 Fuzzy AND node 的運算值，其數學式為：

$$AND(t) = \min(t) + [average(t) - \min(t)] \times [\min(t) + 1] / 2 \quad (4-2)$$

經過林地適宜性分級決策支援系統所評估分析，是以 ArcView 的圖層展示其評估結果，故可以將結果轉成 ArcView 之檔案格式(shape file)回饋至資料庫中，本論文為求資料格式的一致性，因此進一步在 ARC/INFO 下將圖層資料格式做一轉換，供後續研究使用。

在不同尺度與不同分析方法比較時所需的面積資料，則是利用資料庫中的屬性資料，粹取適合度大於 1 的所有單元，再進行面積的加總計算。

(三) 應用決策系統評估台灣杉潛在適宜區

造林樹種之選擇，在育林上，可將樹木栽植於不同環境之實驗地，長期觀察其結果而決定適宜之生育地，亦可依樹木之天然分布情況而加以決定。調查森林植物社會之組成和構造，並求出其與環境因子之關性，即可了解某一樹種與生育地之關係(劉棠瑞、蘇鴻傑，1992)。

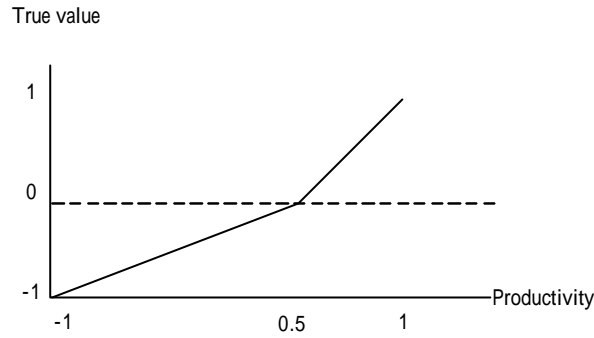
台灣杉為本土樹種，不但材質佳，且對於病蟲害的抵抗力亦強，故漸為國內林業所重視，此外，台灣杉為不耐蔭性樹種，在六龜試驗林地區，日照充足，正適合其培育造林，故選擇以台灣杉為例，在多尺度林地分級決策支援系統決定林地適宜性之後，進一步在適合林木經營的部份選擇適宜台灣杉生長的潛

在適宜區，俾供將來造林地點選擇之參考，以符合生態系經營中適地適木的原則。

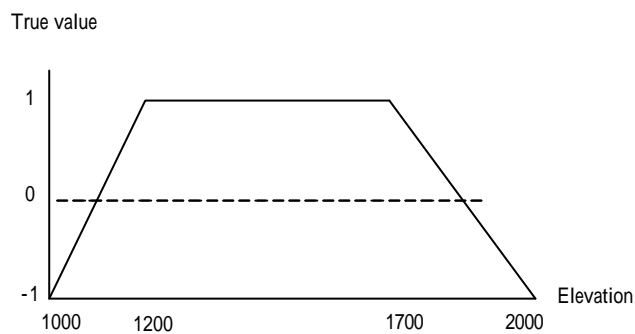
本論文首先將土地適宜性分析結果，視為台灣杉適宜地選擇的基礎，在此將林地適宜性大於 0.5 的部分視為較佳的潛在適宜區，並決定在知識庫中決定該準則和台灣杉生長適宜程度的隸屬函數(如圖 4-6(a))，再參酌相關文獻，逐一選擇與台灣杉生長有關之潛在適宜區因子，建立台灣杉潛在適宜區選擇的決策支援知識庫。

根據前人研究(鄭祈全, 1995)指出利用多變值逐步判別分析所得的結果指出，海拔高為影響樹種生長最重要因子，又根據六龜地區的林木生長資料顯示，台灣杉分布於海拔 1000 公尺~2000 公尺之間(六龜分所試驗林經營計畫)，在 1200 公尺~1700 公尺間生長良好(陳麗琴, 1997)，據此將台灣杉生長之海拔條件轉換成 -1~1 之間的隸屬函數(如圖 4-6(b))。

土壤方面，質地為影響生育地條件的因子，六龜分所試驗林經營計畫中記載，台灣杉適合生長之土壤質地為砂質壤土，因此選擇中質地的土壤，例如：砂質壤土、玢質壤土、砂質粘壤土、粘壤土、玢質粘壤土等排水良好之土系，做為台灣杉潛在適宜區選擇的必要條件。並在知識庫中一一列入評估準則。



(a) 林地適宜性



(b) 海拔高

圖 4-6：台灣杉適宜地選擇因子之模糊隸屬函數

雖然坡度亦為影響生長的重要因子，原應納入考量，但本論文暫時不考慮，主要理由有三：第一，由於山區地形陡峭，以六龜試驗林一級河集水區為例，100 個單元中平均坡度在 25° 以下僅 2 個，故文獻中對於台灣杉生長，並無明確的記載適宜坡度，第二，若參考林相調查台灣杉實際生長資料(如表 4-4 所示)可得知台灣杉生長較佳的坡度為 15° - 40° 之間，但本試區 95% 以上皆落於該坡度區間，因此在評估上意義不大。第三，在林地適宜性分析部份已考量坡度因子，為避免坡度因子在模糊運算的加乘效果下產生加權效果，使評估產生誤差，因此該部份即不再重覆。

表 4-4 六龜地區台灣杉人工林之生育環境調查

林班	種 植 面 積 (ha.)	海拔高 (m)	坡向	坡 度 (degree)
2	38.5	1500-1600	North-West	20-40
2	40	1500-1600	North-West	20-40
2	12.9	1000	North-West	20-40
3	58	1500-1600	South-West	20-30
3	20	1500	South-East	20-35
3	61.3	1300-1500	South-West	20-35
3	26.5	1400	South-West	20-35
10	24	1400	South-East	20-30
12	24.8	1450	South-East	20-30
12	25	1500	South-East	20-30
12	23.7	1300	South-East	20-30
12	18.5	1500	North-East	15-25
12	19.2	1500	North-West	15-30
12	15	1300	North-West	15-30
13	47.4	1500	North-East	20-40
13	24.1	1600	North-West	20-45
14	41.3	1500	South-East	25-40

此外，文獻雖有記載台灣杉喜空氣濕潤，雨量充之環境，忌乾燥之氣候與土地不喜南向，天然林多發現於東北及北北東等坡向(郭寶章，1995)，但是其生長條件在不同地區有很大的差異，因此需視實地生長狀況決定。六龜地區地處台灣南端，接近熱帶地區，終年日照充足，各種坡向的日照差異不大，由日照所引起的乾濕差異亦不顯著，由林相調查之台灣杉實際生長資料顯示，生長良好的台灣杉不論南向北向都有分布，可見該地區之坡向對台灣杉的生長並無顯著之影響，故暫時予以剔除。

潛在適宜區的評估屬於區域性生態議題，生育地的環境條件，在小區域中可能受到微地形或微氣候的影響導致樹種差異，因此台灣杉潛在適宜區的評估，應在小尺度的單元下進行才有意義，故在此僅考慮以一級河集水區單元為分析單元進行評估，將上述資料建立一台灣杉生長的知識庫，並連結至多尺度林地分級決策支系統，進行六龜地區台灣杉的潛在適宜區選擇。

此外，為了解林地分級對樹種選擇的影響，在評估過程中，另外建立一組以坡度、土壤質地及海拔高為變數的分析，用以評估在沒有考慮林地適宜性下之台灣杉潛在適宜區分析。最後，並以 85 年之林型圖當做對照資料，評估決策支援系統在台灣杉潛在適宜區選擇上的可信度。

六龜試驗林的台灣杉分布情形，除台灣杉造林地外，在針葉混合林及人工建造的混合林等，皆含台灣杉在內，因此這部份，先自林型圖粹取台灣杉造林地及含有台灣杉的混合林，並計算其面積，另以疊圖法呈現評估結果和林型圖上台灣杉分布的差異。該部分研究流程如圖 4-7。

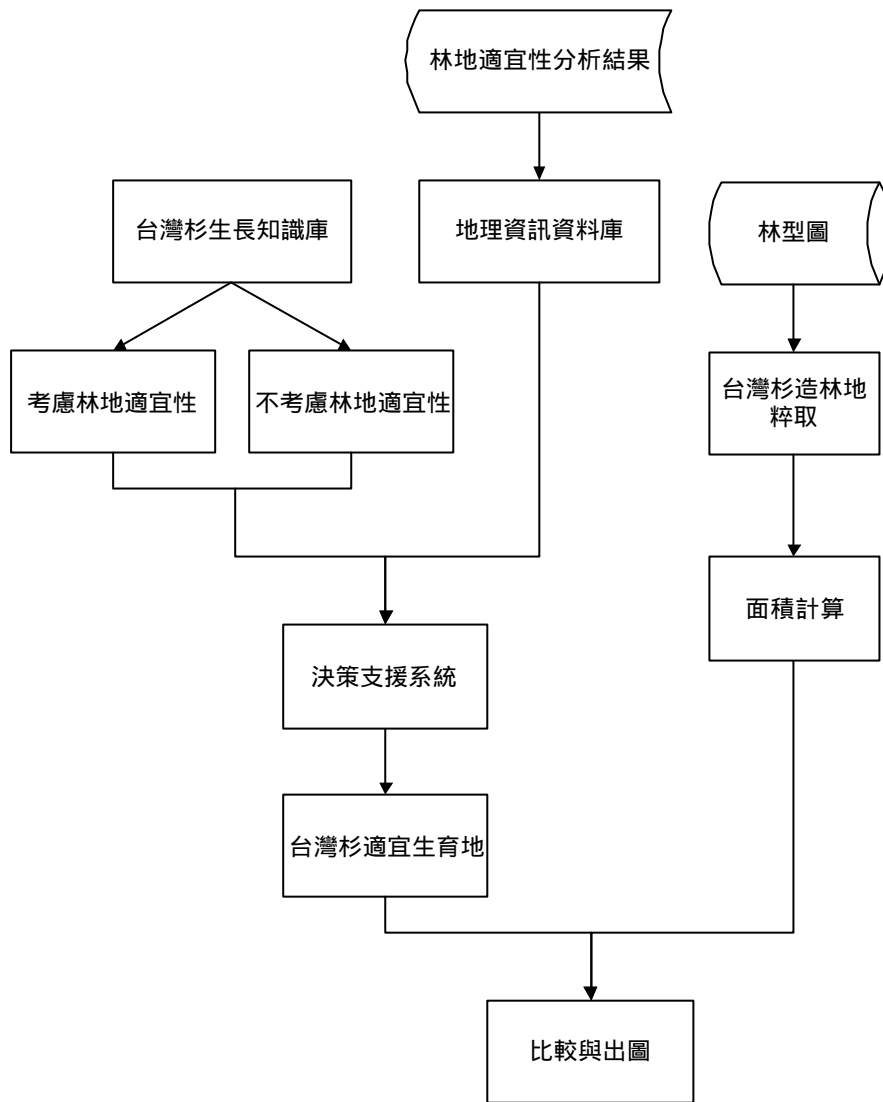


圖 4-7：應用決策支援系統選擇台灣杉潛在適宜區之流程

伍、研究結果與討論

一、多尺度林地分級決策支援系統之建立

(一)、林地分級作業體系之建立

六龜試驗林之數值地型模型，以自動化方式分別粹取不同級序集水區之結果如圖 5-1。明顯地，由於三級河及四級河之集水區無法涵蓋整個試驗林，為了配合多尺度單元建立，需將六龜試驗林當成一個區域單元，故就單一尺度的分級單元而言，僅能以一級河和二級河集水區單元為代表不同大小的基地單元，其粹取出之集水區數目分別為 100 個與 20 個。

為了建立多尺度的林地分級架構，本論文基於六龜試驗林之林班數目與二級河的集水區數目較為相近，故以二級河集水區為基本單元，利用海拔高、坡度及坡向三個地形因子，透過多變值統計之群落分析方法，可將該試驗林區劃三個地景單元，配合基地單元和區域單元，六龜試驗林的多尺度分級可以劃分成基地單元(site)、地景單元(landscape mosaic)、及區域單元(ecoregion)等三種尺度之分級單元。六龜試驗林之多尺度林地單元劃分結果如圖 5-2 所示。由該結果明顯地可看出，若整個六龜試驗林視為一個區域單元，則該區域單元係由三個地景單元所構成，而各地景單元則由不同數目的基地單元(即本論文的二級河集水區單元)所構成，此多尺度的劃分結果頗符合地形之連續體特性。

