

# 多目標數學規劃和地理資訊系統在林木資源經營規劃之研究

汪大雄<sup>1,2)</sup>

## 摘要

林木伐採收穫是林木經營計畫之中心。在面對森林多目標經營之環境下，理想的林木經營計畫除需考量森林內在之生態體系和生產潛能外，還需兼顧環境和社會外在因子之變遷。多目標數學規劃是一種藉用數學模式從事資源最適分配和規劃的技術。本研究利用多目標數學規劃和地理資訊系統技術以林務局阿里山事業區為例進行林木資源規劃，提供一多目標林木經營規劃之模式架構，俾供森林規劃之參考。透過阿里山事業區地理資訊系統和園有林事業區森林調查資料庫之聯合，在滿足地型、環境和政策等因素下，選出可供林木施業之地區 2400 公頃。採用分層基礎之概念，將該地區內之各林小班按樹種、齡級、作業法等因子分類形成不同大小之分析區。將每一分析區視成一經營單元，研擬各種施業方案，以 10 年為一計劃分期，配合模式 I 之架構，在考量林木生產和土壤流失兩個項目下，使用多目標數學規劃進行為期 60 年之林木資源規劃。

關鍵詞：多目標數學規劃、地理資訊系統、林木資源規劃、階段法。

汪大雄 1997 多目標數學規劃和地理資訊在森林經營應用整合之研究。台灣林業科學 12(2): 117-133。

## An Integration of Multiobjective Programming and Geographic Information System in Timber Management Planning

Dar-Hsiung Wang<sup>1,2)</sup>

### 【 Summary 】

Timber harvesting scheduling is the central task in timber management planning. In order to fulfill the multiple use of forest resources, the issues related to forest ecosystem, timber production capacity, environmental concern, and aspects of socio-economy and policy should be taken into account in timber management planning. Geographic Information System (GIS), a very powerful tool, provides sound geographic spatial information. Growth and yield models reflects the simulation of biological response. Multiobjective Programming (MOP) is served to solve for multiobjective harvesting scheduling problems. Timber production and soil loss are pursued in the harvesting scheduling model. Universal Soil Loss Equation (USLE) is used to estimate the sheet and rill erosion on forestlands resulting from alternate harvesting strategies. The actual data from Alishan National Forest in Taiwan is used to demonstrate the

1) 台灣省林業試驗所森林經營系，台北市南海路53號 Division of Forest Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nan-hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

2) 通訊作者 Corresponding author

1996年9月送審 1996年12月通過 Received September 1996, Accepted December 1996.

integrity of GIS and MOP in timber management planning.

**Key words:** geographic information system (GIS), multiobjective programming (MOP), timber harvesting scheduling, step method (STEM).

**Wang, D. H.** 1997. An integration of multiobjective programming and geographic information system in timber management planning. *Taiwan J. For. Sci.* 12(2): 117- 133.

## 一、緒言

森林經營規劃(Forest Management Planning)是安排協調森林各種不同之利用方式以期符合林主和社會大眾的要求。由於森林經營規劃之結果會對多層面造成衝擊(如經濟發展, 環境保護, 景觀美化等), 本質上, 森林經營規劃是一種多目標經營規劃的問題(Allen, 1986)。

本省森林資源以國有林為主, 依據全省第三次森林資源調查結果, 國有林面積已增至二百一十萬公頃, 成為最重要的自然資源(林務局, 1995)。國有林之森林資源因對社會、國家提供國土保安、涵養水源、環境綠化、森林遊樂、木材生產和野生動植物棲息環境之諸多功能, 故必須有效經營以便在諸多之財貨和勞務中, 在各種內外經營環境條件限制下, 找出一最佳有效之資源保育利用方式。欲達成上述目的, 則有賴一套完整理想的經營計畫。

林木之伐採收穫是林木經營計畫之中心。本省國有林之林木經營規劃, 自光復以來一直是使用以配分法為主之傳統森林收穫方法做為林木資源經營之依據。由於此種技術在決定林木資源收穫時只考慮到林木本身, 忽略了社會、經濟、政策和環境等多層面之因素, 使得產生的計畫不足以因應現代社會的需求。在今日倡導森林多目標經營和符合生態系理念之前提下, 合理林木經營計畫之編定除依據森林內在之生態體系和生產潛能外, 還須兼顧環境和社會等外在因子之變遷。數學規劃(Mathematical Programming, MP)基本上是較為符合上述要求之一種規劃法。

數學規劃是一種藉用數學模式從事資源最適化分配(Optimal Resource Allocation)的技術。自50年代被提出後, 數學規劃便廣泛地運用在各個領域如交通、經濟、工程和農業方面。在林業方面,

數學規劃中之線型規劃(Linear Programming, LP)也被美國森林學者應用於國有林之長期規劃(Leuschner *et al.*, 1975., Johnson and Scheurman, 1977; Kent, 1980)。其中又以 Timber RAM (Navon, 1971)和 FORPLAN (Johnson, 1986; Kent *et al.*, 1991)是美國林務署使用最為普遍的國有林經營規劃工具。

真實世界的許多決策問題是尋求多元且或互相衝突目標之達成。數學規劃雖然可藉用將其他目標當做限制式以求取單一主要目標最適解之方式來反映目標間多元化之特質, 然必須面臨限制式內之目標優先於主要目標和決定限制式內目標達成值之問題。因此使得傳統式(或稱單目標)之數學規劃在解決此類決策問題時就降低其實用價值。為解決上述問題, 多目標數學規劃便因應而生。此種技術是為改良單目標數學規劃之不足而產生一種可以在目標函數式同時考慮多個目標之規劃方法。在多目標數學規劃中, 除了一般常用的經濟準則外, 其它非經濟之準則也可一併考量, 如此決定的方案才較符合真實社會的要求, 進而滿足最大之公眾或社會福利。

多目標數學規劃依決策者(Decision Maker, DM)參與之程度和其偏好顯示之方式, 大致可分成無偏好導向法(Nonpreference-oriented Approach), 偏好事先導向法(Prior Articulation of Preference Approach)和偏好逐步顯示導向法(Progressive Articulation of Preference Approach)三大類(Cohon, 1978)。前者之特點是在規劃過程中, 決策者並不直接參與規劃, 而是在分析者(analyst)提供決策者數個方案後決策者再依據其偏好而自行選擇。在後二者中雖然決策者在規劃過程中均有直接參與, 但表示其偏好之方式有異。前者, 分析者是依據決策者事先顯示的偏好函數, 提供決策者在經營環境因素限制下一個最能滿足決策者要求的方案。後者則是在規劃分析過程中, 由

決策者和分析者形成一種交談式架構(interactive framework)。在此架構下,先由分析者提供決策者一方案,分析者在得到決策者之回饋後(feedback),再根據決策者最新顯示的偏好逐步修正,並提供決策者新的方案,如此繼續一直到產生讓決策者滿意的方案為止。

地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)是近年來發展出一種能有效提供森林經營規劃資訊的工具。雖然國內地理資訊系統和數學規劃在林業之研究逐漸增多(鄭祈全、周朝富, 1990;楊榮啟等, 1981, 1992;汪大雄, 1991;林文亮, 1992;郭傳鎮, 1994;黃志成, 1994),但有關地理資訊系統和經營規劃數學模式之聯合運用,則為數甚少(楊榮啟等, 1992)。因此本研究之目的是利用多目標數學規劃和地理資訊系統技術進行林地分類和林木規劃,以提供一多目標林木經營規劃之模式架構,供森林規劃時之參考。

在考量選擇適當多目標數學規劃之方法時,雖然目標規劃(Goal programming, GP)是屬上述第

二大類中常被使用之方法(Kao and Brodie, 1979; 許秀英, 1992; 楊榮啟, 1992),然此法常面臨決策者要在非常有限的資訊下做出偏好決策之困難。因此,本研究使用第三大類中之階段法(Step Method, STEM)以解決或緩和上述決策者決定偏好之問題(Bare and Mendoza, 1988)。另外,使用第一大類中的權數法(Weighting Method),以提供決策者較多之選擇方案。

