

國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系

博士論文

School of Forestry and Resource Conservation

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Doctoral Dissertation

三階複選目標規劃法

於森林疏伐減碳規劃之研究

A Study on 3-level Multi-choice Goal Programming  
for Carbon Reduction by Forest Thinning



陳瑩達

Ying-Ta Chen

指導教授：鄭欽龍 博士

Advisor: Chinlong Zheng, Ph.D.

中華民國 100 年 7 月

June, 2011

## 謝誌

讀博士班期間，我時常在夜深人靜時幻想畢業的那一天，往往想到輾轉反側、無法成眠，因為博士班真的很難熬，我深怕無法取得學位，辜負許多人的關心與期望。但，感謝上天的厚愛與眷顧，總在關鍵時刻幫我一把，使我的努力不至於落空！我總算在第七年即時達到畢業門檻要求，順利畢業了！

我能取得博士學位，最該感謝的是我的父母，我爸常當我的心情垃圾桶及軍師，我媽就默默的繳我們父子每月爆表的手機費！每當我極度疲累時，家就像充電站總是給我溫暖和自信，讓我無後顧之憂，也支持我各種想法。我在博士班期間也總算明瞭父母過去栽培我的各種苦心，尤其是英文！我想，我這份博士論文不是屬於我的，是屬於父母的！其餘對父母感謝的話，我會用實際表現來證明！

在感謝師長的部分，沒有以下三位老師的指導，我沒有辦法畢業！我首先感謝恩師鄭欽龍給我許多學習的機會，碩、博士九年漫長的歷程讓我學到很多，也打下很深厚的基礎，包括接觸各式各樣不同類型的研究，研究計畫該與哪些單位接洽、如何寫、執行、報帳、後續發展研究等博士生畢業時會面臨的各種挑戰，我也早已適應，且能獨當一面，這真的必須深深的向您一鞠躬說聲謝謝！另外，我也非常感謝謝雨生老師的教導，您第一堂高等社會統計課向大家說「分數不必在意，來上就是了！」這句話，讓我對統計不再恐懼，雖然很多課堂所學太深奧讓我聽不懂只能先記起來，但我的邏輯思考、寫作鋪陳等研究所需基礎確實是由上課一點一滴累積建立，日後還可以寫「謝語錄」收錄「open your mind」等名言或紀錄「水電工的工具都沒我多」等故事出書賺錢。另外，我也非常慶幸能遇到張錦特老師，與您相遇真的是緣分！雖然只修過一年的課，但課堂所學對我在研究這條路上造成很大的衝擊和激勵，我永遠會記住「訂定較高的目標，盡量去達成」這個原則，從您課堂上我也學到作研究的各種變化、推陳出新以及提出新創意，我也非常感激您不厭其煩的協助與鼓勵，之後我會試著朝 nature 或 science 這些高等級期刊挑戰的！

我的博士論文也非常感謝各個口試委員的協助與認定才得以通過，馮豐隆老師、汪大雄老師及鄭祈全老師在口試時給予許多寶貴的意見和建議，使這份論文更趨完整，且讓這份研究有更多後續發展的機會。三個小時漫長的口試過程真的很折磨各位老師，尤其是馮老師身體欠安還願意幫我，真的辛苦您了！我想，日後若有機會在學術界發展，我會努力以不負各位老師的指正！

除了感謝師長外，更是要感謝親人的支持！感謝爺爺、奶奶及外婆耐心等待我取得學位，與您們講話是我精神上重要的慰藉！佳里的舅公和姨婆，您們真的很照顧我這個後輩，舅公身體要趕快好起來，換我請你！也謝謝非常照顧我的美純姑姑處理家中很多瑣碎的事情，讓我回家都很輕鬆的當少爺！感謝大舅和小舅在我回家時都會拿好吃的海鮮給我吃，有需要幫忙時也都二話不說力挺到底！港仔尾的叔公和叔叔阿姨等長輩對我非常照顧，讓我回到那邊總是可以感受到家族的根就在那裡！而美惠姑姑及來錫姑丈身負學術界與林業界的繁雜瑣事與重責

大任，卻仍三不五時打電話來關心鼓勵，我除了努力以外，想不到其他任何報答方式！也感謝珠美阿姨逢年過節總會送我好吃的東西讓我解饞，讓我遠在異鄉仍有家人的溫暖！而我的妹妹阿，每次回家妳都幫我事先處理好很多事情，非常謝謝妳，我知道妳在後面苦苦追趕我很辛苦，但是你已經很棒了，但若多點耐心靜下來處理妳想要達成的目標，妳一定可以做到的！

在稻江兼課的一年讓我收穫良多！非常感謝施鎮典主任及主任夫人徐安心老師給我到稻江教學的機會，在那邊我有幸認識李光玉老師，這三位老師提攜後進不遺餘力，也教導我許多處世態度與哲學，這些寶貴的經驗指導與分享是無價的！也感謝鄭富元主任及鄒哲宗主任願意給我兼課機會，讓我能有更多教學經驗！曾德興老師、蕭勝彬老師及蕭玉芬老師的鼓勵與經驗分享也非常受用！而主任秘書王柔舒每逢學期初都大費周章的幫我調課不喊煩，當然不會忘了這位跟我生日同一天的乾妹妹！最後，在稻江我曾經教過的所有學生，因為你們人數太多我無法一個一個打，但我真的非常謝謝你們給我機會上台教學，也給我這個菜鳥老師面子認真上課，我在與你們的互動上學到很多，也激發了我很多教學及研究的靈感！更重要的是，你們是我努力突破難關的動力！讓我覺得自己身為老師，必須要作榜樣給你們看！若你們日後需要學術上的幫忙，我做得到的話，我一定會像熱心幫我的那些老師一樣協助你們的！

在系上的部分，首先感謝本研究室的培蓉學姐與廣冀學長給我支持與協助，我會努力精進都是以你們為榜樣！重銘學長和他老婆淑芬學姐把我當親弟弟一樣看待，時常照顧我！志鵬學長的鼓勵更是不可或缺！再來就是我親愛的學弟妹，俐瑛、秦宇、明倫、又云、貞惟、偉嘉、秋君、宛瑜、宇軒、聖潔、雅筠、財昱及柏蓉，感謝你們在我碩博士班的九年就讀期間幫我分擔許多事情！其他研究室的學弟妹如婉文、佑珊、世俊等也給我很多精神支持！更重要的是系辦公室的三位職員，報帳的事情都有勞文統學長指導和幫忙！需要工具和各種狀況找董哥就對了！另外就是建村學長，我博士班能順利畢業都是靠妳啦！

在朋友的部分，感謝傑仁、信彬、阿亮、智仁、青原、小歐、濟安、思樺、家維，雖然你們分屬物理、社會、化工、圖資、法律等五花八門的各種領域，但卻能給我許多投稿國際期刊的建議，其中智仁的幫忙最是不可或缺！林怡忠教官、范姜、俞名、琇蓉、佳峰、俊中、錦繡、博宇、仁鍵、季陽、國書、奕達、祥丞、郭鴻、張簡、佩珊、又禎、瑋廷、子萱、華榆、士弘、懷慶、淳尹、俊安、岳鴻、柏漢及佳鴻等人，感謝你們陪我打球聊天度過這難熬的九年！也感謝魯味攤澎大哥及魯味幫一群人長期以來的照顧，那邊是放鬆的好場所！我也很感謝家教學生志邦很給面子願意聽我的建議、願意上我的英文課，他媽媽家長林醫師也對我非常照顧，認識你們是我的福氣！

很多人都說，謝誌裡面最好不要寫女朋友，怕有一天如果分手就尷尬，放在圖書館裡要改也改不掉！但是，我們都走了五年多了，就不必怕了！安奇，謝謝妳在背後的支持與鼓勵，還帶我開拓人生的想法和視野！也謝謝妳媽秀梅阿姨把我當兒子照顧，有妳們真好！剩下的話我們私底下說吧~^^

## 中文摘要

對森林經營者而言，選取適當工具規劃可達成多目標森林經營的疏伐作業並非易事。本研究旨在改善複選目標規劃技術之求解效率並探討其相關技術於疏伐減碳等多目標森林經營之適用性。在確認疏伐作業的成本效能實屬可行後，本研究首先以二元搜尋演算法結合複選目標規劃法，提出三階複選目標規劃法改良複選規劃法之求解效率，並以可供檢證之加拿大多目標森林經營案例比較兩者在多目標森林經營之求解效率。接著，利用多段目標規劃法配合線性規劃法，同時將疏伐面積及疏伐程度作為決策變數，以此建置新竹林管處柳杉人工林疏伐減碳規劃模型並探討該方法的適用性。確認三種方法在林業經營規劃可行後，本研究整合三種方法提出新竹柳杉人工林之最適疏伐減碳多目標規劃。

由加拿大多目標森林經營案例之驗證結果可知，複選目標規劃法相較於目標規劃法可迅速協助森林經營者找出最適經營期程，但目標值設定偏差則可能無法找到較佳解。三階複選目標規劃法則可在擴增搜尋範圍後，以每次運算減少一半搜尋範圍的方式，避免純粹使用複選目標規劃程式求解時的設定與比較，以有效找到較佳解。多段目標規劃法配合線性規劃法建置之新竹林管處人工林疏伐減碳模型研究結果顯示，該方法可一次模擬 768 種疏伐組合並找出最適疏伐期程以達到最大化碳吸存量的目標。本研究最後整合三階複選目標規劃法及多段目標規劃法進行新竹林區管理處之疏伐減碳等多目標規劃。研究結果指出，森林經營者應用此二方法可避免設定多種疏伐制度及目標值組合的模擬與比較，迅速找到能達成碳吸存、就業機會及土壤保護經營目標之最適疏伐期程。

關鍵字：森林經營、複選目標規劃、森林疏伐、碳吸存、多段目標規劃

## Abstract

It is not an easy task for forest managers to choose proper techniques to plan an appropriate thinning schedule for multiple forest management. The purpose of this paper is to improve the efficiency of multi-choice goal programming (MCGP) in searching better solutions and discuss the application of its related techniques toward various forest management problems. After confirming the feasibility of thinning in by cost-effectiveness analysis, the 3-level MCGP is firstly proposed to complete the insufficiency of the MCGP technique by combining binary search algorithm with MCGP and verify its efficiency by a credible Canadian multiple forest management case. Second, the application of combining multi-segment goal programming (MSGP) with linear programming to take both thinned area and thinning intensity as decision variables is evaluated by building a model of reducing carbon by thinning for artificial Sugi. in Hsinchu Forest District. Finally, both three techniques is applied to propose a thinning schedule for Hsinchu Forest District to achieve multiple forest management when carbon reduction is considered.

The results show that MCGP can rapidly help forest managers to search for a proper planning horizon for Canadian multiple forest management case. But, forest managers may miss a better ideal solution while the set target goal values are far from the best ideal solution. After expanding the search range, 3-level MCGP can reduce the search range by half in each run and avoid the number of comparison in MCGP method. Second, the model built by MSGP with linear goal programming indicates that 768 times of simulation can be finished in just one run and still get the appropriate thinning schedule to maximize the carbon sequestration. Finally, the 3-level MCGP and LP are applied to build a model for artificial Sugi. age-classes in Hsinchu Forest District to plan an appropriate thinning schedule for multiple forest

management when carbon reduction is considered. The results show that these two techniques can reduce many simulations and comparisons in various thinning regimes and combinations of target goal values to plan an appropriate thinning schedule to achieve the expected carbon sequestration, jobs and soil protection goals.

**Key Words :** forest management, multi-choice goal programming, forest thinning, carbon sequestration, multi-segment goal programming



## 目錄

謝誌.....	I
中文摘要.....	III
Abstract.....	IV
第壹章、緒論.....	1
一、研究背景.....	1
二、研究流程.....	5
第貳章、文獻回顧.....	7
一、疏伐之減碳效果.....	7
二、碳吸存之成本效能.....	12
三、數學規劃法在林業經營之應用.....	14
第參章、研究方法.....	19
一、研究架構.....	19
二、研究案例.....	22
三、分析技術.....	24
(一) 複選目標規劃法.....	24
(二) 多段目標規劃法.....	28
(三) 蒙地卡羅模擬法.....	29
第肆章、三階複選目標規劃法之研究.....	31
一、期望目標值設定概念之探討.....	31
二、三階複選目標規劃法之設定.....	33
三、三階複選目標規劃法設定步驟.....	36
第伍章、疏伐成本效能及不確定性評估.....	38
一、蒙地卡羅模擬模型設定.....	38
二、模型參數設定.....	40
三、成本效能指數與風險分析.....	42
四、小結.....	45
第陸章、MCGP 及 3-level MCGP 於森林經營之應用.....	46
一、加拿大多目標森林經營案例.....	46
二、MCGP 決策最適經營期程之效率.....	49
三、MCGP 求取最適經營期程之較佳解.....	51
四、3-level MCGP、GP 及 MCGP 之求解效率比較.....	53
五、3-level MCGP 及 GP 之林地配置比較.....	58
六、小結.....	59
第柒章、多段目標規劃在疏伐規劃之應用.....	60
一、新竹林管處人工林案例.....	60
二、疏伐減碳模型設定.....	62

(一)目標式及限制式設定.....	63
(二)疏伐後生長率.....	66
三、最大碳吸存目標之最適疏伐規劃.....	68
四、最終蓄積.....	70
五、小結.....	71
第捌章、新竹林管處柳杉林減碳多目標規劃方案.....	72
一、目標值及目標式設定.....	72
(一)碳吸存目標.....	72
(二)就業機會目標及目標式.....	72
(三)土壤沖蝕控制目標及目標式.....	74
二、多目標森林經營之最適疏伐規劃.....	76
三、小結.....	80
第玖章、結果與討論.....	81
第拾章、參考文獻.....	84
第拾壹章、附錄.....	93



## 表目錄

表 2-3-1、DP、LP 及 GP 之比較.....	17
表 5-2-1、不同疏伐程度之疏伐木收穫.....	40
表 5-2-2、55 年生之林分蓄積推估.....	40
表 5-3-1、不同疏伐程度的減碳效果.....	42
表 5-3-2、不同疏伐的減碳成本效能指數.....	43
表 5-3-3、不同疏伐之成本效能指數之累積機率.....	44
表 6-1-1、林地利用政策.....	47
表 6-1-2、加拿大案例之期望目標值及研究結果.....	48
表 6-2-1、最適經營期程決策.....	50
表 6-3-1、MCGP 求取之最適經營期程較佳解.....	52
表 6-4-1、三階複選目標規劃之目標值設定及求得解.....	54
表 6-4-2、三階複選目標規劃及目標規劃求得解之比較.....	56
表 6-4-3、任意設定目標值並利用 MCGP 求解.....	57
表 6-5-1、林地配置的改變.....	58
表 7-1-1、新竹林管處各齡級之林況.....	61
表 7-2-1、不同齡級在各期經不同程度疏伐後之生長率.....	67
表 7-3-1、最適疏伐規劃之林地配置及碳吸存量.....	69
表 8-1-1、各疏伐作業細項之工資及效率.....	73
表 8-1-2、不同疏伐程度的土壤沖蝕增量.....	75
表 8-2-1、三階複選規劃法之計算過程.....	76
表 8-2-2、碳吸存等多目標森林經營之疏伐期程規劃與產出.....	79

## 圖目錄

圖 1-2-1、研究流程.....	6
圖 3-1-1、研究架構.....	21
圖 3-3-1、複選目標規劃法之求解概念.....	27
圖 4-1-1、複選目標規劃法之目標值設定偏差問題.....	32
圖 4-2-1、三階複選規劃法之求解概念.....	35
圖 6-4-1、三階複選目標規劃過程中各目標的目標值改變比率.....	55



## 第壹章、緒論

### 一、研究背景

自氣候變遷異象造成沙漠化、洪水、土石流及颶風等諸多氣候異象後，利用適當的森林經營撫育措施減緩溫室氣體排放，是近幾年林業經營之重要議題。二氧化碳是造成溫室效應的主要影響因子，而森林是提供碳匯(carbon sink)與碳源(carbon source)的主要來源，若能妥善利用適當的森林經營撫育措施，包括造林(afforestation)、再造林(reforestation)及伐林(deforestation)<sup>1</sup>等，應可有效控制二氧化碳之排放與吸收(Bravo et al., 2008)。Kimmins(1997)更指出，新的森林經營典範勢必強調短伐期、同齡、單一栽培的密集式經營，以因應碳吸存及供給生物燃料等新森林經營目標。

森林減碳策略主要有三種，首先是藉由減少森林伐採、保護森林、林火預防及病蟲害等方法，維護森林固碳功能之碳保存(carbon conservation)策略。第二是以造林增加森林面積，或利用各種森林經營手段，例如疏伐(thinning)或延長輪伐期(rotation)以增加森林固碳量之碳吸存(carbon sequestration)策略。第三，係推廣利用木材為能源取代化石燃料，或以木材作為建材取代高耗碳之鋼筋水泥，減少碳排放量之碳替代(carbon substitution)策略(Bass et al., 2000; Schoene and Netto, 2005)。碳保存可視為維護基本固碳量之消極經營，碳吸存及碳替代則可視為直接增加或間接促進固碳量之積極經營，森林經營者可在考量林地狀況下，施以適當的森林經營作業，以減緩二氧化碳之排放。

台灣森林在沒有經營的狀態下，每年可吸收約 1600 至 2100 萬公噸左右之二氧化碳(楊盛行，1997；王立志，1996；楊榮啓等，1998；馮豐隆，2000)。根據林務局在 1995 年執行的第三次森林資源調查，台灣森林面積總計約 210 萬公頃，佔約全國面積的 58.5%，若能妥善經營林地，應可有效促進森林吸收二氧化碳之功能。然而，多數林分雖已屆成熟或呈鬱閉狀態，其單位面積蓄積量卻偏低，平均每公頃蓄積量僅有 163.50 立方公尺<sup>2</sup>，顯示台灣的森林並未受妥善經營。因此，消極之碳保存策略顯然無法改善台灣森林資源現況，應施行較積極之碳吸存及碳

<sup>1</sup> 造林(afforestation): 在無林地上種植林木。再造林(reforestation): 伐採或林火後之林地，重新造林。伐林(deforestation): 在森林中進行林木伐採作業。

<sup>2</sup> 根據林務局在 1995 年進行之第三次台灣森林資源及土地利用調查報告，台灣森林面積總計 2102400 公頃，林木總蓄積量為 56513000 立方公尺，平均每公頃蓄積量約 163.50 立方公尺。

替代策略，藉此提高單位面積蓄積量，進而改善森林之固碳能力。

然而，台灣的森林經營者受限於林地地況不佳及林業法規規範，考量碳吸存及碳替代策略促進森林吸收二氧化碳之功能時，仍須選擇適宜的森林經營措施。首先，台灣政府有鑑於山區地質脆弱且經過度開發，每逢颱風或豪雨引發之土石流往往造成人民生命財產的損失。為使森林擁有一定的覆蓋率以維護其水土保持功能，遂於 1980 年後規定禁伐天然林，1992 年提出之「森林經營管理方案」中第八條更詳細規定「每一伐區皆伐面積不得超過五公頃」，1989 年制訂之「保安林經營準則」中第十條更嚴格規範「一年內皆伐面積在三公頃以上時，應分處皆伐，每一處不得超過三公頃」。因此，若依照傳統森林經營規劃輪伐期，以伐採現存林木後再造林的方式增加固碳量，恐不易執行。第二，在非林地造林的部分，臺灣林務局雖推廣利用閒置農地進行平地造林，但由於造林獎勵金少，農民參與意願不高。此外，森林需長期經營，農地造林後短期內無法種植其他農作物，待林木成熟後，若欲再改植農作物，則林木地下部盤根錯節的清理亦需負擔許多成本，故農地造林固碳將付出較高之機會成本，故農民大多不願施行。因此，利用疏伐作業促進台灣森林之碳吸存功能顯然是較為可行的方式。

早期疏伐作業以滿足人類需求為主要目的，係增加木材收穫和生產優質的木材(Klemperer, 1996)，以獲取較佳的收益(楊榮啓等, 1976; Clutter et al., 1983)。隨著森林經營目的的轉變，其目的也轉而兼顧生態保護、改善林分結構和地被植群(汪大雄, 1994)。近年有關疏伐的研究均指出，小心進行疏伐作業，可降低該作業造成之土壤沖蝕(Worrel and Hampson, 1997)。疏伐後短期內集水區的酸性物質及含氮量會增加，但隨後會復原(Bäumler and Zech, 1999)。疏伐同時可促進植被種類及數量，增加野生動物棲地之資源(Yanai et al., 1998)，野生動物族群密度在疏伐後會略降，但俟林下植被增加後則會恢復原來密度(Homeyack et al., 2005; 袁孝維等, 2005)，甚至可利用不同強度的疏伐控制野生動物族群數量(Hayes et al., 1997)、減少森林遭受病蟲害和火災危害(Helms, 1998; Matthews, 1989)，若將疏伐作業配合藥劑除草或定期焚燒等方式撫育森林，可更有效維護森林健康(Brose et al., 2002)。由此可見，森林經營者可藉由疏伐達成多目標森林經營。

台灣林務局若欲利用疏伐作業達成減碳等多目標森林經營，則必須評估疏伐減碳是否具財務之可行性。本國實證研究指出，在適當的時間點施行疏伐確實可有效增加碳吸存(邱志明, 2006; 邱志明, 2009)。疏伐也合於成本效益的原則，

雖然未含運費之疏伐成本高達 11,144 元/m<sup>3</sup>(任億安、陳宛君, 1996), 但只要在適當的地利及區位條件下, 將疏伐木搬出利用仍可獲利(鄭欽龍等, 2006)。然而, 目前尚未有研究探討利用疏伐促進森林吸收二氧化碳功能所需之成本, 且森林經營期程長, 可能面臨多種天然災害和市場波動風險。故本研究首要目地係探討每單位疏伐作業成本所能獲得之減碳效果, 即探討利用疏伐減碳之成本效能, 並評估森林經營者可能面臨之經營風險, 以提出因應之道。

在台灣擬以疏伐減碳, 可進一步利用適當之研究工具考量疏伐面積、疏伐強度及疏伐的時間點等要素, 規劃森林進行疏伐減碳等多目標森林經營之疏伐期程(thinning schedule)。不同規劃工具有其適用性, 例如動態規劃法(dynamic programming, DP)可用以提出最適疏伐方案, 線性規劃法(linear programming, LP)則適用於規劃單一森林經營目標, 而目標規劃法(goal programming, GP)可處理多目標森林經營問題(Buongiorno and Joseph, 2003; Bettinger et al., 2009)。然而, 這些方法各有優缺點, 例如, 實際森林經營規劃必須考量林地面積, DP 雖可決定疏伐強度, 但無法將面積視為決策變數; LP 及 GP 可將面積視為決策變數, 但無法將疏伐強度視為決策變數。

因此, 森林經營者若利用傳統的 DP、LP 及 GP 規劃法安排疏伐期程, 並試圖以疏伐達成減碳等多目標時, 恐因規劃法的適用性有限及計算程序繁雜等問題而無法有效率的規劃。然而, 倘能應用近年提出之複選目標規劃法(multi-choice goal programming, MCGP)法(Chang, 2007)及其衍生之多段目標規劃(multi-segment goal programming, MSGP)法(Liao, 2009), 應可有效研擬出適當之疏伐減碳方案。前者可協助經營者設定一個目標有多個可能達成的目標值, 藉以找到較佳的多目標森林經營方案; 後者則可將限制式中各決策變數的參數轉化為決策變數, 藉此設定疏伐強度為決策變數。然而, MCGP 雖可設定一個目標擁有多個目標值, 但決策者若在資訊不足的狀況下設定目標規劃法的目標值, 則會因目標值設定偏差而有遺漏更佳方案之疑慮, 故本研究同時提出三階複選目標規劃法(3-level MCGP)試著解決此問題。目前國內外尚未有研究將複選目標規劃及多段目標規劃法應用於疏伐減碳等多目標森林經營, 該二方法之實用性及適用性尚待評估, 且三階複選目標規劃法的求解效率是否較佳, 亦值得探討。

具體而言, 本研究主要有四個研究目的:

- 一、提出三階複選目標規劃法的概念，改良複選目標規劃法的求解效率。
- 二、比較複選目標規劃法及三階複選目標規劃法在多目標森林經營之應用效果。
- 三、利用多段目標規劃法結合線性規劃法建構疏伐減碳模型，驗證其規劃疏伐期程的效率。
- 四、結合三階複選目標規劃及多段目標規劃法研擬可達成減碳等多目標森林經營之最適疏伐期程。

細言之，本研究在確認台灣進行疏伐減碳之成本效能是否可行後，首先將提出三階複選目標規劃法的概念改善複選目標規劃法在設定目標值時可能產生的誤差，以增加求解效率。接著，以複選目標規劃法及三階複選目標規劃法試算加拿大多目標森林經營案例，討論並比較此二種方法在多目標森林經營之適用性。第三，以多段目標規劃法將疏伐程度及疏伐面積兩個決策變數納入考量，研擬新竹林管處柳杉林之最適減碳疏伐期程，瞭解使用該方法可能面臨之技術問題。最後，本研究同時使用三階複選目標規劃法配合多段目標規劃法研擬新竹林管處柳杉林之最適疏伐期程，以達成減碳等多目標森林經營，使台灣森林能在指定的經營期程(planning horizon)內發揮碳吸存功能，同時達成兼顧土壤保護及就業機會等多目標。

## 二、研究流程

本研究之研究流程如圖 1-2-1 所示，首先，在文獻整理的部分分別討論疏伐作業之減碳效果、數學規劃法在林業經營之應用及碳吸存之成本效能。由於有關疏伐減碳規劃之文獻闕如，故同時列入探討利用不同森林作業達成減碳效果之相關文獻。第二，在研究方法一章中，先建立本研究所欲處理之疏伐減碳規劃研究架構，包括分析技術的改善、經營目標與限制的設定及疏伐期程的規劃，以及分析技術在不同森林經營問題之應用。確認研究架構後，本研究再選取適當的森林多目標規劃案例與台灣人工林案例，以供本研究驗證分析技術的改善及在實際森林經營之適用性，並分別說明疏伐減碳模型所需之目標式、限制式及參數設定，最後介紹研究所需使用的各種分析技術。第三，本研究介紹分析工具後，進一步探討複選目標規劃可能存在之目標值設定與最佳理想解有差距之問題，並提出三階複選目標規劃法之演算概念改善此問題。

本研究於建構研究所需之各種材料與工具後，進入實證驗算階段。在第四個步驟中，估算疏伐減碳的成本效能，以蒙地卡羅模擬法模擬台灣進行疏伐減碳的森林經營規劃是否實際可行。第五，利用適當的案例配合各種複選目標規劃法相關技術進行實證分析，包括探討複選目標規劃法與多段目標規劃法在林業經營的適用性評估，以及三階複選目標規劃法是否改善複選目標規劃法的缺點。最後，在確認各複選目標規劃法相關技術在林業經營的適用性後，利用上述三種研究工具建置疏伐減碳多目標規劃模型，以利用疏伐作業達成既定之碳吸存、就業機會及土壤沖蝕控制目標。