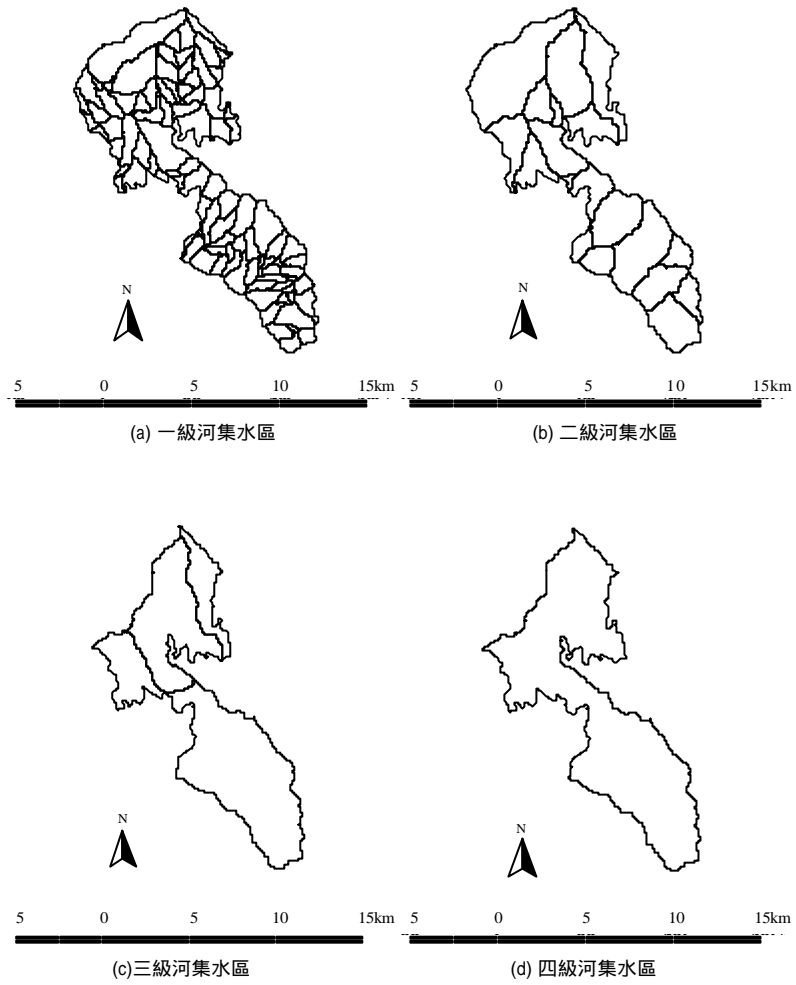


圖 5-1：不同級序集水區單元

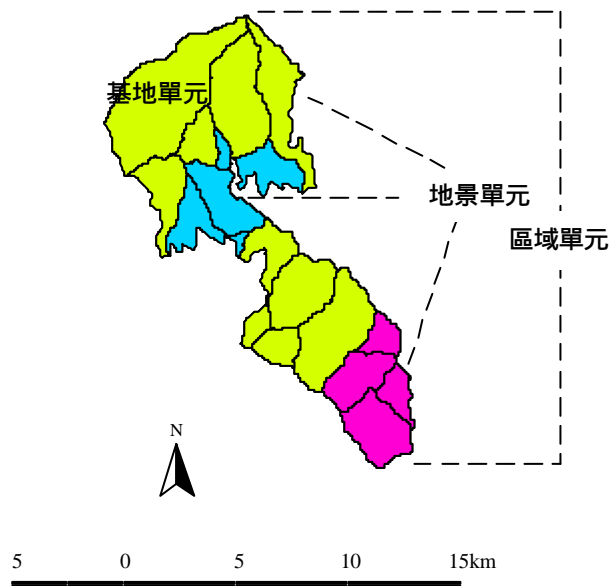


圖 5-2 六龜試驗林多尺度單元劃分

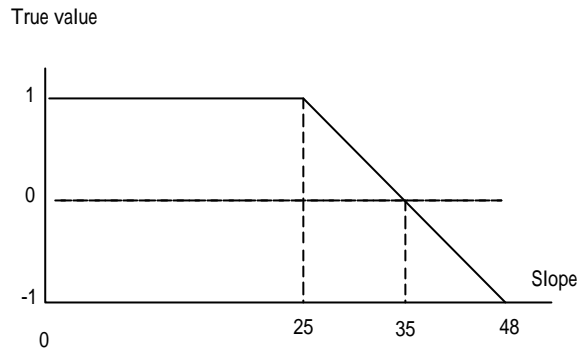
(二)、林地分級決策支援系統之建立

1. 數學規劃之最適林地分級面積

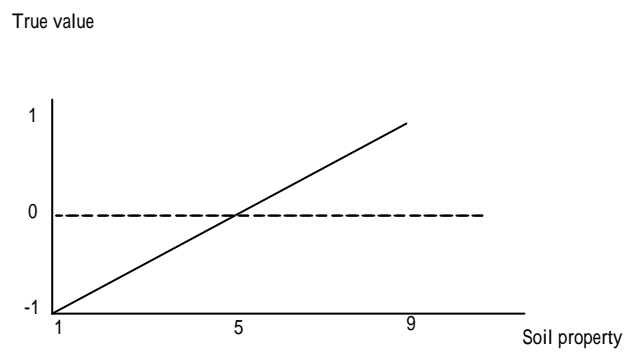
在林地生產力最大化的目標下，以線性規劃模式進行林地分級，可得一級河集水區的林地分級面積為 5,176 公頃，二級河為集水區之林地分級面積為 4,877 公頃(詳如附錄三、四)，該結果雖不能得到其分布地區的相關資訊，但將提供本論文建立知識庫之依據。

2. 知識庫建立

知識庫係參考相關規定，並根據數學規劃所得的面積，經測試結果，可得坡度和土壤特性之隸屬函數指定準則。在坡度部份，依據林務局坡度分級標準，坡度在 25° 以下為平地至丘陵地形，屬於可從事林木經營之地區，故指定 25° 以下者，對於作為林地經營的適合度隸屬函數為 1；坡度在 25° 到 35° 之間為山地地形，其隸屬函數從 1 降到 0，隸屬函數遞減，在適合度上表示逐漸不適合；在坡度 35° 以上時，因為坡度陡峭，不適合為林木生產，故適合度的隸屬函數指定由 0 再向 -1 遞減 (圖 5-3(a))。在土壤部份，由於土壤調查資料將土壤特性分成九級，而 1-9 分別代表最差到最好，因此在隸屬函數的指定上，本論文亦根據此一調查結果，將 1-9 的土壤特性經線性轉換成 -1~1 的隸屬函數 (圖 5-3(b))。



(a)坡度



(b)土壤特性

圖 5-3：林地分級因子之模糊隸屬函數

林地分級的因子及準則可依根據知識庫的結構建立其相依網路及資料連結，圖 5-4、5-5 分為是在 NetWeaver 之下所建立的相依網路和資料連結。

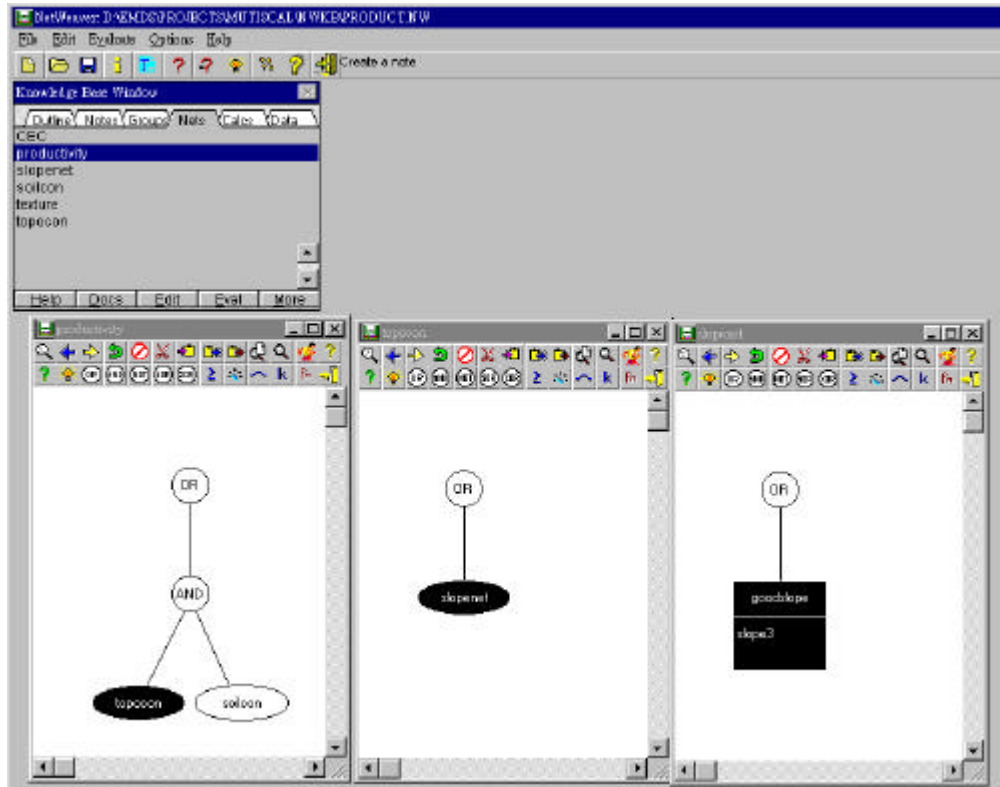


圖 5-4：視窗界面之 NetWeaver 知識庫

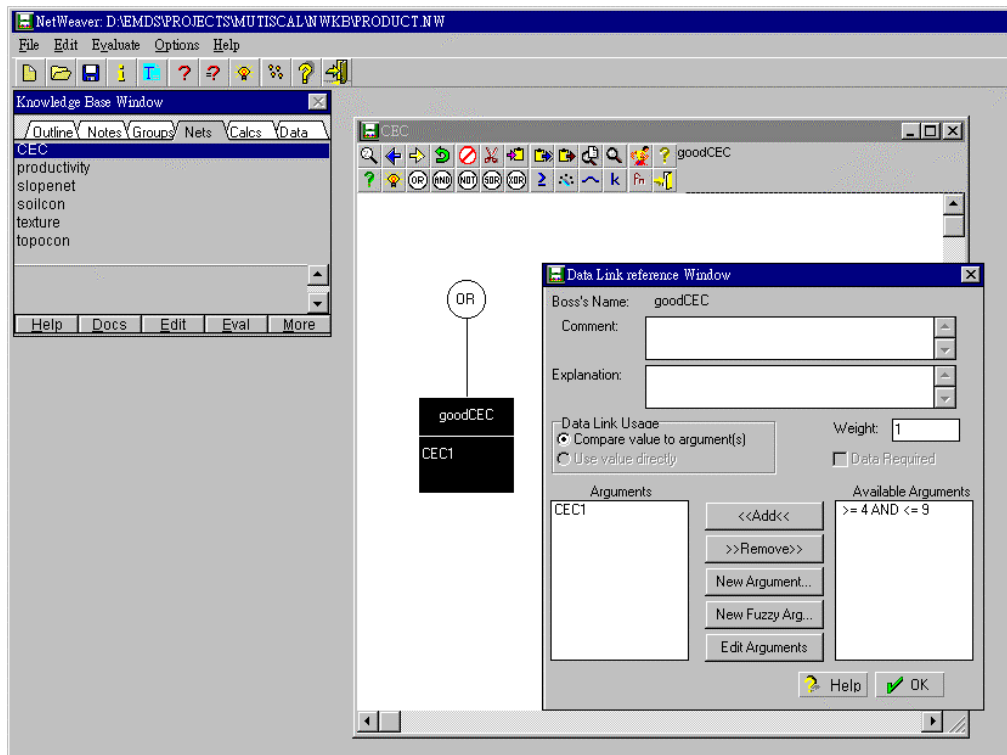


圖 5-5：NetWeaver 知識庫的資料連結

3. 林地分級決策支援系統之建立

圖 5-6 為本論文以 EMDS 整合與林地分級有關之資料庫和知識庫後所建構成的多尺度林地分級決策支援系統，該系統可針對坡度和土壤特性二因子，迅速地評估六龜試驗林區內每一分級單元之林地適宜性分級，同時，在此系統之下可以輕易調整評估區域的範圍和大小，更可以視實際需要，隨時增減相關因子或改變評估的準則，即時得到林地適宜性的評估結果。