## 二、材料和方法

### (一) 研究區域

林務局阿里山事業區係由林務局嘉義和南投林區管理處共同管理,因該事業區大多數的林班是劃分在嘉義林區管理處之轄區內,故本研究係以嘉義林區管轄之阿里山事業區為研究對象。阿里山事業區地跨嘉義縣阿里山鄉、竹崎鄉和南投縣信義鄉間,位於東經 120° 33'14" 至 120° 53'06", 北緯 23° 26'59" 至 23° 37'45"。

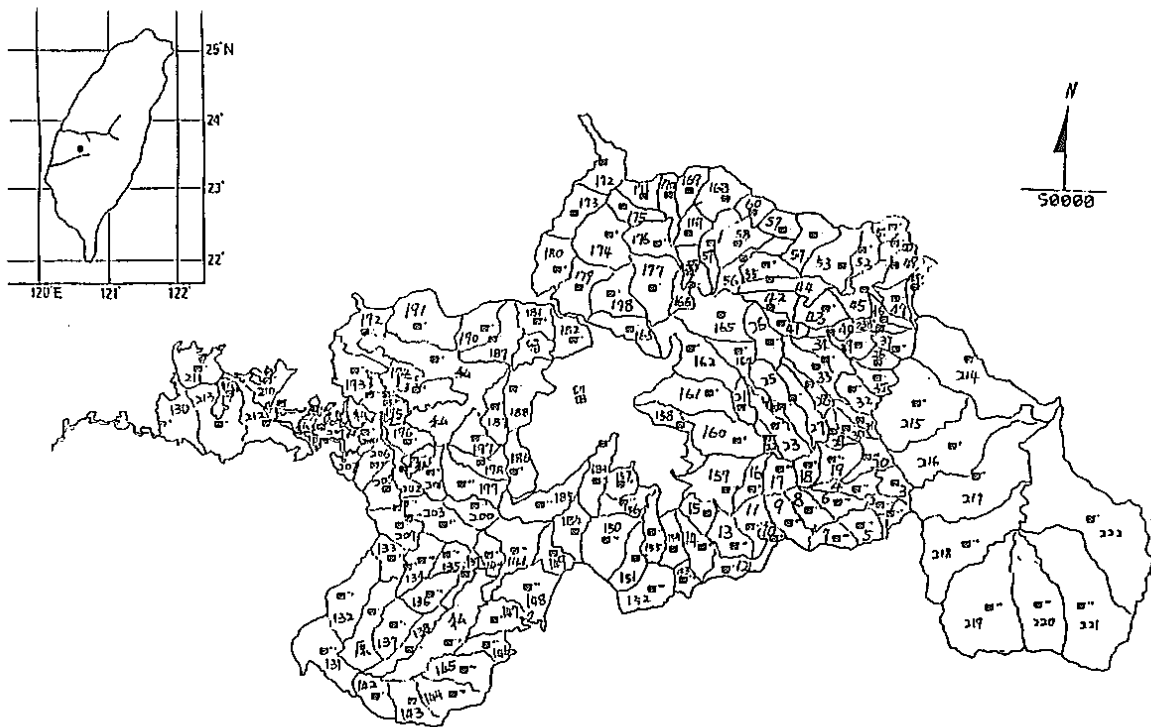


Fig. 1. Compartment map of Alishan Working Circle. (Source: Taiwan Forestry Bureau)

區內除國有林班地外，尚有若干山地保留地和私有林地。全事業區內之國有林地共劃分為 153 個林班，面積計 25,488 公頃。區內主要溪流為濁水溪和八掌溪，並有清水溪，陳有蘭溪，阿里山溪和石鼓盤溪等支流(林務局，1991)。Fig. 1 顯示阿里山事業區之林班分佈。

本區天然林開發年久，大部份之天然針葉樹林已砍伐殆盡，現今除保存部份的天然闊葉樹林外，多為人工造林及人民栽植之竹林地。區內對外交通因開發時間甚早，且有聞名於世之阿里山森林遊樂區，交通網路甚為便捷。

(二) 研究材料

1.地理資訊系統

由林務局提供阿里山事業區地理資訊系統，該系統內包含該事業區內最新完成的地面調查如水系、道路、行政區界、林型、材積和土壤等資料。

2.數值地型資料

由林務局提供，每一像元點(pixel)之解像力為地面 40 x 40 公尺，影像大小為 595 x 695 個像元。

3.國有林森林調查簿系統

由林務局提供阿里山事業區國有林森林調查簿，該系統包含阿里山事業區內每一小班之地況和林況等資料。

4.儀器設備

本研究使用的電腦設備是個人電腦和 Sparc 10 Sun 工作站，電腦軟體則為地理資訊系統套裝軟體(ARC/INFO)，影像處理套裝軟體(ERDAS)，線型規劃套裝軟體(LINDO)，資料庫處理軟體(DBASE)，暨統計套裝軟體(SAS)。

(三) 研究方法

1.地形圖之製作

利用該事業區數值地型資料，自行使用影像處理軟體 ERDAS，處理影像產生坡度、坡向和等高線等地形圖，一併納入阿里山事業區地理資訊系統。

2.森林施業地區之選擇

就研究區域內以 ARC/INFO 和 DBASE 在滿足各項地形、環境、政策等因素(如坡度、海拔高、河川、林相、林道距離等)之考量下，選出可供森林施業之地區，並進行阿里山事業區國有林調查簿和阿里山事業區地理資訊系統之連結。

3.林木生長和收穫之推估

參考前人之研究成果，或使用 SAS 自行配製式 1 非線型模式以推估林木之收穫量。

$$Y = B_0(1 - e^{-B_1 X}) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

Y：單位面積收穫量(m<sup>3</sup>/ha)

X：林齡

B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>：迴歸係數

4.土壤流失量之推估

利用式 2 之通用土壤沖蝕公式(Universal Loss Equation, USLE)計算林地單位面積之土壤沖蝕量。

$$Loss = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P \dots\dots\dots (2)$$

式中 Loss: 土壤流失量(ton · ha<sup>-1</sup> · y<sup>-1</sup>)

R<sub>m</sub>: 降雨沖蝕指數(rainfall erosivity)  
(mm · ha<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup> · y<sup>-1</sup>)

K<sub>m</sub>: 土壤沖蝕性指數(soil erodibility)  
(ton · hr · M<sub>j</sub><sup>-1</sup> · mm<sup>-1</sup>)

L: 坡長因子

S: 坡度因子

C: 作物管理因子(crop management factor)或稱覆蓋管理因子(cover management factor)

P: 水土保持處理因子(conservation practice)

5.林木資源長期經營之多目標規劃

在上述可供施業地區內以多目標數學規劃技術進行該事業區林木資源長期經營之規劃。由於本研究是國內首次嘗試以 STEM 來從事大面積林木資源之規劃，故特將 STEM 法之理論做一介紹，說明如下(Goicoechea *et al.*, 1982)：

STEM 法簡單來說是包含二大部份：首先是由分析者或規劃者自行審核模式內各目標後，得出一最接近理想解 (ideal solution) 的非低劣解 (noninferior solution)<sup>(1)</sup>。其次，決策者比較此兩組解，並指出那一目標之達成值可以減少以換取其它目標之改善。其演譯步驟如下：

(1)界定各目標函數值之範圍

對每一目標式執行式 3

$$\text{Max / Min } Z_k(x) = \sum_{j=1}^n C_{j,k} X_j \dots\dots\dots (3)$$

subject to  $x \in X$ , for  $k = 1, 2, \dots, Q$

式中  $Z_k$  為第  $k$  個目標值,  $X$  為可行解區域 (feasible region), 得解  $X$ 。

第  $k$  個目標之最佳值為  $Z_k^m (X^k)$ , 並令其它目標在解  $X^k$  之值分別為

$Z_i^k, i \neq k, i = 1, 2, \dots, Q$ , 則可得式 4 之償付表 (Pay-off Table)。其中  $Z_k^m, k = 1, 2, \dots, Q$ , 表示每一行之最差值。償付表中之對角線元素表示因目標間之多元化或衝突性, 而無法達成之理想解。

目標函數值

決策變數解 $X$	$Z_1$	$Z_2$	...	$Z_k$	...	$Z_p$
$X^1$	$Z_1^M$	$Z_2^1$	...	$Z_k^1$	...	$Z_p^1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$X^k$	$Z_1^k$	$Z_2^k$	...	$Z_k^M$	...	$Z_p^k$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$X^p$	$Z_1^p$	$Z_2^p$	...	$Z_k^p$	...	$Z_p^M$

.....(4)

(2)執行式 5 找出一離理想解差異最小之非低劣可到達解。

Min  $d$

subject to  $W_k (Z_k^m - Z_{k(x)}) \leq d, k = 1, 2, \dots, Q$ .