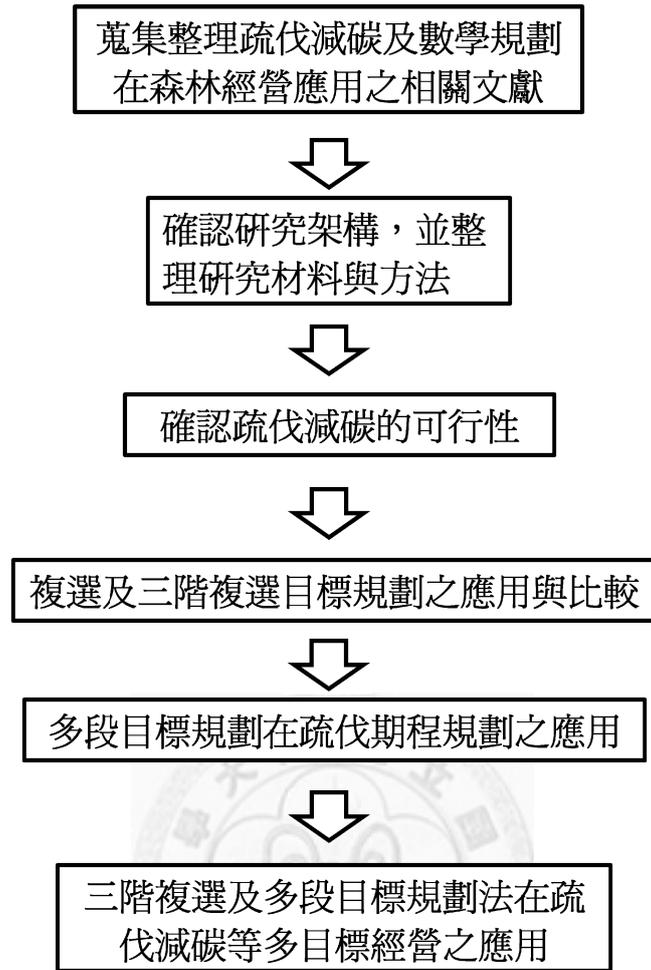


圖 1-2-1、研究流程

## 第貳章、文獻回顧

為了解疏伐是否為台灣可行的森林減碳作業，本研究首先蒐集國內外有關利用疏伐減碳之相關文獻，以進一步瞭解影響疏伐減碳效果之各種因素。其次，本研究蒐集各類森林減碳作業成本效能之相關文獻進行比較，以瞭解台灣森林減碳作業的成本效能與國外之差異。再其次，由於動態規劃、線性規劃及目標規劃是常用以規劃森林經營作業之數學規劃法，故本研究蒐集這三種方法在林業應用之相關文獻並比較分析。

### 一、疏伐之減碳效果

影響森林碳吸存能力的主要因子為：輪伐期、總生物收穫量以及引火整地翻動岩石碎屑，不同森林作業方式亦會影響碳吸存的效果，例如延長輪伐期會增加碳吸存，翻動岩石碎屑和皆伐會減少碳吸存，但擇伐和疏伐部分林木，可增加森林的碳吸存量(Harmon et al., 2002)。Bravo et al.(2008)指出，增加碳吸存的森林經營策略有六種，分別是改變林分內的組成樹種、改變輪伐期、進行疏伐(thinning)<sup>3</sup>、加強保護森林以及保護森林土壤(Bravo et al., 2008)。誠如研究背景對台灣林地及法規現況之描述，疏伐顯然是較可行的森林減碳方式。

若欲利用疏伐減碳，森林經營者必須先擬定疏伐方案(thinning alternative)。Klemperer(1996)指出，疏伐方案的內容包括決定疏伐樹種(species)、疏伐密度(thinning density)<sup>4</sup>、疏伐方式(thinning type<sup>5</sup>)、疏伐的時間點<sup>6</sup>(thinning age)及主伐時間點(clear-cutting age)<sup>7</sup>，而每個疏伐方案可視為一個疏伐制度(thinning regime)，

<sup>3</sup> 在森林經營上，一般將疏伐作業視為一項森林撫育作業的方式之一，Bravo et al.(2008)則將其視為一項森林經營策略。本研究以疏伐作業通稱之。

<sup>4</sup> 疏伐密度有多種表示方法，若以林分株數密度管理的角度說明，中文可稱為疏伐程度或疏伐強度，英文可稱為 thinning intensity 或 level of thinning intensity。但由於模擬疏伐時常面臨資訊不全之狀況，例如缺乏林分內株數的總量，僅有該林分的蓄積量，遂以林分內移除材積表示，故稱為疏伐木移出量(the volume to be removed in each thinning)，亦有學者以胸高斷面積(basal area)作為移出量的標準。但在後續本文中，將以疏伐程度通稱之。

<sup>5</sup> 疏伐方式可分為：a.上層疏伐(thinning from above)，主要移除最高的(tallest)、優勢的(dominant)及等優勢的(codominant)林木。b.下層疏伐(thinning from below)，移除林下的(understory)林木。c.行列疏伐(row thinning)，每隔一段距離，不管林木材質的優劣，帶狀移除林木。

<sup>6</sup> 疏伐時間點依照不同樹種而有差異，過早疏伐會造成林木生長率下降，過晚疏伐則無法刺激林木生長，例如柳杉疏伐時間點為 20 年至 25 年生柳杉，常見樹種之疏伐時間點詳可見各林區管理處之森林經營計畫書。

<sup>7</sup> 主伐時間點通常依照不同樹種的輪伐期(rotation)設定，若在林木生長期間有進行疏伐，一般會再將輪伐期延長，即延長主伐時間點。

經營者可在使用適當工具計算每個疏伐制度的結果後，再從中挑選適合的制度達成經營目標。Bravo et al. (2008)認為，森林經營策略除需觀察森林狀況選擇施行以外，配合多種森林作業之碳吸存效果更佳。例如疏伐採部分林木後，再選擇含碳量較高的樹種如蘇格蘭松進行再造林作業，藉由多種森林作業方式改變樹種的組成，亦可增加碳吸存量。

目前既有的疏伐減碳研究依據各自的研究目的及研究限制設定不同的疏伐方案，並透過實證研究或模擬案例證明適當的疏伐方案可有效減碳。台灣六龜人工林的實證研究探討不同林齡施以不同疏伐程度的減碳效果發現，11年生台灣杉進行中度疏伐、弱度疏伐及不疏伐時，每年的二氧化碳吸存量分別為 17.7、23.8 及 20.3 ton/ha，26年生台灣杉進行強、中、弱度疏伐及不疏伐的二氧化碳吸存量則分別為 14.4、15.8、14.3 及 10.6 ton/ha。以林木經營時間觀之，疏伐的碳吸存效果與林齡成反比，台灣杉林齡若逾 26 年仍未疏伐，則其碳吸存量僅為中度疏伐的 67%(邱志明，2006)。紅檜人工林的疏伐試驗也顯示疏伐後的林木碳吸存量較不疏伐佳，但必須注意過度疏伐會有負面效果(邱志明，2009)。Río et al.(2008)也探討不同疏伐時間點及疏伐不同程度的胸高斷面積移出量對森林的碳吸存功能的影響，設計七種疏伐方案並比較不疏伐時的碳吸存量。此研究結果發現，只要進行疏伐，碳吸存量均較不疏伐高。在 80 年輪伐期內，不疏伐的經營策略每年約可吸存 8,700 ton/ha 的二氧化碳，若進行不同疏伐作業，則每年二氧化碳吸存量介於 8,800 到 9,500 ton/ha。若再將疏伐樹種納入考量，則可發現不同樹種經疏伐後的減碳效果迥異，例如西班牙西北部的濱海松(maritime pine)及放射松(radiata pine)林分的研究結果顯示，利用弱度疏伐保存較高密度的蓄積是促進碳吸存的最佳策略，只要運用適當的疏伐策略，放射松的地上部每年可吸存約 12,500 到 21,600 ton/ha 的二氧化碳，濱海松較少，只有 8,400 到 16,900 ton/ha(Balboa-Murias et al., 2006)。

個別施行疏伐或者延長輪伐期均可增加碳吸存量(Briceño-Elizondo et al., 2006)，若可將兩者合併、或將疏伐配合其他森林經營措施，碳吸存的效果更佳。Eriksson(2006)設計不同疏伐作業方式，擬定不疏伐、上層疏伐、強度疏伐及弱度疏伐並配合施肥等方案探討挪威松(Norway spruce)及蘇格蘭松(Scots pine)林地生物量及 CO<sub>2</sub> 貯存的效果。此研究顯示，挪威松林分並不會受到這些疏伐方案的影響而改變其地上部生物量，但是低度疏伐配合施肥則是增加蘇格蘭松林分地

上部生物量的最適方案，且可提供大量的生物燃料。然而，如欲使林分生物量及碳貯存量均達到最大化，則不疏伐可使兩種林分達成此目標。疏伐配合延長輪伐期也可增加碳吸存，若將蘇格蘭松的輪伐期從 79 年延長至 100 年，每公頃可增加約 20 公噸的二氧化碳，再輔以疏伐作業，則可額外增加 60 公噸的二氧化碳吸存量(Pohjola and Valsta, 2007)。然而，Vesterdal et al. (1995)認為疏伐強度雖會影響碳吸存的效果，但是立地條件影響更大，林木若位處於條件好的林地，將可有較高的碳吸存能力。

對森林施行疏伐作業，亦可間接預防林火及增加植被以減緩或進一步吸收二氧化碳吸存量。疏伐作業刺激林木生長量的效果短暫，但由長遠經營的角度觀之，疏伐可疏開森林內的樹冠密度，降低大面積林火發生的機率，若再將疏伐木搬出，更可減少林火的燃料來源，藉此間接減少二氧化碳的流失量(Chiang et al., 2008; Sorensen et al., 2011)。此外，疏伐後的林分開闊，地表受光量將增加，可促進地被植物生長，間接增加二氧化碳的吸存量(Sullivan et al., 2008)。

將疏伐木作為生物燃料發電或發熱、家具或建材，也可減緩二氧化碳排放，可視為碳貯存策略。Schlamadinger and Marland (1996)指出，利用木材等生物燃料代替化石燃料生產生物能源，減少二氧化碳排放必然成為一種新的森林經營趨勢。疏伐木以及施行作業時產出的林木殘餘物均可作為生物燃料，例如蒐集儲存疏伐後之木材殘餘物並做乾燥處理可做為生物燃料的來源，同時可促進森林中碳、氮循環(Nurmi,1999; Schlamadinger et al, 1995; Malinen et al, 2001)。Bjørnstad(2005)在挪威的研究指出，森林伐採到製材作業的過程中，蒐集伐採殘餘物、低品質林木、疏伐木及針葉木等形式木材燃料，其所能提供的生物能源及其經濟效益，每年約可獲得 5 億度單位的電量。疏伐木也可用於製作一般桌椅家具或提供生態工法所需建材，減少使用鋼筋水泥帶來的二氧化碳排放(王松永等，2005)。Finkral and Evans(2008)以美國亞利桑納州的林地為例進行評估得知，若進行疏伐作業，則每公頃可減少 11.4 公噸的二氧化碳損失，若將疏伐木製為長期使用之林產品，則每公頃可減少 12.3 公噸的二氧化碳流失。

然而，森林經營者也必須考量疏伐木利用是否合於經濟效益。Heikkilä et al.(2007)設計八種不同的能源木疏伐方案，以情境模擬分析法分析不疏伐、只疏伐有銷售價值的林木及不同疏伐強度等情況下的經營狀況。研究結果得知，如果能源木之立木價金高於  $3\text{€m}^3$ ，則可將蓄積量每公頃少於  $20\text{m}^3$  林地之地上木轉

為能源木用材，否則就要延後疏伐時間，以提高日後林木收穫量，但生產能源材可彌補這項損失。

探討森林作業或森林產物對生物能源的助益，亦值得供疏伐作業借鏡。Freppaz et al.(2004)以線性規劃法評估義大利一小鎮附近森林可否永續提供生物能源及木材生產，指出 5 萬公頃森林的生物燃料可持續提供該鎮約 16%的能源。Baral and Guha (2004)研究美國南方短輪伐期林木利用生質能氣化器產生燃料取代化石燃料的可行性，結果指出當化石燃料價格上漲時木材有潛力做為替代能源以減少碳排放。Matthews(2001)分別評估不同的矮林作業來生產生物燃料的能源效益、成本、碳吸存以及碳排放，指出其能源產出對能源投入比介於 24 至 64 倍，平均為 30 倍，而此比例視矮林作業法及燃料材處理方法而異。

承上所述，木材作為生物能源減緩二氧化碳的排放雖然可行，但考量種植何種能源作物及如何取得可使用的土地等因素也至為重要(Berndes et. al, 2003)。吳俊賢等(2005)指出，在台灣種植能源作物如銀合歡、桉樹、相思樹等可替代其他能源並可減少二氧化碳排放，但栽植面積及地點則是能源作物推廣的關鍵。Demirbas(2004)認為雖然使用生物能源可以減緩全球暖化及酸雨等災害，但是缺乏適當經營依舊會造成環境破壞。例如種植生物能源作物會造成單一林相，容易引起病蟲害及減少生物多樣性。此外，與社會大眾溝通，強調使用生物能源改善環境之重要性，並說明該產業是可創造就業機會之勞力密集產業，也是生物能源推廣的關鍵 (Domac et. al, 2005)。

綜而言之，研究者若欲探討疏伐減碳的效果，研究設計難以控制的變數包括立地條件及林分結構(樹種、林木直徑分佈)。立地條件為自然生成，難以用人為干預來改變，此也間接造成林分結構的差異。若林分結構該變數為天然林，則樹種夾雜致使難以評估蓄積量及疏伐量，反之，人工林的林分結構較為單純，通常為單一樹種，較易評估。但不論林分結構為天然林或人工林，林分內的林木大小分佈不均，研究者模擬林分生長時只能將所有林木的生長狀態視為均質。研究者可控制的研究變數主要為疏伐程度、疏伐方式、疏伐及主伐時間點等可由人為設定操作的變數，端視研究需求可將這些變數視為決策變數或常數。而疏伐所能達成的森林經營目標包括增加林木生長、提供就業機會、增加野生動植物棲息地資源及提供生物燃料等，這些目標必須透過適當的模式計算不同疏伐程度對各目標達成度的影響。但目前有關疏伐對各目標達成度的影響，僅止於利用疏伐生長模

式探討疏伐對林木生長的影響，以及透過疏伐工時計算不同疏伐程度所能提供的就業機會，以及疏伐木所能提供的生物燃料量，但不同疏伐程度對於野生動植物棲息地資源的影響則難以評估。

本論文為使操作方便及符合現況，將樹種、立地條件、林分結構、疏伐方式、主伐時間點視為常數，將疏伐程度、疏伐時間點設定為決策變數，另外再將面積視為決策變數，以此探討最適疏伐減碳規劃方案。由於本研究探討疏伐所能達成的多目標森林經營，



## 二、碳吸存之成本效能

目前有關森林碳吸存的成本效能分析僅探討造林或保護森林的作業方式，並未針對疏伐作業的成本效能進行分析。Swisher(1991)估算中美洲造林的碳吸存成本效能，得知成本效能會因氣候、森林作業方法及林地狀況的差異而不同，每公噸成本介於 5 到 13 美元之間。Huang and Kronrad(2001) 以財務分析法研究電力公司補助美國德州私有林地造林以減少二氧化碳排放量的策略，顯示若林地主以增加碳吸存為目標而調整輪伐期以及將無蓄積之林地轉變成為具生產力林地以增加碳吸存效應，均值得補助。該研究指出，比較傳統林木收穫最大化輪伐期及碳吸存最大化輪伐期，兩者每公頃相差約 0.79 公噸的碳量；在無蓄積林地造林，每年每公頃可增加約 1.03 到 3.77 公噸的碳吸存量。若在每公頃林地多儲存 1 公噸碳量時，在集約經營之林地其成本介於 4.18 到 181.27 美元，在無蓄積林地成本介於 0.74 到 27.32 美元，其成本額度視林地的地位級指數和折現率而異。

各國利用森林減碳的成本效能迥異，Richards and Stokes(2004)以文獻分析法整理有關森林減碳的成本效能的相關文章，歸納出全球的平均造林減碳成本約介於 0.1 到 188 美元，美國的造林成本約 5 到 150 美元。若以森林經營撫育增加碳吸存，則全球的平均成本介於 7 到 188 美元，美國約 6 到 47 美元。李國忠等(2000)應用迴歸分析推估林木蓄積並換算林木之碳吸存量，得知臺灣杉造林吸存碳的成本約 448 到 2509 元/公噸。林俊成等(1999)以生物量法估計國有林柳杉人工林每公頃碳吸存的成本為 986.99 元/公噸。吳珮瑛等(2010)以 1990 至 2005 年之國際市場碳交易價格估算各國的邊際減量成本<sup>8</sup>，得知碳排放量與邊際減量成本成正向相關，高所得、中高所得、中低所得及低所得國家平均每公噸的減碳成本分別為 1,329.8、551、536.88 及 62.86 美元。台灣被世界銀行歸類於高所得國家，減碳成本為 751.87 美元。故台灣利用森林減碳的成本效能相較於國際市場價格屬於合理範圍。

上述森林減碳之成本效能差異係由於估算時未提出一套標準化的評估方法，例如清楚界定名詞定義、分析區域、研究假設、模型的建構等，評估的結果將有很大的差異(Richards and Stokes, 2004)。例如不同國家由於地理條件或政策差異，其最符合成本效能之森林減碳方法亦不同。Fearnside(1999)評估巴西公、私部門

---

<sup>8</sup> 邊際減量成本即減少一單位的二氧化碳所需支付的成本，一般以國民所得、國民生產毛額或國內生產毛額的改變表示。

之造林成本均高過收益，積極造林之碳吸存策略顯然不適用，反而是加強保護措施以減緩森林消失的碳保存策略較為可行。Sheeran(2006)分析菲律賓的森林保護計畫，指出菲律賓的熱帶雨林伐採後，會因大量降雨使土壤和養分嚴重流失，積極在伐採後林地上造林付出之代價恐怕更高，故認為保護森林以減緩其二氧化碳流失碳之成本效能優於造林。即使在較小的區域範圍，如州與州之間，也會因森林狀況不同而造成森林減碳成本效能差異。Plantinga et al.(1999)以美國緬因州、南卡羅萊納州及威斯康新州為對象，應用土地利用計量經濟模式評估碳吸存的邊際成本。該研究結果指出，在多種 CO<sub>2</sub> 減量策略中以造林成本較低，且威斯康新州可較其他二州有更低的碳吸存成本，另在南卡羅萊納州人口變遷對碳吸存成本的影響較其他二州明顯。若再將研究範疇縮小至同一個州內，不同城市的條件差異也會影響成本效能。例如科羅拉多州的都市造林，在丹佛市每公噸的減碳成本需 145.1 美元，惠特市為 201.5 美元，格蘭德姜欣為 253.7 美元，科林斯堡要 647.3 美元。雖然這些價格遠超過現行碳交易市場價格每公噸 3 到 13 美元，但若能挑選適當位置並且有良好的管理決策，仍可將價格壓低。例如若將管理決策成本壓低，則丹佛市減碳的成本效能可降至 33 美元/公噸(McHale et al., 2007)。

由文獻回顧可知，目前未有研究探討疏伐減碳的成本效能，由於柳杉為台灣人工林之常見樹種，已有前人研究設定適當的疏伐及主伐時間點，且具有完整的生長模式可供模擬，故將樹種、疏伐及主伐時間點視為常數，將疏伐程度視為決策變數，以適當的生長模式及成本模式估算疏伐三十年後林木生長量之平均數與標準差以探討森林經營之不確定性，探討不同疏伐程度時，吸收每公噸二氧化碳所需花費的成本，並估算各疏伐程度可能面臨之經營風險。

### 三、數學規劃法在林業經營之應用

適當的研究工具可有效規劃森林經營作業，然而，不同研究工具各有其使用限制及適用議題，森林經營者必須依照森林經營問題審慎決定使用的工具。以本研究欲規劃之疏伐減碳多目標方案為例，必須涉及疏伐期程的安排，且配置施行於林地內的疏伐作業必須要能盡量滿足減碳等多個森林經營目標。然而，傳統的數學規劃法難以同時進行上述規劃。本研究於此小節將首先說明規劃疏伐作業時必須考量的要素，接著介紹用以規劃疏伐之動態規劃法及其使用限制，最後再說明線性規劃法與目標規劃法相較於動態規劃法在規劃疏伐之優劣。

森林經營者多以動態規劃法(dynamic programming)規劃疏伐作業，該方法可有效決定疏伐的時間間隔(thinning)及疏伐強度(thinning intensity)，找出最適疏伐制度(Brodie et al., 1978)。該方法通常會配合其他技術規劃疏伐制度，例如配合最適控制理論(optimal control theory)，或再多考量直徑加速生長模式(accelerated diameter growth)，透過不同方法的配合，以達到經濟效益最大化(Brodie and Kao, 1979; Kao and Brodie, 1980; De Kluyver et al., 1980)。近年由於利用森林減碳的議題逐漸受重視，動態規劃法也被用來規劃適當的疏伐作業以增加碳吸存(Diaz-Balteiro and Rodriquez, 2006; Yousefpour and Hanewinkel, 2009)。

雖然動態規劃法可規劃適當的疏伐作業達到既定之森林經營目標，然而，該方法只能應用於特定議題。動態規劃法的概念係將問題拆解成一系列的子問題(subproblems)或者階段(stages)處理，但當決策變數(decision variable)為一難以分割成爲片段的連續變數(continuous variable)，例如面積或時間等變數時，則問題會變得很複雜(Buongiorno and Joseph, 2003)。Kao and Brodie(1979)曾試著將時間間格分割爲一年、三年、五年及十年，分別探討這四種時間分割法所計算求得之最適疏伐的時間點及疏伐次數，以及總林木收穫量。其研究結果指出，林木總收穫獲的結果相差無幾，然而，當時間間隔被分割得越細，則代表電腦必須計算越多種疏伐的排列組合，故運算負擔越重造成計算時間增長。

誠如前段所述，動態規劃法難以將面積視爲決策變數，僅能安排疏伐的次數及疏伐的時間點，但難以計算疏伐作業應施行於多少面積的林地，即將疏伐面積視爲決策變數。因此，森林經營者若欲將林地配置適當的森林經營作業以達成多目標森林經營，必須另外選取適當的工具。

在實際的森林經營中，面積是非常重要的決策變數。Davis et al. (2001)定義

林地經營(forest land management)爲一連串規劃林地的過程，包括分配林地面積，並決定這些面積該施以何種經營處方(prescription)。線性規劃是森林經營中可用以規劃林地的基礎工具，可將面積視爲決策變數分配林地，森林經營者可藉此瞭解該對各個被分配的林地施行何種處方。然而，線性規劃只能考慮單一經營目標，早期常被用以規劃最大林木收穫或者最大林木收益。自 1970 年開始，林業經營不再只著重於單一目標的森林經營，轉而注重生態多樣性的多目標森林經營。因此，由線性規劃法延伸，能考量多個經營目標，達成多目標森林經營的目標規劃(goal programming)法遂被廣泛使用(Weintraub and Romero, 2006)。

Field(1973)是第一個將目標規劃法應用於多目標森林經營的學者，他同時提出一個計算次序權重(priority settings)的演算法，用以設定每個目標的權重以表達森林經營者對目標的偏好，藉此在各項限制式下獲得較佳的理想解(ideal solution)，意即能獲得較佳產量之林地規劃。此後，有許多學者將目標規劃法應用於不同的多目標森林經營問題。Bottoms and Bartlett(1975)、Bell(1976)、Arp and Lavigne (1982)及 Oliveira et al.(2003)等人以基礎目標規劃法配合權重(weight)或次序(priority)設定表達其經營偏好，以此規劃林地生產木材、動物保護、糧草等林產品。Hotvedt(1983)則是利用目標規劃法計算在各伐採期程(harvest horizon)需要伐採的樹種，以及這些伐採樹種必須伐採的面積，以達到既定的多項生產目標。亦有部分學者將目標規劃法配合其他方法規劃林地。例如 Diaz-Balteiro and Romero (1998)同樣使用目標規劃法規劃每個經營期必須伐採的林地面積及樹種，然而，他們配合層級分析法(analytic hierarchy process, AHP)設定各目標的權重以表達經營者對森林經營目標的偏好，以使經營的結果能盡量滿足其經營需求。Bertomeu and Romero(2001)則使用零一目標規劃(zero-one goal programming)法配合邊緣效應(edge effect)理論，選擇適當的林地進行生物多樣性保育、或者進行林木伐採作業，藉此提高鄰近林地之生物多樣性。

然而，目標規劃法雖可將面積視爲決策變數，卻無法將疏伐程度、疏伐時間點等變數納入考量。唯一可在目標規劃法中將疏伐制度納入考量的方式就是事先提出擬定的疏伐制度，再以目標規劃法分別模擬之。例如 Hotvedt(1983)事先擬定數個內含不同疏伐時間點及疏伐程度的疏伐制度，並以線性目標規劃法(linear goal programming)分別模擬這些制度求解。由此可知，若欲模擬越多不同疏伐程度或時間點的組合，則必須重複越多次目標規劃法求解，求解後又必須分別比較

各個求得解，方能挑出一個符合經營所需的規劃方案，此勢必造成森林經營者在規劃最適森林經營作業之負擔。

利用森林經營作業促進碳吸存是近年林業經營之主要議題，動態規劃法、線性規劃及目標規劃法此三種方法雖然各有其使用限制，森林經營者仍可依其特性應用於適當的森林減碳議題。例如 Diaz-Balteiro and Rodriquez(2006)以動態規劃法估算巴西和西班牙的尤加利樹人工林的碳吸存的最適輪伐期規劃，其研究結果指出，碳支付價格的波動明顯影響現金流量(cash flow)的變化，促使巴西人工林的輪伐期必須縮短以獲取較高利益。此外，當巴西人工林之土地期望值高於西班牙人工林時，巴西政府應該擴大造林及促進土地利用方能獲利。Yousefpour and Hanewinkel(2009)則換算碳吸存、林木收穫及生物多樣性等森林經營目標的淨現值，以動態線性規劃(dynamic linear programming, DP)法探討在不同經營階段施行疏伐或皆伐等森林經營作業所帶來的森林價值。研究結果指出，適當的林地保護共可帶來每公頃 27,451 歐元的價值，其中，碳吸存價值佔 12%，且每公頃的碳吸存價值為 3,412 歐元。Diaz-Balteiro and Romero (2003)以碳貯存量、淨現值、各伐期木材收穫量、各期伐採面積控制及最終蓄積量控制為五個經營目標，以權重字典式排序(lexicographic weighted)及望大字典式(lexicographic minmax)排序等兩種目標規劃法探討輪伐期、伐採面積等經營作業方式是否會因各經營目標的重視程度而改變。研究結果指出，利用字典排序目標規劃法所得的結果可符合現今林業注重碳吸存的經營現況，當以碳吸存量最大化目標為首要重視目標時，該兩種方式呈現之林地規劃方式與傳統林業經營面積規整、蓄積規整的法正林概念相同。此結果顯示，傳統的森林經營概念經適當調整規劃，依然可符合現代的森林多目標經營理念。雖然 Nhantumbo et al.(2001)沒有直接考量森林減碳的可行性，但將燃料木供給納入經營目標。在其設計的四個模擬情境中，分別給予燃料木供給、建築用桿材供給、食物供給、資源保育及預算等目標不同的權重，再以目標規劃法計算各種資源的開發潛力。研究結果顯示，各種資源在四個情境下均達到預設目標，但建築用桿材在四個情境中都遠超出了原先設定之期望目標值，表示建築用桿材極具開發潛力。此外，若視燃料木需求為首要考量，食物需求為次要考量，該兩種資源的收穫量均會高於既定之期望目標值，此係由於當地市場對燃料木及食物銷售量的需求較低，導致依照當地使用量設定之期望目標值低於目標規劃所求得之實際產量。上述結果顯示，當地的建築用桿材、燃料木及食物資源