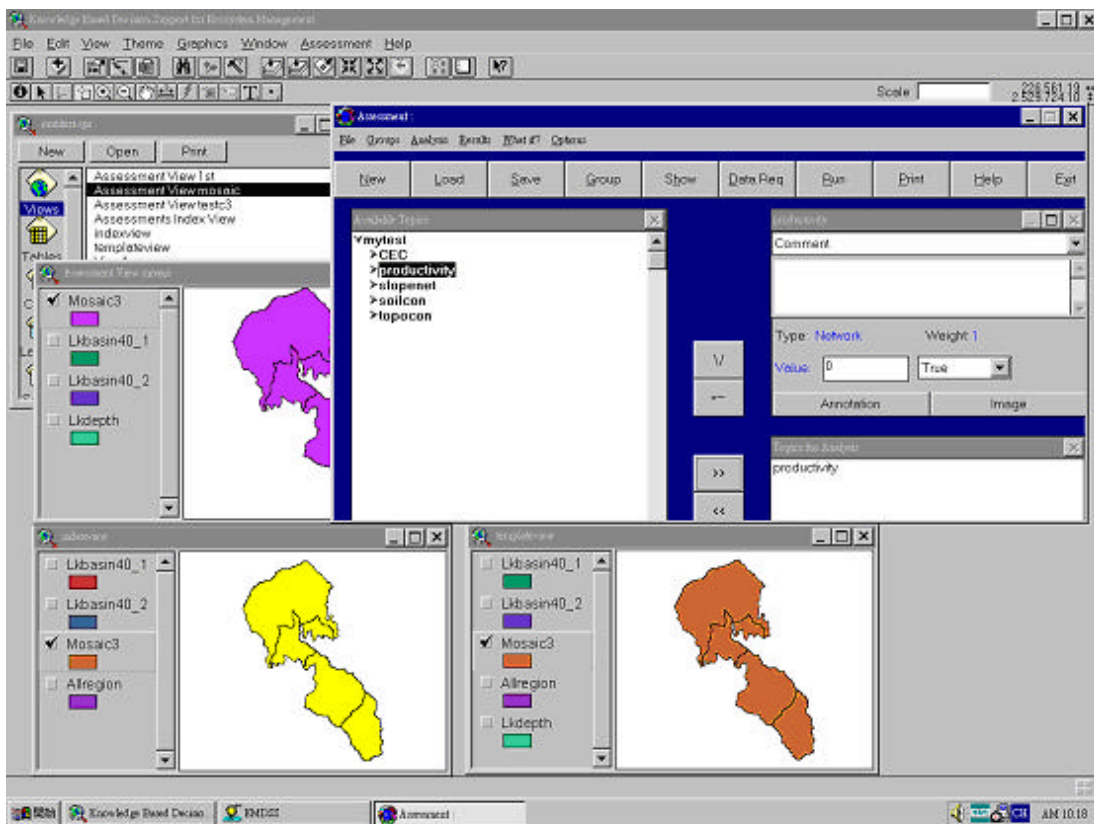


圖 5-6：林地分級決策支援系統

二、林地分級決策支援系統於林地適宜性之分析

(一)、不同演算法之林地適宜性比較

1 傳統二分法

由於六龜試驗林僅能以一級河和二級河集水區代表單一尺度的分級單元，因此，本論文在基地單元的尺度下，僅以該二種分級單元進行林地適宜性分析。圖 5-7、5-8 分別以一級河集水區單元和二級河集水區單元為分析基本單元，應用林地分級決策支援系統，以傳統二分法分析林地生產力所得的結果，其中綠色部份表示適合做為林木經營的地區。由圖可知，傳統二分法在林地分級決策支援系統下，對於林地生產力分析僅能顯示適合與不適合，並不能表現適合程度之高低。

二者經過面積統計計算可得在一級河集水區單元下，適宜地面積為 5562 公頃；二級河集水區元下的適宜地面積則為 5,164 公頃，此結果可以證明分析單元的大小，會影響林地分級的適宜性。此外，林地適宜性分布圖的邊界會有不同於集水區單元邊界之情形，該現象肇因於林地適宜性分析所使用的土壤特性圖是以土系為基本單元，而坡度圖以集水區為基本單元，二者經資料套疊後即產生邊界不一致的情形。

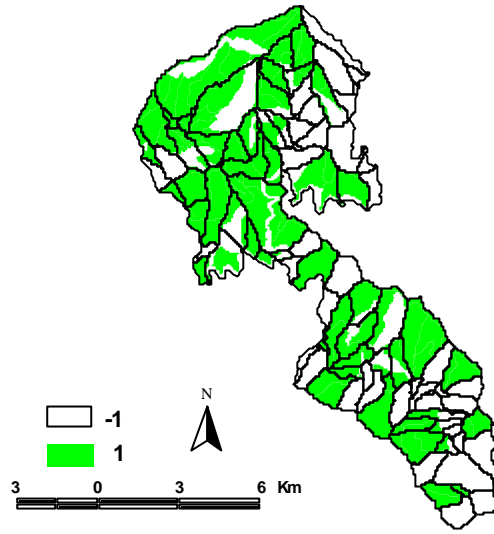


圖 5-7：傳統二分法在一級河集水區單元下之林地適宜性

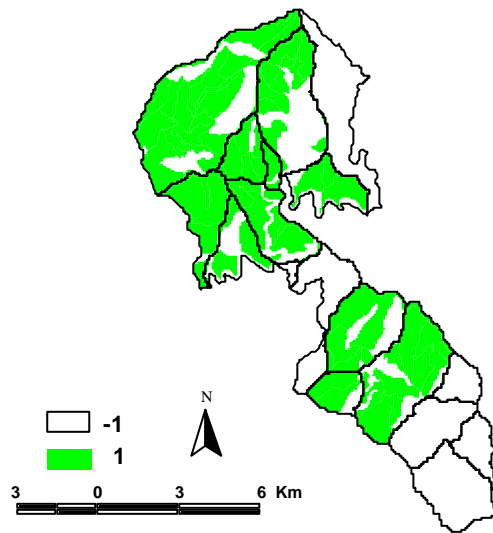


圖 5-8：傳統二分法在二級河集水區單元下之林地適宜性

2. 模糊邏輯法

應用林地分級決策支援系統，以模糊邏輯法分析林地生產力所得的適合度分佈在-1~1 之間，-1 表示完全不適合，而 1 表示完全適合。本論文為使結果單純化，乃將結果分成三級：0.5~1 表示極適合；0~0.5 表示適合；-1~0 表示不適合，圖中並以綠色表示極適合，黃色表示適合，空白部份表示不適合，圖 5-9 和 5-10 分別表示在一級河集水區和二級河集水區單元之下之分析結果。

兩者經計算可得其適宜性面積在一級河和二級河集水區單元下分別為 5,189 公頃和 4,938 公頃，在面積大小的變化上，分級單元變大時，林地適宜生產的面積看似會減少，但此結果並非？對如此，因為在林地分級決策支援系統下，是以分級單元的平均值為分析之依據，在本論文中某些地區因受坡度平均值的影響而將分級單元全部歸入不適合林地生產之地區，故導致面積之縮小。以二級河系最南端之第 20 號集水區單元為例，在二級河集水區單元下分析的結果全部歸屬於非林地生產之地區，但若對應到一級河集水區之 7 個分級單元(編號第 94~100 號)，則有約 122 公頃之地區，可劃入林地適宜生產之地區(如表 5-1)。

表 5-1：相同地區下不同分析單元大小之林地適宜性

一級河集水區編號	一級河單元下之林地適宜性分析結果面積(m ²)	相對應之二級河集水區編號	二級河單元下之林地適宜性分析結果面積(m ²)
94	0	20	0
95	19882	20	0
96	0	20	0
97	15	20	0
98	891597	20	0
99	127160	20	0
100	0	20	0
總和	1216998		0

由圖中可發現，就整個地景而言，以二級河集水區為單元之林地適宜性分析結果常形成較大的區塊，而一級河集水區則區塊較為細碎，此乃因較大的分級單元在進行林地適宜性分析時，常因分級單元之坡度因子符合或不符合限制條件，而會有全部歸類或不歸類的情形發生，此為使用不同大小分級單元之必然現象。此外，林地適宜性分布圖的邊界亦有不同於集水區單元邊界之情形，該現象與傳統二分法一樣係由資料單元不一致所造成的。

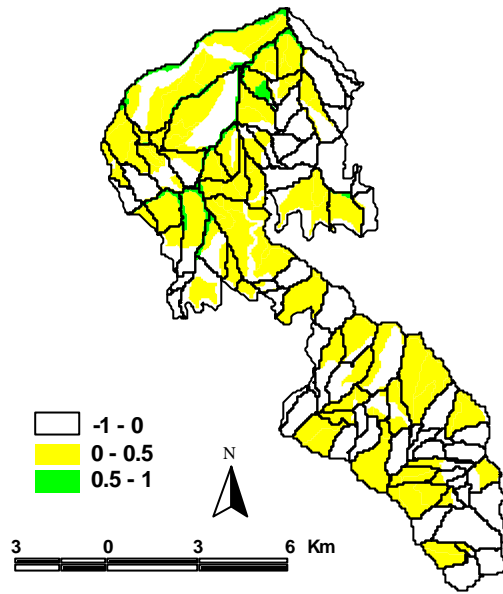


圖 5-9：模糊法在一級河集水區單元下之林地適宜性

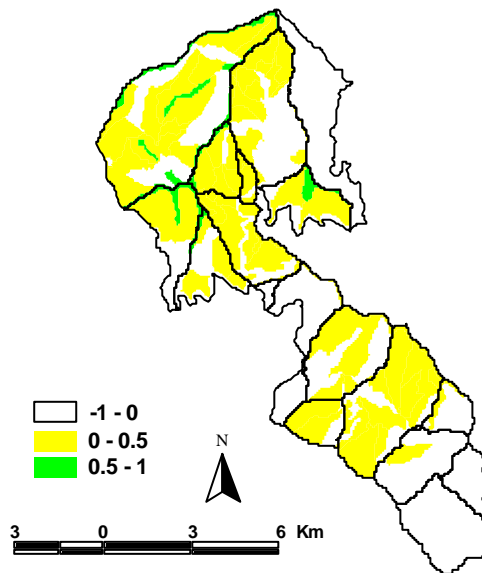
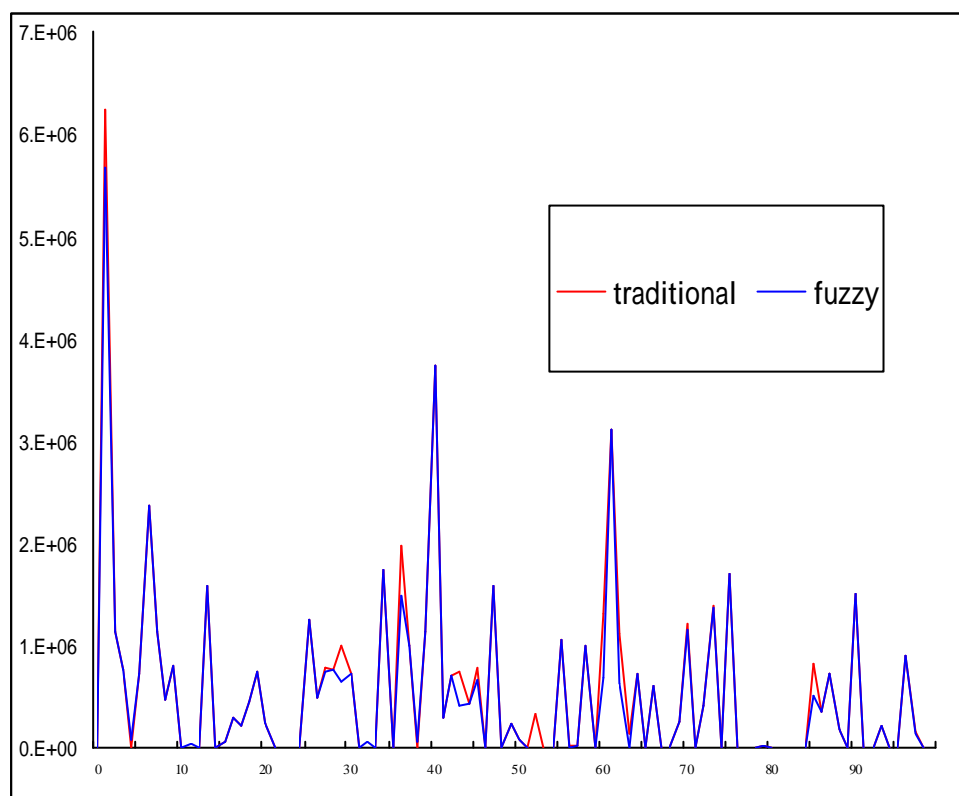