.....(5)

$x \in X^r$

$d \geq 0$

式中  $d$  表示一目標離其理想解值最大之加權偏差 (weighted deviation)

$W_k$ : 第  $k$  個目標之相對重要性 (即權數), 由式 6 決定

$X^r$ : 是由原來的可行解區域 (當  $r=1$ ) 加上第  $r+1$  次疊代 (iteration) 之新限制式後形成之新可行解區域。

$$W_k = \frac{\alpha_k}{\sum_{k=1}^Q \alpha_k} \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{式中 } \alpha_k = \left[ \frac{Z_k^M - Z_k^m}{Z_k^m} \right] \left[ \sum_{j=1}^n C_{jk}^2 \right]^{-1/2} \text{ 若 } Z_k > 0$$

$$\text{或 } \alpha_k = \left[ \frac{Z_k^m - Z_k^M}{Z_k^m} \right] \left[ \sum_{j=1}^n C_{jk}^2 \right]^{-1/2} \text{ 若 } Z_k < 0$$

(3)決策者在比較式 5 之解和理想解後, 區分可滿足和不滿足之目標, 並指出那些滿意目標之值可以減少, 以期換取其他非滿意目標值之改善。換言之, 對任一滿足之目標言之, 式 7 必須成立。

$$Z_1(X) \geq Z_1(X^r) - \Delta Z_1 \text{ for } Z_1(X^r) \in H_s \dots\dots\dots(7)$$

式中  $H_s$  為滿意目標之集合

$\Delta Z_1$ : 為第 1 目標值之減少值

同時對任一不滿足之目標  $j$  言之, 式 8 必須成立

$$Z_j(x) \geq Z_j(X) \text{ for } Z_j(X^r) \in H_u \dots\dots\dots(8)$$

式中  $H_u$  為非滿意目標之集合

將滿意目標之各權數  $W_i (i \in H_s)$  設為 0, 並重新依據式 6 計算各非滿意目標之權數  $W_j (j \in H)$ 。將  $X^r$  和式 7, 式 8 合併成新的可行解區域  $X^{r+1}$ 。

(4)回到步驟 2, 如此繼續疊代一直到決策者對所有目標均滿意為止。Fig. 2 顯示本研究之研究流程。

### 三、結果與討論

經營計劃之期間 (planning horizon) 國內外長短不一。一般言之, 為使林木經營能永續發展, 國外規劃期間多半甚長, 如美國林務署之規劃期長達 120 年, 國內則以 10 年為一經營計劃期。雖然臺灣森林經營管理方案第 15 項規定林業主管機關應擬定 40 年為期之林木資源發展目標, 據以研定十年為期之木材供需長期計畫, 但對一事業區林木之長期經營而言, 40 年之計劃期間似嫌不足。本研究在面臨永續發展和規劃模式大小 (經營

(1)非低劣解 (noninferior solutions) 定義為在一組可行解 (feasible solutions)  $X$  中, 沒有存在任何其它解  $x' \in X$ , 使得  $Z_q(x') > Z_q(x)$  對某些目標函數值  $q \in \{1, 2, \dots, p\}$ ,  $p$  為目標個數, 且  $Z_k(x') \geq Z_k(x)$  對所有  $k \neq q$  之目標, 則  $x$  便稱為非低劣解。

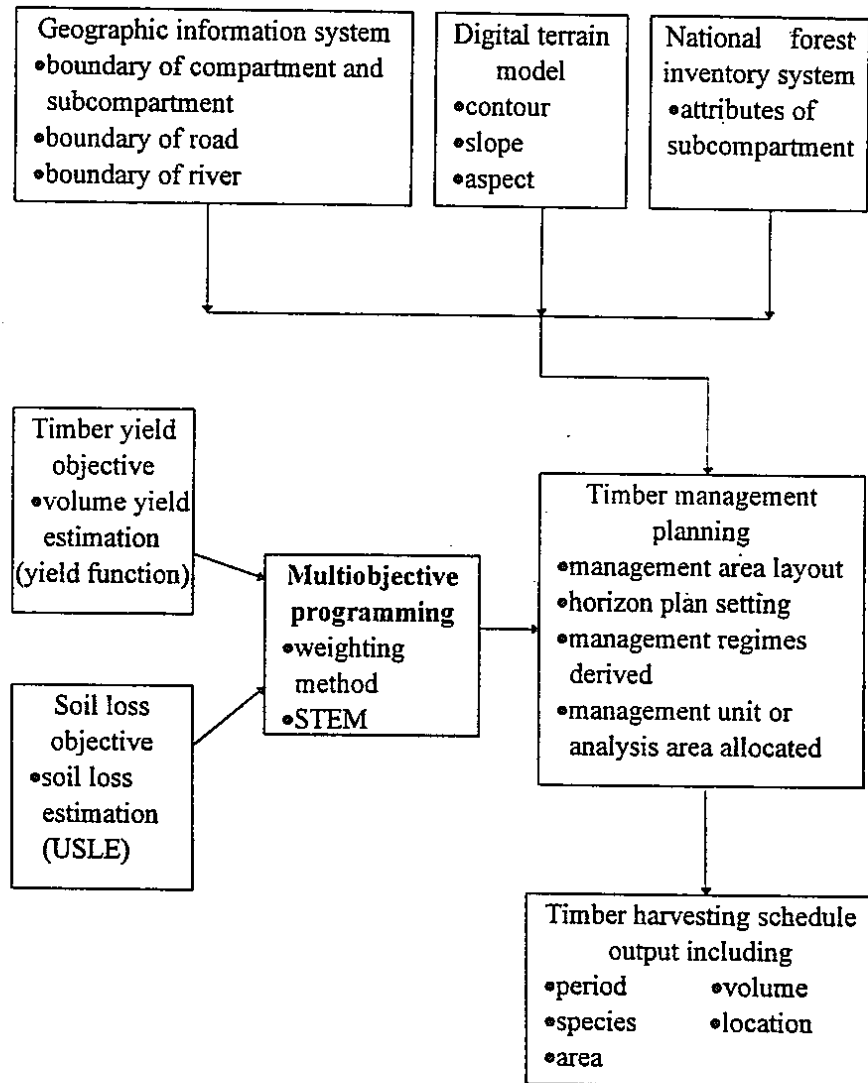


Fig. 2. Flowchart for timber management planning.

方案數量)之雙重考慮下，以 60 年做為經營計劃期間，並以 10 年為一分期。

#### (一) 地形圖之產生

根據阿里山事業區地理資訊之資料顯示，國有林班地內，各林班面積差異頗大，從 36 公頃(209 林班)至 1132 公頃(222 林班)均有。該事業區內因若干地方缺少數值地形(DTM)之高程資料，為期瞭解該地區地形起伏之變化，將研究區域縮小到現有 DTM 能提供資料的範圍內(左下角二度分帶 TM 座標為 214200, 2592440；左上角二度分帶 TM 座標為 214200, 2616200)。經分割處理後之數值地形和阿里山事業區林小班邊界套合後之地理資訊

顯示該研究區域內國有林班地之面積約為 23,000 公頃，佔整個阿里山事業區面積之 90%，顯示出該事業區大部分的地區都在本研究之研究範圍內。

Figs. 3-5 分別顯示研究地區內國有林班高程，坡度和坡向之分佈情形。高程方面以 1001-1500 m 最多，佔全部林地面積 33.5%，依次為 1501-2000 m 之 28.3%，2001-2500 m 之 20%，501-1000m 之 15.9%，大於 2500 m 之 1.8%和 0-500 m 之 0.5%。° 坡度以急坡(26-35°)者最多，佔 35%，依次為險坡(36-45°)之 24%，中坡(16-25°)之 22%，緩坡(6-15°)之 10%，絕坡(>45°)之 8%