非常豐富，可加以妥善經營利用。

本研究將 DP、LP 及 GP 的比較列於表 2-3-1。LP 和 GP 在處理林業經營上的差異不大，前者處理單一目標森林經營問題，後者則用以探討多目標森林經營，兩者的優點均在於有標準形式可供研究者操作依循，且可處理不連續變數，即將面積視為決策變數。然而，這兩個方法較不適用於探討疏伐議題，因疏伐方案的組合包括疏伐程度、疏伐時間點等變數，故必須分別擬定不同疏伐方案後，用此二方法分別模擬並比較各疏伐方案的差異。DP 在林業經營中則適用於探討最適疏伐方案，即將疏伐程度及疏伐時間點視為決策變數，但其缺點則在於難以應用於實際森林經營，因其無法將面積視為決策變數。Buongiorno and Gilles (2003) 整理 LP 和 DP 在森林經營應用上的兩個主要差異。首先，LP 只能處理連續變數，雖然該方法可利用整數規劃(integer program)的設定處理變數不連續的問題，但整數規劃求解不易設定，且不易找到最佳解(optimal solution)。DP 則可處理不連續變數。第二，LP 雖然只能應用在目標式與限制式可化為線性函數型態的問題，但 LP 的方程式有標準形式(standard form)可依循，而 DP 的缺點就在於沒有標準形式，必須依照不同的案例而規劃處理之。由於 LP 和 GP 的差異

表 2-3-1、DP、LP 及 GP 之比較

	優點	缺點	決策變數	適用議題
DP	1. 考量單一或多目標 2. 可處理不連續變數	1. 無法處理連續變數 2. 決策變數切割過細造成電腦運算負擔	1. 疏伐程度 2. 疏伐時間點	疏伐方案
LP	1. 考量單一目標 2. 可處理連續變數	1. 疏伐方案需事先擬定 2. 需一一比較各疏伐方案的結果	1. 面積	單一目標森林經營
GP	1. 考量多目標 2. 可處理連續變數	1. 疏伐方案需事先擬定 2. 需一一比較各疏伐方案的結果	2. 面積	多目標森林經營

綜而言之，雖已有研究以既有的研究工具探討疏伐減碳規劃，或規劃不同經營期的林地伐採面積以促進碳吸存，但囿於傳統線性規劃、目標規劃及動態規劃等研究工具的應用限制，目前尚未有研究在規劃疏伐制度(thinning regime)時，將面積變數納入考量。因此，若能以適當的研究工具同時考慮疏伐制度及各經營期的疏伐面積，應可在森林減碳議題上有貢獻。

近年發展之複選目標規劃法(MCGP)(Chang, 2007)及多段目標規劃法(MSGP)(Liao, 2009)係改良自傳統 GP，在求解概念上有新的突破。MCGP 有別於傳統目標規劃法，研究者可設定一個目標擁有多個層級的目標值，以搜尋各目標較好的解，傳統 GP 則只能設定各目標僅有單一目標值，有可能因為目標值設定偏差而無法求得更佳解。雖然 MCGP 可藉由設定一個目標擁有多個層級目標值的方式擴充可行解的搜尋範圍，其和傳統 GP 一樣會面臨目標值設定偏差的問題，該如何避免或降低此問題發生的機率，值得探討。MSGP 的改良在於可使限制式中各決策變數的參數值有多個層級可供選擇，也就是可將參數值同樣視為決策變數。決策者若使用該技術配合 GP 或 MCGP 應用於林地規劃，可設定疏伐程度有多種程度可供選擇，與疏伐面積兩者同時做為決策變數，研究者可藉此省略多種疏伐制度的設計與模擬。因此，若能進一步改善 MCGP 的求解效率，並配合 MSGP 建立疏伐減碳等多目標規劃的模型，應可迅速提出適當的疏伐方案，以達成減碳等多目標經營。



## 第參章、研究方法

在研究方法一章中，本研究首先介紹本研究之研究架構，包括探討疏伐減碳之成本效能，複選目標規劃法之改良，及各種複選目標規劃技術在林業經營之應用。第二，介紹可用以印證三階複選目標規劃法改良效果的國外案例，及可試作各種複選目標規劃技術之本國林地。第三，分別介紹本研究應用之複選目標規劃法、多段目標規劃法及蒙地卡羅模擬法。最後，依據研究架構，應用各種複選目標規劃技術設定疏伐減碳模型並蒐集所需參數。

### 一、研究架構

本研究之研究架構如圖 3-1-1 所示，首先，本研究將利用蒙地卡羅模擬法確認疏伐減碳在台灣是否合於成本效能，若屬可行，則後續研究在現實森林經營作業中將更有意義。接著，本研究之兩大研究重點分別為複選目標規劃相關技術之研究及複選目標規劃相關技術在林業之應用。在複選目標規劃相關技術之研究中，複選目標規劃及多段目標規劃兩項方法已被提出，後者係由前者的概念衍生。複選目標規劃係應用於目標式等號右邊，用以設定一個目標擁有多個目標值；多段目標規劃法以複選目標規劃法的概念設定限制式中的等號左邊，即設定各決策變數的參數值亦有多重選擇，可將參數作為決策變數。然而，複選目標規劃法在使用設定上仍有值得改良之處，故本研究將進一步探討複選目標規劃法設定目標值及求解可能面臨之問題，並提出三階複選規劃法改善求解效率。

進行複選規劃相關技術之研究後，本研究將試著把這些技術依其特性分別應用於林業經營，若分別可行，則可進一步整合應用於疏伐減碳之多目標規劃。應用複選規劃相關技術於疏伐減碳多目標規劃的整體架構如圖下半段所示，主要可分為設定經營期程、經營目標及經營限制三大部分，而複選規劃相關技術則分別用以設定經營目標及經營限制。由於經營目標和經營限制可分別視為目標式及限制式的規劃，因此，前者可利用複選目標規劃法或三階複選目標規劃法設定，而經營限制中的疏伐程度則可利用多段目標規劃法設定。茲將疏伐減碳歸劃整體架構的三個主要部分詳細說明如下。

首先，經營期程的設定係根據森林經營管理方案第二條規定，各事業區之經營計畫應每五至十年檢討一次，而目前台灣各林區管理處經營計畫書每十年檢訂

一次。故本研究規劃二十年的經營期程(planning horizon)，並以五年為一個經營期(planning period)，共分四個經營期。

在經營目標設定方面，本研究旨在利用疏伐作業達到碳吸存目標，但亦期望兼顧國土保安或利用疏伐獲取經濟利益等多目標森林經營。故本研究期許在二十年的經營期程後能達到既定之碳吸存、就業機會及土壤保護等三個經營目標。其中，碳吸存、就業機會兩個目標與土壤保護目標之間屬於互斥的關係。例如，藉由疏伐吸收較高的碳吸存量及增加較多的就業機會，則將會因為施行較多的疏伐作業而造成土壤流失的問題。

在經營限制方面，可細分為限制式設定及疏伐作業設定兩個部分。首先，在限制式設定的部分，共有疏伐面積限制、疏伐收穫限制及各經營期等量收穫三個限制。疏伐面積限制係為避免將所有的林地面積集中於某一經營期進行疏伐，故將疏伐面積平均分攤至四個經營期。疏伐收穫限制則是控制疏伐木收穫量，避免過度疏伐而傷到林分之蓄積，為了達成永續收穫的概念，每年的林木伐採量不會超過該林分之年平均生長量。另為使森林經營者每期能有穩定之疏伐木收穫，即穩定之收益，本研究也同時將疏伐木等量收穫作為經營限制式。第二，疏伐作業設定是疏伐減碳規劃的關鍵，係設定疏伐期程、疏伐程度及疏伐面積三個決策變數，以達成上述三個經營目標及三個經營限制。疏伐期程的設定可由圖中不同顏色的圓圈來理解，不同顏色的圓圈代表不同期程進行疏伐，但由於疏伐對老熟林的林木生長效果不佳，故應挑選較年輕之林分，如柳杉可挑選 11-20、21-30 或 31-40 齡級為對象施行之。而疏伐次數的設定係設定一次，即疏伐過後之林地不再進行疏伐，以第一期就進行疏伐為例，林地中淡灰色圓圈代表進行疏伐之林地，其餘空白處則代表不疏伐之林地，疏伐與否是由疏伐面積所決定，而進行疏伐之林地，則會再決定疏伐程度。另為了避免過度疏伐造成林地土壤沖蝕的問題，各期疏伐過後的林地將不會再進行疏伐。疏伐面積的設定部分，在利用傳統的線性規劃及目標規劃進行伐採期程規劃時即將之視為決策變數，因此，疏伐面積設定亦相同。另由於疏伐面積為 0 時即代表疏伐程度為 0%，故疏伐面積設定亦可減少多段目標規劃法中二元變數的設定，以減少電腦運算負擔。疏伐程度的設定係應用多段目標規劃法將其視為決策變數，設定為不疏伐、弱度疏伐、中度疏伐及強度疏伐四種，分別疏伐 0%、20%、40% 及 60% 的林分蓄積，由四種疏伐程度中選取其中一種程度施行之，傳統線性及目標規劃法無法處理此問題。

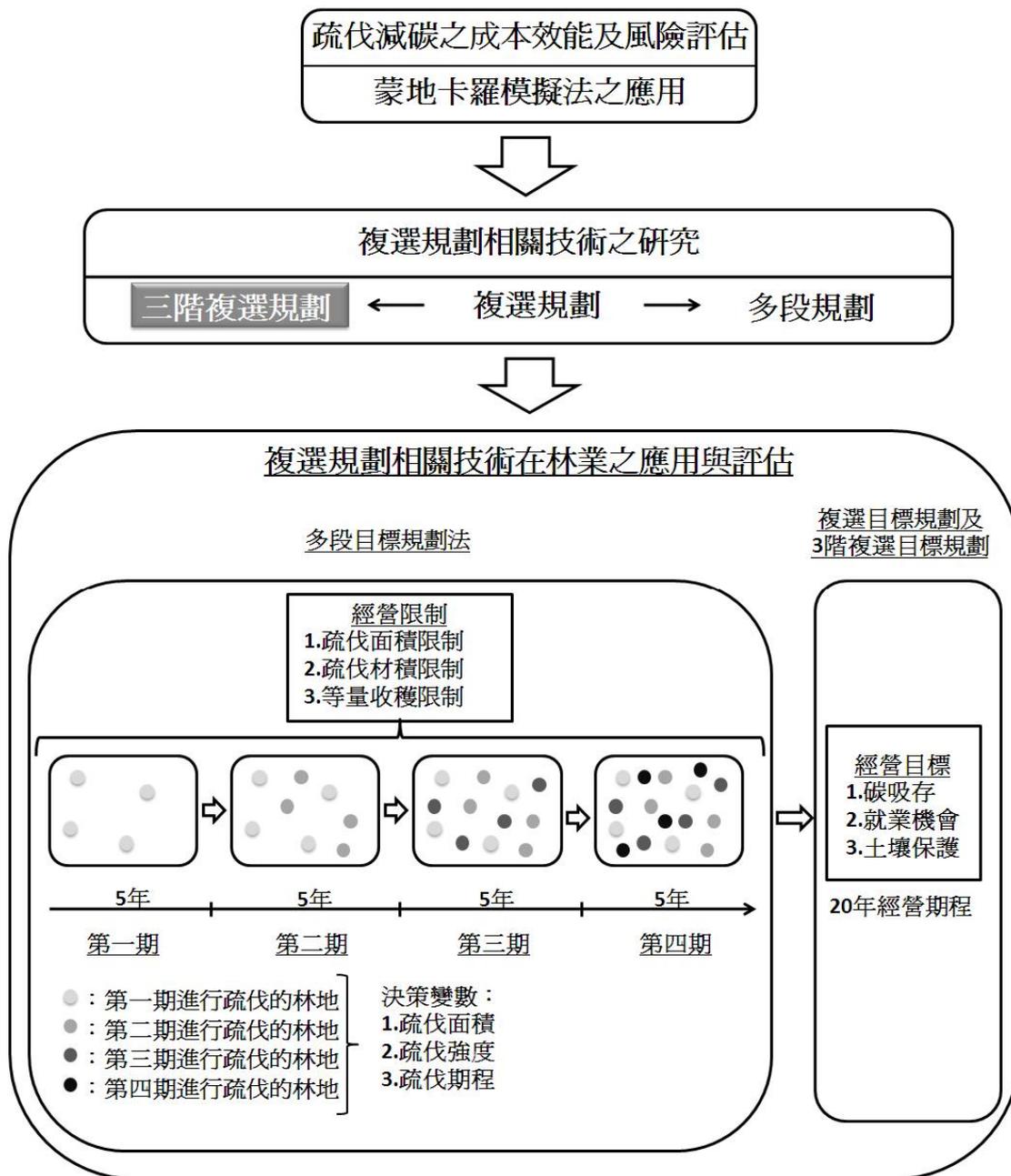


圖 3-1-1、研究架構

## 二、研究案例

複選目標規劃法係設定各目標有多個目標值可供選擇，適用於規劃多目標森林經營問題，而多段目標規劃法則用以設定各參數有多個參數值可供選擇，可應用於設定疏伐程度。

針對複選目標規劃及三階複選目標規劃法處理多目標經營問題(multiple objective management problem, MODP)的特性，本研究首先挑選加拿大多目標森林經營問題作為多目標森林經營案例。以目標規劃法處理多目標森林經營的研究繁多，但這些研究多未詳細臚列目標式及限制式，Arp and Lavigne (1982)是少數有詳列計算式之研究報告。本研究使用該研究作為案例的主要原因有二。首先，這是一個真實且有複雜考量的森林經營案例，而非一般假設的虛擬案例。第二，該案例提供詳細的目標式、限制式及各種參數值，可供研究者重複驗證。

多段目標規劃法可設定參數有多個參數值可供選擇，可用以設定不同疏伐程度後的生長率。為使研究更能符合台灣實際可行之森林經營，本研究由法規可行性、財務可行性及在疏伐研究的適用性三個面向挑選適當的地點作為研究案例。

首先，在法規可行性方面，林務局全面禁伐天然林之緣由已於第一章第一節研究背景交代，故不詳述。然而，法規雖規定可於人工林進行作業，但並非所有人工林均可進行森林經營作業<sup>9</sup>，故只能針對可進行森林經營作業之國有林林木經營區人工林進行疏伐減碳規劃。

第二，在財務可行性方面，由各林管處森林經營計畫書中近五年有關森林撫育、林木收穫或再造林之預算資料可見，新竹與台東林管處每年編列用於森林撫育及收穫之預算最高，分別為 269,000 元及 263,000 元，各佔其總預算之 49.81% 及 65.71%，故該二縣市具有較多的森林經營預算可供執行疏伐作業。但若再以疏伐成本考量，在台東林管處施行疏伐作業必須負擔較高之運輸成本，故宜選取交通便利之新竹林管處為宜。

第三，若欲進行疏伐研究，必須確認該樹種是否已建立適當之生長模式，以及哪些齡級適合進行疏伐作業。目前台灣常見之造林樹種中，僅台灣杉(劉浚明、鍾旭和，1993)與柳杉(高強，1982)有建立可供操作疏伐之收穫模式。而新竹林管

---

<sup>9</sup> 林務局根據林地之土壤、坡度及相關法令劃設之保安林、國家公園、野生動物保護區及自然保留區等，暫將國有林地區分為自然保護區、國土保安區、森林育樂區及林木經營區，其中，國土保安區佔百分之八十以上，林木經營區佔約百分之十八，育樂區佔約百分之二。

處中，柳杉為主要樹種，面積總計 12,228.6 公頃，佔人工林面積之 28.93%，故以柳杉為宜。而柳杉輪伐期介於 30 到 35 年，因此，本研究將挑選齡級 11 到 20、21 到 30 及 31 到 40 年生之柳杉林分進行疏伐作業。



### 三、分析技術

#### (一) 複選目標規劃法

目標規劃法(goal programming)是由 Charnes et al. (1955)提出，用以解決多目標決策的問題(multi-objective decision problems, MODP)，而 Charnes and Cooper (1961)隨後命名之。有別於只能針對單一目標求解的線性規劃法(linear programming)，目標規劃法可以同時將多個目標納入考量，其求解概念係將各目標求解後所得之實際值與期望值之間的離均差(deviation)加總，並使離均差的總和最小，以求得盡量接近各目標預定期望值的「理想解(ideal solution)」。之後，學者也提出不同形式的目標規劃法以解決不同的多目標決策問題，例如字典式排序目標規劃(lexicographic GP)，權重目標規劃(weighted GP)，望大目標規劃法(min-max GP)，整數目標規劃(integer GP)，零一目標規劃(zero-one GP)，模糊目標規劃(fuzzy GP)，互動式目標規劃(interactive GP)及機率限制目標規劃(chance-constrained GP)等方法(Lee 1972; Ignizio 1976; Romero 1991; Tamiz *et al.*, 1995; Mendoza and Martins, 2006)。

然而，Chang(2007)指出，傳統的目標規劃法並未考量設定目標值時，目標值會有多選擇層級性(multi-choice aspiration level, MCAL)的問題，意即各目標可能會有不同高低層級的目標值提供決策者選擇。因此，他利用多選擇層級性的概念提出複選目標規劃法(multi-choice goal programming, MCGP)，使決策者可以設定一個目標擁有多個目標值可供選擇。Biswal and Acharya (2009)的實證研究也印證該方法確實可有效解決限制式等號右邊的目標值本質為多選擇的問題。複選目標規劃法的方程式可展示如下。

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^n w_i (d_i^+ + d_i^-) \\ & \text{s.t. } f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = \sum_{j=1}^m g_{ij} s_{ij}(B), \\ & i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ & d_i^+, d_i^- \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & S_{ij}(B) \in R_i(x), \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & X \in F (F \text{ is a feasible set}) \end{aligned}$$

在方程式中，假設決策者共有  $n$  個目標要考量( $i=1, 2, \dots, n$ )，第  $i$  個目標有  $j$

個層級的目標值可供選擇( $j=1,2,\dots,m$ )，故可將各目標的目標值設定表示為  $g_{ij}$ 。為使每個目標設定的多個層級目標值僅能成立其中一個，可利用  $s_{ij}(\mathbf{B})$  此項一連串的二元變數(binary variable)設定組合控制每個目標最後只會有一個層級的目標值產出。 $f_i(X)$  是決策變數  $X$  的線性函數， $d_i$  是目標值及實際值的差距，即離均差(deviation)。複選目標規劃的求解演算法與傳統目標規劃法相同，均是最小化離均差的總和，而決策者可依自身偏好給予目標不同的權重  $w_i$ 。

本研究以一個目標有三個層級為案例說明複選目標規劃的使用，可將方程式設定為  $f(X)=g_{11}*s_{11}+g_{12}*s_{12}+g_{13}*s_{13}$ ，表示  $g_1$  這個目標有  $g_{11}$ 、 $g_{12}$  及  $g_{13}$  這三個層級的目標值，並可透過  $s_{11}$ 、 $s_{12}$  及  $s_{13}$  這三個二元變數的設定組合而成立其中一個層級的目標值。最簡便的二元變數組合設定可表示為  $s_{11}+s_{12}+s_{13}=1$ ，當  $(s_{11},s_{12},s_{13})$  等於  $(1,0,0)$ 、 $(0,1,0)$  及  $(0,0,1)$  時，則分別僅會成立  $g_{11}$ 、 $g_{12}$  及  $g_{13}$ 。由於設定過多的二元變數會加重電腦運算負擔，若欲減少二元變數的設定，則可將方程式的設定改為  $f(X)=g_{11}*s_{11}*s_{12}+g_{12}*s_{11}*(1-s_{12})+g_{13}*s_{12}*(1-s_{11})$ ，如此只需使用兩個二元變數。當  $(s_{11}, s_{12})$  等於  $(1,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(0,1)$  時，則分別僅會成立  $g_{11}$ 、 $g_{12}$  及  $g_{13}$ 。

在進行多目標決策的過程時，決策者通常會對某些目標有特定偏好，例如希望利潤越高越好，但成本越低越好。Chang(2007)歸納出在實際決策的過程中，目標值的設定會有三種狀況。第一種是希望目標值的求得解能越多越好，第二種是希望目標值的結果能越少越好，第三種則是沒有一定喜好的任意設定。Chang(2007)認為，第三種狀況以複選目標規劃法處理即可，但第一及第二種狀況則需另外設定，故其應用模糊理論(fuzzy theory)的設定概念改良原始的複選目標規劃方程式以處理第一、二種狀況。若欲使目標值的結果能越多越好，則方程式可再設定如下， $g_{max}$  及  $g_{min}$  分別代表各目標設定的多層級目標值中的最大值及最小值。

$$\frac{g_{ij} s_{ij}(\mathbf{B}) - g_{min}}{g_{max} - g_{min}} - d_i^+ + d_i^- = 1$$

若欲使求得的目標值結果能越小越好，則方程式可再修正為下面的設定。

$$\frac{g_{max} - g_{ij} s_{ij}(B)}{g_{max} - g_{min}} - d_i^+ + d_i^- = 1$$

上述促使目標值越多越好及越少越好的兩個方程式設定原理在於將目標值進行標準化，即等號右邊視為目標值並設定為 1。以將目標值最大化為例，由於等號左邊的分母為最大的期望目標值減去最小值，因此，若分子也是由最大期望目標值減去最小值，則與 1 的離均差將最小，反之則有較多的離均差，故可透過此種設定方式迫使目標求得的解越大越好或越小越好。

本研究進一步以圖示法展示複選目標規劃法可使資源配置更有效率以求取較佳理想解的概念。如圖 3-3-1 所示，假設決策者需考量兩個目標，各目標分別有兩個層級的目標值欲達成， $g_1$  及  $g_2$  線段代表較低層級目標值的目標式， $g_1'$  及  $g_2'$  線段代表較高層級目標值的目標式， $mn$  線段則是代表不同決策限制的功能限制式。圖(a)與(b)分別代表傳統目標規劃法的求解概念，圖(c)則為複選目標規劃法的求解概念。

傳統目標規劃法求解的概念可以圖 3-3-1 中的圖(a)為例，各目標只能設定單一層級(single aspiration level)的目標值，故只能設定  $g_1$  及  $g_2$  兩條目標式， $x$  軸、 $y$  軸、 $g_1$ 、 $g_2$  及  $mn$  線段圍成的多邊型  $abcdo$  內任一點均可成為多目標規劃的解，一般而言，理想解會在  $x$  軸、 $y$  軸、 $g_1$ 、 $g_2$  及  $mn$  線段的交點找到，即  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及  $d$  四個角解(corner solution)中的最佳解可作為理想解。圖(b)則代表決策者將兩個目標設定較高層級的目標值，即  $g_1'$  及  $g_2'$  兩條目標式，故可將搜尋範圍擴大為多邊形  $a'b'c'd'o$ ，而理想解則可能為  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  及  $d'$  中的任一點。由此顯示，傳統目標規劃法在求解時的操作較為繁複，必須重複設定目標值，反覆操作目標規劃法方能求解，且求解後尚須進行多重比較。

複選目標規劃法的求解概念如圖(c)所示，決策者可同時設定各目標有多個層級(multi-aspiration levels)的目標值，因此，決策者可同時考量  $g_1$ 、 $g_2$ 、 $g_1'$  及  $g_2'$  四條目標式，即可一次從  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  及  $d'$  八個角解中選取最佳解作為理想解，其求解效率顯然較傳統目標規劃法佳。

複選目標規劃法的優點可總結為二。首先，可利用此方法將各目標設定多個

可供選擇的目標值，藉由擴大可行解的搜尋範圍以獲得最佳的解(the more the better or the less the better)。第二，該方法可同時考量一個目標有多個目標值可供選擇的狀況，有效率的搜尋較佳解，省去重傳統目標規劃法重複計算求解並比較的麻煩。

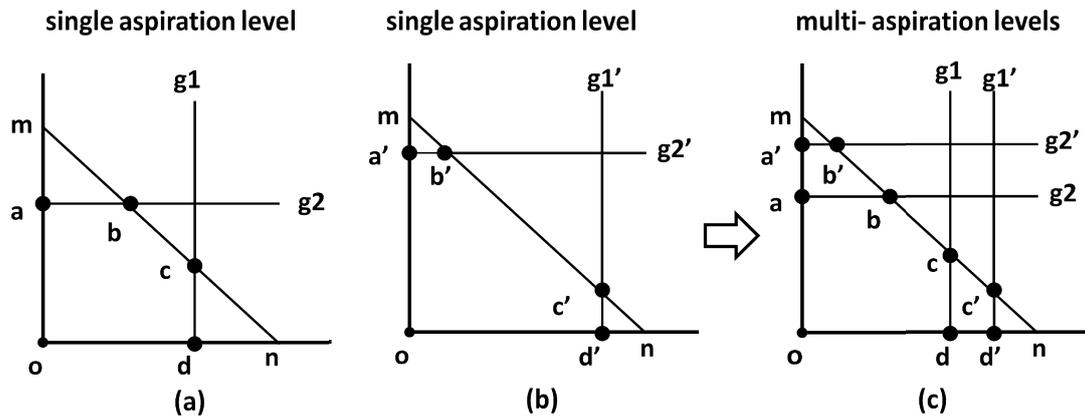


圖 3-3-1、複選目標規劃法之求解概念



## (二) 多段目標規劃法

自 Chang(2007)以複選目標規劃法解決現實決策中，目標值會有多選擇層級性的問題後，Liao(2009)指出設定參數(coefficient)時同樣會有多段層級(multi-segment aspiration levels, MSAL)的問題，遂應用複選目標規劃法之概念題出提出多段目標規劃(multi-segment goal programming, MSGP)，解決等號左邊的參數有多個層級可供選擇的問題。該方法的數學式如下所示。

Achievement function:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (d_i^+ + d_i^-)$$

Goals and constraints:

$$\sum_{i=1}^n S_{ij}(B)S_{ij}X_i + d_i^+ - d_i^- = G_i, j = 1, 2, \dots, m$$

$$X \in F$$

( $F$  is a feasible set.)