圖 5-10：模糊法在二級河集水區單元下之林地適宜性

圖 5-11 為針對一級河集水區每一單元，比較傳統二分法和模糊邏輯法分析林地生產力所得之結果。由該圖逐一比較各個單元內林地適宜生產的面積可發現，二種演算法所得結果，在面積及分佈上有所不同。

面積(m²)



集水區編號

圖 5-11：傳統二分法和模糊法之林地適宜性面積比較

比較單一尺度之分級單元的分析時間，使用一級河集水區單元和二級河集水區單元進行林地適宜性分析所需的時間如表 5-2，由該表可知，一級河 100 個集水區單元所需的時間為 60 秒，而二級河 20 個集水區單元所需的時間為 40 秒，也就是如果由一級河集水區單元改成以二級河集水區為單元的情況下，可以節省 1/3 的計算時間。

因此，同一地區若以不同大小的分級單元進行分析時，除了建立分級單元之圖層與屬性資料不同之外，其所需之分析時間亦有所不同。雖然以一級河集水區為分析基本單元時，能得到比較詳細的結果，但因一級河集水區的單元數目較多，會耗費較多的分析時間，故必需視經營目的或規劃區域的範圍來選擇適當的分級單元大小。

(二)、多尺度林地適宜性比較

圖 5-12 和圖 5-13 為利用地景單元和區域單元所得到之林地適宜性分析結果，其林地適宜生產的面積分別為 5394 公頃和 6075 公頃。若從林地適宜生產之分佈來看，區域單元的林地適宜性分析結果較地景單元的分析結果顯得粗略，其造成的原因係區域單元僅含一個單元，且其平均坡度落在適合生產的範圍之內，造成全區歸類的情形。

利用 3 個地景單元和 1 個區域單元執行林地適宜性分析所需的時間分別為地景單元 32 秒；區域單元 31 秒，二者幾乎相同。但若比較多尺度與單一尺度的林地適宜生產面積和分析時間，則可發現確實有差異。至於圖中林地適宜性分佈的邊界，仍有不同於集水區單元邊界的情形，其原因與單一尺度的情形類似，其差異僅在於多尺度單元的坡度圖，係以群落分析歸併後之分級單元為邊界。

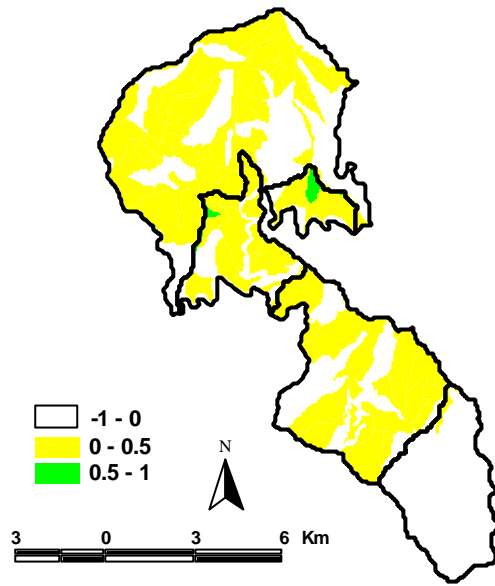


圖 5-12：模糊法在地景單元下之林地適宜性

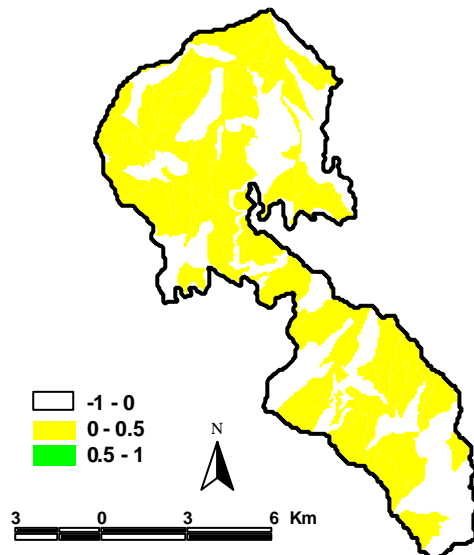


圖 5-13：模糊法在區域單元下之林地適宜性

表 5-2：多尺度單元下之林地適宜性分析

	基地單元		地景單元	區域單元
	一級河集水區	二級河集水區		
適宜性面積 (ha)	5,189	4,938	5,394	6,075
單元數目	100	20	3	1
計算時間 (sec)	60	40	32	31

比較 EMDS 林地適宜性分析和數學規劃法以 LINDO 規劃程式對於林地適宜性進行分析的結果如表 5-3 所示，不論以一級河集水區或是二級河集水區為分析單元，利用 EMDS 所提供之模糊邏輯運算法所得的結果皆十分接近數學規劃所得的結果。若以數學規劃之結果為基準而言，一級河多出 13 公頃；二級河高出 61 公頃，二者差異皆很小，故在應用上具有相當的可靠性。此外，EMDS 可透過空間分析展示適宜性的正確位置，而在數學規劃無法達到此目的。

表 5-3 數學規劃與決策支援系統之評估結果比較

	一級河集水區單元		二級河集水區單元	
	傳統二分法	模糊邏輯法	傳統二分法	模糊邏輯法
評估結果(ha)	5,562	5,189	5,164	4,938
數學規劃(ha)	5,176		4,877	
相差面積(ha)	386	13	287	61

若比較不同演算法對於林地適宜性分析的影響則可以發現，利用傳統二分法針對生產力所進行的土地適宜性分析面積，會較使用模糊邏輯運算法所的分析面積大，顯示在傳統二分法所得的結果對於土地適宜性分析會有高估的可能，且與數學規劃法所得的誤差較大，分別為一級河集水區 386 公頃、二級河集水區 287 公頃。除了數據上的差異之外，在傳統二分法所得的結果中，只能分成適合及不適合二部份，若使用模糊邏輯運算法進行適宜性的分析，則在適合與不適合之間，可以再區分成不同程度的適宜性。

三、台灣杉潛在適宜區之評估

六龜地區適合台灣杉生長的評估結果如圖 5-14，其中綠色部份表示評估上適合台灣杉生育的地區，經由面積統計得到台灣杉潛在適宜區評估面積為 1,633 公頃，紅色框線表示現有台灣杉造林地，由 85 年林型圖資料可粹取出台灣杉造林地有 17 筆，面積為 672 公頃，藍色框線表示人工針闊葉混合林，在林型圖中有 11 筆，其中含有台灣杉的部份佔 10 筆，面積為 207 公頃。

在面積上，現有台灣杉造林地雖比評估結果少，但是經過比對，大部份經決策支援系統評估之潛在適宜區，在實際林況上，除台灣杉造林地外，多為？葉樹混合林、針？葉混合林或是其他樹種與台灣杉混植的造林地，也就是大部份評估所得的潛在適宜區，目前現地都已包含台灣杉，且由圖 5-14 來看，分佈位置大致相近。

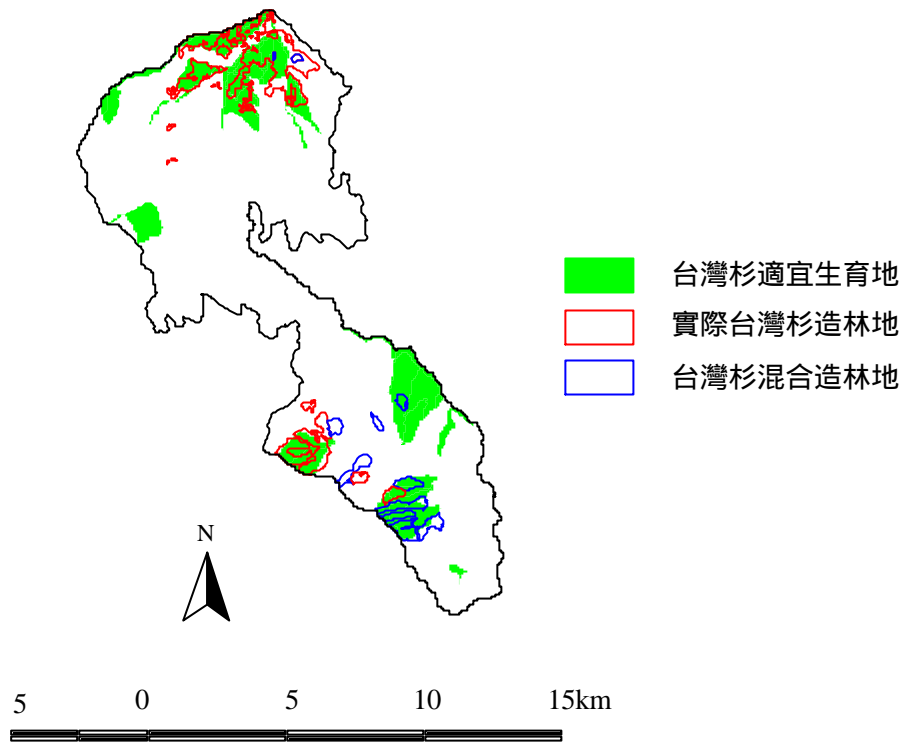


圖 5-14 台灣杉潛在適宜區

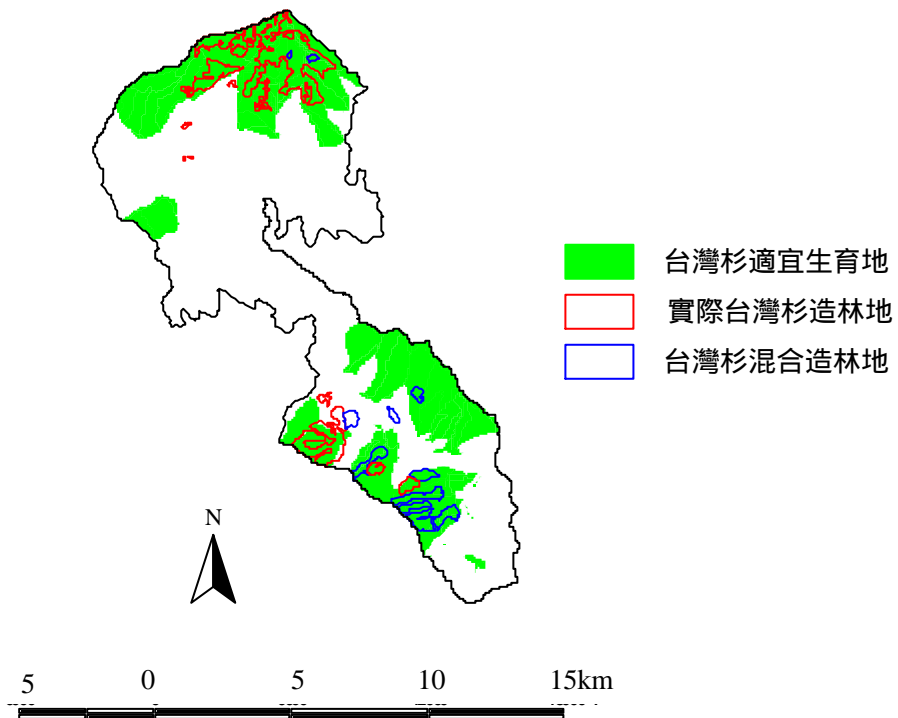


圖 5-15：未考慮林地適宜性之台灣杉潛在適宜區

圖 5-15 是在沒有林地分級的情況下進行台灣杉潛在適宜區評估的結果和六龜地區含台灣杉的林型圖互相套疊的分布圖，由圖中可以發現評估結果對於台灣杉潛在適宜區評估，明顯較實際台灣杉分佈多出許多，由此可推知，若在沒有林地分級的情況下進行潛在適宜區評估，所預估的潛在適宜區會有高估的情形，因此，林地分級為樹種選擇前之必要工作，意即在生態系經營的階層架構之下，我們必須先了解林地生產力的概況，才能進行樹種的選擇。