和平地(0-5°)之1%。若以35°為區分標準,可看出約有32%之林地其坡度是大於35°。坡向則以北或西北向者最多約佔33%,其次為西或西南向,佔29%,東或東北向和南或東南向者相當,各佔約19%。

(二) 經營規劃區之選擇

林木資源不適當之施業處理(如在坡度太陡之地區進行商業性伐採),常因外部性(externality)之效果對自然環境和社會大眾之生活品質造成負面衝擊。因此林木資源之施業處理必需受到社會、環境、法令等層面之規範與限制。在綜合考量地形、林地到達性、環境和政策等因素暨配合林業改革方案之相關規定,本研究使用DBASE和ARC/INFO,依據下列之準則(1)地種:普通施業地,(2)特定地點:非特定地,(3)造林性質:經濟造林,(4)林相:人工林,(5)坡度小於35度,(6)海拔高:低於2500公尺,(7)河川兩岸50公尺之外(Fig. 6),和(8)林道500公尺以內(Fig. 7),選出可供林木資源之經營地區。規劃結果可經營地區約有2400公頃,約佔研究區域國有林地之10%(Fig. 8)。

(三) 分析區和經營方案之產生

應用數學規劃建立林木收穫規劃模式時,先要對規劃之林地進行分類。一般而言,有二種分類方法,即分層法(Stratum-based approach)和區域法(Area-based approach)(Johnson, 1986; Jamnick and Walters, 1993)。前者是從類似性的觀點出發,將生物屬性類似的林分合併組成一均質(homogeneous)單位,並假設在此單位內之各生物體對相同之經營行動會有一致的反應(response)。此種分類方法是不考慮林分之空間位置。區域法則是實際考量地型空間上的差異而將林地分成不同之區域。對有些產量而言,例如,因建築林道而產生的泥砂量或分散式遊樂區之遊樂人次數,常因為不同之地型或環境有所差異,因此適合以區域法進行分類便較明確地顯示出空間之差異。然而如此作會大量增加模式之決策變數和限制式的列數使得模式更為複雜。本研究所考量的土壤沖蝕並非是來自於修築道路,所以採用分層法,在上述可供施業之地區內,將各林小班之林分按樹種、齡級、作業法和地位級等因子分類,並合

併形成55個不同大小之分析區(analysis area)。Table 1顯示紅檜各分析區內之齡級、面積,和組成之林小班。

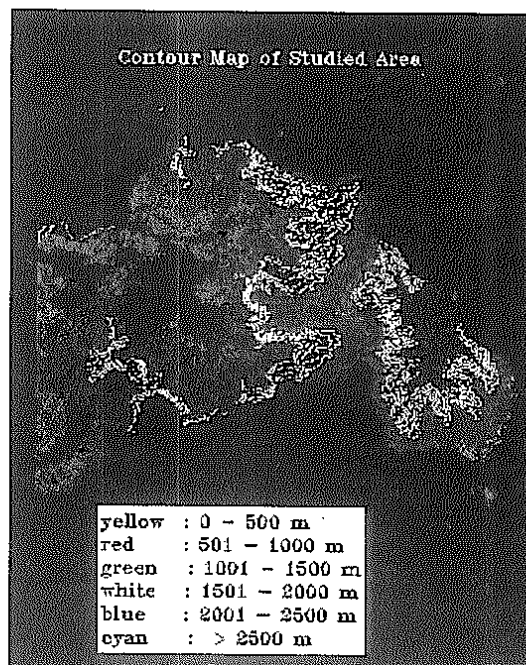


Fig. 3. Contour map of studied area.

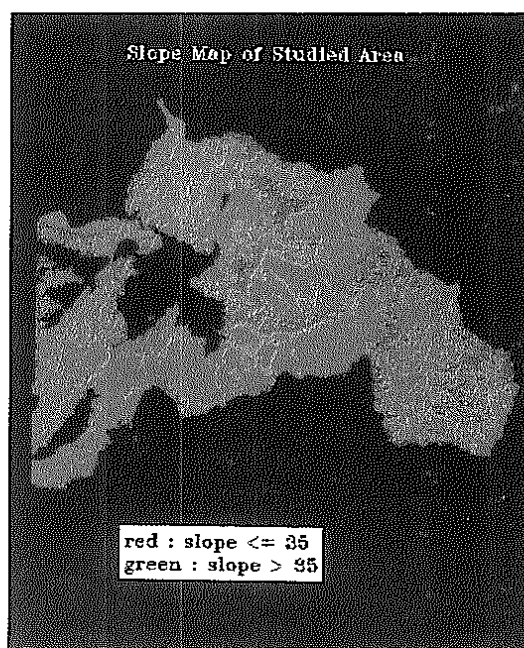


Fig. 4. Slope map of studied area.

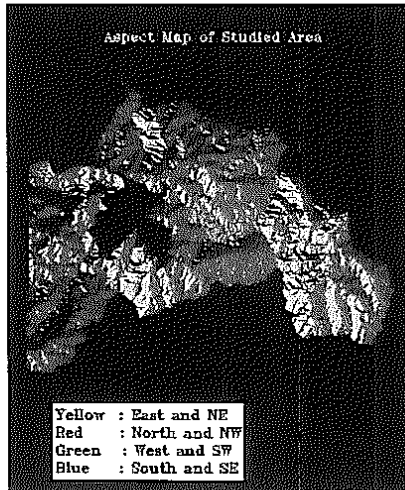


Fig. 5. Aspect map of studied area.

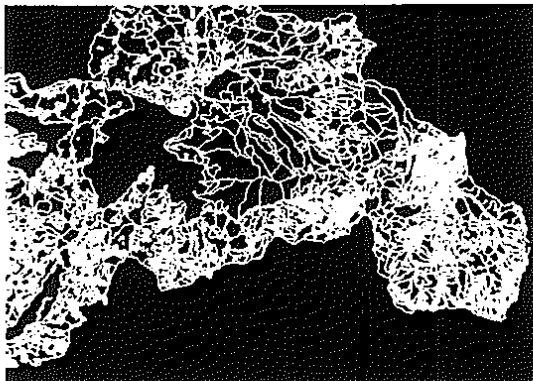


Fig. 6. Buffer zone area within 50-meter distance to streamside.

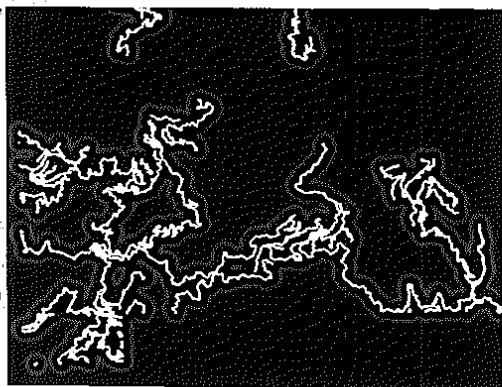


Fig. 7. Buffer zone area within 500-meter distance to forest road side.

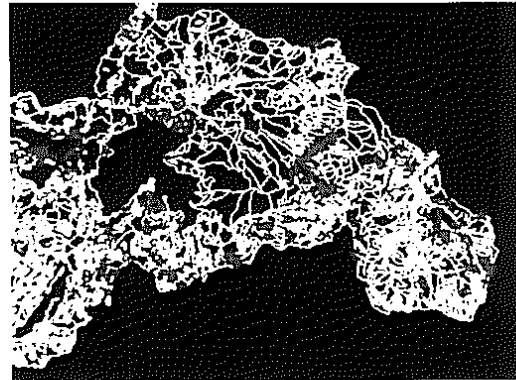


Fig. 8. Spatial distribution of timber management areas.