Laio(2009)的多段目標規劃法數學式係以多目標規劃法為基礎而設定，故其演算概念與複選目標規劃相同，均是希望離均差( $d_i$ )的總和( $z$ )最小，唯其主要差異在於各個參數可設定各自擁有多個層級之參數值。本研究將 Laio(2009)的數學式稍作改良以方便說明。數學式中假設有  $n$  個目標值( $i=1, 2, \dots, n$ )且期望各目標的離均差總和最小( $d_i$ )， $S_{ij}(B)S_{ij}X_i$  用以表示限制式(亦可為目標式)。變數  $X_i$  屬於傳統目標規劃法的決策變數，為第  $i$  個目標的決策變數。變數  $S_{ij}$  則是  $X_i$  的參數，但其有  $j$  個層級可供選擇，也就是該參數有多段層級(multi-segment aspiration levels)的情形，故該變數同樣也可視為決策變數。而變數  $S_{ij}(B)$  是一連串的二元變數函數設定，用以控制僅有其中一個  $S_{ij}(j=1, 2, \dots, m)$  可成為變數  $X_i$  的參數。

本研究以一個參數擁有三個層級參數值的概念展示多段目標規劃法之設定。 $X_i$  的參數設定可表示為“ $b_{i1} * b_{i2} * S_{i1} + b_{i1} * (1 - b_{i2}) * S_{i2} + b_{i2} * (1 - b_{i1}) * S_{i3}$ ”， $b_{i1}$  和  $b_{i2}$  為二元變數，當( $b_{i1}, b_{i2}$ )分別為(1,1)、(1,0)和(0,1)時，則  $S_{i1}$ 、 $S_{i2}$  和  $S_{i3}$  會個別成立。總結該方法的優點在於可供決策者將參數設定多個可供選擇的參數值，而不必分別重複設定計算多個參數值求解。

### (三) 蒙地卡羅模擬法

蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo simulation)之概念係假設某變數隸屬於某一機率分配，以該方法產生大量的樣本，以求取該變數的期望值與標準差。此方法的主要工作有三，包括選擇變數、設定變數的機率分布及決定變數間的關係，機率分布的設定需要依賴經驗判斷或就歷史資料運用統計方法檢定後決定(Hertz and Thomas, 1983; 郭迺鋒, 2001)。在財務不確定性分析(financial risk analysis)領域，此法以機率分布產生的隨機觀察值模擬不確定性對投資結果的影響，例如產生不同的成本效益分佈，提供投資決策(Hillier, 2001)。

森林經營必須考慮風險及不確定性(risk and uncertainty)，其主要原因有三：一、林木生長期長，期間之生長環境及社會經濟狀況會有明顯劇烈的變動；二、木材價格在許多地區有劇烈變動的記錄；三、可比較投資不同森林產出之差異，以決定最適的森林投資時間(Brazee and Newman, 1999)。配合蒙地卡羅模擬法，森林經營者可有效評估各種森林經營之風險與不確定性。

蒙地卡羅模擬法可用以評估長期林業經濟之投資與報酬風險。例如 Dieter (2001)以德國南部地區雲杉及山毛櫸的實際生長資料及存活機率，配合蒙地卡羅模擬法計算土地期望價，探討雪害、病蟲害等自然風險是否會影響栽植樹種及輪伐期的決策。研究結果顯示，即使雲杉的林木存活機率明顯低於山毛櫸，其經濟收益卻較高，且在考量各種自然風險的情況下，其最適輪伐期從 90 年縮減為 80 年。該方法亦可應用於環境改變對植群演替的影響。Guan et al.(2003)以蒙地卡羅模擬法研究不同溫度、雨量等氣候變遷對臺灣中部地區森林植群型態組成的影響。以合社為例，當溫度增加攝氏 5 度時，暖溫帶常綠闊葉樹、夏綠型闊葉樹等植物型可能會逐漸消失，但熱帶雨林型可能會逐漸出現。當模擬雨量為正負 30%時，合社地區多數林型不變，但山地闊葉雨林可能會消失。Yin et al.(2009)也利用蒙地卡羅模擬法估算不同森林生態演替的特徵參數，並配合 Markov- chain transition model 模擬洪水密度對密西西比河上游森林生態演替的影響。研究結果指出，船閘及水壩的設置會改變洪災的頻率及強度，也間接影響樹種的組成，將會造成較多的 Fraxinus，較少的 Acer、Quercus 及 Ulmus 等樹種。在沒有洪災的狀況下，Acer 及 Quercus 將會成為優勢樹種，但其卻會因為洪災而使胸高斷面積及密度減少，而 Fraxinus 卻在洪災過後的環境會有較佳的生長狀況。Salas et al.(2006)研究，

以 Ripley's  $K(t)$ 公式推估 *Northofagus obliqua* 為優勢樹種的老齡林的林木存活機率，及邊緣效應(edge effect)以瞭解其空間分布型態(spatial pattern)。利用蒙地卡羅模擬法中的波瓦松分配，研究結果指出，*Aextoxicon punctatum* 由原本的隨機散落成為在一定空間中的群落，*Northofagus obliqua* 的分布則較為規則。而在林齡小於 100 年及高於 250 年的樹種間，會產生互斥效應(repulsion)，林齡較輕的樹種之間則會有相吸效應。

近年有關森林碳循環的研究漸多，但將不確定性納入森林碳循環預測的研究闕如，蓋因森林生態模式的研究重點多在於改善預測能力，而非減少變異；另因森林生態模式的重要參數仍不易掌握，故難以評估不確定性(Larocque et al., 2008)。Peltoniemi et al.(2006)指出，影響碳循環的重要參數可歸納為各物種的碳比重、林木、地上植物等生物量，由於經營者不易評估各種不確定性因素對森林之影響，蒙地卡羅模擬法較不適用於推估短期的森林碳循環評估，而宜應用於推估一年以上之森林碳循環狀況。



## 第肆章、三階複選目標規劃法之研究

本研究於此章的第一節中將探討傳統目標規劃法與複選目標規劃法在設定目標值時可能遺漏較佳解之問題。接著，以二元搜尋演算法配合複選目標規劃法提出三階複選目標規劃法之演算概念，解決目標值設定可能產生的問題。本研究最後在第三節中提出三階複選目標規劃法的設定步驟，以供後續使用者參考使用。

### 一、期望目標值設定概念之探討

決策者使用傳統目標規劃法時，需審慎設定目標值。Dyer et al. (1979)指出，傳統目標規劃法設定目標值時，是事先由決策者依照其經驗判斷或已知的訊息來決定，若決策者面臨資訊取得不易、或對狀況不甚熟悉的狀態下，則難以建立適當的目標值或偏好設定以符合其經營目標。本研究認為，Chang(2007)提出之複選目標規劃法優點在於可供決策者擺脫固有的經營決策思考框架，進而設定各目標的目標值有多重選擇，故有較高的機會找到更好的解。然而，利用複選目標規劃法設定目標值時，該方法仍會面臨同樣的問題，即該方法仍可能如傳統目標規劃法一樣，因為設定的目標值不當而遺漏更佳解。為使相關研究者更瞭解此問題，本研究以圖 4-1-1 表示。

圖 4-1-1 中，圖(a)與(b)分別表示兩種造成決策者使用複選目標規劃法時遺漏較佳解的主因。由於複選目標規劃法之演算概念與目標規劃法相同，故每次複選目標規劃法求得的解均可稱為「理解想」，決策者必須經過多次比較才可選出較佳的理解解，本研究稱此為最佳理想解(best ideal solution)。在圖 4-1-1 的(a)、(b)兩個圖中，假設決策者利用複選目標規劃法設定一個目標有兩個層級的目标值，分別為高層級(high level)及低層級(low level)的目标值。雖然決策者已設定此兩個層級的目标值，但其仍有可能無法確認他所設定的目标值是否接近所謂的最佳理想解，或者目标值設定範圍是否包含最佳理想解。

圖(a)表示目标值設定並未包含最佳理想解的狀態，由於複選目標規劃法的計算概念與傳統目標規劃法相同，均是希望離均差的總和最小，若以最佳理想解(best ideal solution)作為求解的結果，則會有虛線這段距離的離均差，但若以高層

級目標值為結果，則離均差為零，因此，被圈選的高層級目標值將成為「暫時」的最佳理想解。但決策者若持續設定越高層級的目標值並重複求解，最終將有機會找到更佳的理想解。然而，若不解決圖(b)可能產生的問題，即使將最佳理想解涵蓋在目標值設定範圍中，決策者依然無法接近或得到最佳理想解。

圖(b)中，決策者設定的高、低層級目標值範圍雖然涵蓋最佳理想解，但決策者仍會因為複選目標規劃法的演算概念以離均差總和最小為原則，故而只能選擇已設定之低層級目標值作為暫時的最佳理想解，以使離均差為零。因為，當以高層級目標值為解時，則與最佳理想解有離均差，而在以最佳理想解為解時，則會與已經設定的高、低層級產生離均差。

上述兩個目標值設定的問題同樣出現於傳統目標規劃法及複選目標規劃法，雖然此二問題均可透過重複設定目標值後，再經過多次重複計算以獲取接近最佳理想解的結果，但均無法保證決策者可獲得較佳的理想解。目前為止，並無相關研究針對圖(a)與(b)的問題進行討論並提出解決方法。本研究認為，此二問題可利用複選目標規劃法的特性，即設定一個目標有多個層級目標值的特性加以解決，故於下一節提出三階複選目標規劃法(3-level MCGP)的求解概念。

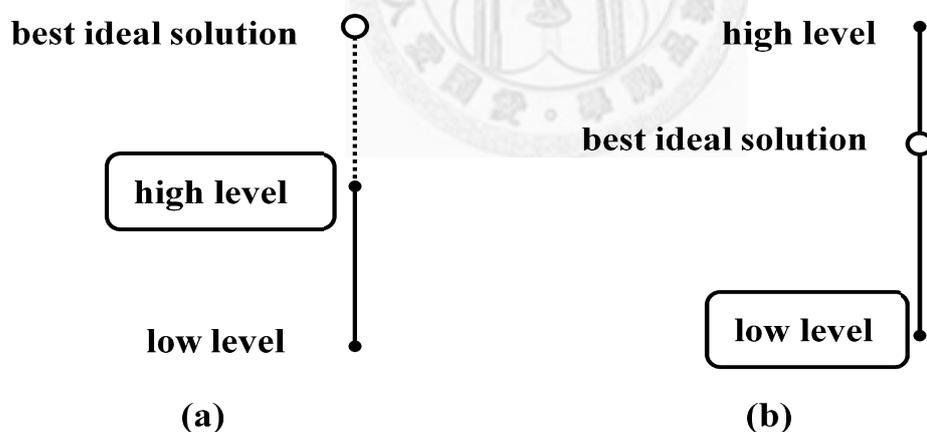


圖 4-1-1、複選目標規劃法之目標值設定偏差問題

## 二、三階複選目標規劃法之設定

本研究結合二元搜尋演算法(binary search algorithm)及複選目標規劃法，提出三階複選目標規劃法(3-level MCGP)的概念以確保決策者能盡量找到最佳理想解。在電腦科學(computer science)領域中，二元搜尋演算法可有效迅速的在一串排序過的數列中決定搜尋值(search value)，該演算法的概念是在每一次的搜尋過程中，在排序後的數值範圍內，設定上界、下界及中間值，藉此在每次疊代(iteration)過程中減少一半的搜尋範圍。假設該數列共有  $n$  個數值，則利用二元搜尋演算法，則可在不超過  $\log_2 n + 1$  的搜尋次數內，找到搜尋值(Levitin, 2003; McAllister, 2007)。

由於決策者通常會面臨缺乏經驗或資訊可供參考的狀況，因此，決策者設定目標值時往往會有設定的目標值遠離最佳理想解的問題，或者最佳理想解不在設定目標值所形成的搜尋範圍內。若利用二元搜尋演算法的概念，決策者可以其專業知識擴大目標值的搜尋範圍，之後在每次目標值搜尋範圍內設定三個目標值，藉此系統化的縮小搜尋範圍，以求得一個能盡量靠近最佳理想解的解。該演算法可稱為三階複選目標規劃法(3-level MCGP)，相較於複選目標規劃法(MCGP)，其優點在於可使決策者有系統的將搜尋範圍以對數函數的形式縮減，省略一連串的目標值設定與比較，以有效找到較佳的理想解。

本研究假設決策者利用已知資訊與知識，設定一個包含最佳理想解的搜尋範圍，以避免第肆章第一節的圖 4-1-1(a)描述的狀況，接著，再以三階複選目標規劃法求解，並希望求得的解能越高越好，該求解概念以圖 4-1-1 表示。在第一次求解過程中，決策者分別設定( $H_0$ )和( $L_0$ )為最高層級及最低層級的目標值，並在此二者中設定一個中間層級的目標值( $M_0$ )將搜尋範圍分割為二。若以最佳理想解為求得解，其與三個已設定之目標值均會產生離均差，且與  $M_0$  的離均差最小。若以最高層級目標值為求得解，由於資源受限，無法達成此目標，故必定與最佳理想解會產生離均差。若以最低層級目標值為求得解，雖然離均差為零，但依照希望目標值越高越好的設定<sup>10</sup>，則會轉而以  $M_0$  為第一次求解的理想解，因可使目標值離均差為零，且最接近最佳理想解。此即傳統目標規劃及複選目標規劃在

---

<sup>10</sup> 詳見第參章第四節的第一小節中，複選目標規劃法參考模糊理論設定以使目標值求解越多越好或越少越好。

設定目標值的缺失，導致決策者不見得可以獲得較佳理想解的原因。

依照三階複選目標規劃法的求解概念，決策者爲了避免遺漏最佳理想解，或求得一個盡量靠近最佳理想解的答案，基於希望求得數值越高越好的原則下，假設在中間層級目標值( $M_0$ )及最高層級目標值( $H_0$ )中間存在一個更佳的理想解，故在第二次求解過程中，將原來的中間層級目標值( $M_0$ )設定爲第二次求解時的最低層級( $L_1$ )，最高層級目標值( $H_0$ )仍爲第二次求解的最高層級( $H_1$ )，在( $L_1$ )與( $H_1$ )之間再取一個中間層級的目標值( $M_1$ )。在第二次求解時可見， $M_1$  與最佳理想解的離均差小於  $L_1$  與最佳理想解的離均差，然而， $L_1$  將會是第二次求解的理想解，因爲選擇  $L_1$  作爲求得解將可使離均差爲零。重複三階複選目標規劃法的求解過程，則第三次求解過程所求得的解將是  $M_2$ 。重複三階複選規劃，決策者將能得到一個最靠近、甚至直接是「最佳理想解」的理想解。然而，只要決策者滿意所求得的解，則可隨時停止搜尋過程，若不滿意，則可持續搜尋。

總結三階複選目標規劃法的優點有二。首先，該方法以對數的形式在每次求解過程中將搜尋範圍減半( $m/2^1, m/2^2, m/2^3, \dots, m/2^n$ ,  $m$  是搜尋範圍,  $n$  是求解次數)，故可精確且有效的將求得的理想解盡量收斂至最佳理想解附近，以降低遺漏較佳理想解的機率。第二，針對特定目標設定較高層級的目標值，可視爲一種設定目標權重或次序的替代方法。決策者可省略設定決策偏好的過程，但仍可利用該方法獲得較佳的理想解。綜而言之，三階複選目標規劃法對於搜尋較佳理想解而言，是一個有效且系統化的求解演算法。

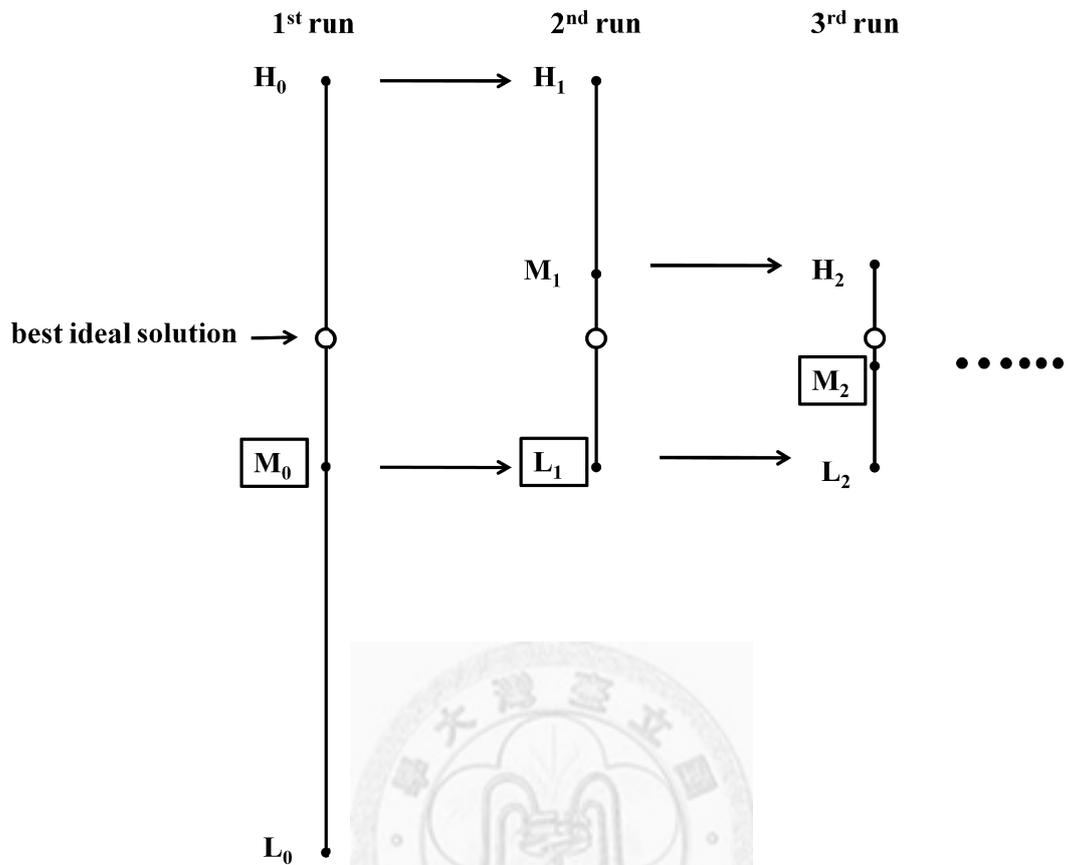


圖 4-2-1、三階複選規劃法之求解概念

### 三、三階複選目標規劃法設定步驟

本研究於此小節中提出系統化操作三階複選目標規劃法的步驟，以供後續研究者操作使用。以三階複選目標規劃法求解的步驟係將每個目標設定三個層級的目標值，藉由重複上述步驟有效的減少搜尋範圍以獲取較佳的理想解。本研究同時提出停止該步驟的參考法則，使決策者節省求解時間。基於希望目標值越多越好的概念，本研究將此項簡單且系統化求解的設定過程臚列如下，若決策者希望目標值越低越好，同樣也可依照此步驟重複設定求解。

1. 決策者以自身經驗或相關資訊，設定每個目標最高及最低的期望目標值。為避免設定的搜尋範圍遺漏較佳理想解，決策者可以擴增自己設定的最高期望目標值，例如增加 10%、20%，甚至 100%。若在求解過程中發現設定之目標值搜尋範圍仍無法包含較佳理想解，決策者可依照求解時面臨的狀況調整搜尋範圍。
2. 決策者在最高及最低目標值形成的搜尋範圍內建立一個中間點，即中間層級的目標值，該目標值可以是最高及最低目標值的平均數，也可簡化之，設定為任何一個接近最高及最低目標值平均數的整數值。
3. 指定每個目標有三個層級的目標值後，以複選目標規劃法求取理想解。
4. 若決策者對求得的解不滿意，可重複三階複選目標規劃法的步驟搜尋較佳的理想解。決策者可依據前一次求解過程所獲得的解，設定新的高、低及中間層級目標值。如果低層級目標值是前一次求解過程的解，則仍可以此為新的低層級目標值，而前一次求解過程中的中間層級目標值，則可作為新的高層級目標值，並在此搜尋範圍中重新設定新的中間層級目標值。若其中一個目標求得的解是設定的高層級目標值，則決策者可保持該目標的原始設定以作為不同目標間的緩衝。決策者亦可依照經驗或偏好，替每個目標試著建立更高的三個層級。
5. 決策者重複上述步驟直到每個目標值的百分比改變極小甚至不再變動。決策者可依其經營需求，自行設定停止重複設定三階複選目標規劃法的法則，例如規定百分比的改變低於 5%、1% 或者 0%。如果百分比的改變為 0%，而決

策者仍然相信研究結果仍有改善空間，可依照研究結果重新建立搜尋範圍，繼續重複三階複選目標規劃的步驟。

本研究認為，將每個目標設定越多個層級的目標值，可有更高的機率找到較佳理想解，且能更迅速的縮減目標值搜尋範圍。舉例來說，建立每個目標有四個層級，則每次計算可減少三分之一的搜尋範圍，所需計算次數也不會超過  $(\log_3 n + 1)$  次。此種在每個目標的搜尋範圍內設定四個階層目標值的計算效率似乎較設定三個階層高，然而，建立  $n$  個階層將會需要增加  $\ln n / \ln 2$  個額外的二元變數(Chang, 2007)。如此一來，更多的二元變數將會使決策者建立二元變數組合的過程更為複雜，而且也會造成電腦計算負擔。基於簡化二元變數的原則，本研究建議，建立每個目標有三個階層的計算方式操作較為簡易，但決策者仍可依其特殊需求若欲建立更多層級求解。



## 第五章、疏伐成本效能及不確定性評估

台灣有約 42 萬餘公頃的人工林，多數已屆鬱閉狀態，森林減碳功效漸減，可施以適當的疏伐作業獲取疏伐木，並刺激林木生長量以增加其減碳效果。然而，疏伐後之林木生長可能面臨各種狀況致使林木收穫結果面臨不確定性，需透過適當的評估提供森林經營者可靠的資訊，方能選擇減碳成本效能最佳的疏伐方法以降低森林經營風險。因此，本研究將以臺灣人工林主要樹種柳杉為例，以蒙地卡羅模擬法模擬不同疏伐程度可獲得之碳替代效果以及疏伐後 30 年林木生長相較於不疏伐時之碳吸存增量，並由平均數、標準差及變異數係數評估不同疏伐程度在延長輪伐期後的減碳效果及其成本效能，然後提出因應減碳的適當疏伐方法。

### 一、蒙地卡羅模擬模型設定

本研究利用蒙地卡羅模擬法，分析 25 年生柳杉林在不同強度的疏伐後 30 年相對於不疏伐的減碳效果，並評估其成本效能及不確定性。在設定 25 年生柳杉林疏伐的減碳模擬模型前，本研究先設定疏伐及主伐的時間，再依據楊榮啓等（2003）之柳杉收穫表，查訂此齡級柳杉胸徑為 21.43cm，而此胸徑之疏伐木已具利用價值。柳杉輪伐期為 30 年，然疏伐作業可使輪伐期延長，故本文設定疏伐後可延長主伐期 30 年，即在 55 年生時再進行主伐。

設定疏伐及主伐時間後，本研究再設定疏伐減碳模擬模型，並以蒙地卡羅模擬法進行 1000 次抽樣模擬。本研究之研究流程主要有三，首先為建立疏伐減碳模擬模型，包括強度(60%)、中度(40%)及弱度(20%)疏伐之碳替代量及疏伐後 30 年之碳吸存量，以及建立所需之模擬參數，包括疏伐後 30 年之蓄積量、疏伐成本、柳杉比重、含碳量等。其次，以蒙地卡羅模擬法進行抽樣。最後以變異數分析(ANOVA)之雪費(Sheffe)檢定、變異係數及累積機率分佈探討不同疏伐處理之減碳效果及其成本效能。茲將研究流程臚列如下。

以上疏伐及主伐時間決定後，本研究再設定疏伐的減碳模擬模型，並應用蒙地卡羅模擬法針對不同疏伐強度進行重複模擬，再以模擬之減碳效果配合疏伐費用分析強、中、弱三種疏伐的成本效能指數及不確定性。茲將模擬分析步驟說明於下。

### (一)疏伐減碳模擬模型設定

疏伐減碳模擬模型旨在估算 25 年生柳杉林，在被施以不同程度疏伐後 30 年可獲得的減碳效果及費用，以分析其成本效能指數及不確定性。減碳效果的計算方式係利用 IPCC 公式將疏伐材及主伐材積轉換為二氧化碳量，藉以評估不同疏伐程度相對於不疏伐時，每單位面積所能獲取之減碳增量。本研究所指之減碳效果係由碳吸存量與碳替代量兩者加總後減去未疏伐林分之碳吸存量而得，碳吸存量係透過疏伐刺激保留林木生長所能獲得二氧化碳數量，碳替代量則為利用疏伐木做為建材、燃料等，替代使用水泥和化石燃料使用時，所減少的二氧化碳排放量。另將減碳效果除以疏伐費用（以千元為單位），即每支出疏伐費用一千元所減之二氧化碳量作為疏伐減碳的成本效能指數，用以比較不同疏伐的減碳效能。不確定性的模擬則由柳杉生長模式及疏伐成本模式計算疏伐、主伐時期的林木收穫、疏伐成本的平均數與標準差，由上述兩者的標準差模擬林木經營面臨之不確定性。

### (二)蒙地卡羅模擬法之應用

完成以上疏伐減碳模擬模型之建置後，本研究假設疏伐後之林木生長及疏伐成本均屬常態分布<sup>11</sup>，以蒙地卡羅模擬法隨機給予分布參數並重複 1,000 次，以計算不同疏伐的減碳效果、疏伐減碳成本效能指數之平均數、標準差與變異係數。

### (三)不同疏伐之減碳效果分析

依據以上模擬結果，本研究首先檢驗各疏伐之減碳成本效能指數是否為常態分布，再以變異數分析檢證不同疏伐之效能指數是否呈現差異，最後利用減碳效果的變異係數及成本效能指數的累積機率分布評估不同疏伐的減碳效果與不確定性。

---

<sup>11</sup>學者建置生長模式的資料多來自林分結構較為均質的人工林資料。一般模擬均以人工林為對象，以減少模擬時可能面臨之不確定性。本研究以人工林為模擬對象，假設林木生長屬常態分佈係指林分內的結構不會有直徑差異甚大、分佈不均的狀況。

## 二、模型參數設定

在疏伐與生長模擬模型中，三個設定參數分別為疏伐木收穫量、疏伐後 30 年柳杉林分蓄積量及疏伐成本。首先，本研究先設定三種疏伐程度，分別是砍伐蓄積量 60% 的強度疏伐，40% 的中度疏伐及 20% 的弱度疏伐，再依據楊榮啓及林文亮(2003)在溪頭進行調查所得之柳杉收穫表，推估以上三種疏伐及不疏伐將砍伐的立木株數、材積及保留林木的蓄積，如下表 5-2-1。由此表可見，強、中、弱疏伐的株數分別為 704 株、469 株及 235 株，疏伐木的材積各為 235.016 m<sup>3</sup>、156.566 m<sup>3</sup> 及 78.45m<sup>3</sup>，另未疏伐的株數及材積均以 0 表示。

表 5-2-1、不同疏伐程度之疏伐木收穫

疏伐程度	疏伐株數	疏伐材積(m <sup>3</sup> /ha)	留存蓄積(m <sup>3</sup> /ha)
60%	704	235.016	158.349
40%	469	156.566	236.799
20%	235	78.450	314.915
0%	0	0	393.365

註：25 年生柳杉林分之立木株數為 1173 株。

疏伐 30 年後之林分蓄積推估及總收穫材積列於表 5-2-2，此表係依據楊榮啓及林文亮(2003)之柳杉林收穫表設定 25 年生柳杉林的初始林況，再利用高強(1982)的柳杉生長模式計算柳杉林疏伐後 30 年的蓄積量，並以蓄積量的標準差表示疏伐結果的不確定性。因疏伐愈強愈可增加保留林木之生長，但也使林木生長風險提高，故本研究假設強、中、弱疏伐及未疏伐在 30 年後材積之變動分別為生長模式估計值的上下±30%、±22.5%、±15%及±7.5%範圍內，並設變動的分布為常態，在 90%的信賴區間內，以 Z 值公式計算其標準差。

表 5-2-2、55 年生之林分蓄積推估

疏伐程度	30 年後蓄積(m <sup>3</sup> /ha)		蓄積增量(m <sup>3</sup> /ha)
	平均數	標準差	
60%	417.741	64.848	259.39
40%	514.044	69.311	277.25
20%	595.445	70.133	280.53
0%	667.740	68.594	274.38

表 5-2-2 顯示，弱度疏伐在 55 年生時，即林分疏伐 30 年後，所增加之蓄積量最多，為 280.53 m<sup>3</sup>/ha，中度疏伐次之，為 277.25 m<sup>3</sup>/ha，未疏伐為 274.38 m<sup>3</sup>/ha，強度疏伐最低，僅 259.39 m<sup>3</sup>/ha。以上可見，就疏伐後的蓄積量增加而言，以弱度疏伐優於中度疏伐，又優於強度疏伐。另以疏伐 30 年後之蓄積量而言，強、中、弱及未疏伐之蓄積量分別為：417.742、514.044、595.445 及 667.740 m<sup>3</sup>/ha，標準差各分別為 64.848、69.311、70.133 及 68.594 m<sup>3</sup>/ha，以上為生長模型設定之疏伐後林分蓄積參數。