四、討論

林地分級、決策支援系統和數學規劃的結合，在未來森林生態系經營上扮演一重要角色，本論文除了整合數學規劃的決策能力和地理資訊系統的展示能力之外，也利用決策支援系統在使用上的便利性來處理林地分級的問題，就系統建構與實際應用而言，本論文所建構的生態系經營決策支援系統，整體上可符合生態系經營之林地分級作業需要，唯在研究過程中，尚有一些值得討論之處，茲分述如下：

(一).多尺度林地分級決策支援系統之建立

分析單元的建立是森林經營的基本工作，目前常用的分析單元有集水區單元和網格單元，在本論文中為符合森林生態系經營多尺度生態單元的建立，係選用集水區為基本生態單元，並配合地景單元和區域單元建立階層式的架構。由於六龜試驗林在三級河和四級河集水區單元下無法涵蓋所有試驗林範圍(如圖 5-1)，因此，本論文僅以一級河和二級河集水區單元為基

地單元。未來林地分級的範圍若擴大至三級河集水區以上，該系統仍可應用於任何一個河川級序之單元，至於林班、事業區等非集水區的單元，本系統亦可適用。

在林地分級決策支援系統建立的過程中，乃涉及林地分級因子的選用與準則訂定。坡度因子因影響土壤沖蝕和穩定性，因此在相關法律及規定中，對於坡度都有明確的使用限制，因此在林地分級因子選擇上，首先納入坡度因子；而土壤特性直接影響林地的生產力，故亦為林地分級之必要因子。本論文兩者的權重分配，由於坡度和土壤因子對林地分級因子代表性大小及其對分級結果影響的大小，尚未獲得統計及實証上的驗証，因此在權重分配上係以等權的方式處理。此外，本論文僅以坡度和土壤特性為林地分級的因子，對於其他環境因子如海拔高及坡向等是否影響林地分級的結果，本文並未進一步測試，惟系統中仍將這些因子建入知識庫中，但暫不提供準則，未來使用者可依試區之地理環境特性，建立其準則並選用適當之分級因子，如此可符合決策支援系統的動態需求。

本論文以數學規劃輔助隸屬函數的指定方式，因為僅考慮坡度和土壤二個因子，困難不大，但將來在其他議題相繼納入生態系決策支援系統的發展後，必須克服將現實問題轉換成目標函數和限制式的困難。這部份將是未來研究中極需著力的部份。

(二). 林地分級決策支援系統於林地適宜性之分析

由研究結果可以看出，不論在任一分析單元尺度或單元大小之下，林地適宜性分布圖的邊界都會有不同於集水區單元邊

界之情形，該現象肇因於林地適宜性分析所使用的土壤特性圖是以土系為基本單元，而坡度圖是以多尺度生態單元為基本單元，二者經資料套疊後即產生邊界不一致的情形。

由於地形因子與土壤因子原本就屬於不同尺度的環境因子，故使用集水區自動粹取方式和多變值統計分析所建立之階層式多尺度林地分級架構與生態單元，其地形環境因子的屬性資料亦配合多尺度的生態單元而建立，而土壤特性之土系單元則是由土壤調查所區劃的，除非以網格為基本單元進行分析，否則無法得相同的單元。

本論文曾以網格為基本單元進行分析，雖然 EMDS2.0 版本具有格格資料的處理功能，但是在處理上，係以每一網格為計算單元，造成資料量十分龐大，分析過程需耗費許多時間，而且網格資料並不能完全表現真實世界的情況，因此本論文仍以向量的方式進行林地適宜性分析。

在適宜性分析的過程中，適宜性分析的面積大小，會隨尺度的選用而有所變動，在尺度放大時，林地適宜性分析面積有逐漸增大的情形，因為所使用的分析單元放大時，單元內的平均值會隨之逐漸概化，故大尺度所得的分析結果較為粗略。唯二級河集水區單元的林地適宜性面積小於一級河集水區的適宜性面積，可能的原因為試區南端地形變化較大，就坡度因子而言，一級河集水區單元的坡度值在 26° - 39° 之間，以一級河為分析單元時，一部份可納入適宜區的條件中，若以二級河為分析單元時，其坡度為 36° 會落於適宜性的條件值之外。因此在單元的選用上，除了需考慮尺度與研究目的的配合外，分析單元的大小亦是不可忽略的要項。

在適宜性分析的方法上，數學規劃及決策支援系統之二分法和模糊邏輯法，會分別得到不同的適宜性分析結果，其中數學規劃的限制式指定方式係與二分法相同，但由其結果不相同的情形來看，以往適宜性分析所使用的二分法，並不能完全符合規劃的概念。因此生態系經營的相關分析，應以模糊邏輯的方式來進行，才能得到較合理的結果。

(三)、台灣杉潛在適宜區

由台灣杉潛在適宜區分析的結果來看，雖然分析結果在面積上比現有造林情形高出許多，但是經過比對其分布位置，大部份經決策支援系統評估之潛在適宜區，在實際林況上，除台灣杉造林地外，多為？葉樹混合林、針？葉混合林或是其他樹種與台灣杉混植的造林地，意即大部份評估所得的潛在適宜區，目前現地都已包含台灣杉(如附錄一、二)。

至於扣除台灣杉混合林面積之後仍多出來的部份，可能的原因為評估結果乃所有台灣杉之潛在適宜區，而實際台灣杉造林必需考慮實際林地的易達性及造林的成本，因此，評估結果高於實際分布情況屬於合理之結果。

另一方面，由該結果亦可推測目前六龜試驗林之台灣杉造林情形，尚未超出其潛在適宜區，未來在加強造林及撫育工作時，台灣杉仍具有一定的可造林空間，可供生態系經營在樹種選擇上之參考。

此外，從研究結果可以看出，若沒有進行林地分級的工作，會造成台灣杉潛在適宜區評估的誤差；就經營的角度而

言，如果潛在適宜區落在非林木經營區，依規定不能作業。因此，潛在適宜區的評估必需在林地分級之下進行，才具有合理性。由此可知，林地分級是生態系經營最重要且最基本的工作，故在發展生態系經營決策系統的過程中，必需以林地分級出發點，建立林地分級決策支援系統，做為後續生態系決策支援系統發展的基本架構。

陸、結論及建議

本論文利用地理資訊系統結合林地分級和數學規劃的方式將森林地景作一合理的配置。在生態系經營的單元上，採用多尺度的規劃方式，不但能符合生態系經營的意義，且能達到階層式管理的需求。在作法上，本論文係以決策支援系統的方式，針對當前生態系經營最重要的議題，(即林地分級)建立一套多尺度的林地分級決策支援系統，在系統建立的過程中，為求知識庫的合理性，乃以數學規劃配合模糊邏輯演算法之準則訂定，將地理資訊系統、決策支援系統及數學規劃做一連結，供林地適宜性分析之用，意即在決策過程中引入了數學規劃的概念，建立了數學規劃和地理資訊系統給合的另一種方式。

完整的森林生態系經營應包含各種森林財貨及非財貨價值的產出，但目前在保育重於開發的呼聲下，森林經營者對於林木生產的規劃往往受到極大的阻力，然而台灣木材自給率只佔用材的 1%左右，其他約有 99%的用材需靠進口，對於全球性保育的觀念而言，無疑是對其他國家資源的略奪。在未來資源更加珍貴、保育走向國際化的潮流之下，木材自給率過低的情況，必定倍受非議，故未來台灣要跨上保育的國際舞台，除了加強保育各種動植物資源與重要棲地之外，適度地規劃木材生產區，降低用材的進口比例，也是不可或缺的一環。本論文針對林地分級建立一多尺度的決策支援系統，除了進行林地適宜性的評估之外，並應用於台灣杉潛在適宜區的評估，期能提供森林經營在林地管理與規劃上的參考。在研究中所得結論與建議歸納如下：

一、生態系經營之多尺度林地分級概念與必要性

林地分級除了需符合生態原則之外，亦應考量不同管理階層之實際需要和經營效率。本論文針對六龜試驗林所建立之多尺度林地分級系統，係根據生態系階層架構所建立之分級系統，含區域單元、地景單元及基地單元。台灣地區未來建立本土化的林地分級系統，應有多尺度的觀念與架構，而本論文建立六龜試驗林多尺度林地分級系統的方法可供作參考。

如果研究的範圍擴大，或者研究的目的是要評估較大面積之林地適宜性時，分析單元可以採用較大的地景單元，或者更大的區域單元，因此，不同層級的經營單位應考量不同的地景尺度，在林地分級議題上，不同尺度和不同單元大小都有其各自的意義存在，完全視經營目的或規劃區域的範圍而定。

就實際應用面而言，分級尺度和分級單元大小的選擇，會影響分析的過程及結果，需視經營的目標而定，惟本論文建議，大尺度的分析，雖然結果較為粗略，但可快速地瞭解林地分級的概況，適合於政策面的評估，而小尺度的分析，雖可獲得較詳盡的資料，但需耗費較多的人力與時間，較適合於作業面的評估。

二、生態系經營決策支援系統與模糊邏輯法之優點

本論文根據 EMDS，以物件導向和模糊邏輯理論為基礎所建構的六龜試驗林多尺度林地分級決策支援系統，不但可以改變評估範圍的大小和分析單元，更可根據關心的議題和現有的環境條件隨時做動態的改變，符合生態系經營即時回饋和隨時修正之需求。

以傳統二分法為演算基礎的林地分級決策支援系統與疊圖法得到的結果可以視為相同的，因此決策支援系統可以用資料庫和知識庫的建立，完全的取代林地適宜性疊圖分析，在考慮多項因子時，決策支援系統可以更方便的管理資料及更有效率的提供決策參考。

由於傳統二分法的結果較數學規劃結果高，表示用疊圖的方式進行分級，對於結果可能會有高估的情況，在相同條件下，模糊邏輯法的評估結果較接近數學規劃的結果，由此可知以模糊邏輯法進行林地分級不論是在學理或實証上都較傳統二分法接近生態研究的要求。此外，決策支援系統可透過空間分析的功能展示適宜性的正確位置，而在數學規劃無法達到此目的，因此，本論文建議在生態系經營的要求下，應採用決策支援系統並以模糊邏輯法進行生態分析。

在決策支援系統建立的過程中，為了提高模糊邏輯法的可信度，本論文提出以模糊邏輯法配合數學規劃的方式，這種模式不但能保有數學規劃的合理性，還能配合模糊邏輯對生態現象的適用性和決策支援系統的便利性，可供未來生態系經營規劃的樣版，並作為生態系經營決策支援系統後續發展的理論根本。

三、台灣杉造林地點的選擇

台灣杉潛在適宜區的分析，除了可以了解過去台灣杉造林的情形，更可以提供森林生態系經營在樹種選擇上的重要依據。在選擇造林地點方面，可以參考評估的潛在適宜區進行台灣杉的造林，而現有台灣杉造林地區，若不為合適之潛在適宜

區，則應進一步了解實地狀況，以決定是否進行天然更新。

在未來實際作業上，則需參考林業政策及分區使用規劃以及地景完整性，才能決定正確的台灣杉造林地面積及位置。例如試區右下方，鄰接雙鬼湖自然保護區，雖然地力良好，適合台灣杉生長，然而在保存地景及保護區整體性的考量下，建議仍保留其天然林之完整性，不為造林使用。