在本省現行採用以面積配分法和材積配分法為基礎之林木收穫規整法中，輪伐期在決定各作業級容許砍伐面積或材積中佔著極重要的地位。輪伐期是由各作業級內組成樹種之伐期齡依其更新面積加權平均再加上更新期而定，因此各樹種伐期齡之改變會對容許面積/材積有較大之影響。然而，以數學規劃法進行林木資源規劃，在決定林木之砍伐活動時一般有二種做法(Johnson, 1986)。其一，是對一分析區內之現實林或更新林定下林分可供商業利用之最低年限。低於此門檻的林分不予砍伐，而大於最低年限之林分則沒有確定的伐期齡，而由模式決定其伐期齡。第二種則是為有效利用林木資源，促進林地之生產力，除了前述最低年限之要求外，還加設最老利用年限之規定，換言之，後者對林分伐期齡之決定，較現行林木收穫法提供了較多的空間。本研究採用第二種方式，參考林務局各造林樹種伐期齡之標準，訂定本研究各主要樹種之伐期齡，如 Table 2 所示。

以每一分析區當成經營單元(management unit)，規劃或分析者可以就不同育林措施，研擬各種經營策略(management regime)。經營策略研擬方式之一是就林分之年齡，配合樹種伐期齡之限制，在經營計劃期間內所擬出之各種可能方案。如 Table 3 顯示一 35 年生之柳杉分析區，依據其伐期齡(30-60 年)在經營計劃期 60 年內，所擬定出之 9 種不同經營方案。其中方案 1 表示該分析區在第一個計劃分期(planning period)砍伐並隨即以



原樹種更新, 更新之新林分在第 4 個分期又再度砍伐, 並以該樹種更新。方案 9 則為該分析區之現實林分要保留至第 3 個計劃分期才砍伐、更新, 並在計劃經營期結束時保留更新之林分。

對每一個分析區而言, 規劃者都可依資源之特性, 配合不同育林措施, 規劃出各種經營方案。在眾多的可行方案中, 數學規劃會在滿足各項條件之限制下, 對各個分析區選擇出能使生產目標最大的最適方案。

(四) 數學規劃模式之建立

決策變數(decision variable)之設定是建立數學規劃模式首先要解決的問題。決策變數表示從事某種經營活動 ( activity)的數量。決策變數的意

義則視規劃目的之不同而異。以林木資源之規劃為例, 若砍伐和造林是林木經營的唯一活動, 則決策變數常代表收穫或砍伐的面積。然而, 若林木收穫活動是土地利用整體多目標活動之一, 則宜將決策變數視為某一種活動土地利用之面積(林文亮, 1992)。為處理方便, 決策變數多以下標方式表示。下標應如何設定則由規劃者視問題之特性而定。林木經營之收穫調整注重時間和空間分配的規劃, 一般多以三個下標表示。故本研究亦採用三下標表示法, 各下標分別表示樹種, 齡級和方案(經營策略), 其中樹種之代號則以其學名內屬名和種名第一個字母表示。本研究使用之樹種代號如 Table 2 所示。

Table 1. Description of analysis area for *Chamaecyparis formosensis* in studied area.

Analysis area	Age class	Area (ha)	Symbol	Compartment and subcompartment
1	1	43	CF1	185-001, 186-017, 185-009, 185-010, 011-014, 011-015, 219-023, 014-011,
2	2	24	CF2	241-010, 153-007, 216-019, 217-080,
3	3	48	CF3	003-014, 003-017, 003-022, 216-007, 216-008, 218-004, 019-004, 019-006, 019-009, 020-002, 014-006, 219-005, 219-006, 219-007, 005-042, 005-044, 005-046, 077-003.
4	4	44	CF4	004-001, 004-004, 019-007, 006-021, 006-031, 006-016, 007-001, 007-002, 216-002, 004-006, 005-047.
5	6	17	CF6	216-013, 217-001, 003-025, 006-004.
6	7	42	CF7	216-012, 005-009, 005-026, 216-006, 216-011, 216-003, 216-010, 219-008, 003-006, 005-006.
7	8	12	CF8	005-013, 005-015, 005-004.

Table 2. Cutting age and abbreviation for species in studied area.

Species	Abbreviation	Cutting age (y)
<i>Chamaecyparis formosensis</i>	CF	80-120
<i>Chamaecyparis taiwanensis</i>	CT	80-120
<i>Cunninghamia konishii</i>	CK	50-100
<i>Pinus taiwanensis</i>	PT	40-60
<i>Cryptomeria japonica</i>	CJ	30-60
<i>Cunninghamia lanceolata</i>	CL	20-40
<i>Taiwania cryptomerioides</i>	TC	50-90
<i>Acacia confusa</i>	AC	20-40
Fagaceal	FA	40-70
Other hardwoods	OH	40-70

**Table 3. Management alternatives for *Cryptomeria japonica* with 35 years old during the planning horizon.**

Management regime	Cutting period					
	1	2	3	4	5	6
1	E			R		
2	E				R	
3	E					R
4	E					
5		E			R	
6		E				R
7		E				
8			E			R
9			E			

Note: E: regeneration harvest of existing stand;  
R: regeneration harvest of future stand.

林木經營活動除影響林木之收穫外，還直接對林地環境，如集水區溪流量、水土沖蝕、生態景觀等造成多層衝擊，因此在規劃林木經營活動時，應儘可能將上述各層面同時加以考慮。

許多國外試驗集水區之研究均顯示砍伐森林會導致溪流量明顯的增加，而其效應之持續則視集水區植生恢復之程度而定(Bosech and Hewlet, 1982; Harr, 1983)。本省林業試驗所早期曾在蓮花池分所進行林相改良對水量影響之研究，也顯示類似之結果(夏禹九等, 1982)。只可惜該集水站因故無法繼續提供後續之流量資料，因而無法求得流量增加量和林地植生恢復程度之關係式。因本省目前欠缺上述之關係式來推估森林砍伐後溪流量增加之變化量，故在本研究中不考慮水資源之收穫。而以林木收穫和土壤流失為考慮之對象。

本研究使用模式 I<sup>(2)</sup> 建立之數學規劃模式如下

目標式

$$\text{MAX} \quad Z_1 = \sum_i \sum_j \sum_k V_{ijk} X_{ijk}$$

$$\text{MIN} \quad Z_2 = \sum_i \sum_j \sum_k S_{ijk} X_{ijk}$$

限制式

• 面積限制式

$$\sum_k X_{ijk} \leq A_{ij}$$

$i = 1, \dots, I$   $I$ : 樹種數

$j = 1, \dots, J$   $J$ : 第  $i$  樹種內之齡級數

• 材積流量限制式(政策限制式)

$$\sum_i \sum_j V_{ijk} X_{ijk} = H_t$$

$t = 1, \dots, 6$

如非下降穩定供應量(nondeclining even flow)

$$H_t \geq H_{t'}$$

$t = 2, \dots, 6$

$t' = t - 1$

• 非負性限制式

$$X_{ijk} \geq 0$$

式中

$Z_1$ : 林木收穫目標函數式

$Z_2$ : 土壤流失目標函數式

$X_{ijk}$ : 為第  $i$  樹種, 第  $j$  齡級在第  $k$  個方案下的伐採面積(公頃)。

$V_{ijk}$ : 為第  $i$  樹種, 第  $j$  齡級在第  $k$  個方案下單位面積的材積收穫量( $m^3/ha$ )。

$S_{ijk}$ : 為第  $i$  樹種, 第  $j$  齡級在第  $k$  個方案下單位面積土壤沖蝕量( $ton/ha$ )。

$A_{ij}$ : 為第  $i$  樹種, 第  $j$  齡級之林分面積(公頃)。

$H_t$ : 第  $t$  個分期之收穫量( $m^3$ )。

目標式含有林木收穫和土壤流失兩個目標，分別求最大和最小。將此兩個目標以線性組合方式合併來處理多目標之方式，則為本研究所稱之權數法(Steuer, 1986)。限制式有三大類，分別為(1)面積限制式：限制每一分析區內各種活動面積的累計不能超過該分析區之面積；(2)材積流量限制式：經營期間，對每一分期林木總收穫量之限制。本研究參照美國林務署 FORPLAN 使用之非下降穩定供應政策，來調節各分期之林木總收穫量；(3)非負限制式：表示決策變數必需為非負值。由於本模式之規劃結果是提供每一分期各分析區內預計處理的林分總面積，而非個別砍伐區之面積，故本研究在限制式內不列入砍伐區皆伐面積不得超過 5 公頃之規定。