本研究以鄭欽龍等(2006)建置之人工林疏伐成本模式<sup>12</sup>，將不同疏伐強度之疏伐株數帶入，推估含砍伐及搬出疏伐木所需之成本。並假設疏伐成本為常態分布，利用 Judge et al. (1988)之公式計算疏伐成本的標準差，用以表示疏伐成本的不確定性。經本研究計算，強、中、弱三種疏伐每公頃的成本分別為 243,710 元、198,130 元、152,750 元，標準差為 15,754 元、8,220 元及 6,100 元；疏伐成本及其標準差皆隨疏伐強度愈強而愈高。



<sup>12</sup> 該模式為  $TC=48776-23132 \times DR+14.7 \times N+58400 \times M+179.24 \times MN$ 。TC：每公頃疏伐成本；DR，區域別，為虛擬變數，花東地區管理處為 1，其餘林管處為 0；N：疏伐株數；M，搬出與否，為虛擬變數，搬出為 1，不搬出為 0；MN：疏伐木搬出株數。其中，疏伐株數的模擬係由楊榮啓、林文亮(2003)之柳杉收穫表計算 55 年生每株林木的材積後，由生長模式模擬 25 年生柳杉於疏伐後 30 年每公頃之林分蓄積量換算而得。

### 三、成本效能指數與風險分析

本研究利用 SAS 統計軟體進行蒙地卡羅模擬分析，假設林木生長面臨之不確定性分佈屬於常態分佈，以亂數產生器從常態分布中，隨機抽取 1000 個變數值，即模擬 1000 次。然後，計算不同疏伐處理的減碳效果及其成本效能之平均數及標準差，再以此計算變異係數及進行 ANOVA 分析以比較不確定性下不同疏伐處理的減碳成本效能。不同強度的疏伐相對於未疏伐的碳替代量與碳吸存增量及減碳效果，經本研究利用蒙地卡羅法模擬 1,000 次的結果，整理如表 5-3-1。

表 5-3-1、不同疏伐程度的減碳效果

疏伐程度	碳替代量 (ton/ha)	碳吸存增量 (ton/ha)	減碳增量 (ton/ha)		
			平均數	標準差	變異係數
強	82.04	150.64	72.99	38.33	52.51%
中	54.65	161.01	55.97	40.97	73.20%
弱	27.38	162.92	30.61	41.46	135.45%

首先，材積轉換成二氧化碳量的計算方法係採用 IPCC 公式，以柳杉材積分別乘以柳杉比重、碳轉換係數及二氧化碳相對於碳的分子量比（即 44/12）而得。其中柳杉比重採 Fukuda et al.(2003)研究之 0.319ton/m<sup>3</sup>，碳轉換係數則採林裕仁、劉瓊霖及林俊成(2002)、李意德等(1998)及林俊成、鄭美如等(2002)之研究結果的平均數，即 0.4974。經以上換算式，材積 1m<sup>3</sup> 的柳杉含二氧化碳重 0.582 公噸。另疏伐木可用於製作桌椅家具或提供生態工法所需建材（王松永等，2005），其立木材積利用率設為 60%，故 1m<sup>3</sup> 柳杉的碳替代量 0.349 公噸。

由上表可見，每公頃柳杉林進行強度疏伐，即伐除 60% 的林分蓄積可獲得以二氧化碳計算之碳替代量 82.04 公噸，伐除蓄積 40% 的中度疏伐可得 54.65 公噸，20% 的弱度疏伐為 27.38 公噸。進行疏伐後 30 年，弱度與中度疏伐的碳吸存增量分別為每公頃 162.92 公噸及 161.01 公噸的二氧化碳，而強度疏伐的增量略低，為每公頃 150.64 公噸。然而，合併疏伐木的碳替代量與疏伐的碳吸存增量的減碳效果則以強度疏伐最高，相較於未疏伐之林分，其可減少之二氧化碳增量為每公頃 72.99 公噸，中度疏伐次之，為 55.97 公噸，弱度疏伐最少，為 30.61 公噸。以上可見，強、中、弱疏伐相對於未疏伐均有更高的減碳效果。此外，弱度疏伐之變異係數最高，為 135.45%，中度疏伐為 73.20%，強度疏伐為 52.51%，顯示

疏伐強度愈低，其不確定性反愈高。而此不確定性差異主要來自於碳替代量，愈強度的疏伐有愈多的疏伐木收穫，碳替代量較 30 年後的碳吸存增量更確定，故整體的碳減量效果變異範圍愈小。

表 5-3-2 中所列為依據不同疏伐的成本及減碳效果所算出的成本效能指數及其統計結果。為了進行統計推論，本文先檢驗依據蒙地卡羅法模擬所得的減碳成本效能是否屬常態分配，並計算平均數及信賴區間，其結果如表 5-3-2 所列。

表 5-3-2、不同疏伐的減碳成本效能指數

疏伐程度	常態分配檢定機 率值		成本效能指數 (kg/1000NT\$)	標準差	變異係數	95%信賴區間	
	S-W	K-S				下界	上界
強	0.237	0.101	521.08	161.57	31.00%	511.05	531.10
中	0.499	0.150	553.59	208.49	37.66%	540.65	566.53
弱	0.598	0.150	551.75	272.96	49.47%	534.82	568.69

本研究先減碳蒙地卡羅法模擬所得的減碳成本效能指數是否為常態分配，依據 Shapiro-Wilk(S-W)及 Kolmogorov-Smirnov(K-S)兩項常態分布檢定法的機率值均大於 0.05，顯示三種疏伐的減碳成本效能指數的分布均為常態。本文再以變異數分析比較三種疏伐的減碳成本效能指數是否具差異，從 Sheffe 多重比較檢定可知，中度疏伐與弱度疏伐的成本效能指數在統計上無顯著差異，但兩者的成本效能指數明顯高於強度疏伐。以每支出一千元的疏伐成本所獲得的二氧化碳減量為效能指數，則中度疏伐最高，平均數為 553.5 kg/千元，標準差為 208.49 kg/千元，而其 95%信賴區間介於 540.65 kg/千元至 566.53 kg/千元；弱度疏伐的效能次之，平均數為 551.75 kg/千元，標準差為 272.96 kg/千元，95%信賴區間介於 534.82kg/千元至 568.69 kg/千元；強度疏伐的效能最低，平均數為 521.08 kg/千元，標準差為 161.57 kg/千元，95%信賴區間介於 511.05 kg/千元至 531.10 kg/千元。

將標準差除以平均數可得變異係數，用以表示不同疏伐的成本效能的不確定性，由上表可見，強度疏伐成本效能指數的變異係數最低，為 31.00%，中度疏伐次之，為 37.66%，弱度疏伐最高，為 49.47%。

適當的疏伐減碳方案，除了考慮成本效能也須兼顧不確定性，本研究進一步探討在給定的預期成本效能指數下，不同疏伐低於該指數的機率，以提供更完整的決策資訊。表 5 為三種疏伐對不同的預期成本效能指數的機率。

所謂最適疏伐成本效能必須兼顧每單位成本能達成之減碳量及其面臨之不確定性，雖然施行強度疏伐面臨之不確定性低於中度及弱度疏伐，但其成本效能居三者之末，故此三種疏伐處理之成本效能優劣仍有待商榷。本研究進一步探討在給定可接受之期望成本效能下，不同疏伐處理低於該成本效能之累積機率，以提供更完整之森林經營資訊。各疏伐處理在不同成本效能下之累積機率如表 5-3-3 所示。

表 5-3-3、不同疏伐之成本效能指數之累積機率

疏伐程度	小於 520 kg/千元	大於 550 kg/千元
強	49.73%	42.90%
中	43.60%	50.69%
弱	45.37%	50.26%

因成本效能指數最低者為強度疏伐的 521.08 kg/千元，最高者為中度疏伐的 553.59 kg/千元，故表 5 分別列出三種疏伐的成本效能指數小於 520 kg/千元及大於 550 kg/千元的機率。由此表可見，效能指數小於 520 kg/千元的機率以強度疏伐最大，為 49.73%，中度疏伐次之，為 43.60%，弱度疏伐為 45.37%。亦即若以小於 520 kg/千元為低減碳效能，則強度疏伐屬低效能的風險最大，而中度疏伐最小。就此風險而言，中度疏伐優於弱度疏伐，而弱度疏伐優於強度疏伐。相反地，若以成本效能指數大於 550 kg/千元為高減碳效能，中度疏伐優於此高效能指標的機率為 50.69%，為最大，弱度疏伐其次，機率為 50.26%，惟兩者之差別甚微；強度疏伐的效能指數超過前述高效能的機率為 42.90%，為三者之最低。

#### 四、小結

本文依據柳杉生長模式以蒙地卡羅模擬法重複模擬不同疏伐強度對蓄積的影響，進而估計三種疏伐的減碳量和減碳成本效能指數及其分布範圍。本研究估算的疏伐減碳成本效能指數視疏伐強度而不同，其平均數為強度疏伐的 521.08 kg/千元，弱度疏伐的 551.75 kg/千元，以及中度疏伐的 553.59 kg/千元。中度疏伐的效能稍優於弱度疏伐，但統計上差異不顯著，但兩者的效能皆明顯高於強度疏伐。就減碳效能的不確定性而言，亦是中度疏伐與弱度疏伐差別甚微，但兩者顯著優於強度疏伐。

本文計算的疏伐減碳的效能與國內學者估算的造林減碳效能相似。如李國忠等(2000)估算台灣杉人工造林，支出每千元有 398.55 kg 到 2234.29 kg 的二氧化碳吸存量。林俊成等(2002)指出造林 13 年後，二氧化碳吸存效能為 550.13 kg/千元，此與本研究計算的減碳效能十分接近，而造林 20 年後為 731.72kg/千元，效能高於疏伐。然而，台灣目前禁伐天然林，人工林皆伐亦受面積限制，故要取得大面積林地新植造林的可能性甚低，倘若要移轉大面積農地進行造林則限制農地使用的機會成本也相當高，如現行的平地造林補助金額高於一般造林一倍以上。因此，以疏伐再延長伐期來減碳不失為可行的森林經營方法，就成本效能而言，中度疏伐為最優先的選項，弱度疏伐其次，強度疏伐可不予考慮。

## 第陸章、MCGP 及 3-level MCGP 於森林經營之應用

複選目標規劃法及三階複選目標規劃法適用於求解多目標森林經營問題，故本研究使用 Arp and Lavigne (1982)發表之加拿大多目標森林經營案例建置複選及三階複選規劃法之模型。本章節中首先詳細介紹加拿大案例，包括案例設定之決策變數、經營目標及林況。接著，應用 MCGP 可設定單一目標有多個層級目標值的特性，操作 Lingo 軟體探討可達成各經營目標期望目標值的最適經營期程。第三，針對最適經營期程，以 MCGP 設定各目標有較高層級目標值，探討 MCGP 是否可找到較傳統 GP 更佳的林地規劃。第四，同樣針對最適經營期程，以 3-level MCGP 求解，探討該方法相較於 MCGP 及傳統 GP 的求解效率。最後，更進一步探討 3-level MCGP 相較於 GP 在林地規劃之差異，以瞭解何種林地配置可達成較高的森林經營目標。

### 一、加拿大多目標森林經營案例

Arp and Lavigne (1982)由加拿大林地中挑選一個由十個林班(compartment)<sup>13</sup>組成的森林作為研究對象，森林面積總計 11,070 公頃。研究者將面積視為決策變數，探討四個林地利用政策(A, B, C, D)在各個林班中的面積分配。四個林地利用政策的內容如表 6-1-1 所示，各政策中包含不同的林地利用目標，政策 A 中不包含木材收穫目標，政策 B 不包含開發式遊憩目標，政策 C 則不包含開發式及分散式遊憩目標。由於各林班中均有固定的林地面積不適合遊憩或伐木等開發活動，故各林班均有固定面積施行政策 D。

為使閱讀者更方便理解該研究的研究架構，本研究將其表示為  $X_{ij}$ ， $X$  是代表面積這項決策變數， $i$  代表十個林班地( $i=1$  to 10)， $j$  代表四個林地使用政策( $j= A, B, C, D$ )。若排除固定面積之政策 D，則總共有 30 種林地使用面積需進行決策。

<sup>13</sup> 林業行政劃分將國有林區的管轄單位區分為「事業區」、「林班」及「小班」三種。「事業區」為台灣森林經營之獨立單位，需配合集水區境界而劃定範圍，是永久固定的森林經營單位。其面積大小係以獨立合理經營之範圍為原則。「林班」是事業區內為施業方便及表示位置，依天然地形分劃而成的永久性森林區劃單位，無論森林狀態如何，原則上係以嶺線、溪流等地形線為分劃之依據。「小班」指林班內之森林，依樹種、林齡、作業法、地位、地利及土地利用之不同，所區劃的臨時性施業單位，是施業實行上所設立之林地區劃最小單位，依林班內林木狀況之不同，考慮樹種、林齡、林況或地況之一致，以及地種之區分等而分劃。

表 6-1-1、林地利用政策

林地使用	Policy A	Policy B	Policy C	Policy D
分散式遊憩 (dispersed recreation)	v	v	-	-
開發式遊憩 (developed recreation)	v	-	-	-
狩獵 (hunting)	v	v	v	v
木材收穫 (timber harvesting)	-	v	v	-
野生動物 (wildlife)	v	v	v	v

資料來源：Arp and Lavigne (1982)

本研究進一步說明 Arp and Lavigne (1982)的研究設定與研究結果。Arp and Lavigne (1982)分析短(2年)、中(12年)及長(36年)經營期程中，該片森林可生產之分散式遊憩(dispersed recreation)、開發式遊憩(developed recreation)、狩獵(hunting)、木材收穫(timber harvest)及野生動物(wildlife)等五個森林經營目標。

各經營目標的期望目標值列於表 6-1-2，木材收穫在 2 年經營期程的期望目標值為 20,000 立方公尺，12 年經營期程為 120,000 立方公尺，36 年經營期程為 364,751 立方公尺。其餘目標並未設定不同經營期程的目標值，而是設定固定的期望目標值，分散式遊憩目標的期望目標值為 1,000 天，開發式遊憩目標為 320 天，狩獵目標為 957 天，野生動物目標為 125 隻。Arp and Lavigne (1982)同時設定四種包含不同權重的經營方案代表四種經營偏好，因此，該研究共以傳統的目標規劃法計算 12 次(3 個經營期程，各 4 種經營方案)，並比較短、中及長期經營規劃的經營結果，及比較不同經營期程時，各目標是否有互競或互補之狀況。在研究方法的使用上可見，傳統目標規劃法的設定較為繁雜，包括權重的設定及各方案的模擬，使用操作上顯然不便。

在研究結果及模擬方案的比較方面，Arp and Lavigne (1982)並未指出何種經營期程的研究結果較佳，但由傳統目標規劃法的模擬結果可知，12 年經營期程的模擬結果顯然可滿足所有目標最初設定之期望值，而 2 年及 36 年經營期程求得的解則均有部分目標無法達成預定之期望目標值，故 12 年顯然是能達成期望目標的適當經營期程。若再觀察 12 年經營期程中，原作者設定的四個模擬方案所能求得的解可見，第三及第四個經營方案所求得的解較佳，故本研究僅挑選第

三個經營方案，也就是給予發散式、開發式及木材生產等三個目標較高權重及考量順序的研究結果列於表 6-1-2 說明。第三個經營方案中，2 年經營期程研究結果的狩獵目標及野生動物目標分別只有 674 天及 119 隻，低於預期。在 36 年經營期程中，木材生產目標則低於原先預期，只有 297007 立方公尺。僅有 12 年經營期程能符合所有的經營目標，其木材收穫為 120,000 立方公尺，分散式遊憩目標為 27,259 天，開放式遊憩目標為 612 天，狩獵目標為 1216 天，野生動物目標為 125 隻。

由第三個經營方案中各期程求得解的比較可知，12 年經營期程顯然相較於 2 年及 36 年經營期程能達成作者既定之森林經營目標。然而，Arp and Lavigne (1982) 必須以傳統目標規劃法重複計算多次才能進行比較，經營決策的效率較低。此外，Arp and Lavigne (1982) 總共設定包含不同權重的四種經營方案，雖可透過權重和次序的設定找到更好的經營結果，但這些設定不見得是最佳設定，求得的解是否為最佳解也值得商榷。

表 6-1-2、加拿大案例之期望目標值及研究結果

	期望目標值	目標規劃解		
		2- year horizon	12- year horizon	36- year horizon
木材收穫	2 year:20000(m <sup>3</sup> ) 12 year:120000(m <sup>3</sup> ) 36 year:364751(m <sup>3</sup> )	20000	120000	297007
發散式遊憩	1000(天)	39334	27259	9928
開發式遊憩	320(天)	612	612	320
狩獵	957(天)	674	1216	2077
野生動物	125(隻)	119	123	125

## 二、MCGP 決策最適經營期程之效率

決策者可利用複選目標規劃法設定各目標擁有多個層級之目標值，以同時進行多個經營方案之比較。Arp and Lavigne (1982)將其研究案例之經營期程設定為 2 年、12 年及 36 年，並將木材產量設定為 20,000、120,000 及 364,571 立方公尺代表不同經營期程的木材生產目標，以此探討不同經營期程中，木材產量與其餘森林經營目標的折衷平衡(trade-off)。然而，作者必須進行三次目標規劃法以求得此三種不同經營期程之結果。此外，作者也未明確說明在預定的期望目標值下，何種經營期程最為適當，僅可由研究結果得知在 2 年及 36 年經營期程時，會有部分目標低於原先設定之期望目標值，以此研判 12 年可能會是該案例之最適經營期程。

若以複選目標規劃法探討最適經營期程，應可節省決策者的決策過程。故本研究試著以複選目標規劃法重新探討該片加拿大森林之最適經營期程，改寫後之方程式可表示如下<sup>14</sup>。

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^n (d_i^+ + d_i^-) \\ & \text{s.t. } f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = T \\ & T = 20000 \times b1 \times b2 + 120000 \times b1 \times (1 - b2) + 364571 \times b2 \times (1 - b1) \\ & T / (364571 - 20000) + d_i^+ - d_i^- = 364571 / (364571 - 20000) \\ & i = 1, 2, \dots, n, \\ & \dots \end{aligned}$$

由於其餘經營目標不需採用複選目標規劃法設定，故本研究僅列出木材生產目標的方程式設定。在方程式中， $T$  代表木材生產，三個經營期程的木材生產期望目標值可視為該目標擁有三個層級的目標值可供決策者選擇，即木材生產量可視為一項決策變數。 $b1$  及  $b2$  分別代表二元變數(binary variable)，當  $(b1, b2)$  分別等於  $(1, 1)$ 、 $(1, 0)$  及  $(0, 1)$  時，則木材產量 20,000、120,000 及 364,571 會個別成立。由於本研究希望能有較高之木材生產量以滿足長期的森林經營需求，故再利用 Chang(2007)應用之模糊理論(fuzzy theory)概念設定第四行方程式，以期望木材產量能越多越好，即能在滿足其餘森林經營目標的狀況下，提供較長的經營期程。此外，本研究希望求得之各目標解不低於原先設定之期望目標值，另以限制式設

<sup>14</sup> 模擬所需參數值及目標值詳見附錄一，係掃描自原文。

定各目標求得解不得低於原先的期望目標值。

複選目標規劃決定最適經營期程之結果如表 6-2-1 所示。表中可見，木材收穫目標的結果為 120,000 立方公尺，而其餘森林經營目標的結果均高於原先設定的期望目標值，發散式遊憩為 25,416 天，開發式遊憩為 341 天，狩獵為 1,150 天，而野生動物為 127 隻。由此研究結果可知，中期程(12 年)顯然是能滿足既定經營目標的經營期程，而不會因為目標間有折衷平衡(trade-off)的狀況而使部分目標低於預定之目標期望值。

由此顯示，複選目標規劃法確實可協助經營者迅速決定適當的經營期程。若以傳統的目標規劃法計算，則森林經營者必須操作三次目標規劃法分別計算短、中及長期可達成的森林經營目標，但利用複選目標規劃法則只需操作一次即可得知最適經營期程。

表 6-2-1、最適經營期程決策

	期望目標值	MCGP 求得解
木材伐採(m <sup>3</sup> )	20000(2 年) 120000(12 年) 364571(36 年)	120000
發散式遊憩(天)	1000	25416.01
開發式遊憩(天)	320	340.94
狩獵(天)	957	1149.97
野生動物(隻)	123	127.04

### 三、MCGP 求取最適經營期程之較佳解

在找出最適經營期程後，本研究再以複選目標規劃法嘗試尋找 12 年經營期程的更佳解。在此小節中，本研究假設森林經營者處於決策資訊不明的狀況，遂任意設定各目標的目標值，以此探討下面所述兩個問題：

1. 確認決策者是否可利用複選目標規劃法擴張可行解的搜尋範圍，藉此找到更佳解。
2. 與原作者 Arp and Lavigne (1982)所求得的 12 年經營期程最佳理想解作比較，探討是否會出現如第肆章第一節中所陳述的問題，即目標值設定若與最佳理想解相距甚遠，則無法找到更佳的理想解。

如前面第陸章第二節之表 6-2-1 所示，本研究希望在 12 年的經營期程下，其餘各目標的產值能增加，因此本節針對各目標任意設定二到三個更高層級的目標值，將發散式遊憩的目標值設定為 25,416、26,000 及 26,500 天，開發式遊憩的目標值設定為 341 及 360 天，狩獵的目標值設定為 957、1,000 及 1,050 天，野生動物的目標值設定為 127 及 130 隻。

表 6-3-1 中的研究結果顯示，幾乎所有目標的解均較第一次求得的解佳，僅有野生動物目標少了約 1 隻，故森林經營者確實可利用複選目標規劃法有效配置林地，獲得更多資源產出。發散式遊憩目標的產出為 26,000 天，開發式遊憩目標為 360 天及狩獵目標為 1,116.58 天，分別較最低期望目標值(即表 6-1-1 求得解)高出 4.27%、5.57%及 16.68%。然而，野生動物目標則略降為 126.2 隻<sup>15</sup>，較最低期望目標值低了-0.63%。顯示各目標間會有折衷平衡(trade-off)的狀況產生，野生動物目標可能屬於極為敏感的經營目標，目標值略微下降即可造成其他目標的目標值有顯著上升。因此，設定野生動物目標的期望目標值時必須格外注意，滿足既定之期望值 123 隻即可，若有必要則再以複選目標規劃法求取該較佳之目標值即可。

值得注意的是，部分目標求得解並未座落於本研究設定之期望目標值。例如狩獵目標的求得解為 1,116.58 天，並非本研究設定之目標值，且較本研究設定之

<sup>15</sup>野生動物係以「隻」為單位，本研究推測從 127.04 降至 126.20 的變動除了該目標的敏感度高以外，也有部分原因可能屬於計算時的小數點進位問題，某種程度上也可將之視為求得的解並沒有變動。

上界 1,050 更高。理論上而言，若以原始設定之 1,050 計算，則離均差應可為 0，但求得解並非如此，此原因可由複選目標規劃利用模糊理論設定之「越多越好」的方程式說明。以狩獵目標為例，希望該目標越多越好的設定可表示為  $G_{\text{huntin}}/(1050-957)+d^+-d^-=1050/(1050-957)$ ，該方程式促使求得解越高越好，因等號右邊的值為(1050/93)，若  $G_{\text{huntin}}$  求得解為 1050，則等號左邊的值同樣為(1050/93)，故不會有離均差產生。反之，若以 957 為求得解，則等號左邊的值會變成(957/93)，造成等號左右兩邊的值不相等而產生離均差。此現象亦可反應出決策者有可能因為目標值設定不佳而有忽略較佳解的可能性。

本研究接著探討複選目標規劃法是否會因目標值設定差距而無法找到更佳解。由表 6-1-2 比較複選目標規劃法求得解與 Arp and Lavigne (1982)求得解之差異可知，複選目標規劃法求得的解幾乎均較傳統目標規劃法配合權重設定求得的解低。由此更可確認，即使決策者可藉由複選規劃法擴張可行解區域找到更佳解，但卻可能會因資訊不足的狀況設定遠離較佳解的目標值，而失去尋求更佳解的機會，故以複選目標規劃法任意設定更高層級目標值求解的方式效率較不佳。

表 6-3-1、MCGP 求取之最適經營期程較佳解

	期望目標值	目標規劃法之解
發散式遊憩(天)	26500	27259
	26000	
	25416	
開發式遊憩(天)	360	612
	341	
狩獵(天)	1050	1216
	1116.58	
	1000 957	
野生動物(隻)	130	123
	127	

#### 四、3-level MCGP、GP 及 MCGP 之求解效率比較

本研究在此節中首先驗證三階複選目標規劃法是否可改善複選目標規劃法之求解效果，找到優於原作者 Arp & Lavigne (1982)利用傳統目標規劃法求得之解，並比較兩者求解效率的差異。接著，進一步分析三階複選目標規劃法如何更有效的配置林地作業，以得到更多的森林產出，並與複選目標規劃法進行求解效率驗證。

本研究同樣以 Arp & Lavigne (1982)的加拿大案例為研究對象，利用三階複選目標規劃法試著規劃 12 年經營期程以獲得更好的多目標森林經營結果。複選目標規劃的目標值設定中，係以 Arp & Lavigne (1982)原始文章內第三個模擬情境求得的解作為最低層級的目標值，因此，發散式遊憩的最低目標值為 27,259 天，開發式遊憩為 612 天，狩獵為 1,216 天，野生動物為 123 隻，木材伐採為 120,000 立方公尺。

最高層級目標值的設定中，本研究認為各目標的生產潛力也許可增加 50%，故將每個目標的最低層級目標值增加 50%，以此作為最高層級的目標值。例如，木材生產目標的最高層級目標值增加為 180,000 立方公尺，而中間層級目標值則為 150,000 立方公尺。發散式遊憩的最高層級目標值為 40,889 天，中間層級為 34,074 天。狩獵的最高層級目標值為 1,824 天，中間層級為 1,520 天。

本研究僅擴增上述三個目標的目標值，因由 Arp & Lavigne (1982)文章中的目標值變動可發現，開發式遊憩目標及野生動物目標這兩個目標值的變動較敏感，容易影響其他目標的目標值，且此兩個目標也早已達成預定的期望目標值。本研究遂設定兩個限制式維持這兩個目標之既定產量，即限制開發式遊憩的目標值不能低於 612 天，以及野生動物的目標值不能低於 123 隻，而這兩項限制式同時也可避免目標之間有損益權衡(trade-off)的狀態發生，造成此二目標的目標值減少而迫使其他目標值增加的狀況。

本研究持續重複三階複選目標規劃，直到每個目標值的改變量為 0% 為止。表 6-4-1 係操作每一次 3-level MCGP 所設定的期望目標值及求得解，被框起來的數值是每一次計算結果得到的數值。在第一次求解過程中，木材伐採目標值達到 120,000 立方公尺，發散式遊憩目標值為 34,074 天，狩獵目標為 1,216 天。以此結果與傳統目標規劃法比較可知，發散式遊憩目標明顯增加了 25%，其餘兩個目