雖然目前在保育的前提下，並不強調林木經營，但是在森林生態系經營的長遠考慮下，為滿足國內的木材自給率，選擇材質優良、生長良好的的造林樹種仍是重要的工作。此外，近年來，天然災害頻頻發生，在極需加強造林的情況下，台灣的林業政策在造林上，強調適地適木的原則，因此，發展一套本土化的樹種潛在適宜區選擇決策支援系統，可以使林業經營在減少決策上的錯誤，讓作業更有效率。本論文雖以台灣單一樹種為例，但只要能取得相關的生長資料，決策支援系統亦可應用於不同樹種混合造林的情形。

四、未來發展之建議

生態系經營決策支援系統可以協助森林經營的決策訂定以及經營的評估，包括林地分級及樹種選擇皆可以藉由決策系統來完成，然而生態系經營所包含的層面相當廣，其中人文和經濟的因子會隨社會求的改變而扮演日益重要的角色，在日後相關研究上應加強人文經濟的考慮，畢竟經營是以人類需求為出發點，公眾參與和協商，是生態系經營最棘手且不容忽視的一部份。

在物理和生物向度方面，決策支援系統的建立都較人文向

度單純，只要能取得相關的資訊，不論是物種棲地的選擇及保護區規劃、地景相關議題的評估，或經營施行的影響等，都能藉由決策支援系統的建立，提供有用的參考資訊。然而單一議題的解決，並不能達成生態系經營的目標，因此各議題之間的整合亦是在未來生態研究上的重點。

決策支援系統是決策上有力的輔助工具，但是在決策過程中，人的價值觀還是最關鍵的因子，因此在準則的訂定，還是受到決策者主觀意識的影響，這也是倍受爭議的焦點，未來在決策支過程中應透過不斷的回饋和修正，才能得到合理的評估準則。

生態資料包含一些定性資料，若以數學規劃做為規劃準則，會產生量化上的問題，未來在研究上，必需配合統計理論或其他研究理論，方能取得合理之量化資料，供決策者使用。

柒、參考文獻

- 王韻皓 1996 模糊數學分類法應用於衛星影像上林分鬱閉度推估之研究 國立台灣大學森林學研究所碩士論文
- 沈昆禧、管立豪 1995 林地分級及其應用 台灣林業 21(1):23-27
- 林子玉 1973 柳杉林地生產力及林分收穫之推估 國立中興大學森林學報 第二輯:56-82.
- 林文亮 1995 森林生態系經營觀念模式的研究 林業試驗所百週年慶論文集 林業叢刊 58 號 p203-211
- 林照松、洪富文 1991 六龜地區臺灣杉人工林之生長 林業試驗所研究報告季刊 6(3):229-248
- 林俊宏 1998 區域水資源調配空間決策支援系統建立之研究 國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文
- 林務局造林生產組 1998 國有林地造林台帳統計資料
- 林信成 2000 基於 XML 之分散式模糊知識管理系統模式 教育資料與圖書館學 37(4): 376-403
- 洪富文 1995 美國太平洋西北區的森林生態系經營 林業試驗所百週年慶論文集 林業叢刊 58 號 p181-192
- 孫志鴻 1991 空間決策支援系統之研究 中國地理學會會刊 19:145-155
- 梁定澎 1991 決策支援系統 松崗電腦圖書資料股份有限公司
- 郭傳鎮、陳永寬、鄭祈全 1993 台大實驗林水源涵保安林規劃探討 台大實驗林研究報告 7(2):105-116

- 郭寶章 1995 台灣貴重針葉五木 pp：297-367 中華林學叢書第 956 號 中華林學會
- 黃書禮 1988 淡水河流域土地使用規劃與河川質管理之研究 - 土地分類之應用 與土地管理策略之研擬國立中興大學都市計畫研究所 310 p
- 陳朝圳 1993 地理資訊系統在森林經營管理上之應用 國立中興大學森林學研究所博士論文。
- 陳朝圳、裴家騏、鍾玉龍 1994 整合地理資訊系統與遙測技術應用於自然保護區之經營管理 行政院農業委員會 83 年度試驗研究計畫研究報告 71 頁
- 陳朝圳 1999 模糊地理資訊系統應用於野生動物之棲息地分析 -- 以台灣山羌為例 技術學刊 14(2):265-270
- 陳麗琴、黃進睦、林俊秀、邱祈榮 1997 六龜試驗林台灣杉人工林蓄積量及生長估測之研究 台灣林業科學 12(3)：319-327
- 陳建勛 1997 應用地理資訊系統於土地使用配置之研究 中興大學法商學院都市計劃研究所第 22 屆論文
- 黃進睦 1994 臺灣杉人工林不同栽植密度對生長之影響 國立台灣大學森林學研究所碩士論文
- 楊政川 1999 跨世紀之林業經營 - 從地球村看台灣(二) 臺灣省林業試驗所專訊第 29 期 p. 1-3
- 楊榮啟 1995 森林生態系經營理念的規劃與執行 林業試驗所百週年慶論文集 林業叢刊 58 號 p193-202

- 馮德益、樓業博 1988 模糊數學方法與應用 科技圖書公司。
- 馮豐隆 1997 生態系經營理念與實務作法之研究 兩岸林業科技發展？實務交流研討會論文集 pp:85-105
- 葉名容 2001 台灣消費者對國際森林及木材認證制度態度之分析 國立台灣大學森林學研究所碩士論文
- 雷雅琦 1999 整合數學規劃方法及生態觀念於森林資源經營規劃之研究 國立台灣大學森林學研究所碩士論文
- 廖錦偉 1997 地理資訊系統在台灣杉造林地選擇上之應用 國立台灣大學森林學研究所碩士論文
- 劉浚明 1995 數學規劃：理論與實務 國立編譯館
- 鄭祈全、周朝富 1990 地理資訊系統在森林經營規劃之應用 中華林學季刊 23(1)：105-116
- 鄭祈全 1995 地理資訊系統在林地分級上之應用 林業試驗所研究報告季刊 10(2)：241-254
- 鄭祈全、謝漢欽、詹進發 1997 森林生態系經營理念下的生態系分類 林業叢刊第 80 號
- 鄭祈全、詹進發、賴晃宇 2000 林地分級多尺度生態單元之研究，台灣林業科學 15(1): 71-79
- 鄭祈全、賴晃宇 2000 生態系經營決策支援系統(1)地理資料庫規劃與整合之研究 台灣林業科學 15(1): 125-135
- 鄭祈全、陳永寬、王素芬 2001 多尺度林地分級決策支援系統之研究，航測及遙測學刊 6(2):41-56

- 鄭惠丹 1994 空間決策支援系統之研究 - 土地利用模式建構輔助系統之設計 國立臺灣大學地理學研究所碩士論文
- 劉棠瑞、蘇鴻傑 1992 森林植物生態學(第四版) 臺灣商務印書館
- 賴晃宇 1995 應用數值地形模型與地理資訊系統於水源涵養保安林之規劃研究 國立台灣大學森林學研究所碩士論文
- 蘇鴻傑 1987 森林生育地因子及其定量評估 中華林學季刊 20(1):1-14
- 蓋墟 1991 實用模糊數學 亞東書局
- Alan H. and L.P. Rebecca, 1996. Adaptive management for sound ecosystem management. *Environmental Management* 20(6): 879-886.
- Bailey R.G., 1987. Suggested hierarchy of criteria for multi-scale ecosystem mapping. *Landscape and Urban Planning* 14:313-319.
- Bailey R.G., 1988. Ecogeographic analysis: a guide to the ecological division of land for resource management. Misc. Publ. No.1465. Washington, DC: USDA Forest Service.
- Bailey R.G., 1996. *Ecosystem geography*. New York: Springer-Verlag.
- Burrough P.A., 1987. Principles of Geographical Information System for Land Resources Assessment. Oxford University. New York pp.1-12.
- Caldwell L. K., C.F. Wilkinson, M. A., Shannon, 1994. Making ecosystem policy: three decade of change. *Journal of Forestry*.

92:7-10.

Covington W. W., D. B. Wood, D. L. Young, D. P. Dykstra and L. D. Garrett, 1988. TEAMS: A decision support system for multiresource management. *Journal of Forestry*. August: 25-33.

Dan B., and H. Harold, 1991. The forest management decision support system project. *The Forestry Chronicle* 67(6): 622-628.

Daniel H.W. and L. Duncan, 1997. Natural Resource Management: opportunities and challenges in the application of decision support system. *AI Application* 11(2): 41-51.

Densham P.J. and M.F. Goodchild, 1989. Spatial decision support system : A research agenda *Proceedings GIS/LIS* 2:707-716

Durkin J., 1993. Expert system: catalog of application. Akron, OH: Intelligent Computer system, Inc. 49p.

Emilio C., 1993. Integration of linear programming and GIS for land-use modeling. *Int. J. Geographical Information System* 7(1): 71-83

Erik N., 1997. A spatial decision support system for long-term forest management planning by mean of linear programming and a geographical information system. *Scand. J. For. Res.* 12: 77-88.

FEMAT, 1993. Forest Ecosystem Management: An Ecological, Economic, and Social Assessment. Report of the Forest Ecosystem Management Assessment Team. USDA Forest Service, USDC National Marine Fisheries Service, USDI Bureau of Land Management, USDI Fish and Wildlife Service, USDI National Park Service, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

- Hills G. A., D. V. Love and D. S. Lacate, 1970 Developing a better environment. Toronto: Ontario Economic Council, Ontario Government Bookstore.
- Hopkin L. D., 1977. Method for Generating Land Suitability Maps : A Comparative Evaluation. *Journal of American Institute of Planner* 43:386-400.
- James R.M., A. J. Linda, L. K. Richard and M.K. Rudy, 1996. Forest road and landscape structure in the southern Rocky Mountains. *Landscape Ecology* 11(2): 115-127.
- Jan A.M., G.W. Ian, 1995. NAIA: A decision support system for predicting ecosystems from existing land resource data. *AI Application* 9(1): 49-60.
- Jaromír K., 1992. Local GIS application in the planning of ecological landscape stability system. *Comput., Environ. and Urban Systems* 16: 329-335.
- Kawana A., 1981 Classification of forest land in Japan. In R.A.Carpenter *Assessing Tropical Forest Land*, pp. 88-97.
- Lotspeich F. B., 1980 Watersheds as the basic ecosystem: this conceptual framework provides a basis for a natural classification system. *Water Resources Bulletin* 16(4): 581-586.
- Mashimo Y. and K. Arimitsu, 1981 A site classification for forest land-use in Japan. XVII IUFRO World Congress, Tokyo, Division I, 103- 116.
- McHarg I. L., 1969. *Design with Nature*. New York: Natural History Press.
- Meijere J. C. and B. Mardanus, 1988 Land use modelling for the upper Komerling watershed. *ITC Journal* 1988-1:91-95.

- Meulen G.G., 1992. Geographical information and decision support system. *Computer, Environment and Urban Systems* (16): 187-193.
- Michael A.T., P. Mark S. A., 1996. Sustainable forest ecosystem and management: a review article. *Forest Science* 42(3): 366-377.
- Michael H.R., 1999. Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: A review. *Forest Ecosystem and management* 114: 173-197.
- Miller C.L. and R.A. Laflamme, 1958. The digital terrain model-theory and application. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 24(3):433-443.
- Morrison J., 1993. Integrating ecosystem management and the forest planning process. In: Jensen, M. E., Bourgeron, P.S., ed. *Eastside forest Ecosystem Health Assessment-Volume II : Ecosystem Management: Principles and Application*. USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Mowrer H.T., K. Barber, J. Campbell, N. Crookston, C. Dahms, J. Day, J. Laacke, J. Merzaenich, S. Mighrton, M. Rauscher, K. Reynolds, J. Thompson, P. Trenchi and M. Twery, 1997. *Decision support systems for ecosystem management: An evaluation of existing systems*. USDA Forest Service, Interregional Ecosystem Management Coordination Group, Decision Support System Task Team, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, RM-GTR-296, 154 pp.
- Nelson D., G. A. Harris and T. E. Hanilton, 1978. Land and Resource Classification –Who care? . *Journal of Forestry*. 76(10):644-646.