(2) 依據 Johnson 和 Scheurman (1977) 之解釋，模式 I 乃是指某一分析區在經營計畫期間之一系列活動都以同一決策變數表示。

(五) 各樹種材積收穫量之推估

材積收穫量之推估是應用數學規劃進行林木經營規劃時不可或缺的資訊。材積收穫量推估之方法雖多, 如生長率法, 但只限於短期推估有效。基本上, 在中長期欲得到一合理可信賴的推估量則有賴一良好的生長收穫模式以供推估。從實務觀之, 雖然國內從事林木生長研究之文獻甚多, 但大都專注於連年生長和平均生長之比較, 並無涉及收穫表之建立。和本研究有關的樹種只有少數如柳杉、杉木、香杉、台灣杉、二葉松等有學者提出各齡級之材積收穫量(林子玉, 1967; 黃崑岡, 1970; 洪良斌, 1973; 劉宣誠、洪富文, 1978; 劉俊明、鍾旭和, 1993)。唯此等收穫表在應用時常因所提供之齡級範圍過狹或地緣性之關係, 減弱推估結果之可靠性, 故本研究採取的方法是對那些能提供足夠齡級收穫量的樹種(柳杉、杉木、臺灣杉), 比較該收穫量和本研究地區同齡林分現有單位面積收穫量之差異, 再對收穫表之收穫量做適當的修正。對那些無收穫可參考或有收穫參考但齡級不足的樹種(紅檜、扁柏、香杉、相思樹、檜欏和其他闊葉樹), 則用阿里山事業區內各齡級的單位面積蓄積量配置式 1 之非線型模式以得各齡級之收穫量。最後對那些無法用上述二種方法獲得各齡級收穫量之樹種(二葉松)<sup>(3)</sup> 則用生長率法推估其收穫量。Fig. 9 顯示本研究紅檜、扁柏和香杉在不同林齡之收穫量。

每一經營策略在經營計劃期間之林木收穫量則由該經營策略之砍伐時期和砍伐次數而定。例如 Table 3 之方案 1 之現實林第一期砍伐時之收穫量為 298 m<sup>3</sup> /ha, 其更新林在第 4 分期砍伐時之收穫量為 238 m<sup>3</sup> /ha, 故此方案在整個計劃期間內之收穫量為 536 m<sup>3</sup> /ha。Table 4 顯示紅檜分析區內不同經營方案在經營計劃期之林木總收穫量。此外, 對混淆樹種之林分而言, 其各樹種所佔面積是按照其所佔總蓄積之比例計算而得。

在推估各經營策略之材積收穫前, 本研究必須做如下的一些假設:

1. 每一分期皆假設其伐採時間是在一分期的中點, 並行皆伐更新。
2. 現實林和更新林之伐期齡相同, 其收穫量亦同。
3. 更新後之林分在次一年立即更新。

4. 更新樹種和現實林樹種相同。
5. 更新樹種之混淆比例和現實林樹種相同。
6. 林分除主伐外, 並無其它之間伐作業。

(六) 土壤沖蝕量(soil loss)之推估

由於人為外界力量之涉及, 森林砍伐對林地之環境會造成干擾, 其中土壤沖蝕乃為大眾所關心的項目之一。通用土壤沖蝕公式是至今應用最為廣泛的一種推估土壤層蝕(sheet erosion)和紋蝕(rill erosion)推估方法。茲將本研究有關式 2 各因子參數推估之資料來源說明如下:

1. 降雨沖蝕指數 Rm :

參照黃俊德(1979)得阿里山地區之年降雨沖蝕指數 Rm = 40191。

2. 土壤沖蝕性指數 Km :

理論上欲得到一正確的土壤沖蝕性指數應依照 Wischmeier 等氏(1971)提出的土壤沖蝕性線解圖(soil erodibility nomograph)法分析土壤粉粒和細沙含量、土壤粗沙含量、土壤有機質含量, 土壤構造和土壤通透性等(soil permeability)五種土壤參數而得。然而因阿里山事業區的土壤資料不夠齊全, 因此參考黃俊義(1986)報告中土壤質地和土壤沖蝕指數之關係, 配合水土保持專家的經驗判斷, 將研究區域內各小班依其土壤特質給予一主觀數值, 分別為沙土 0.049, 沙壤土 0.046, 壤土 0.043, 黏土 0.020, 腐植質土 0.046, 石礫土 0.040。

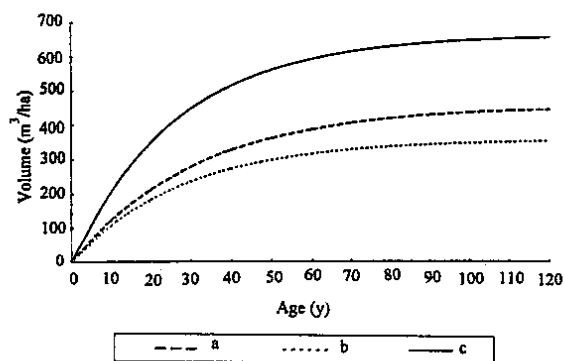


Fig. 9. Volume yield for (a) *Cunninghamia konishii*; (b) *Chamaecyparis taiwanensis*; (c) *Chamaecyparis formosensis*.

**Table 4. Timber yield and soil loss produced for a planning horizon in the *Chamaecyparis formosensis* area with alternate management regimes.**

Management regime	Timber yield (m <sup>3</sup> /ha)	Soil loss (tons/ha)	Management regime	Timber yield (m <sup>3</sup> /ha)	Soil loss (tons/ha)
CF301	0 <sup>1)</sup>	1085	CF701	320	14935
CF302	279	3414	CF702	330	14820
CF401	274	5803	CF703	338	13397
CF402	280	3120	CF704	342	10301
CF403	0	751	CF705	345	5532
CF601	316	1897	CF801	325	12243
CF602	322	1715	CF802	332	12243
CF603	326	1318	CF803	336	12149
CF604	330	708	CF804	339	10983
CF605	0	239	CF805	343	8444

<sup>1)</sup> As the management regime keeps the stand uncut within the planning horizon, its timber yield for the planning horizon is zero.

3.地形因素(LS)：

將研究區內的林小班圖和坡度圖疊合後可得各小班之平均坡度(S)，並在每一小班之多邊形區域內依照各點之高程資料撰寫程式求出該多邊形內之最大坡長當成該小班之坡長(L)。再按式 9 求

$$S = \sqrt{L / 22.13(65.4 \sin^2 S) + 4.56(S) + 0.0654} \quad (9)$$

其中 L：坡長

S：坡度(度數)

得每一小班的地形因子量。因本研究採用的分析區是由含相同生物屬性的小班組成，為考慮到各小班地形因子的差異，故以小班面積進行加權以得到各分析區之地形因子量。

4.覆蓋管理因子 C：

國內的土壤沖蝕研究大都是在山坡地或農地上從事靜態比較不同土地利用產生的土地沖蝕，因而有植生覆蓋指數資料可直接引用。然而在林地方面，由於 C 值會隨著不同種類植生，生育地狀況，和覆蓋程度有所變化，至目前為止國內尚缺乏該項資料可予引用。

國外方面，Dissmeyer 和 Forster(1980, 1981) 兩氏曾從事林地土壤沖蝕之研究。由於伐採、火災、放牧和整地等作業皆會干擾林地、破壞植生覆蓋，因此他們將覆蓋管理因子 C 又細分成九個次因子，並分別推估各次因子之影響量而得到一些若干次因子之綜合效果。阿里山事業區因缺乏該項資料，故無法完全按照上述方法推估 C 值。雖然如此，本研究仍盡量仿效他們之研究方法，考慮裸露土壤，根系等次因子對覆蓋管理因子 C 之綜合效果，並視本省之現場作業情況提出若干假設。即林地砍伐前，假設成熟林分內有 99%之林地覆蓋，在裸露地區有 80%之裸露地表在三公分土壤下有良好之根系，參照 Dissmeyer 和 Forster (1980)兩氏之研究結果將 C 值定為 0.0005。林地砍伐後，在以架空索道集材之架構下，約有 10%之林地裸露，且在裸露地有 50%其地表三公分之土壤含有良好的根系，此時 C 值增加至 0.011。由於地表植物，雜草暨樹冠層之產生，林地砍伐後假設 C 值會以線型速率逐漸回復到未砍前之狀