標的目標值求得解不變。此結果如同第肆章第一節之圖 4-1-1(a)所示，傳統目標規劃法確實會因為決策者經驗或資訊不足而導致目標值設定偏差，而錯失獲得更佳結果的機會。然而，複選目標規劃法可以利用多選擇層級(multi-choice aspiration level)的概念擴張搜尋範圍，尋找最佳的資源配置方式以獲得更佳解。

本研究為了避免如圖 4-1-1(b)所示狀況而遺漏更佳解，故重複三階複選規劃的過程直到各目標的目標值變動為零，以盡量接近所謂的「最佳理想解」。三階複選目標規劃的建置步驟可以木材伐採目標為例說明之，由於第一次求解過程獲得的解為 120,000 立方公尺，故在 120,000 及 150,000 立方公尺之間可能存在一個更好的解，因此，150,000 變成最高層級目標值，120,000 仍為最低層級目標值，135,000 則為中間層級目標值，由此新建的三個層級，計算第二次求解過程的解答，其餘目標也依照同樣的設定方式處理。值得注意的是，由於木材伐採目標在第五次求解過程時，是以最高層級目標值為求得解，本研究基於求得解越多越好的原則下，遂以 135000 為最低層級目標值，重新以 150000 為最高層級目標值求解。

表 6-4-1、三階複選目標規劃之目標值設定及求得解

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次
木材伐採 (m <sup>3</sup> )	180000	150000	135000	135000	135000	150000
	150000	135000	127500	131250	133125	142500
	120000	120000	120000	127500	131250	135000
發散式遊 憩(天)	40889	40889	37932	37932	36968	36486
	34074	37932	36003	36968	36486	36245
	27259	34074	34074	36003	36003	36003
狩獵(天)	1824	1520	1368	1292	1292	1292
	1520	1368	1292	1254	1273	1283
	1216	1216	1216	1216	1254	1273

註：括弧內為求得解

本研究將三階複選目標規劃求解過程中，各目標的目標值改變以圖 6-4-1 表示。圖中可見，各目標從第一次到第二次求解過程所求取之目標值改變為 0%，依照第肆章第三節所制訂之三階複選目標規劃的操作原則，本研究可就此停止搜尋。然而，由表 6-4-1 中比較第二次求解設定的最高及最低層級目標值可知仍有很大差距。以木材伐採目標為例，在 120,000 及 135,000 之間也許仍存在一個最佳的解，而且兩個數值的差距為 12.5%，表示木材伐採這個目標仍有潛力增加

12.5%的產量。此外，由於三階複選目標規劃的操作簡易方便，也值得一試。

如圖 6-4-1 所示，木材伐採目標的百分比改變在第三次、第四次及第五次分別增加了 6.25 %，2.94 %，and 2.86 %；狩獵目標則在第四次增加 3.13%，第五次增加 1.52%；發散式遊憩目標只在第三次增加 5.66%。本研究最後在第六次求解後停止，因為各目標的改變百分比為 0%。然而，相關研究者可根據不同的森林經營需求，採取較為保守的經營目的，在第三次求解後立即停止搜尋，或者積極經營，持續重複三階複選目標規劃的過程，以找到更佳解。

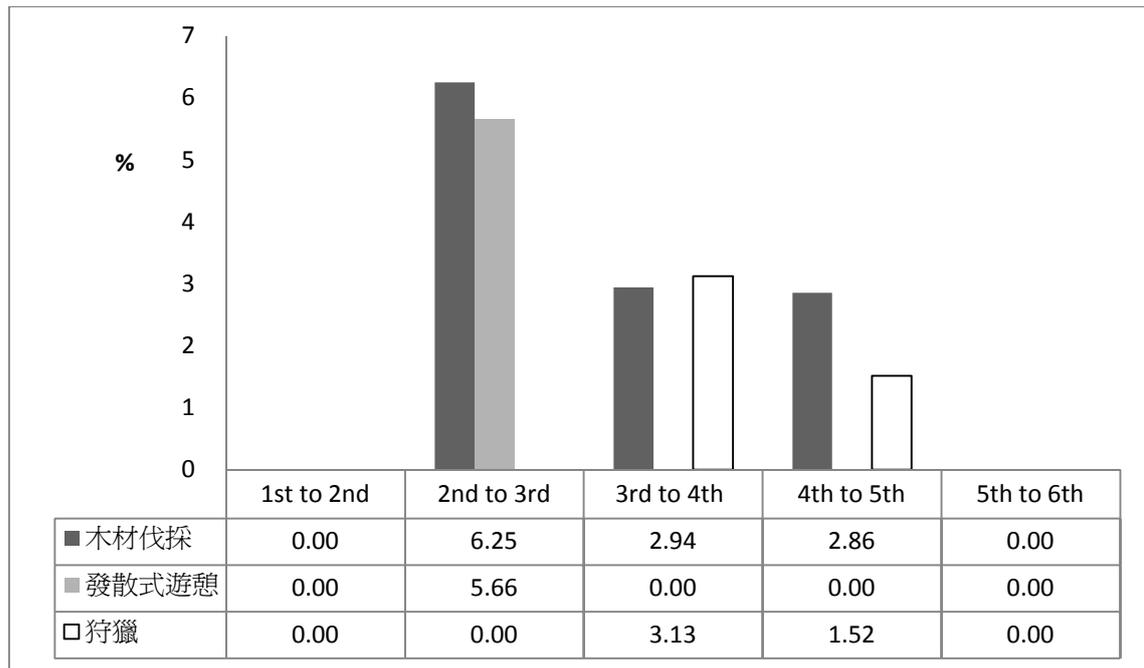


圖 6-4-1、三階複選目標規劃過程中各目標的目標值改變比率

本研究將三階複選目標規劃法求得解與目標規劃法求得解列於表 6-4-2 進行比較。第六次求解過程所求得的解中，木材伐採目標為 135,000 立方公尺，發散式遊憩目標為 1,273 天，狩獵為 1,273 天。相較於傳統目標規劃法求得的解，可發現木材伐採目標增加了 15,000 立方公尺(12.5%)，狩獵目標增加了 57(4.69)天，而發散式遊憩目標的增加多達 8,744 天，32.08%。這項研究結果證實三階複選目標規劃確實可以加強複選目標規劃法的效用，系統化的接近所謂的最佳理想解，以確保決策者可以獲得更佳解。

表 6-4-2、三階複選目標規劃及目標規劃求得解之比較

	GP	3- level MCGP	增量
木材伐採(m <sup>3</sup> )	120000	135000	15000(12.5%)
發散式遊憩(天)	27259	36003	8744(32.08%)
狩獵(天)	1216	1273	57(4.69%)

爲了進一步比較兩者的決策效率差異，本研究利用複選目標規劃法，將每個目標設定兩個層級的目標值求解，以此與三階複選目標規劃法求得解進行比較。在表 6-4-3 中，本研究使用複選目標規劃法求解，而每個目標的目標值設定，則以 EXCEL 中的 RANDBETWEEN 功能在原始的搜尋範圍中挑選任意挑選兩個數值作爲目標值。以木材伐採目標爲例，目標值(133,458, 163,009)或(121,614, 178,796)是在搜尋範圍(120,000, 180,000)中任意選取。

本研究共挑選了七種目標值設定組合，進行七次複選目標規劃。表中顯示，複選目標規劃所能求得的解確實均較傳統目標規劃法所能求得的解佳，然而，由於目標之間會有損益權衡的狀態產生，這七次複選目標規劃法所求得的解相較於三階複選目標規劃法，只有部分目標的目標值較高(表中加上底線的數值)。由這一連串複選目標規劃法與三階複選目標規劃法求得解比較可知，只要該方法設定的期望目標值得宜，則所獲得的解可以盡量接近所謂的最佳理想解。然而，設定複選目標規劃的求解過程卻無規律可循，雖由 EXCEL 挑選出的數值設定恰巧有部分求得解可優於三階複選目標規劃求得解，但若挑選出的數值與較佳理想解的落差甚大，則有可能進行多次運算後仍無法找到較佳解。

表 6-4-3、任意設定目標值並利用 MCGP 求解

	<u>各次 MCGP 設定之目標值</u>						
	1	2	3	4	5	6	7
木材伐採(m <sup>3</sup> )	163009	178796	171649	149309	161340	142595	137258
	133458	121614	136602	142894	129974	129828	126310
發散式遊憩(天)	40802	38211	40027	31456	39524	35054	32413
	30167	37562	30778	28507	39503	30764	29526
狩獵(天)	1646	1455	1630	1518	1650	1628	1526
	1452	1289	1329	1413	1401	1360	1341
	<u>各次 MCGP 求得解</u>						
	1	2	3	4	5	6	7
木材伐採(m <sup>3</sup> )	133458	133458	<u>136602</u>	<u>142894</u>	129974	<u>142595</u>	<u>137258</u>
發散式遊憩(天)	30167	<u>36172</u>	30778	31456	<u>36357</u>	35054	32413
狩獵(天)	<u>1281</u>	1271	<u>1295</u>	<u>1324</u>	1254	<u>1315</u>	<u>1298</u>

\*\* 有底線之數字代表該求得解優於 3-level MCGP 求得解



## 五、3-level MCGP 及 GP 之林地配置比較

本研究認為目標可增加產量的主因在於三階複選目標規劃法可更有效的配置林地作業，遂於此節中深入探究。表 6-5-1 列出三階複選目標規劃法及傳統目標規劃法的林地配置，表中可見，林地配置的改變主要在於 3、4、6、7 及 10 號林班。傳統目標規劃法將這些林班配置施行單一政策，即施行 A 政策或 C 政策，此種配置方式使得 3、7 及 10 號林班無法生產發散式遊憩目標，而 4 及 6 號林班無法提供林木伐採目標。然而，三階複選目標規劃法找到更好的林地配置方式，規劃這些林班的多數面積施行 B 政策，以生產發散式遊憩目標及林木伐採目標，而不生產開發式遊憩目標的。由這個林地配置可知，森林經營者可將這些林地付以較多生產任務，即這些林班可同時生產較多的林木伐採及發散式遊憩目標生產任務。雖然此種配置多數林地施行政策 B 的方式可能會造成開發式遊憩目標的損失，然而，3 號林班及 7 號林班分別會挪出 296 公頃及 101 公頃的面積施行政策 A，而此種配置正可彌補施行 B 政策的不足，同時也可增加發散式遊憩目標的產量。

由上述比較可知，使用傳統目標規劃法會有低估林地生產潛力的狀況，但若使用三階複選目標規劃法，則可有效激發林地的生產潛力。透過三階複選目標規劃的重新規劃，森林經營者可以獲取更多的木材伐採、發散式遊憩及狩獵目標，而不會對開發式遊憩及野生動物保育目標造成損害，該結果亦可作為加拿大多目標森林經營案例的新替代方案。

表 6-5-1、林地配置的改變

單位: ha

	政策	林班				
		3	4	6	7	10
GP	A	8	389	167	0	0
	B	0	0	0	0	0
	C	672	0	0	605	761
3-level MCGP	A	296	0	0	101	0
	B	380	389	167	504	761
	C	4	0	0	0	0

\*\*政策 A、B 及 C 詳見第陸章第一節

## 六、小結

本研究在第陸章第二及三節將複選目標規劃法應用於加拿大案例的規劃結果可知，該方法相較於傳統目標規劃法主要有三個優點。首先，森林經營者可設定各目標同時擁有多個目標值可供選擇，一次模擬多種方案以節省操作研究工具的繁雜過程及計算時間。第二，複選目標規劃法可協助經營者判斷較佳的理想解，不必一一比較各方案的優劣。第三，利用該方法確實可擴大可行解的搜尋範圍以找到更佳解。

然而，複選目標規劃法也有本研究於第肆章所提出之目標值設定問題，即目標值的設定若遠離最佳理想解，則有可能無法找到較佳解。該問題亦存在於傳統的目標規劃法，但複選目標規劃法在求解概念上已有突破，僅需以三階複選目標規劃法加以改良即可使其求解效率及結果臻於完善。

第陸章第四節的驗證結果顯示，決策者使用複選目標規劃法確實會有因期望目標值設定偏差而遺漏更佳理想解的狀況，但使用三階複選規劃法則可確保決策者不會有期望目標值的設定偏差，且該方法可在每次計算過程中縮減一半的搜尋範圍，可藉此省略一連串目標值的設定及求解後的理想解比較，迅速找到較佳的理想解。而第陸章第五節的林地配置比較結果可見，傳統目標規劃法在林地資源分配

此外，三階複選目標規劃法的設定過程並未使用權重或次序設定，找到的解即可優於傳統目標規劃法配合權重找到的解，此係由於利用複選目標規劃法設定越高(或越低)的目標值，可視為一種替代權重(weight)的設定。本研究認為，設定各目標值的權重應可改善目標值設定偏差的狀況，但權重設定較為複雜，且需有諸多考量，若能從目標值設定的高低著手，應可避免許多計算麻煩。

## 第柒章、多段目標規劃在疏伐規劃之應用

多段目標規劃法的創意係用以設定限制式的參數擁有多個層級的參數值可供選擇，在疏伐方案的規劃中，可用以設定疏伐程度。本研究於此章同樣以 Lingo 軟體求解，由於尚未有研究探討多段目標規劃法在疏伐方案的應用，故於此章節中簡化為單一目標，即探討多段目標規劃法是否可研擬適當的疏伐方案以達成減碳的單一目標。因此，本章首先介紹新竹人工林管理處研究案例中各齡級的林況。接著，應用多段目標規劃法結合線性規劃法設定疏伐減碳的目標式及限制式，藉此決策各期程的疏伐面積及疏伐程度。最後以 Lingo 求解，找出可達成碳吸存最大化之疏伐方案。本研究於此章中確認多段目標規劃及線性規劃之適用性後，將於下一章節中再以多段目標規劃法配合三階複選目標規劃法探討疏伐可達成之多目標森林經營。

### 一、新竹林管處人工林案例

如第三章第二節研究案例所述，因柳杉輪伐期為 35 年，且疏伐老熟林分對其生長效果的作用不佳，故本研究挑選林齡低於 40 年生之三個齡級進行疏伐規劃。如表 7-1-1 所示，挑選的研究林地中，齡級 11-20 的柳杉人工林面積為 2,633 公頃，齡級 21-30 的面積為 5,960 公頃，齡級 31-40 的面積為 2,186 公頃。雖然齡級 21-30 人工林的單位面積蓄積量低，僅有  $174.15 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，但該齡級有最多面積，故總蓄積量高達 1,037,934 立方公尺。而齡級 11-20 的人工林因其未臻成熟，故其單位面積蓄積量僅有  $130.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，其總蓄積量為 343,079 立方公尺。齡級 31-40 之人工林因已屆成熟，故其單位面積蓄積量最高，為  $226.4 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，但因其面積最少，總蓄積量只有 494,910.4 立方公尺。

根據楊榮啓及林文亮(2003)之柳杉法正收穫表，15、25 及 35 年生柳杉林分在理想狀態下的單位面積蓄積量分別是 217.80, 467.28, and  $659.12 \text{ m}^3/\text{ha}$ 。以此比較新竹林管處之柳杉人工林之林況後可知，該地區之柳杉人工林並未受到妥善的撫育。由於疏伐作業可促進森林生長 (Klemperer, 1996)，除了增加森林之減碳功能外，本研究亦希望疏伐作業能改善這些齡級的蓄積狀態。

表 7-1-1、新竹林管處各齡級之林況

齡級(年)	11-20	21-30	31-40
面積(ha)	2633.00	5960.00	2186.00
單位面積蓄積(m <sup>3</sup> /ha)	130.30	174.15	226.40
材積(m <sup>3</sup> )	343079.90	1037934.00	494910.40



## 二、疏伐減碳模型設定

在設定疏伐減碳模型的目標式、限制式之前，需先界定研究架構中的兩個設定要點。首先是設定疏伐期程的選擇(option of thinning period)，並分配每個疏伐期程中，各齡級的疏伐次數及疏伐的時間點；第二為設定兩個主要決策變數，即疏伐面積(thinned area)及疏伐的程度(level of thinning intensity)。

在疏伐期程選擇方面，台灣林務局以十年為一個經營期程，本研究擬設定兩個經營期程，共二十年，並細分為四個五年的期程。而為了維護森林覆蓋，避免過度疏伐造成的土壤沖蝕(陳明杰, 2007)，故本研究限制疏伐次數為一次，意即疏伐過後的林地之後的經營期程將不再進行疏伐。因此，每個齡級均有五種疏伐期程的選擇，分別是：第一期進行疏伐、第二期進行疏伐、第三期進行疏伐、第四期進行疏伐及完全不疏伐。

在決策變數設定方面，本研究必須決定每個疏伐期程選擇的疏伐面積及疏伐程度。在利用傳統線性規劃及目標規劃設定森林經營期程時，疏伐面積是固有的決策變數。傳統的線性或目標規劃法無法同時將疏伐面積及疏伐程度當作決策變數，但若輔以多段目標規劃法，則可同時考量此二個決策變數。疏伐程度的設定一般介於 0% 至 76%(Kanninen et al., 2004; Mederski, 2006; Eriksson, 2006)，本研究則將疏伐程度設定為 0%、20%、40% 及 60% 四種分別代表不疏伐、弱度疏伐、中度疏伐及強度疏伐。因此，除了不疏伐這個疏伐期程選擇外，其餘四個疏伐期程選擇，每個期程也有四種疏伐程度可供選擇。

## (一)目標式及限制式設定

### 1.面積限制

$$\sum_{i=1}^3 x_{ijk} < \sum_{i=1}^3 x_i / 4 \quad (1)$$

方程式(1)限制每一期疏伐面積的總和不得超過總面積的四分之一，以避免這三個齡級的疏伐作業均集中於其中某個時期施行。變數  $x_{ijk}$  表示第  $i_{th}(i=1,2,3)$  齡級在第  $j_{th}(j=1,2,3,4)$  期進行疏伐或者不疏伐的面積， $k$  則代表每個齡級有五種疏伐期程選擇( $k=1$ : 在第一期疏伐， $k=2$ : 在第二期疏伐， $k=3$ : 在第三期疏伐， $k=4$ : 在第四期疏伐， $k=5$ : 不疏伐)。為了簡化方便，每個齡級的疏伐期程選擇可單純以  $x_{i1k}$  代表  $x_{i2k}$ 、 $x_{i3k}$  及  $x_{i4k}$  即可。例如  $x_{i11}$  表示  $i_{th}$  齡級有部分面積會在第一期進行疏伐作業，但由於疏伐作業僅進行一次，因此  $x_{i21}$ 、 $x_{i31}$  及  $x_{i41}$  的面積將不會變動，因此均以  $x_{i11}$  表示即可。

### 2.疏伐木限制

$$R_{ijk} = \sum_{l=1}^3 T_{ijkl} B_{ijkl}(B) \times x_{ijk} \times v_{ijk} \quad (2)$$

在方程式(2)中，變數  $R_{ijk}$  表示第  $i_{th}$  齡級在選定進行疏伐的期程( $j=k$ )時所生產的疏伐木數量，例如疏伐期程選擇的設定為  $k=1$  時，表示該齡級只有在  $j=1$  期會進行疏伐，該期才有疏伐木產出。變數  $v_{ijk}$  表示當期的單位面積材積量，乘以  $x_{ijk}$  後成為當期總材積量。疏伐木產量由疏伐程度決定，由於疏伐程度可分為強中弱等不同層級，故可利用第三章第三節中介紹的多段目標規劃法(MSGP)技術設定  $T_{ijkl}B_{ijkl}(B)$  這項集合。 $T_{ijkl}$  是疏伐程度變數，由於 0% 疏伐強度可直接歸類為不疏伐，故該選項中只有三種疏伐程度可供選擇( $T_{ijk1}$ : 疏伐 20 % 的林分， $T_{ijk2}$ : 疏伐 40 % 的林分， $T_{ijk3}$ : 疏伐 60 % 的林分)。而疏伐程度的選取則由  $B_{ijkl}(B)$  這項二元變數的功能函數控制，藉此決定一種疏伐程度。 $T_{ijkl}B_{ijkl}(B)$  的集合可表示為  $s_1*s_2*0.2+s_1*(1-s_2)*0.4+s_2*(1-s_1)*0.6$  ( $s_i$  是二元變數)。

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 R_{ij} < V^{initial} \times 2\% \times H \times 1.1 \quad (3)$$

本研究基於永續收穫(sustained yield)概念，認為每年的木材採收量不得超過森林蓄積的生長量。在森林經營中，銀行利率通常被用以表示林木生長率，以此計算適當的土地期望值輪伐期或財務成熟期輪伐期。因此，本研究提出比較保守的疏伐木限制，在方程式(3)中限定每年的疏伐木移出量不得超過森林初始材積  $V^{initial}$  的 2%， $H$  表示 20 年的經營期程，方程式(3)最後乘以 1.1 表示 20 年經營期程後的疏伐木總量可以有超過 10% 的容許誤差。

$$0.9 \times \sum_{i=1}^3 R_{ij} < \sum_{i=1}^3 R_{i(i+1)(j+1)} < 1.1 \times \sum_{i=1}^3 R_{ij} \quad (4)$$

疏伐木是提供燃料或家具的重要材料。為了確保森林經營者每個期程有穩定的收入，本研究以方程式(4)確保每期有等量(even flow)的疏伐木產出，以達到永續收穫的概念。本研究規範每期的疏伐木收穫量相較於上一期可有正負 10% 的容許誤差，即  $(j+1)_{th}$  期時，每個齡級加總後的疏伐木總量不得低於  $j_{th}$  期時總量的 90%，也不得超過 110%，故方程式(4)中疏伐木移出量( $R_{ij}$ )分別乘以 0.9 及 1.1。

### 3. 碳吸存目標

$$S'_{ijk} = V_{ijk} - R_{ijk}, j = k \quad (5)$$

$$V'_{i(j+1)k} = \left(1 + \sum_{l=1}^3 G_{ijkl} B_{ijkl}(B)\right) \times S'_{ijk}, j = k \quad (6)$$

$$S^m_{ijk} = V_{ijk}, j \neq k \quad (7)$$

$$V^m_{i(j+1)k} = (1 + G_{ijk}) \times S^m_{ijk}, j \neq k \quad (8)$$

...

在設定碳吸存方程式時，必須區分成兩個部分。第一個部分是疏伐後的碳吸存量，由於疏伐作業只會施行一次，故在四個經營期程中只會使用一次，可由方程式(5)及(6)表示。第二個部分則是沒有疏伐作業的碳吸存量，在四個期程中會使用三次，由方程式(7)和(8)表示。

在疏伐後碳吸存量的計算中，方程式(5)中的變數  $S'_{ijk}$  表示在第  $j_{th}$  期時疏伐後的蓄積量，由當期材積量變數  $V_{ijk}$  扣除疏伐木數量  $R_{ijk}$ 。林分疏伐後在第  $(j+1)_{th}$  期程的材積量  $V'_{i(j+1)jk}$  則由方程式(6)計算，係由第  $j_{th}$  期時疏伐後的蓄積量乘以疏伐後的生長率而得。疏伐後的生長率  $G_{ijkl}$  取決於疏伐程度，也同樣是以 MSGP 的技術控制，也就是由  $B_{ijkl}(B)$  這項二元變數功能函數控制，故  $G_{ijkl} B_{ijkl}(B)$  集合中只有一個生長率會成立 ( $G_{ijk1}$ : 疏伐 20% 後的生長率,  $G_{ijk2}$ : 疏伐 40% 後的生長率,  $G_{ijk3}$ : 疏伐 60% 後的生長率)。不同齡級在不同疏伐程度時所對應之生長率詳見下一小節「疏伐後生長率」。

方程式(7)與(8)則用以計算不疏伐期程後的蓄積量， $S''_{ijk}$  表示  $j_{th}$  期程時，沒有進行疏伐作業的當期蓄積量，由於不進行疏伐作業，故與當期材積  $V_{ijk}$  相同。方程式(8)用以計算第  $(j+1)_{th}$  期的材積，由於不進行疏伐，故只有一種疏伐率  $G_{ijk}$ 。

疏伐後的碳吸存效果會在下一期顯示，故本研究透過重複設定方程式(5)到(8)來計算第五期的總碳吸存效果，由方程式(9)表示。

$$CO_2 = \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^5 V_{i5k} - V^{initial} \right) \times S \times C \times CO_2 / C \quad (9)$$

在二十年經營期程後的碳吸存目標可由方程式(9)決定。由於在第四期程施行疏伐後的效應會在第五期程出現，因此本研究計算第五期程時，三個齡級林分的碳吸存量總和。第五期總材積  $V_{i5k}$  與初始材積的差經過係數轉換後可視為碳吸存量。在方程式(9)中， $S$  代表柳杉的比重，以 Fukuda et al.(2003)計算之 0.319  $Mg/m^3$  代入， $C$  代表柳杉含碳量的轉換係數為 0.4974<sup>16</sup> (林俊成等, 2002)，而  $CO_2/C$  為二氧化碳除以碳之分子量，為 44/12。

<sup>16</sup> 台灣研究柳杉碳轉換係數之研究眾多，但不同林地、林木部位的柳杉材含碳量有差異(林俊成、李國忠及林裕仁, 1999; 林裕仁、劉瓊霖及林俊成, 2002; 李意德等, 1998; 林裕仁、李國忠、林俊成, 2002; 林俊成、鄭美如等, 2002; 吳俊賢、林俊成、李國忠等, 2005)，故造成各研究者之柳杉碳轉換係數略有不同，本研究整合上述文獻數據計算柳杉的碳轉換係數平均數為 0.4974。

## (二)疏伐後生長率

### 1.柳杉在不同疏伐程度後之生長率

國內用以預測林木生長收穫之之林木收穫表及收穫模式不多，僅柳杉較為完整，有楊榮啓及林文亮(2003)年編定之柳杉收穫表，但該收穫表並無法估算疏伐後的生長率。高強(1982)則有建立柳杉收穫模式，該模式的變數包含林分密度，可用以估算不同疏伐程度後，林木的生長率。

本研究利用高強(1982)建立之柳杉收穫模式，估算不疏伐、20%疏伐、40%疏伐及 60%疏伐程度時的生長率，並將生長率列於表 3-3-1。由於本研究以五年為一期程，故表內的生長率均是直接計算疏伐後五年的總生長率，但由於疏伐後對林木生長的刺激效果無法持續長久，故疏伐後，下一期(五年後)回復為不疏伐時的生長率。

下表將四種疏伐期程選擇在四個期程內，不同疏伐程度後的生長率列出。表 7-2-1 中的生長率是由高強(1982)建立的林分生長模式計算。以齡級 20 到 30 的林分為例，如果該地區在第一期( $k=1$ )時進行 20%的疏伐，則疏伐後 5 年增加的生長率為 0.3543，之後由於沒有進行疏伐，且疏伐效應會在五年後消失，因此，齡級 20-30 年生的林分在第一期進行疏伐後，第二、三及四期的生長率分別是 0.2278、0.1513 及 0.1088。若該林分有部分面積被分配為在第二期進行疏伐( $k=2$ )，則第一期的生長率將是沒疏伐的 0.2154，之後，第二期疏伐後的生長率變成 0.3007，第三及四期的生長率則又會變成 0.1879 及 0.1216。

一般而言，生長率和疏伐程度的關係是呈現正相關，意即疏伐程度越高，則生長率也會越高。然而，疏伐後生長率和林齡的關係則呈現負相關。疏伐對年輕林齡的影響較佳。但是過度疏伐又會造成生長率下降，例如齡級 10-20 年生林分在 60%疏伐程度後的生長率為 0.8528，比 40%疏伐程度的生長率低了約 40%。這代表高疏伐程度不適用於年輕的林分，但卻適用於林齡較高的林分。