- Odum E.P., 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164:262-70. Research Station. 61 p.
- Oliver, C., W. H. Knapp and R. Everett, 1993. A system for implementing ecosystem management. In: Jensen, M. E., Burgeron, P.S., edc. *Eastside forest Ecosystem Health Assessment -Volume II: Ecosystem Management: Principles and Application*. USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- O'Neill R. V. et al., 1996. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale. *Landscape Ecology* 11(3): 169-180.
- Pregitzer, K. S. 1988 A comparison of methods of forest- land classification. *Workshop of forest- land classification* 1-12.
- Rauscher H. M., 1999. Ecosystem management decision support for federal forests in the United States: a review. *Forest Ecology and Management* 114:173-197.
- Rebecca J. M. and G. L. Robert., 1996. Adaptive management: promises and pitfalls. *Environmental Management* 20(4): 437-448.
- Reynolds K.M., M. Saunder, M. Foster, R. Olson, D. Schmoldt, D. Latham, B. Miller, J. Strffenson, 1996. A knowledge-based information management system for watershed analysis in the Pacific Northwest U.S., *AI Application*, 10(2): 9-22.
- Reynolds K.M., 1998. *EMDS User's Guide (Version 2.0): Knowledge-based decision support for ecological assessment*. Draft user guide, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 61 p.
- Richard W. H., T. G. Russell, and M. Q. Thomas, 1998. A

- framework for ecosystem management in the interior Columbia Basin. *Journal of Forestry*. October: 4-9.
- Richard C. F., E. D. Peter, and C. F. James, 1980. Complementary linear and goal programming procedures for timber harvest scheduling. *Forest Science* 26(1): 121-133.
- Robert H.G. et al., 1987. Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern *Landscape Ecology* 1(1) : 19-28.
- Rowe J. S. and J. W. Sheard, 1981. Ecological land Classification: A Survey Approach, *Environmental Management* 5(5):451-464.
- Salwasser H., 1990. Conserving biological diversity: a perspective on scope and approach, *Forest Ecology and Management* 35: 79-90.
- Sandra A. B. and E. C. Sharon, 1996. Landscape-level ecological regions: linking state-level ecoregion frameworks with stream habitat classifications. *Environmental Management* 20(3): 297-311.
- Scott M., S. Michael, 1971. Management decision systems; computer-based support for decision making. Boston, Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Sharpe D.M. and Z. Yang, 1991. Design of buffer zones for conservation areas and a prototype spatial decision support system (SDSS), *GIS/LIS'91 Proceedings* 1 : 60-70.
- Shih T.T. and W.L. Mills, 1993. An integrated decision support system for multiple forest resources management from ecosystem approach. *International Symposium on System Analysis and*

Management Decision in Forestry.

Shrestha B.P. and L. Duckstein, 1998. A multiobjective decision support system multiresource forestmanagement. *Group Decision and Negotiation* 7:23-40.

Silver C. S. and R. S. Defries, 1990. *One Earth, On Future*. National Academy Press, Washington, D. C., 196pp.

Smith G. R., 1997. Making decision in a complex world. Creating a forestry for the 21century. Island Press, Washington DC, pp419-435.

Thomas J. S. et al., 1997. Landscape analysis of plant diversity. *Landscape Ecology* 12: 155-170.

Vivek K. V., F. Ian and W. Ian, 2000. Decision support system for the sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* 128: 49-55.

Wilson E.O., 1992. *The Diversity of Life*, ambridge, Mass.: Harvard University Press.

Wood D. B., B.E. Fox and W.W. Covington, 1989. Computer-based approach for teaching multiresource management. *Journal of Forestry* November: 11-16.

Yang R.C., 1995. Aspen management information system. Canadian Forest Service Northern Forest Center 309p.

中華民國永續發展策略綱領

<http://sd.erl.itri.org.tw/forum/guide/content.htm>

USDA Forest Service

<http://www.fs.fed.us/>

附錄

附錄一：85年台灣杉造林地分布面積

LK85FT_ID	AREA	PERIMETER	OLDTYPE	TREAT	CHINESE
3	3370904.000	30775.014	臺灣杉、紅檜、香杉、臺灣赤楊	疏伐修枝	台灣杉造林地
33	460442.719	5410.998			台灣杉造林地
55	115908.898	1385.990	臺灣杉、香杉、柳杉、墨西哥柏、松	疏伐修枝	台灣杉造林地
56	3960.186	273.011	臺灣杉、香杉		台灣杉造林地
70	673814.563	7605.948	臺灣杉、香杉		台灣杉造林地
100	57755.289	1691.495			台灣杉造林地
103	12352.699	569.625			台灣杉造林地
106	3121.684	244.641			台灣杉造林地
122	15977.420	488.876	臺灣杉		台灣杉造林地
126	69397.297	2108.478	臺灣杉		台灣杉造林地
152	24799.846	739.850			台灣杉造林地
179	7725.275	435.535			台灣杉造林地
181	3361.273	248.203			台灣杉造林地
288	74846.625	1821.817	台灣杉	低度修枝	台灣杉造林地
302	1475484.500	13646.786	臺灣杉、赤楊、香杉	低度修枝	台灣杉造林地
354	144712.656	1819.876	台灣杉	低度修枝	台灣杉造林地
375	207440.484	2069.375	台灣杉		台灣杉造林地
面積(m ²)	6722005.414				

附錄二：人工針葉混合林分布面積

LK85FT_ID	AREA	PERIMETER	OLDTYPE	TREAT	CHINESE
64	19676.746	615.859	臺灣杉	疏伐修枝	人針闊混
66	50061.977	918.295	臺灣杉、香杉		人針闊混
282	113123.742	1641.430	台灣檫、台灣杉		人針闊混
304	93725.813	1550.882	台灣檫、光羸樹、台灣杉		人針闊混
334	322938.844	3934.823	台灣杉、赤楊、香杉		人針闊混
361	226044.313	2068.895	台灣杉、赤楊		人針闊混
380	375872.813	4215.246	台灣杉、紅檜、赤楊	低度修枝	人針闊混
393	206725.547	2587.979	台灣杉、紅檜、台灣赤楊、黑桫	低度修枝	人針闊混
397	278547.375	2942.507	台灣杉、赤楊	低度修枝	人針闊混
403	383363.219	3756.816	台灣杉、紅檜、赤楊	低度修枝	人針闊混
面積m ²	2070080.389				

附錄三：一級河林地分級LINDO數學規劃程式及輸出結果

程式碼

變數 Y_{ij} : i 坡度級、 j 土壤特性之生產力

X_{ij} : i 坡度級、 j 土壤特性之面積

A : 坡度大於35度部分，面積與生產力間的關係轉換

B : 土壤特性大於4部分，面積與生產力間的關係轉換

```
bat
!variable 18
MAX Y11+ Y12 + Y13 + Y14 + Y15 + Y16 + Y17 + Y18 + Y19 + Y21
+ Y22 + Y23 + Y24 + Y25 + Y26 + Y27+ Y28 + Y29
!MAX PROPERTY
ST
X11 + X12 + X13 + X14 + X15 + X16 + X17 + X18 + X19 + X21 + X22
+ X23 + X24 + X25 + X26 + X27 + X28 + X29
<= 961453.068970
!AREA CONSTRAINT
X21+ X22 + X23 + X24 + X25 + X26 + X27 + X28 + X29
<= 690561.439234
!slope < 35 , AREA CONSTRAINT
X14 + X15 + X16 + X17 + X18 + X19 <= 150865.277122
X24+ X25 + X26 + X27 + X28 + X29 <= 555976.272348
!property > 4 , AREA CONSTRTAINT
X11 + X21 <= 105762.427289
X12 + X22 <= 135313.577583
X13 + X23 <= 13535.514628
X14 + X24 <= 99644.476078
X15 + X25 <= 453461.271661
X16 + X26 <= 34969.525123
X17 + X27 <= 57482.052125
X18 + X28 <= 12833.182146
X19 + X29 <= 48451.042337
!THE SAME PROPERTY AREA
Y11 - Y21 <=0
Y12 - Y22 <=0
Y13 - Y23 <=0
Y14 - Y24 <=0
Y15 - Y25 <=0
Y16 - Y26 <=0
Y17 - Y27 <=0
Y18 - Y28 <=0
Y19 - Y29 <=0
!UNDER THE SAME PROPERTY ,
Y11 - 2Y12 <=0
2Y12 - 3Y13 <=0
3Y13 - 4Y14 <=0
4Y14 - 5Y15 <=0
5Y15 - 6Y16 <=0
6Y16 - 7Y17 <=0
7Y17 - 8Y18 <=0
8Y18 - 9Y19 <=0
Y21 - 2Y22 <=0
2Y22- 3Y23<=0
3Y23- 4Y24 <=0
4Y24 - 5Y25 <=0
5Y25 - 6Y26 <=0
6Y26 - 7Y27 <=0
7Y27 - 8Y28 <=0
8Y28 - 9Y29 <=0
!UNDER THE SAME SLOPE ,
Y11 - X11 =0
Y12 - 2X12 =0
Y13 - 3X13 =0
Y14 - 4X14 =0
Y15 - 5X15 =0
Y16 - 6X16 =0
Y17 - 7X17 =0
Y18 - 8X18 =0
Y19 - 9X19 =0
Y21 - X21 =0
Y22 - 2X22 =0
Y23- 3X23 =0
Y24 - 4X24 =0
```



```

Y25 - 5X25 =0
Y26 - 6X26 =0
Y27 - 7X27 =0
Y28 - 8X28 =0
Y29 - 9X29 =0
!Y11 - AX11 =0
!Y12 - 2AX12 =0
!Y13 - 3AY13 =0
!Y14 - 4AX14 =0
!Y15 - 5AX15 =0
!Y16 - 6AX16 =0
!Y17 - 7AX17 =0
!Y18 - 8AX18 =0
!Y19 - 9AX19 =0
!Y21 - BX21 =0
!Y22 - 2BX22 =0
!Y23 - 3BX23 =0
!Y24 - 4BX24 =0
!Y25 - 5BX25 =0
!Y26 - 6BX26 =0
!Y27 - 7BX27 =0
!Y28 - 8BX28 =0
!Y29 - 9BX29 =0
!B -A >0
end
bat
leave

```

一級河林地分級數學規劃輸出結果

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 34

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 1933229.

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y11	.000000	.000000
Y12	135313.600000	.000000
Y13	.000000	.000000
Y14	199289.000000	.000000
Y15	125890.300000	.000000
Y16	104908.600000	.000000
Y17	.000000	.000000
Y18	.000000	.000000
Y19	218029.700000	.000000
Y21	105762.400000	.000000
Y22	135313.600000	.000000
Y23	40606.540000	.000000
Y24	199289.000000	.000000
Y25	125890.300000	.000000
Y26	104908.600000	.000000
Y27	117332.000000	.000000
Y28	102665.500000	.000000
Y29	218029.700000	.000000
X11	.000000	.000000
X12	67656.790000	.000000
X13	.000000	.000000
X14	49822.240000	.000000
X15	25178.060000	.000000
X16	17484.760000	.000000
X17	.000000	.000000
X18	.000000	.000000
X19	24225.520000	.000000
X21	105762.400000	.000000
X22	67656.790000	.000000
X23	13535.510000	.000000
X24	49822.240000	.000000
X25	25178.060000	.000000
X26	17484.760000	.000000
X27	16761.710000	.000000
X28	12833.180000	.000000
X29	24225.520000	.000000

51762754.0000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	443825.500000	.000000
3)	357301.300000	.000000
4)	34154.700000	.000000
5)	409670.800000	.000000
6)	.000000	1.000000
7)	.000000	2.000000
8)	.000000	3.000000
9)	.000000	4.000000
10)	403105.200000	.000000
11)	.000000	13.200000
12)	40720.340000	.000000
13)	.000000	17.142860
14)	.000000	9.000000
15)	105762.400000	.000000
16)	.000000	.000000
17)	40606.540000	.000000
18)	.000000	.000000
19)	.000000	.000000
20)	.000000	.000000
21)	117332.000000	.000000
22)	102665.500000	.000000
23)	.000000	.000000
24)	270627.200000	.000000
25)	797155.800000	.000000
26)	.000000	.200000
27)	.000000	.142857
28)	1962267.000000	.000000
29)	164864.700000	.000000
30)	675336.200000	.000000
31)	.000000	.200000
32)	.000000	.142857
33)	1140944.000000	.000000
34)	.000000	1.000000
35)	.000000	1.000000
36)	.000000	1.000000
37)	.000000	1.000000
38)	.000000	.000000
39)	.000000	2.200000
40)	.000000	.000000
41)	.000000	2.142857
42)	.000000	1.000000
43)	.000000	1.000000
44)	.000000	1.000000
45)	.000000	1.000000
46)	.000000	1.000000
47)	.000000	.000000
48)	.000000	2.200000
49)	.000000	.000000
50)	.000000	2.142857
51)	.000000	1.000000