(3)雖然黃崑岡於 1970 提出台灣二葉松之林分收穫表，然是天然林而非人工林。因阿里山事業區現有之二葉松齡級不平均，故無法配置式 1 之非線性模式。

況。然其所需時間視樹種不一。一般言之,生長快速的樹種其所需時間較短。本研究由於缺乏不同樹種恢復鬱閉之實証資料而假設闊葉樹為 10 年,柳杉、杉木、二葉松等短輪伐期者為 20 年,紅檜、扁柏,台灣杉等長輪伐期者為 40 年。換言之,本研究中各分析區內使用之 C 值不再是一固定數值,而是隨著不同經營策略和時間呈動態之改變, Figs. 10-11 分別顯示 65 年生扁柏分析區、35 年生杉木分析區和 55 年生杉木分析區其 C 值在經營計劃期間變動之情形。

5.水土保持因子 P :

本研究因假設施業地區不做水土保持,故 P 為 1。

就每一經營策略而言,從上述各項因子之推估量,透過通用土壤沖蝕公式,便可算出其每年的土壤流失量,累計至經營計劃期末便得出各經營策略在經營期內的總土壤流失量,表 4 顯示紅檜分析區內不同經營策略在經營計劃期之總土壤流失量。此外,本研究在推估地形因素時使用最大坡長而非平均坡長,故推估出來的土壤流失量應會有高估之現象。

(七) 林木資源之規劃結果

本研究林木資源長期經營規劃之結果如下:

1.只考慮林木之收穫

經營計劃期內各分期之規劃結果如 Table 5 左半部所示。此表顯示出各分期規劃之砍伐面積,收穫材積,伐採地點。

2.以權數法同時考慮林木收穫和土壤流失

Table 5 右半部顯示以權數法將林木收穫和土壤流失視為同等重要而同時考量後各分期林木資源規劃之結果。由 Table 5 可看出納入土壤流失之考量時,林木之伐採面積和收穫量在總經營期間和各分期都會減少,且砍伐之分析區差異頗大。因為非下降穩定供應之林木政策會使得後期的收穫量增加,因考量土壤流失而造成林木收穫量減少的效果因而在後期更為顯著。

3.以 STEM 法考慮林木收穫和土壤流失

權數法雖可提供決策者一妥協解(compromise solution),但不提供決策者各目標函數在決策問題既有經營條件限制下可能達成之範圍,因此減少其決策之空間。本個案研究在整個經營計劃期間林木收穫和土壤流失之範圍值分別為(837358,

697881) m<sup>3</sup>, (30735853, 52514656)噸。林木收穫和土壤流失在理想解下之達成值分別為 837,358 m<sup>3</sup>和 30,735,853 噸。

執行式 5 找出一離理想解差異最小之非低劣解,其中林木收穫和土壤流失經執行式 6 後之相對權數 Wk 分別為 0.25 和 0.75。此解之林木收穫量為 697,881m<sup>3</sup>,土壤流失為 30,735,853 噸。和理想解比較,林木之收穫量過低,而土壤流失量是達到最佳狀況。假設決策者願意增加 20%土壤流失量,以換取林木收穫量之增加,則分析者將土壤流失量<=36,882,960 噸和林木收穫量>=697,881 m<sup>3</sup>之二限制式納入原限制式後,再執行式 5 可得新解。此解之林木收穫量為 758,874 m<sup>3</sup>,土壤流失量為 36,882,960 噸。若決策者不滿意此新收穫量,仍可嚐試再增加較多之土壤流失量以換取林木收穫量之繼續增加。否則,疊代過程結束。

(八) 現行林木收穫法和多目標數學規劃收穫法之比較

茲將國內現行之林木收穫法(以下稱前者)和多目標數學規劃收穫法(以下稱後者)在目標選擇,決策準則、生長量、輪伐期、經營資訊、和伐區位置等項目上做一比較並扼述如下:

1.目標選擇

前者在林木資源規劃過程中只能考慮林木之生產,後者除了林木生產外,還可同時考慮環境之效益。

2.決策準則

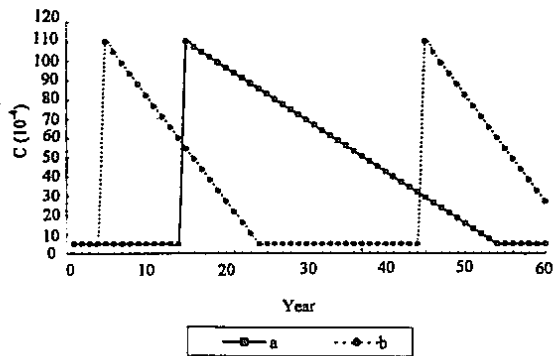
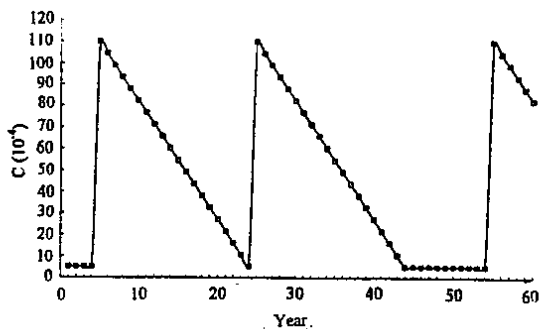


Fig. 10. Variation of cover management factor (C) during the planning horizon for (a) *Chamaecyparis taiwanensis* with 65 years old and (b) *Cunninghamia lanceolata* with 35 years old.

**Table 5. Timber harvesting allocation for each period with timber production consideration only and both timber production and soil loss consideration simultaneously, respectively.**

Only timber production is considered				Both timber production and soil loss are considered			
Period	Harvest yield (m <sup>3</sup> )	Harvest area (ha)	Analysis area	Period	Harvest yield (m <sup>3</sup> )	Harvest area (ha)	Analysis area
1	124,329	435	CL2, CL4, CL5, CL6, CJ5, CJ6, CJ7, CJ8, OH8, AC4, AC6.	1	116,339	394	CL4, CL5, CL6, CJ7, CJ8, OH1, AC4, AC6.
2	124,329	435	CL2, CL3, CJ4, CJ5.	2	116,339	399	CT8, CF7, CL3, CJ4, CJ5.
3	124,329	502	CT7, CJ1, CJ2, CJ3, CJ4, AC4.	3	116,339	436	CL1, CL2, CJ2, CJ4, PT3.
4	124,329	594	CT6, CT8, CF6, CF7, CF8, CL1, CL2, CL3, CL4, CL5, CL6, CJ2, CJ3, CJ5, CJ6, CJ7, CJ8, TC2, OH1, OH2, OH3, OH4, PT2, PT3, AC6, FA3, CK2.	4	116,339	486	CT6, CT7, CF6, CL3, CJ1, CJ2, CJ3, CJ6, CJ8, TC2, OH4, CK2.
5	146,192	594	CT4, CF4, CJ4, CJ5, CJ6, TC1, OH8, AC4, AC6, CK3.	5	116,339	486	CT4, CF4, CL4, CL5, CL6, CJ6, CJ7, CJ8, TC1, OH1, OH2, OH3, OH8, PT2, AC4, AC6, FA3, CK1, CK3.
6	193,849	894	CT3, CL1, CL2, CL3, CL4, CL5, CL6, CJ1, CJ2, CJ3, CJ4, AC6, CK1.	6	136,522	504	CT3, CF3, CL1, CJ4, CJ5, CJ6, CK1.