表 7-2-1、不同齡級在各期經不同程度疏伐後之生長率

單位：%

		第一期進行疏伐				第二期進行疏伐			第三期進行疏伐		第四期進行疏伐
		1	2	3	4	2	3	4	3	4	4
11-20	0%	0.4462	0.2916	0.2125	0.1607						
	20%	0.6115	0.3586	0.2361	0.1699	0.4393	0.2754	0.1834	0.3511	0.2209	0.2934
	40%	1.2555	0.5897	0.3126	0.1987	0.6548	0.3613	0.2132	0.5534	0.3032	0.4871
	60%	0.8528	0.4501	0.2673	0.1818	1.0145	0.4923	0.2566	0.8910	0.4286	0.8103
21-30	0%	0.2154	0.1673	0.1293	0.1001						
	20%	0.3543	0.2278	0.1513	0.1088	0.3007	0.1879	0.1216	0.2584	0.1572	0.2259
	40%	0.5571	0.3106	0.1804	0.1201	0.4955	0.2679	0.1499	0.4468	0.2185	0.4094
	60%	0.8956	0.4367	0.2226	0.1361	0.8637	0.3291	0.1928	0.7613	0.3357	0.7158
31-40	0%	0.1512	0.1239	0.0964	0.0741						
	20%	0.2828	0.1822	0.1178	0.0826	0.2523	0.1533	0.0951	0.2218	0.1298	0.1969
	40%	0.4794	0.2618	0.1460	0.0936	0.4399	0.2310	0.1227	0.4047	0.2060	0.3761
	60%	0.7954	0.3833	0.1870	0.1093	0.7528	0.3495	0.1628	0.7100	0.3220	0.6752

### 三、最大碳吸存目標之最適疏伐規劃

本研究在此節探討單一碳吸存目標最大化，結合線性規劃及多段目標規劃法規劃最適疏伐期程<sup>17</sup>，並將研究結果列於表 7-3-1。首先觀察由疏伐面積的配置，第一期疏伐總面積達到設定之疏伐面積限制 2,694.75 公頃，但在第二、三及四期的疏伐面積分別只有 1,450.57、1,326.22 及 2,120.73 公頃。儘管各期的疏伐面積大小處於不規則的分佈，各期最終碳吸存總量卻很接近，分別是 324,826.31、353,423.55、340,091.95 及 361,301.22 公噸。此種現象可進一步由疏伐期程選的、疏伐強度、疏伐面積限制及疏伐木量討論之。

在第一期程時，因齡級 10-20 年生的柳杉林疏伐後生長率最高，故該齡級有 2,248 公頃施行中度疏伐。其餘在第一期程就進行疏伐的齡級分別有齡級 20-30 年生林分疏伐 0.75 公頃，齡級 30-40 年生林分疏伐 446 公頃，而且這兩個林分都進行強度疏伐以使疏伐後生長率最高。而第一期程的疏伐木總量為 177,828.81 立方公尺，由於各期有疏伐木總量不得超過及低於前期 10% 的限制，故第一期程的疏伐木產量將會規範第二到第四期程各期的疏伐木總量。

為了符合方程式(4)各期疏伐木產量盡量相等以維持穩定產出的規範，第二期程的疏伐木產量為 195,611.60 立方公尺，比第一期的產量高出約 10%。這些疏伐木主要由齡級 30-40 年生的林分所提供，共進行 1,065 公頃的強度疏伐，而齡級 10-20 的林分則進行 385 公頃的中度疏伐。在第三期程時，651.22 公頃的齡級 20-30 年生林分及 676 公頃的齡級 30-40 年生林分共生產 215,172.81 立方公尺的疏伐木。最後，在第四期程時為了遵從方程式(4)的疏伐木限制，只有齡級 20-30 年生的林分進行 2,120.73 公頃的中度疏伐，共生產 236,690.10 立方公尺的疏伐木，且四個期程的疏伐木總產量也達到方程式(3)的疏伐木總量上限，故該齡級也因此留下 3186.73 公頃的林地未疏伐。

第四期程未進行強度疏伐以使疏伐後生長率最高的原因，可由疏伐面積及疏伐後生長率兩個因素共同探討。以同樣產量的疏伐木來說，施行強度疏伐只需較少的疏伐面積即可達成，但中度疏伐則需較多的疏伐面積。由於本節中係以碳吸存最大化為研究目標，中度疏伐後的疏伐面積較高，將使得整體碳吸存量高於強度疏伐面積所能吸收的碳吸存量，故採取同樣可達到疏伐木產量，卻能有較多碳

---

<sup>17</sup> 部分程式碼附於附錄二。

吸存量之中度疏伐。

由疏伐期程的安排可見，利用多段目標規劃法結合線性規劃法，確實可有效率的分配不同齡級的林分在適當的期程進行適當程度的疏伐，以此刺激林木生長，達到最大化碳吸存目標。決策者若沒有使用多段目標規劃法，而欲將疏伐面積及疏伐程度作為決策變數，則單純使用線性規劃法將會是一項非常複雜的工作。此三個齡級的疏伐期程規劃中，四個期程總共可藉由疏伐 825,302.8 立方公尺的疏伐木，獲得 1,379,643.03 公噸的碳吸存量。此外，每一期程的疏伐木產量都是以接近等量的形式生產，能穩定的供應碳替代如家具或燃料木的來源。若在沒有進行疏伐的狀況下，這些齡級的林地最多只能達到 1,016,282.82 公噸的碳吸存量，由此可知，森林經營者若可對森林施以適當的疏伐，則可擁有更高的碳吸存量。

表 7-3-1、最適疏伐規劃之林地配置及碳吸存量

		2 <sup>nd</sup> period	3 <sup>rd</sup> period	4 <sup>th</sup> period	5 <sup>th</sup> period	total
碳吸存量 (tons)	11-20	141397.90	152582.70	129748.40	107782.80	531511.80
	21-30	130083.90	122807.10	127188.10	195735.20	575814.30
	31-40	53344.51	78033.75	83155.45	57783.22	272316.93
	total	324826.31	353423.55	340091.95	361301.22	1379643.03
面積 (ha)		1 <sup>st</sup> period	2 <sup>nd</sup> period	3 <sup>rd</sup> period	4 <sup>th</sup> period	no thinning
	11-20	2248 <sup>M</sup>	385 <sup>M</sup>	0	0	0
	21-30	0.75 <sup>S</sup>	0.57 <sup>M</sup>	651.22 <sup>S</sup>	2120.73 <sup>M</sup>	3186.73
	31-40	446 <sup>S</sup>	1065 <sup>S</sup>	675 <sup>S</sup>	0	0
	total	2694.75	1450.57	1326.22	2120.73	3186.73
疏伐木 (m <sup>3</sup> )		1 <sup>st</sup> period	2 <sup>nd</sup> period	3 <sup>rd</sup> period	4 <sup>th</sup> period	total
	11-20	117165.80	29019.74	0	0	157903.27
	21-30	78.37	48.26	96538.61	236690.10	402939.93
	31-40	60584.64	166543.60	118634.20	0	264459.74
	total	177828.81	195611.60	215172.81	236690.10	825302.80

M:中度疏伐, S:強度疏伐

#### 四、最終蓄積

除了藉由疏伐達到碳吸存目標最大化的目的以外，本研究期望能透過多段目標規劃法，分配適當的疏伐作業以改善未受妥善照顧的齡級的蓄積量。齡級 11-20、21-30 及 31-40 年生的林分，在第五期程時，單位面積蓄積量分別是 421.75、273.54 及 281.91 m<sup>3</sup>/ha，雖然未能達到收穫表中預定之理想狀態單位面積蓄積量，但均比原先的單位面積蓄積量高出許多，即使已屆成熟、生長率遲滯的林分，依然能改善其生長狀況。

比較齡級 11-20 及 31-40 年生的林分在疏伐後的蓄積量可知，對較年輕的林分進行疏伐可有較佳的疏伐效果，雖然 11-20 年生林分在第五期程時仍然低於 35 年生齡級的理想蓄積狀態，但是該蓄積狀態已經接近 25 年生齡級的理想蓄積狀態，也就是輪伐期時的理想蓄積量。齡級 21-30 年生的林分在疏伐後同樣也表現出不錯的生長能力，但是由於該齡級有過半的面積未進行疏伐，因此，近半數未改善林分結構的林地也造成該齡級在第五期程時的單位面積蓄積量偏低。若疏伐木限制能放寬，則 21-30 年生林分的林地應可藉由疏伐改善其蓄積狀態。但也由於老齡林疏伐後的生長量低，因此，31-40 年生的林分在疏伐過後的生長率也相對較低，蓄積量的改善效果有限。

## 五、小結

本研究利用多段目標規劃法設定不同的疏伐程度，以此決定最適疏伐期程。研究結果顯示，該方法只要透過一次的設定步驟，即可有效協助決策者依照林分特性，在適當的期程施以適當程度的疏伐，例如年輕的林分施以中度疏伐，林齡較老的林分則施以強度疏伐，藉此刺激林分的碳吸存能力。以本研究為例，四個期程中，各期程要由四種疏伐程度中選取一個適當的疏伐程度，故有  $256(4^4)$ 種疏伐組合，共有三個齡級個別需要選取與設定，故共有  $768(3 \times 256)$ 種疏伐組合，若將這三個齡級的疏伐組合假設為彼此互相影響，則總共有  $16,777,216(256^3)$ 種疏伐組合必須要模擬與比較，再從中選取適當的疏伐組合，但透過 MSGP，研究者只需設定一次即可找到最佳的疏伐期程組合。

在方程式設定方面，由於本研究的研究範疇大，無法考量各林區林況的差異性，但後續研究者在規劃小範疇如數個林分(stand)時，則可依照地力指數(site index)給予不同權重，以決定其伐採先後順序。此外，本研究中的疏伐程度只設定三個，但可利用 MSGP 技術擴增多個不同疏伐程度以進行比較。而由於本研究中用以比較的疏伐組合過多，且使用該技術必須設定許多二元變數，會造成計算時間偏長的問題。若能減少二元變數設定，將疏伐程度的選取依照 Chang(2008)的概念設計為線段式，即疏伐程度為例如 20%至 60%的區間，而非點狀式的 20%、40%及 60%設定，應可節省許多計算時間。最後，本研究設定的疏伐木數量限制較保守，故齡級 21-30 的林地有 3186.73 公頃未疏伐，若可放寬疏伐木限制，應可獲得更多的碳吸存量，以及更多的疏伐木。

## 第柒章、新竹林管處柳杉林減碳多目標規劃方案

本研究於第柒章確認多段目標規劃法配合線性目標規劃法在疏伐減碳規劃之適用性，故於本章探討疏伐可達成之減碳等多目標森林經營。爲了更有效的求解，本研究結合三階複選目標規劃法及多段目標規劃法，規劃新竹林管處柳杉人工林可達成多目標森林經營之疏伐期程。疏伐期程的設定與第陸章第三節之設定相同，但由於疏伐對其餘森林功能之參數值無法取得，故僅能探討疏伐對碳吸存、就業機會及土壤沖蝕控制等三個森林經營目標的影響。

本章中，由於疏伐模式設定新增加就業機會目標及土壤沖蝕控制二個目標，故本研究將介紹此二目標的目標式設定，並依據第柒章中求得解估算各目標的期望目標值上限與下限，以此設定各目標值有三個層級的期望目標值。接著，本研究將操作 Lingo 軟體求解，探討該柳杉人工林如何分配各期程的疏伐面積及疏伐程度，以及 20 年的疏伐期程可達成之碳吸存、就業機會及土壤沖蝕控制目標。

### 一、目標值及目標式設定

#### (一)碳吸存目標

在多段目標規劃法應用評估一節顯示，該三個齡級透過疏伐最多可吸存 1,379,643.03 公噸之二氧化碳，故本研究將碳吸存目標值的上界設定爲 1,380,000 公噸。設定碳吸存目標值的下界必須考量土壤保護目標，減少疏伐量可減少土壤流失，但疏伐促進碳吸存的效果勢必降低，故本研究期望碳吸存量的流失量最多不超過 20%，將其設定爲 1,100,000 公噸。

#### (二)就業機會目標及目標式

本研究設定之 20 年疏伐木產量限制爲 825,303 立方公尺，以此配合疏伐效率參數計算可知，20 年內至多可提供 4,708 個就業機會，本研究爲方便計算，將上界設定爲 20 年提供 5,000<sup>18</sup>個就業機會。由於就業機會目標與土壤保護目標屬

<sup>18</sup> 依據行政院主計處公布之 2006 年產業關聯統計表顯示，林產部門之國內生產總值爲 2,100 百萬元，其中每一元之國內生產總值內含 0.619 元之工資支出，即該年之勞動報酬爲 1,299.9 百萬元。若以該年度工業部門每人平均月薪 35,938 元計算，林業部門的 1,299.9 百萬元勞動報酬，表示每年可提供 3014.22 個工作機會。若本研究設定之 5000 個就業機會可達成，則每年可增加約 8% 的就業機會。

於負相關，卻又與碳吸存量呈正相關，本研究難以判定下界該如何設定為宜，故假設疏伐量減半，故將就業機會之下界設定為 2,500。就業機會目標式如下所示：

$$Job = \frac{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^4 R_{ij}}{E}$$

E 代表疏伐木的作業效率，即每年每個人次可處理之疏伐木數量，包括伐木作業、打枝造材、集材作業及裝車運材等四個主要作業。有關台灣疏伐作業伐採效率的相關文獻闕如，但吳學平(2001)研究之柳杉人工林疏伐工作研究有詳細估算疏伐作業流程中各階段流程所需之人力與時間成本。該研究指出，集材作業帶來之效益最高，所需之人員有 7 人；次之為打枝造材與裝車運材兩項目並列，所需人工為 4 人；最後則是伐木作業，所需人工為 2 人。但在每項目每天所疏伐面積上，效益最高的為裝車運材，每天可工作 19.95 立方公尺；次之為集材作業，每天可工作 15.58 立方公尺；再來為伐木作業，每天可工作 8.89 立方公尺；最後為打枝造材，每天可工作 7.16 立方公尺(吳學平，2001)。本研究為估算人力需求，將工作量換算為年工作量如下表 8-1-1 所示，表中為每人每年之標準工作量，伐木作業為每人 1112.50 立方公尺，打枝造材、集材作業及裝車運材分別為 447.50、565.00 及 1247.50 立方公尺。

表 8-1-1、各疏伐作業細項之工資及效率

疏伐作業	工數(人)	日標準工作量(m <sup>3</sup> /年/人)
伐木作業	2	1112.50
打枝造材	4	447.50
集材作業	7	565.00
裝車運材	4	1247.50
總和	17	

### (三)土壤沖蝕控制目標及目標式

在土壤保護目標的設定部分，本研究計算在第陸章第三節碳吸存單一目標最大化時，疏伐面積總計約 7,592 公頃，配合疏伐程度對每公頃土壤沖蝕量的參數計算後得知，該疏伐期程增加之土壤流失量為 1,461.53 公噸。由於本章節考量多目標森林經營，為達到土壤保護目標必須減少疏伐量，間接也減少碳吸存量，故土壤流失量最多將不超過 1,461.53 公噸。因此，本研究以 1,500 公噸為上界。若將此 7,592 公頃均進行弱度疏伐，則會有 664.3 公噸之土壤流失量，本研究直接將土壤流失量的目標值下界設定為 500 公噸以方便計算。土壤沖蝕控制的目標式可表示如下：

$$Soil = \sum_{i=1}^3 B_{ijkl} (B) SE_{ijkl}, j = k \quad (11)$$

土壤沖蝕控制目標同樣依照多段目標規劃的概念設定， $SE_{ijkl}$  代表  $i_h$  齡級在進行疏伐作業時( $j=k$ )，進行  $l(l=1,2,3)$  程度的疏伐後，相較於不疏伐時的土壤沖蝕增量，該係數值可參照陳明杰(2007)之研究。

台灣有關疏伐程度對土壤沖蝕量影響的資料闕如，僅陳明杰(2007)整理前人於泰國所做的實驗，針對 41 場暴雨，總降雨量達 1128mm 的情況下，觀測不同樹冠層比率的林地地表逕流量和土壤沖蝕量的相關性。該研究指出，樹冠層覆蓋率愈低，將使林地土壤沖蝕量愈高；反之，則土壤沖蝕量將愈低，意即疏伐強度愈強，土壤沖蝕的情況將越高。本研究擬探討不同疏伐強度相較於未疏伐時之土壤沖蝕增量，但林地即使在不經營的狀態下仍會有土壤自然流失量，故以該文中最低覆蓋率之土壤流失量視為未進行疏伐或伐採狀態下之土壤自然流失量，以內插法及外插法推估不同疏伐強度之土壤沖蝕增量，各疏伐強度之增量如表 8-1-2 所示。

表 8-1-2、不同疏伐程度的土壤沖蝕增量

疏伐強度	土壤沖蝕增量(ton/ha)
皆伐	0.3677
強度	0.2272
中度	0.1718
弱度	0.0875

資料來源：整理自陳明杰(2007)



## 二、多目標森林經營之最適疏伐規劃

本研究以三階複選目標規劃法配合多段目標規劃法試著找出能達成多目標森林經營之最適疏伐期程。如表 8-2-1 所示，運算至第三次時，各目標值的變動率雖然為 0%，然而，碳吸存目標相較於原先設定之最高期望目標值 1,380,000 公噸，仍有 5.34% 的增加空間，土壤沖蝕控制目標相較於最低期望目標值 734 公噸仍有 24.10% 的下降空間，就業機會相較於最高期望目標值 3,750 人次仍有 20% 的增長空間。因此，本研究持續利用三階複選規劃法求解。

至第五次運算時，各目標值之變動率為 0%，且各目標值的增長空間已經縮小為 5% 左右，故本研究在此次停止求解。在 20 年經營期後，森林經營者可獲得的碳吸存目標為 1,327,500 公噸，土壤沖蝕控制目標為 967 公噸，就業機會目標為 3,125 個。相較於第一次求得解，碳吸存及就業機會目標值分別增加 7.06% 及 25%，表示三階複選規劃法確實可協助經營者找到更佳解。而土壤沖蝕控制目標自始至終並未變動，表示該目標在第一次求解獲得之目標值恰巧可與另外兩個目標的目標值設定配合，其他目標的目標值變動不會影響該目標，但若將碳吸存目標或就業機會目標的目標值設定進行大幅度調整，則土壤沖蝕控制目標可能會隨之變動。

表 8-2-1、三階複選規劃法之計算過程

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
碳吸存 (ton)	1380000	1380000	1380000	1345000	1345000
	<u>1240000</u>	<u>1310000</u>	1345000	<u>1327500</u>	1336250
	1100000	1240000	<u>1310000</u>	1310000	<u>1327500</u>
土壤 沖蝕 控制(ton)	1500	<u>967</u>	<u>967</u>	<u>967</u>	<u>967</u>
	1000 <u>967</u>	734	851	909	938
	500	500	734	851	909
就業 機會 (人)	5000	3750	3750	3438	3282
	3750	<u>3125</u>	3438	3282	3204
	<u>2500</u>	2500	<u>3125</u>	<u>3125</u>	<u>3125</u>

註：框選之數值為求得解

本研究進一步將疏伐規劃以及各經營目標在各期程的產出統整後列於表 8-2-2。在疏伐規劃部分，進行疏伐作業的林地面積總共有 4818.78 公頃，這些疏伐地主要來自於齡級 11-20 及 31-40 之林分，各分別疏伐 2633 及 2186 公頃的林，幾乎佔各齡級之所有面積。然而，未進行疏伐的林地面積尚有 5960.22 公頃，主要來

自齡級 21-30 公頃的林分，有 5949.22 公頃，也幾乎是該齡級的所有面積。

上述疏伐面積的分配可由碳吸存目標及疏伐木限制說明。由於齡級 11-20 年生的林分生長力最佳，有最高的碳吸存能力，故在第一期程時疏伐該齡級所有林地，在該期程的疏伐木數量也將限制後續期程的疏伐木數量。第二期程的疏伐木數量會受第一期限制，決策者必須從齡級 21-30 及 31-40 的林分挑選適當的面積獲取疏伐木以盡量接近第一期程的疏伐木量。值得注意的是，齡級 31-40 的林地的碳吸存能力較齡級 21-30 的林地差，但第二期程時卻主要疏伐齡級 31-40 的林地，此因齡級 21-30 的林分單位面積蓄積量較低，相較於單位面積林分蓄積較佳的 31-40 齡級，必須伐採較多面積的林地方能得到相同數量的疏伐木，爲了考量碳吸存以外的土壤沖蝕控制目標，則必須針對齡級 31-40 的林分進行疏伐以減少疏伐面積，進而減少土壤沖蝕量。

本研究接著分析各齡級在各期程的疏伐程度分配，發現齡級 11-20 的林分有 2300 公頃的面積在第一期程即進行中度疏伐，此因該齡級在中度疏伐後的生長力最佳，若施以強度疏伐反而會使其生長力降低。而該齡級在第三及第四期程則分別有 224 及 107 公頃的面積施以強度疏伐，此因齡級成熟的林分必須以強度疏伐方能刺激其林木生長，也因此，齡級 31-40 的林分在第一至四期程分別有 17、822、630 及 706 公頃的林地進行強度疏伐。其餘進行弱度疏伐的少數面積，例如第二期程時 11-20 齡級的 2 公頃與 21-30 齡級的 0.32 公頃，第三期程時齡級 21-30 的 0.59 公頃，本研究認爲係用以滿足各期疏伐木收穫等量收穫的條件而附加伐採。

疏伐期程中具有附加價值的疏伐木收穫主要來自於齡級 11-20 及 31-40 的林分，各期的疏伐木收穫量合於本研究所設定的各期疏伐木收穫等量限制，第一至第四期程分別收穫 122,185.28、12,8632.30、141,462.44 及 155,482.38 立方公尺，呈現遞增的情形，此係因爲在收穫等量限制中有上下 10% 的容許誤差，爲了最佳化林木之碳吸存能力同時提供較多的就業機會，故後續期程的疏伐木數量均達成收穫限制中的上限。在四個疏伐期程後，總共收穫 547,762.40 立方公尺，並沒有達到本研究設定的疏伐木總量門檻，本研究推測此原因係受限於土壤沖蝕控制目標，是位了避免疏伐過多面積增加土壤沖蝕量。

本研究將各經營目標可達成的目標值列於表 7-2-2。首先，碳吸存目標的產出主要由齡級 11-20 及 21-30 兩個生長力較佳之林分生產，20 年後共分別生產

536,509.10 及 530,286.40 公噸的二氧化碳，齡級 31-20 林分的疏伐面積雖然與 11-20 齡級之林分接近，但由於其即使受到疏伐刺激，生長力仍偏弱，故只產出 260,704.52 公噸的二氧化碳。各期程透過疏伐獲得的總碳吸存量接近，第一至第四期程分別為 316,592.53、337,154.45、314,956.04 及 358,798.00 公噸，四個期程後總共可獲得 1,327,500.02 公噸的二氧化碳產出。

土壤沖蝕控制目標與疏伐面積與強度呈正相關，第一期程由於疏伐 2,317 公頃的面積，故當期的土壤沖蝕量為 399 公噸，但隨後由於伐採單位面積蓄積量較高的林地，伐採面積也隨之降低，故第二至第四期程的土壤沖蝕量降低為 186.96、194.08 及 186.96 公噸，四個期程總計有 967 公噸的土壤沖蝕增量。

就業機會目標則與疏伐木數量呈正相關，故每期所提供的就業機會接近，且呈遞增趨勢，各期分別為 697.07、733.85、807.05 及 887.03 個，總計 3125 個就業機會，也就是每年可提供約 156.25 個就業機會。

雖然近年台灣森林經營強調森林減碳，但若比較疏伐對減碳等多目標森林經營及單一碳吸存量目標的結果可知，多目標經營之碳吸存量略低，只減少了約 4% 左右的碳吸存量，但土壤沖蝕量卻可減少高達約 33%，更能達到森林維護國土安全的功能。此外，就業機會雖然減少約 33%，但考量人民生命財產安全顯然更為重要。

表 8-2-2、碳吸存等多目標森林經營之疏伐期程規劃與產出

			第一期	第二期	第三期	第四期	合計	no thinning
疏伐規劃	疏伐面積 (ha)	11-20	2300 <sup>M</sup>	2 <sup>W</sup>	224 <sup>S</sup>	107 <sup>S</sup>	2633.00	0 <sup>N</sup>
		21-30	0	0.32 <sup>W</sup>	0.59 <sup>W</sup>	9.87 <sup>S</sup>	10.78	5949.22 <sup>N</sup>
		31-40	17 <sup>S</sup>	822 <sup>S</sup>	630 <sup>S</sup>	706 <sup>S</sup>	2175.00	11 <sup>N</sup>
		total	2317	824.32	854.59	882.87	4818.78	5960.22 <sup>N</sup>
	疏伐木 (m <sup>3</sup> )	11-20	119876.00	75.38	30708.16	17785.71	168445.25	
		21-30	0.00	13.42	28.98	1652.57	1694.97	
		31-40	2309.28	128543.50	110725.30	136044.10	377622.18	
		total	122185.28	128632.30	141462.44	155482.38	547762.40	
經營目標	碳吸存 (ton)	11-20	142608.50	149804.40	130962.40	113133.80	536509.10	
		21-30	130073.00	122791.10	110783.30	166639.00	530286.40	
		31-40	43910.03	64558.95	73210.34	79025.20	260704.52	
		total	316591.53	337154.45	314956.04	358798.00	1327500.02	
	土壤沖蝕 控制(ton)	11-20	395.14	0.18	50.89	24.31	470.52	
		21-30	0.00	0.03	0.05	2.24	2.32	
		31-40	3.86	186.76	143.14	160.40	494.16	
		total	399.00	186.96	194.08	186.96	967.00	
	就業機會(人)	total	697.07	733.85	807.05	887.03	3125.00	

註：S=強度疏伐，M=中度疏伐，W=弱度疏伐，N=不疏伐

### 三、小結

本研究透過三階複選目標規劃法配合多段目標規劃法的結合運算，節省許多疏伐方案組合的設定與比較，並找到最適疏伐期程的規劃，獲取較佳的森林減碳等森林經營目標。在結合此二種方法運算求解時，誠如多段目標規劃法應用評估的小結所述，本研究同樣面臨運算時間過長的問題，但後續研究者可採取線段式的設定方式解決此問題。而本研究在設定各目標值的達成目標時，乃採取各目標重要程度相等的狀況，也就是將各目標的權重分別設定為 1，但後續研究者可視經營需求調整權重，或者，可直接將各目標設定較高的目標值，以代替權重設定。



## 第玖章、結果與討論

在評估台灣進行疏伐減碳的成本效能實屬可行後，本研究旨在改良複選目標規劃法及其相關技術在疏伐減碳等多目標森林經營之應用。首先探討複選目標規劃法在設定目標值時可能因設定偏差而無法找到較佳理想解的狀況，並提出三階複選目標規劃法改善此問題。接著，本研究利用加拿大多目標森林經營案例分別探討複選目標規劃法及三階複選目標規劃法之適用性，並檢證後者是否可改善前者的求解效率。此外，也以新竹林管處柳杉人工林為案例，利用多段目標規劃法配合線性規劃法將疏伐面積及疏伐程度二個決策變數同時納入考量，以此建置疏伐減碳規劃法模型，探討該方法的適用性。確認三種方法在林業經營規劃可行後，本研究整合三種方法提出新竹柳杉人工林之最適疏伐減碳多目標規劃。