NO. ITERATIONS= 34

附錄四：二級河林地分級LINDO數學規劃程式及輸出結果

程式碼

變數 Y_{ij} : 坡度級 i , property級 j 之生產力

X_{ij} : 坡度級 i , property級 j 之面積

A : 坡度大於35度部分, 面積與生產力間的關係轉換

B : 土壤特性大於4部分, 面積與生產力間的關係轉換

bat

!basin402

MAX $Y_{11} + Y_{12} + Y_{14} + Y_{15} + Y_{16} + Y_{17} + Y_{18} + Y_{19}$
 $+ Y_{21} + Y_{22} + Y_{23} + Y_{24} + Y_{25} + Y_{26} + Y_{27} + Y_{28} + Y_{29}$

!MAX PROPERTY

ST

$X_{11} + X_{12} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19}$
 $+ X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29}$
 ≤ 961454.994402

!AREA CONSTRAINT

$X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29}$
 ≤ 682400.887919

!slope < 35 , AREA CONSTRAINT

$X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} \leq 190679.894746$
 $X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29} \leq 516427.726930$

!property > 4 , AREA CONSTRAINT

$X_{11} + X_{21} \leq 105498.385910$

$X_{12} + X_{22} \leq 135313.434550$

$X_{23} \leq 13535.552266$

$X_{14} + X_{24} \leq 99644.518134$

$X_{15} + X_{25} \leq 453727.397219$

$X_{16} + X_{26} \leq 34969.425261$

$X_{17} + X_{27} \leq 57482.024000$

$X_{18} + X_{28} \leq 12833.219295$

$X_{19} + X_{29} \leq 48451.037767$

!THE SAME PROPERTY AREA

$Y_{11} - Y_{21} \leq 0$

$Y_{12} - Y_{22} \leq 0$

$Y_{14} - Y_{24} \leq 0$

$Y_{15} - Y_{25} \leq 0$

$Y_{16} - Y_{26} \leq 0$

$Y_{17} - Y_{27} \leq 0$

$Y_{18} - Y_{28} \leq 0$

$Y_{19} - Y_{29} \leq 0$

!UNDER THE SAME PROPERTY ,

$Y_{11} - 2Y_{12} \leq 0$

$2Y_{12} - 4Y_{14} \leq 0$

$4Y_{14} - 5Y_{15} \leq 0$

$5Y_{15} - 6Y_{16} \leq 0$

$6Y_{16} - 7Y_{17} \leq 0$

$7Y_{17} - 8Y_{18} \leq 0$

$8Y_{18} - 9Y_{19} \leq 0$

$Y_{21} - 2Y_{22} \leq 0$

$2Y_{22} - 3Y_{23} \leq 0$

$3Y_{23} - 4Y_{24} \leq 0$

$4Y_{24} - 5Y_{25} \leq 0$

$5Y_{25} - 6Y_{26} \leq 0$

$6Y_{26} - 7Y_{27} \leq 0$

$7Y_{27} - 8Y_{28} \leq 0$

$8Y_{28} - 9Y_{29} \leq 0$

!UNDER THE SAME SLOPE ,

$Y_{11} - X_{11} = 0$

$Y_{12} - 2X_{12} = 0$

$Y_{14} - 4X_{14} = 0$

$Y_{15} - 5X_{15} = 0$

$Y_{16} - 6X_{16} = 0$

$Y_{17} - 7X_{17} = 0$

$Y_{18} - 8X_{18} = 0$

$Y_{19} - 9X_{19} = 0$

$Y_{21} - X_{21} = 0$

$Y_{22} - 2X_{22} = 0$

$Y_{23} - 3X_{23} = 0$

$Y_{24} - 4X_{24} = 0$

$Y_{25} - 5X_{25} = 0$

$Y_{26} - 6X_{26} = 0$

$Y_{27} - 7X_{27} = 0$

$Y_{28} - 8X_{28} = 0$

```

Y29 - 9X29 =0
!Y11 - AX11 =0
!Y12 - 2AX12 =0
!Y14 - 4AX14 =0
!Y15 - 5AX15 =0
!Y16 - 6AX16 =0
!Y17 - 7AX17 =0
!Y18 - 8AX18 =0
!Y19 - 9AX19 =0
!Y21 - BX21 =0
!Y22 - 2BX22 =0
!Y23 - 3BX23 =0
!Y24 - 4BX24 =0
!Y25 - 5BX25 =0
!Y26 - 6BX26 =0
!Y27 - 7BX27 =0
!Y28 - 8BX28 =0
!Y29 - 9BX29 =0
!B - A >0
end
bat
leave

```

二級河林地分級數學規劃輸出結果

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 31

OBJECTIVE FUNCTION VALUE

1) 1772520.

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
Y11	.000000	.000000
Y12	.000000	.000000
Y14	.000000	.000000
Y15	.000000	.000000
Y16	.000000	.000000
Y17	.000000	.000000
Y18	.000000	.000000
Y19	218029.700000	.000000
Y21	105498.400000	.000000
Y22	270626.900000	.000000
Y23	40606.660000	.000000
Y24	398578.100000	.000000
Y25	164265.200000	.000000
Y26	136887.700000	.000000
Y27	117332.300000	.000000
Y28	102665.800000	.000000
Y29	218029.700000	.000000
X11	.000000	.000000
X12	.000000	.000000
X14	.000000	.000000
X15	.000000	.000000
X16	.000000	.000000
X17	.000000	.000000
X18	.000000	.000000
X19	24225.520000	.000000
X21	105498.400000	.000000
X22	135313.400000	.000000
X23	13535.550000	.000000
X24	99644.520000	.000000
X25	32853.040000	.000000
X26	22814.610000	.000000
X27	16761.760000	.000000
X28	12833.220000	.000000
X29	24225.520000	.000000

48770554.0000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	473749.400000	.000000
3)	218920.800000	.000000
4)	166454.400000	.000000
5)	307295.100000	.000000
6)	.000000	1.000000

7)	.000000	2.000000
8)	.000000	3.000000
9)	.000000	4.000000
10)	420874.400000	.000000
11)	12154.810000	.000000
12)	40720.270000	.000000
13)	.000000	40.609520
14)	.000000	9.000000
15)	105498.400000	.000000
16)	270626.900000	.000000
17)	398578.100000	.000000
18)	164265.200000	.000000
19)	136887.700000	.000000
20)	117332.300000	.000000
21)	102665.800000	.000000
22)	.000000	.000000
23)	.000000	.000000
24)	.000000	.200000
25)	.000000	.366667
26)	.000000	.509524
27)	1962267.000000	.000000
28)	435755.400000	.000000
29)	1472492.000000	.000000
30)	.000000	.200000
31)	.000000	.366667
32)	.000000	.509524
33)	1140941.000000	.000000
34)	.000000	1.000000
35)	.000000	1.000000
36)	.000000	1.000000
37)	.000000	.000000
38)	.000000	.000000
39)	.000000	.000000
40)	.000000	5.076190
41)	.000000	1.000000
42)	.000000	1.000000
43)	.000000	1.000000
44)	.000000	1.000000
45)	.000000	1.000000
46)	.000000	.000000
47)	.000000	.000000
48)	.000000	.000000
49)	.000000	5.076190
50)	.000000	1.000000

NO. ITERATIONS= 31

附錄五：地景單元劃分除坡度和海拔高之外 9 個因子計算模式

(一)、係數推導

DTM 經以三階 Lagrange 多項式(Zevenbergen and Throne , 1987)為演算基礎，可導出九種三階多項式係數。

$$Z=A X^2 Y^2+B X^2 Y+CXY^2+D X^2+EY^2+EXY+GX+HY+I$$

式中：

Z：點(X, Y)的高程

A - I：係數

X, Y：網格點平面座標

係數 A 到 I 可由下式導出

$$A=[(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)]/4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)/2 + Z_5 / C S^4$$

$$B=[(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)]/4 - (Z_2 - Z_8)/2 / C S^3$$

$$C=[(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)/4 + (Z_4 - Z_6)/2] / C S^3$$

$$D=[(Z_4 + Z_6)/2 - Z_5] / C S^2$$

$$E=[(Z_2 + Z_8)/2 - Z_5] / C S^2$$

$$F=(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)/4 C S^2$$

$$G=(-Z_4 + Z_6)/2 C S$$

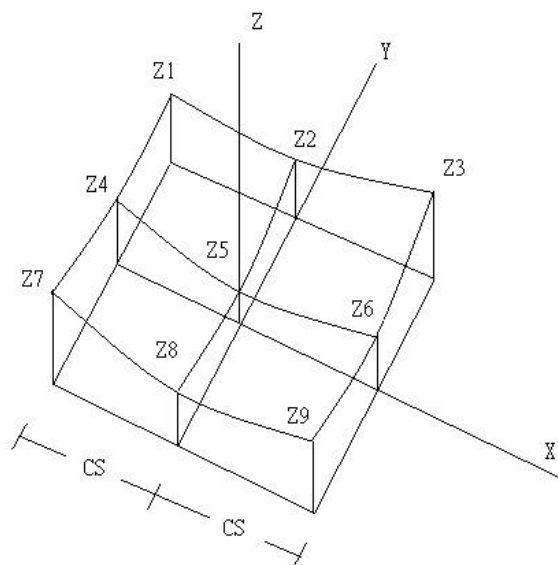
$$H=(Z_2 - Z_8)/2 C S$$

$$I=Z_5$$

式中：

CS：網格大小

Z_i：在 3 * 3 高度矩陣中每一網格的高程(i=1 ~ 9)，如下圖



(二)、因子計算

1. 坡向多樣化指標

$$H = \sum_{i=1}^m (p_i)(\log_2 p_i)$$

m = 集水區中嵌塊型數目

P_i = 第 I 類嵌塊型在地景中所佔比例

2. 地形位置

$$P_i = \frac{X \text{點與最近谷系之歐幾里德距離}(d1)}{X \text{點與最近谷系之歐幾里德距離}(d1) + X \text{點與最近集連區界之歐幾里德距離}(d2)}$$

X : 為單一網格點

P_i : 為相對位置比

3. 剖面曲率

$$\Phi = -2 \frac{DG^2 + EH^2 + FGH}{G^2 + H^2}$$

$\Phi > 0$ 為凸面

$\Phi < 0$ 為凹面

$\Phi = 0$ 為平面

4. 平面曲率

$$v = 2 \frac{DH^2 + EG^2 - FGH}{G^2 + H^2}$$

$v > 0$ 為凸面

$v < 0$ 為凹面

$v = 0$ 為平面

5. 曲率

$$c = v - \Phi = 2E + 2D$$

$c > 0$ 為凸面

$c < 0$ 為凹面

$c = 0$ 為平面

6. 潤濕指標

$$W = \ln\left(\frac{a}{\tan b}\right)$$

a : 累積流量

b : 坡度梯度

7. 水份梯度

水份梯度級評定準則

山谷				中坡與上坡						嶺線		
下坡												
			NE								SSW	
		NNE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S				
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
濕										乾		

8. 坡長-坡度指數

$$LS = (n+1) \left(\frac{AREA}{22.13} \right)^n \left(\frac{\sin b}{0.896} \right)^m$$

$$n = 0.4$$

$$m = 1.3$$

AREA：上坡流域面積

b：坡度梯度

9. 蝕溝指數

AREA = $a \times CS^2$ 式中：

a：累積流量

CS：網格大小

因此在求得上坡流域面積後，則蝕溝指數為：

$$AREA \times \tan b$$

式中：

AREA：上坡流域面積

b：坡度梯度