**Fig. 11. Variation of cover management factor (C) during the planning horizon for *Cunninghamia lanceolata* with 55 years old.**

前者在理論上是在求等量保續及法正齡級之分配，但常無法配合實際需求。後者不但可要求保續收穫，且可配合其他決策條件取得最適解，較符合社會環境之需求。

### 3. 林木生長量

前者在決定容許砍伐量時只依據林分之現有蓄積，並無考慮林分在經營期間的生長量，故無法合理地反映林木資源之變化。後者則在推估林分生長和收穫時因納入林分之生長量而較前者為優。

### 4. 輪伐期或伐期齡

前者之輪伐期是決定於各樹種之平均伐期齡加上更新期，因此其值為一點。在實務上常易造

成長伐期樹種必須提早伐採和短伐期樹種延遲過熟伐採之缺失。後者之伐期齡都訂有範圍適中之區間，並由模式決定其砍伐時間，故可避免過早或過晚伐採之缺點。

#### 5. 經營資訊

前者所需的資訊簡單，收集容易，主要為地種別之面積，蓄積及各樹種之伐期齡等。後者所需的資訊複雜且不易收集，除前者之資訊外，尚需土地利用情形，地位級，現實林分 and 更新林分在不同施業法之生長收穫，不同施業對非林木資源衝擊之數量評估等。

#### 6. 伐區位置

前者依配分法求出年容許砍伐量後，規劃者再依林道網之分佈，在全事業區內決定砍伐地點，使得規劃者在決定伐區之彈性過大。後者依據模式決定第一分期內要做處理的分析區(由林小班組成)後，再由規劃者就已定案之分析區範圍內再視實地狀況，因地制宜決定年度之砍伐地點。如此以模式結果為規範藍圖再配合實際情況，則可賦予規劃者適中之彈性以決定砍伐地點。

### 四、結論

資源分配(resource allocation)和施業計畫釐訂(harvest scheduling)是國有林經營規劃過程中的二大重要項目。前者是探討如何將國有林地分配到各種不同用途上，如自然保育、森林遊樂、林木生產等。後者則是考慮在既定用途的林地上，在各種不同施業方案中選擇最能發揮此既定用途效益的施業方案。綜合此二大項目，可決定某一特定方案應何時、何處及如何安排於不同的林地上。本研究雖然重點是在林木經營規劃地區內從事施業計畫釐訂之工作，但在經營規劃區選擇之過程中，透過前述之準則方式已無形將阿里山事業區非林木經營地區之林木資源分配至其他非林木生產用途，如水源保護區或自然保護區而達到資源分配之效果。

地理資訊系統在森林資源規劃中不但可提供所需的圖面或屬性資料，還可應規劃者之要求配合數值地型進行特殊目的之運算，因而提高了地理資訊系統在森林資源規劃之實用性。

以多目標數學規劃技術從事林木資源規劃不但可考慮林木資源本身變化，還可符合社會層面和政策之需求。進行林木資源中長期經營規劃時，還可將林木砍伐和更新之問題合併考量。雖然一般經營計劃期都包含數個計劃分期，但因森林經營環境中眾多不確定因素之存在，使得規劃者通常只關注第一分期之規劃結果。此種從長期經營觀點並隨時以更新資料來編定短期林木收穫量之特性正是以數學規劃當成林木長期經營規劃工具之一大主因。規劃者依據 10 年之總收穫資訊可以因地制宜，決定砍伐地點以製訂年度之收穫暨更新計畫。

### 謝誌

本研究承蒙林務局企劃組提供有關資料，林試所經營系退休同仁周朝富先生在地理資訊系統軟體(ARC/INFO)和影像處理軟體(ERDAS)處理上之協助暨仲琦科技公司羅澤炎先生程式之設計，謹此一併致謝！

### 引用文獻

- 汪大雄 1991 多目標隨機規劃模式森林經營規劃之應用。中華林學季刊 24(2): 3-31。
- 林子玉 1967 杉木林生長預測表及栽值株數與蓄積動態之研究。中華林學季刊 1(1): 91-107。
- 林文亮 1992 森林資源分配之多目標規劃。台灣大學森林研究所博士論文。120 頁。
- 林務局 1991 嘉義林業經營管理暫行計劃。嘉義林業管理處。188 頁。
- 林務局 1995 第三次台灣森林資源及土地利用調查。台灣省林務局。258 頁。
- 洪良斌 1973 台灣天然闊葉樹林林相改良方法之研究(下)。台灣省林業試驗所試驗報告第 229 號。
- 夏禹九、楊炳炎、金恆鑰、漆陞忠 1982 皆伐作業對蓮花池試驗集水區溪流流量的影響。台灣省林業試驗所試驗報告第 381 號。17 頁。
- 許秀英 1992 目標規劃應用於大埔事業區多目

- 標土地使用規劃之研究。中興大學森林研究所碩士論文。61頁。
- 郭傳鎮 1994 地理資訊系統在水源涵養保安林規劃上之研究。台灣大學森林研究所碩士論文。62頁。
- 黃志成 1994 地理資訊系統在森林資源調查與分析上之應用。中興大學森林研究所碩士論文。76頁。
- 黃俊義 1986 台灣坡地土壤沖蝕性及流失量之推估。中華水土保持學報 17(2): 139-154。
- 黃俊德 1979 台灣降雨沖蝕指數之研究。中華水土保持學報 10(1): 127-144。
- 黃崑崗 1970 台灣二葉松林分收穫及材積表之編製。台灣省林業試驗所試驗報告第193號，43頁。
- 楊榮啟、林文亮、陳麗琴、汪大雄、張新儀 1981 台灣森林資源長期經營規劃之研究。台灣省林務局合作報告第36號，51頁。
- 楊榮啟、林文亮、葉楷勳、蔡國雄、朱進興、邱立文 1992 台灣國有林木資源長期發展計畫。台灣省林務局合作計畫第二年報告。70頁。
- 楊榮啟 1992 目標規劃在台灣森林資源經營管理計畫決策上應用。台大實驗林研究報告6(1): 1-24。
- 劉宣誠、洪富文 1978 本省柳杉人工林生長與收穫之研究(II)-阿里山地區。台灣省林業試驗所試驗報告第309號，47頁。
- 劉俊明、鍾旭和 1993 臺灣杉非線型收穫模式之建立。中華林學季刊 26(2): 39-49。
- 鄭祈全、周朝富 1990 地理資訊系統在森林經營規劃之應用。中華林學季刊 23(1): 105-115。
- Allen, J. C. 1986. Multiobjective regional forest planning using the noninferior set estimation method in Tanzania and the United States. *Forest Science* 32(2): 517-533.
- Bare, B. b., and G. Mendoza. 1988. Multiple objective forest land management planning: An illustration. *European Journal of Operational Research* 34: 44-55.
- Bosech, J. M., and J. D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes in water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Cohon, J. L. 1978. *Multiobjective programming and planning*. Academic Press. NY. 333 pp.
- Dissmeyer, G. E., and G. R. Foster. 1980. A Guide for predicting sheet and rill erosion on forest land. USDA Technical Publication SA-TP 11. 40 pp.
- Dissmeyer, G. E., and G. R. Foster. 1981. Estimating the cover-management factor (c) in the universal soil loss equation for forest conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*. 36: 235-240.
- Goicoechea, A., D. R. Hansen, and L. Duckstein. 1982. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley & Sons. 519 pp.
- Harr, R. D. 1983. Potential for augmenting water yield through forest practice in Western Washington and Western Oregon. *Water Resource Bulletin* 19(3): 383-393.
- Jamnick, M. S., and K. R. Walters. 1993. Spatial and temporal allocation of stratum-based harvest schedules. *Can. J. For. Res.* 23: 402-413.
- Johnson, K. N. 1986. FORPLAN version 1: An overview. Land management planning system section, USDA Forest Service, Washington, D. C. 85 pp.
- Johnson, K. N., and H. L. Scheurman. 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. *Forest Science Monograph* 18. 31 pp.
- Kao, C., and J. D. Brodie. 1979. Goal programming for reconciling economic even-flow, and regulation objectives in forest harvesting



- scheduling. *Can. J. For. Res.* 9: 525-531
- Kent, B. M.** 1980. Linear programming in land management planning on national forests. *Journal of Forestry* 78: 469-471.
- Kent, B. , B. B. Bare, R. C. Field, and G. A. Bradley.** 1991. Natural resource land management planning using large-scale linear programs: The USDA Forest Service Experience with FORPLAN. *Operation Research* 39(1): 13-27.
- Leuschner, W. A., J. R. Porter, and H. E. Burkhart.** 1975. A linear programming model for multiple-use planning. *Can. J. Res. For.* 5: 485-491.
- Navon, D. J.** 1971. Timber RAM. A long-range planning method for commercial timber lands under multiple use management. USDA Forest Service Research Paper. PSW-70.
- Steuer, R. E.** 1986. Multiple criteria optimization: theory, computation, and application. John Wiley & Sons. 546 pp.
- Wischmeier, W. H., C. B. Johnson, and B. V. Cross.** 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation.* 26: 189-193.