研究結果顯示，複選目標規劃法可協助森林經營者同時考量多種森林替代方案並找出最適方案，例如森林經營期程的抉擇。該方法也可協助森林經營者找到更佳的森林經營規劃以獲得更多的森林產出，但也會發生本研究所指出的目標值設定偏差問題。本研究提出之三階複選目標規劃法則可確保決策者不會有期望目標值的設定偏差，且該方法可在每次計算過程中縮減一半的搜尋範圍，並省略一連串目標值的設定及求解後的理想解比較，迅速找到較佳的理想解。接著，多段目標規劃法建置之新竹林管處人工林疏伐減碳模型研究結果顯示，該方法可節省 768 次的模擬次數，計算一次即可找出最適疏伐期程。並可針對不同齡級之林分施以適當程度的疏伐促其發揮最佳碳吸存功效，例如對年輕林分施以中度疏伐，或對成熟林分施以強度疏伐。

本研究最後整合三階複選目標規劃法及多段目標規劃法進行新竹林區管理處之疏伐減碳多目標規劃。研究結果指出，應用該二方法確實可規劃出適當的疏伐期程，達到既定之碳吸存、就業機會及土壤保護經營目標，各齡級之林分也都施以適當的疏伐作業促其發揮最佳之森林功效，但卻仍有求解耗時甚長之問題。本研究建議，後續研究者在設定三階複選目標規劃及多段目標規劃法時，可利用修正後複選目標規劃法(revised MCGP)的方式，在設定目標值及參數值之搜尋範圍後，以線段式的搜尋概念替代設定多階層數值的方式減少模型中二元變數的數量，增加電腦求解效率。

承研究結果所述，本論文印證 3-level MCGP 及 MSGP 在疏伐減碳等多目標

規劃之實用性，後續研究者可再將此二種方法應用至不同的研究範疇，例如在新竹以外的七個林區管理處挑選符於成本效益的人工林區位進行規劃，然而，此二種方法在使用上仍受基礎資料建置不足的問題限制。3-level MCGP 係更有效率的設定 MCGP 以找到更好的規劃結果，早期研究者使用傳統 GP 進行的研究，如森林伐採規劃研究可利用此方法找到更好的林地伐採規劃而求得更佳解。此類研究也較不受限於樹種或林地區位等變數影響，例如以面積為決策變數時，可利用各種測計方法推估每公頃森林之蓄積，以作為伐採面積之對應參數。但若研究者欲探討森林伐採對於森林功能之影響，例如伐採每公頃森林對森林遊憩人數的影響，則仍面臨缺乏基礎資料推估之窘境。而 MSGP 在林業經營的應用限制相較於 MCGP 或 3-level MCGP 更多，因該方法係將參數視為決策變數，可套用的研究議題不多，能找到相對應的參數值更為不易。以本研究的疏伐程度設定為例，樹種選取必須受限於柳杉或台灣杉，因此二樹種有較完整的疏伐後林木生長模式可供換算疏伐後的減碳功效，故若欲模擬其他樹種的疏伐減碳規劃較為不易。此外，利用疏伐促進野生動植物資源等森林功能的模擬也同樣受限，因為目前尚未有模式探討疏伐程度與野生動植物資源等森林功能之間的關係。因此，研究者若利用 MSGP 處理林業經營問題，目前似乎僅能探討疏伐與林木收穫之間的關係，應用範圍較為受限。

最後，本研究提出此二種方法在森林經營之後續研究建議可分成多目標森林經營規劃、林地規劃及森林作業規劃三個議題討論。在多目標森林經營規劃的部分，環保及減碳趨勢促使林木資源的循環利用日益重要，森林經營者可重拾傳統的森林經營概念，以輪伐期提出一套可永續利用林木資源的森林伐採規劃。但林木收穫尚須兼顧水源涵養、國土保安等森林功能，此可仰賴 MCGP 與 3-level MCGP 求得最適規劃。然而，傳統輪伐期的制訂係根據林木收穫最大化單一目標所設定，輪伐期是否應重新調整以因應多目標森林經營，值得重新定義與探討。在林地規劃部分，目前台灣各林地依照土地利用狀況進行區分，以自然保護區設定為例，區分為核心區、緩衝區及永續利用區，此三種區域面積大小的設定可利用 MCGP 與 3-level MCGP 進行規劃，但前提是必須取得相關參數，例如核心區每增加一公頃可增加的野生動物數量，以此換算 Shanon 生物歧異度指數，提出可提高核心區生物多樣性的最適規劃。不同的森林作業規劃對森林功能有不同的影響，例如不同程度的施肥對林木生長有不同的效果，若可取得相關參數，則可



## 第拾章、參考文獻

- 王立志. (1996). 氣候變遷對台灣林業的衝擊與適應. Paper presented at the 氣候變遷衝擊評估與因應策略建議研討會, 台大思亮館.
- 王松永, 張豐丞, 李怡真, 楊賜霖, & 林法勤. (2005). 柳杉疏伐木有效利用之探討. *臺大實驗林研究報告*, 19(4), 293-300.
- 任意安, & 陳宛君. (1996). 六龜試驗林疏伐作業個案採運成本及疏伐效率分析. *台灣林業科學*, 11(4), 475-480.
- 吳俊賢, 林俊成, 李國忠, 陳溢宏, 林麗貞, & 林瑞進. (2005). 森林能源作物之二氧化碳吸存效果與能源產出效率. *台大實驗林研究報告*, 19(1), 43-53.
- 吳珮瑛, 林宗昱, & 劉哲良. (2010). 不同國際組織與結盟下之碳排放交易成本有效性的檢視. *法制論叢*, 46, 41-84.
- 吳學平. (2000). 新竹林區柳杉人工林疏伐工作之研究. 國立台灣大學森林學系碩士論文.
- 李國忠, 林俊成, 賴建興, & 林麗貞. (2004). 台大實驗林森林生態系不同林分經營策略之碳貯存效果. *臺大實驗林研究報告*, 18(4), 261-272.
- 李意德, 曾慶波, 吳仲民, 周光益, & 陳步峰. (1998). 我國熱帶天然林植被C貯存量的估算. *林業科學研究*, 11(2), 156-162.
- 李國忠, 林俊成, & 陳麗琴. (2000). 台灣杉人工林碳吸存潛力及其成本效益分析. *台灣林業科學*, 15(1), 115-123.
- 林俊成, 李國忠, & 林裕仁. (1999). 柳杉人工林碳貯存效果與適應成本研究. *臺大實驗林研究報告*, 13(1), 51-60.
- 林裕仁, 李國忠, & 林俊成. (2002). 以生物量與材積關係式推估台灣地區森林林木碳貯存量之研究. *台大實驗林研究報告*, 16(2), 71-79.
- 林裕仁, 劉瓊霏, & 林俊成. (2002). 台灣地區主要用材比重與碳含量測定. *台灣林業科學*, 17(3), 291-299.
- 林俊成, 鄭美如, 劉淑芬, & 李國忠. (2002). 全民造林運動二氧化碳吸存潛力之經濟效益評估. *台灣林業科學*, 17(3), 311-321.
- 邱志明. (2006). 疏伐撫育經營策略對森林碳吸存之影響. *林業研究專訊*, 13(1), 6-9.

- 邱志明. (2009). 疏伐對紅檜人工林碳吸存效益之評估. *林業研究專訊*, 16(2), 31-36.
- 袁孝維, 丁宗蘇, & 謝欣怡. (2005). 柳杉造林地疏伐對野生動物群聚的影響. *Zoological Studies*, 44(3), 393-402.
- 高強. (1982). 臺灣柳杉最佳疏伐與輪伐期之經濟分析. 台北: 國立成功大學工業管理科學系.
- 郭迺鋒, 謝秀宜, & 王淑眉. (2001). 電子商務經營模式的不確定因素對企業獲利之影響. *產業金融季刊*, 110, 2-15.
- 陳明杰. (2007). 疏伐作業對人工林林地水土保持影響. *林業研究專訊*, 14(1), 10-13.
- 馮豐隆. (2000). 固定源總量調查-森林碳吸存之效益評估期末報告: 行政院環境保護署.
- 楊盛行. (1997). 臺灣地區森林二氧化碳之涵容量估算. *中華生質能源學會會誌*, 16(2), 1-10.
- 楊榮啓, & 林文亮. (2003). *森林測計學*. 台北: 國立編譯館.
- 楊榮啓, 陳昭明, & 林文亮. (1976). 柳杉人工林之經濟疏伐 (pp. 39-94): 國立台灣大學農學院實驗林研究報告.
- 楊榮啓, 馮豐隆, & 黃俊維. (1998). 林業對溫室氣體減量策略規劃及衝擊評估 (二).
- 鄭欽龍, 陳重銘, & 陳瑩達. (2006). 台灣人工林疏伐成本之計量分析. *中華林學季刊*, 39(1), 57-66.
- Arp, P. A., & Lavigne, D. R. (1982). Planning with goal programming: a case study for multiple- use of forested land. *Forest Chronicle*, 58, 225-232.
- Balboa-Murias, M. Á., Rodríguez-Soalleiro, R., Merino, A., & Álvarez-González, J. G. (2006). Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecology and Management*, 237, 29-38.
- Baral, A., & Guha, G. S. (2004). Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit. *Biomass and Bioenergy*, 27, 41-55.

- Bass, S., Dubois, O., & Costa, P. M. (2000). *Rural livelihood and carbon management*. London: International Institute for Environment and Development
- Bäumler, R., & Zech, W. (1999). Effects of forest thinning on the streamwater chemistry of two forest watersheds in Bavarian Alps. *Forest Ecology and Management*, 116, 119-128.
- Bell, E. F. (1976). Goal programming for land use planning. Oregon: USDA Forest Service.
- Berndes, G., Hoogwijk, M., & Broek, R. v. d. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25, 1-28.
- Bertomeu, M., & Romero, C. (2001). Managing forest biodiversity: a zero- one goal programming approach. *Agricultural System*, 68(197-213).
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2009). *Forest management and planning*. Boston: Amsterdam.
- Biswal, M. P., & Acharya, S. (2009). Transformation of a multi- choice linear programming problem. *Applied Mathematics and Computation*, 210, 182-188.
- Bjornstad, E. (2005). An engineering economics approach to the estimation of forest fuel supply in North- Trondelag country, Norway. *Biomass and Bioenergy*, 10, 161-188.
- Bottoms, K. E., & Bartlett, E. T. (1975). Resource allocation through goal programming. *Journal of Range Management*, 28(6), 442-447.
- Bravo, F., Jandl, R., Gadow, K. V., LeMay, V. (2008). Forest management strategies and carbon sequestration, in Gadow, K., Pukkala. T., Tomé, M. (Eds.), *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*. Springer Inc., Heidelberg, pp. 179-194.
- Brazee, R. J., & Newman, D. H. (1999). Observations on recent forest economics research on risk and uncertainty. *Journal of Forest Economics*, 5(2), 193-200.
- Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., & Kellomäki, S. (2006). Carbon stocks and timber yield in two boreal forest ecosystems under current and changing climatic conditions subjected to varying management regimes. *Environmental Science and Policy*, 9, 237-252.
- Brodie, J. D., Adams, D. M., & Kao, C. (1978). Analysis of economic impacts on

- thinning and rotation for Douglas- fir using dynamic programming. *Forest Science*, 24(4), 513-522.
- Brodie, J. D., & Kao, C. (1979). Optimizing thinning in Douglas- fir with three-descriptor dynamic programming to account for accelerated diameter growth. *Forest Science*, 25(4), 665-672.
- Brose, P., & Wade, D. (2002). Potential fire behavior in pine flatwood forests following three different fuel reduction techniques. *Forest Ecology and Management*, 163, 71-84.
- Buongiorno, J., & Gilless, J. K. (2003). *Decision methods for forest resource management*. Boston: Academic.
- Chang, C. T. (2007). Multi-choice goal programming. *Omega*, 35, 389-396.
- Chang, C. T. (2008). Revised multi-choice goal programming. *Applied Mathematical Modelling*, 32(12), 2587-2595.
- Charnes, A., & Cooper, W. W. (1961). *Management models and industrial applications of linear programming* (Vol. 1). New York: Wiley.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Ferguson, R. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management Science*, 1, 138-151.
- Chiang, J. M., McEwan, R. W., Yaussy, D. A., & Brown, K. J. (2008). The effects of prescribed fire and silvicultural thinning on the aboveground carbon stocks and net primary production of overstory trees in an oak-hickory ecosystem in southern Ohio. *Forest Ecology and Management*, 255, 1584-1594.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber Management: A Quality Approach*. New York: Wiley.
- Davis, L. S., Johnson, K. N., Bettinger, P. S., & Howard, T. E. (2001). *Forest Management*. New York: McGraw-Hill.
- De Kluyver, C. A., Daellenbach, H. G., & Whyte, A. G. D. (1980). A two- stage, multiple objective mathematical programming approach to optimal thinning and harvesting. *Forest Science*, 26(4), 674-686.
- Demirbas, A. (2004). Bioenergy, Global Warming, and Environmental Impacts. *Energy Sources*, 26, 225-236.
- Diaz-Balteiro, L., & Rodriguez, L. C. E. (2006). Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration- A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management*, 229, 247-258.

- Diaz-Balteiro, L., & Romero, C. (2003). Forest management optimisation models when carbon captured is considered: a goal programming approach. *Forest Ecology and Management*, 174, 447-457.
- Dieter, M. (2001). Land expectation values for spruce and beech calculated with Monte Carlo modeling techniques. *Forest Policy and Economics*, 2(2), 157-166.
- Domac, J., Richards, K., & Risovic, S. (2005). Socio- economic drivers in implementing bioenergy projects. *Biomass and Bioenergy*, 28, 97-106.
- Eriksson, E. (2006). Thinning operations and their impact on biomass production in stands of Norway spruce and Scots pine. *Biomass and Bioenergy*, 30, 848-854.
- Fearnside, P. (1999). Forests and global warming mitigation in Brazil: opportunities in the Brazilian forest sector for responses to global warming under the "clean development mechanism". *Biomass and Bioenergy*, 16, 171-189.
- Field, D. B. (1973). Goal programming for forest management. *Forest Science*, 19, 125-135.
- Field, D. B. (1973). Goal programming for forest management. *Forest Science*, 19, 125-135.
- Finkral, A. J., & Evans, A. M. (2008). The effects of a thinning treatment on carbon stocks in a northern Arizona ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management*, 225, 2743-2750.
- Freppaz, D., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., Sacile, R., & Taramasso, A. (2004). Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. *Biomass and Bioenergy*, 26, 15-25.
- Fukuda, M., Iehara, T., & Matsumoto, M. (2003). Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan. *Forest Ecology and Management*, 184, 1-16.
- Guan, B. T., Huang, Z. B., & Chung, N. J. (2003). Possible impacts of climate change on potential tree plant forms of a mountain region in central Taiwan. *Taiwania*, 48(4), 259-272.
- Harmon, M. E., & Marks, B. (2002). Effects of silvicultural practices on carbon stores in Douglas- fir—western hemlock forests in the Pacific Northwest, USA.: results from a simulation model. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 863-877.
- Hayes, J. P., Chan, S. S., Emmingham, W. H., Tappeiner, J. C., Kellogg, L. D., &

- Bailey, J. D. (1997). Wildlife response to thinning young forests in the Pacific Northwest. *Journal of Forestry*, 95(8), 28-33.
- Heikkilä, J., Sirén, M., & Äijälä, J. O. (2007). Management alternatives of energy wood thinning stands. *Biomass and Bioenergy*, 31, 255-266.
- Helms, J. A. (1998). *The Dictionary of Forestry*. Bethesda, MD: Society of American Forests.
- Hertz, D. B., & Thomas, H. (1983). *Risk Analysis and Its Application*. New York: N. Y.: Wiley.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2001). *Introduction to Operation Research* (7th ed.). New York: N. Y.: McGraw-Hill.
- Homeyack, J. A., Harrison, D. J., & Krohn, W. B. (2005). Long-term effects of precommercial thinning on small mammals in northern Maine. *Forest Ecology and Management*, 205, 43-57.
- Hotvedt, J. E. (1983). Application of linear goal programming to forest harvest scheduling. *Southern Journal of Agricultural Economics*, 15, 103-108.
- Huang, C. H., & D., K. G. (2001). The cost of sequestering carbon on private forest lands. *Forest Policy and Economics*, 2, 133-142.
- Ignizio, J. P. (1976). *Goal programming and extensions*. Lexington: Lexington Books.
- Judge, G. G., Griffiths, W. E., Hill, R. C., Lutkepohl, H., & Lee, T. C. (1988). *Introduction to the theory and practice of econometrics* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Kanninen, M., Péres, D., Montero, M., & Viquez, E. (2004). Intensity and timing of the first thinning of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica: results of a thinning trial. *Forest Ecology and Management*, 203, 89-99.
- Kao, C., & Brodie, J. D. (1979). Determination of optimal thinning entry interval using dynamic programming. *Forest Science*, 25(4), 672-674.
- Kao, C., & Brodie, J. D. (1980). Simultaneous optimization of thinnings and rotation with continuous stocking and entry intervals. *Forest Science*, 26(3), 338-346.
- Kimmins, J. P. (1997). Predicting sustainability of forest bioenergy production in the face of changing paradigms. *Biomass and Bioenergy*, 13(4), 201-212.
- Klemperer, W. D. (1996). *Forest Resource Economic and Finance*. New York: McGraw-Hill.

- Larocque, G. R., Bhatti, J. S., Boutin, R., & Chertov, O. (2008). Uncertainty analysis in carbon cycle models of forest ecosystems: research needs and development of a theoretical framework to estimate error propagation. *Ecological Modelling*, *219*, 400-412.
- Lee, S. M. (1972). *Goal programming for decision analysis*. Philadelphia: Auerback.
- Levitin, A. (2003). *Introduction to the Design & Analysis of Algorithm*. Boston: Addison-Wesley.
- Liao, C. N. (2009). Formulating the multi- segment goal programming. *Computer and Industrial Engineering*, *56*, 138-141.
- Malinen, J., Pesonen, M., Maatta, T., & Kajanus, M. (2001). Potential harvest for wood fuels(energy wood) from logging residues and first thinning in Southern Finland. *Biomass and Bioenergy*, *20*, 189-196.
- Matthews, J. (1989). *Silvicultural Systems*. Oxford: Oxford University Press.
- Matthews, R. W. (2001). Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems. *Biomass and Bioenergy*, *21*, 1-19.
- McAllister, W. (2007). *Data structures and algorithms using Java*. Sudbury: Mass: Jones and Bartlett Publishers.
- McHale, M. R., McPherson, E. G., & Burke, I. C. (2007). The potential of urban tree plantings to be cost effective in carbon credit markets. *Urban Forestry and Urban Greening*, *6*, 49-60.
- Mederski, P. S. (2006). A comparison of harvesting productivity and costs in thinning operations with and without midfield. *Forest Ecology and Management*, *224*, 286-296.
- Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multi- criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modeling paradigms. *Forest Ecology and Management*, *230*, 1-22.
- Nhantumbo, I., Dent, J. B., & Kowero, G. (2001). Goal programming: Application in the management of the miombo woodland in Mozambique. *European Journal of Operational Research*, *133*, 310-322.
- Nurmi, J. (1999). The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy*, *17*, 41-47.
- Oliveira, F. d., Volpi, N. M. P., & Sanquetta, C. R. (2003). Goal programming in a planning problem. *Applied Mathematics and Computation*, *140*, 165-178.

- Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S., & Mäkipää, R. (2006). Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soil and vegetation. *Forest Ecology and Management*, 232, 75-85.
- Plantinga, A. J., Mauldin, T., & Miller, D. J. (1999). An econometric analysis of the costs of sequestering carbon in forests. *American Journal of Agricultural Economics*, 81(4), 812-824.
- Pohjola, J., & Valsta, L. (2007). Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics*, 9, 789-798.
- Richards, K., & Stokes, C. (2004). A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research. *Climatic Change*, 63(1/2), 1-48.
- Río, M. d., Barbeito, I., Bravo-Oviedo, A., Calama, R., Cañellas, I., Herrero, C., & Bravo, F. (2008). Carbon sequestration in Mediterranean pine forests. In K. Gadow, T. Pukkala & M. Tomé (Eds.), *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (Vol. 17, pp. 221-245). London: Springer.
- Romero, C. (1991). *Handbook of critical issues in goal programming*. Oxford: Pergamon.
- Salas, C., LeMay, V., Núñez, P., Pacheco, P., & Espinosa, A. (2006). Spatial pattern in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*, 231, 38-46.
- Schlamadinger, B., & Marland, G. (1996). The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy*, 10(5), 275-300.
- Schlamadinger, B., Spitzer, J., Kohlmaier, G. H., & Ludeke, M. (1995). Carbon balance of bioenergy from logging residues. *Biomass and Bioenergy*, 8(4), 221-234.
- Schoene, D., & Netto, M. (2005). The Kyoto Protocol: what does it mean for forests and forestry? *Unasylva*, 222(56), 3-10.
- Sheeran, K. A. (2006). Forest conservation in the Philippines: A cost-effective approach to mitigating climate change. *Ecological Economy*, 58, 338-349.
- Sorensen, C. D., Finkral, A. J., Kolb, T. E., & Huang, C. H. (2011). Short- and long-term effects of thinning and prescribed fire on carbon stocks in ponderosa pine stands in northern Arizona. *Forest Ecology and Management*, 261, 460-472.
- Sullivan, B. W., Kolb, T. E., Hart, S. C., Kaye, J. P., Dore, S., & Montes-Helu, M.

- (2008). Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 255, 4047-4055.
- Swisher, J. N. (1991). Cost and performance of CO<sub>2</sub> storage in forestry projects. *Biomass and Bioenergy*, 1(6), 317-328.
- Tamiz, M., Jones, D. F., & Eldarzi, E. (1995). A review of goal programming and its application. *Annals of Operation Research*, 58, 39-54.
- Vesterdal, L., Dalsgaard, M., Felby, C., Raulund-Rasmussen, K., & Jørgensen, B. B. (1995). Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 77(1-3), 1-10.
- Weintraub, A., & Romero, C. (2006). Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison. *Interfaces*, 36(5), 446-457.
- Worrell, R., & Hampson, A. (1995). The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils—a review. *Forestry*, 62, 62-85.
- Yanai, R. D., Twery, M. J., & S, L. S. (1998). Woody understory response to changes in overstory density: Thinning in Allegheny hardwoods. *Forest Ecology and Management*, 102(1), 45-60.
- Yin, Y., Wu, Y., & Bartell, S. M. (2009). A spatial simulation model for forest succession in the upper Mississippi river floodplain. *Ecological Complexity*, 6, 494-502.
- Yousefpour, R., & Hanewinkel, M. (2009). Modelling of forest conversion planning with an adaptive simulation- optimization approach and simultaneous consideration of the values of timber, carbon and biodiversity. *Ecological Economics*, 68, 1711-1722.

## 第拾壹章、附錄

### 附錄一、加拿大多目標森林經營案例之參數

Compartment #	1				2				3				4				5			
Land-use policy	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Variable	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$
Disp. recreation	6.25	3.90	0	0	7.50	4.69	0	0	9.38	5.9	0	0	7.50	4.69	0	0	9.38	5.90	0	0
Dev. recreation	.113	0	0	0	.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.129	0	0	0
Hunting	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05
Timber	0	61.1	61.1	0	0	59.9	59.9	0	0	65.2	65.2	0	0	70.7	70.7	0	0	70.4	70.4	0
Wildlife	.0116	.0139	.0139	.010	.0116	.0139	.0139	.010	.0133	.016	.016	.010	.0084	.010	.010	.010	.0133	.016	.016	.010

Compartment #	6				7				8				9				10			
Land-use policy	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
Variable	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$	$x_{26}$	$x_{27}$	$x_{28}$	$x_{29}$	$x_{30}$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{34}$	$x_{35}$	$x_{36}$	$x_{37}$	$x_{38}$	$x_{39}$	$x_{40}$
Disp. recreation	6.25	3.90	0	0	6.25	3.90	0	0	5.62	3.51	0	0	8.12	5.10	0	0	5.62	3.51	0	0
Dev. recreation	0	0	0	0	0	0	0	0	.046	0	0	0	.315	0	0	0	0	0	0	0
Hunting	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05	.05	.375	.375	.05
Timber	0	69.9	69.9	0	0	54.1	54.1	0	0	64.1	64.1	0	0	71.6	71.6	0	0	57.1	57.1	0
Wildlife	.010	.012	.012	.010	.0117	.014	.014	.010	.0099	.0118	.0118	.010	.0083	.0099	.0099	.010	.017	.014	.014	.010

Compartment #	Deviates										Goals (Demands)
Land-use policy	$d_1^-$	$d_1^+$	$d_2^-$	$d_2^+$	$d_3^-$	$d_3^+$	$d_4^-$	$d_4^+$	$d_5^-$	$d_5^+$	
Variable	$x_{41}$	$x_{42}$	$x_{43}$	$x_{44}$	$x_{45}$	$x_{46}$	$x_{47}$	$x_{48}$	$x_{49}$	$x_{50}$	
Disp. recreation	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	$G_1 = 1000$ disp. v.d./year
Dev. recreation	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	$G_2 = 320$ dev. v.d./year
Hunting	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	$G_3 = 957$ hunter v.d./year
Timber	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	$G_4 = 20,000; 120,000; 364,571$ m <sup>3</sup>
Wildlife	0	0	0	0	0	0	0	1	-1		$G_5 = 125$ deer



## 附錄二、以MSGP設定疏伐減碳規劃之部分程式

max=co;(碳吸存量最大化)  
Co=co1+co2+co3+co4;(碳吸存量總計)  
Co1=co11+co21+co31;(第一期碳吸存總量)  
Co2=co12+co22+co32;  
Co3=co13+co23+co33;  
Co4=co14+co24+co34;  
R1=r111+r211+r311;(第一期疏伐木總量)  
R2=r122+r222+r322;  
R3=r133+r233+r333;  
R4=r144+r244+r344;  
X111+x211+x311<2694.75;(各期面積限制)  
X112+x212+x312<2694.75;  
X113+x213+x313<2694.75;  
r1+r2+r3+r4<825406.69;(疏伐木總量限制)  
x111+x112+x113+x114+x115=2633;(11-20齡級林分的面積限制)  
X111>0;x112>0;x113>0;x114>0;x115>0;  
v111=x111\*130.3;v112=x112\*130.3;v113=x113\*130.3;v114=x114\*130.3;v115=x115  
\*130.3;(各期程的疏伐量)  
r111=v111\*(0.2\*b1111+0.4\*b1112+0.6\*b1113);(疏伐程度控制)  
s111=v111-r111;s112=v112;s113=v113;s114=v114;s115=v115;(疏伐後留存蓄積)  
@bin(b1111);@bin(b1112);@bin(b1113);(二元變數控制)  
co111=s111\*(0.6115\*b1111+1.2555\*b1112+0.8528\*b1113)\*0.319\*0.4974\*3.6667;  
co112=v112\*0.4462\*0.319\*0.4974\*3.6667;(碳吸存量)  
co113=v113\*0.4462\*0.319\*0.4974\*3.6667;  
co114=v114\*0.4462\*0.319\*0.4974\*3.6667;  
co115=v115\*0.4462\*0.319\*0.4974\*3.6667;  
co11=co111+co112+co113+co114+co115;  
v121=s111\*(1+0.6115\*b1111+1.2555\*b1112+0.8528\*b1113);(下一期林分蓄積)  
v122=1.4462\*s112;v123=1.4462\*s113;v124=1.4462\*s114;v125=1.4462\*s115;  
....(以下略)