

出國報告（出國類別：其他）

赴美國研習森林生長模式之發展和 森林結構空間數量化之研究報告

服務機關：行政院農業委員會林業試驗所

姓名職稱：汪大雄 研究員

派赴國家：美國

出國期間：101年7月9日~10月8日

報告日期：101年11月24日

摘要

台灣人工林之經營與永續發展是台灣目前與未來森林經營之重點項目，林木是森林生態系中之主體，林木樹種之組成、林分之結構、林木之生長、蓄積和族群之改變等因素在時間和空間分佈上之推測和預測，無疑是人工林永續經營中經營者必須獲得最主要之資訊。然欲達成上述資訊之提供，則必須仰賴一套在生物和邏輯面都能充分信賴的生長收穫數學模式以模擬森林演變的過程。生長和收穫模式具備描述森林隨時間之動態反應（生長、孔隙更新）之功能，進而可以提供未來資源之狀況。生長和收穫模式因具有更新調查、預測未來收穫、探討經營策略和模擬育林措施影響之能力，故在森林經營上被廣泛地運用，因此，在不同經營策略下預測森林未來生長和收穫，成為森林永續經營體系中之重要一環。

報告人在林業試驗所長期研究與台灣人工林永續經營相關之議題，因此向國科會申請赴美國西北地區和美國克羅拉多州林務署森林經營服務中心研習森林生長模式之建置、發展和森林結構空間數量化之處理技術。本次研習計畫之完成，使報告人明瞭國外有關生長模式和林分結構方面最新之發展趨勢，不但擴大報告人之研究視野，還可大幅增進實際之研究能力。對於林業試驗所未來和報告人日後研究國際化之學術交流，助益良多。

【關鍵詞】 森林生長模式 Forest Growth modeling、森林結構 Forest structure、森林植群模擬器 Forest Vegetation simulator、美國林務署太平洋西北研究站 USDA Forest Service Pacific Northwest Research Station、美國林務署森林經營服務中心 USDA Forest Management Service Center、奧立岡州立大學 Oregon State University

目 次

一、研習目的.....	4
二、研習過程.....	4
三、研習心得.....	6
四、建議事項.....	35
五、照片.....	37

一、研習目的

林木在生長之過程中，因受到各項自然，生物和人為因素之影響使林木生長之變化甚為複雜也不易為經營者所瞭解。因此，必須仰賴一套在生物面和邏輯面都能充分信賴的生長數學模式進行林木演變過程之模擬，以期協助經營者掌握其生長變化之趨勢。台灣杉是六龜試驗林最主要的造林樹種，因此有關台灣杉生長和林分結構之動態變化是林業試驗所森林經營組研究之重要項目。但要掌握台灣杉生長和林分結構變化之趨勢，則必須先能發展出一套可以整合台灣杉各項生長過程和林分結構之整體生長模式，雖然報告者初步已發展出可以滿足明瞭林分整體生長變化之生長模擬器，但因全林分生長模式架構先天之限制，無法提供林分內各組成單木生長和結構變化之動態資訊，因此，及早建立一個可以模擬林分內各組成單木各項生長和結構變化變化之生長模式，提供經營者制定經營策略之資訊，實屬林業試驗所森林經營組對台灣人工林生長研究面臨之挑戰。

由於在建立模擬林分內各組成林木生長變化之整體模擬系統中必須要整合許多預測或推估模式，因此模擬系統之組織架構頗為複雜。各推估模式之功能確定和彼此間之互動關係，無疑是生長模擬系統發展中最可能面臨或發生之困難。報告人在林業試驗所長期研究與台灣人工林永續經營相關之議題，因此向國科會申請赴美國西北地區和美國克羅拉多州林務署森林經營服務中心研習森林生長模式之建置、發展和森林結構空間數量化之處理技術，並實務上參訪美國西北地區之森林施業和育林體系，以供台灣人工林永續經營施業之參考。

二、 研習過程

1. 研習方法

為使在抵達後便能順利，立即展開相關之研究工作，報告人行前積極收集研究計畫資料和文獻，並就研究期間研究進度之安排等事項與前往研究機構之接洽人員作事先之溝通與聯絡。具體達成之方法如下：

1. 出發前對研究主題相關之資料和文獻積極收集與閱讀；
2. 出發前以電子郵件和前往研究機構之接洽人員和研究人員做充分之溝通與聯絡；
3. 抵達後立即展開相關之研究工作，並設定研究進度之時程表；

4. 研究過程中隨時紀錄研究所發現之事件或結果，並就研究主題與相關之研究人員進行實際之討論、觀摩和學習；
5. 參訪當地之個案，配合研究主題進行案例分析以加強實務上之經驗。

2. 研習機構

報告人在研習進修期間總共參訪美國林務署太平洋西北研究站總站(含西雅圖分站和奧林匹亞分站)，奧立岡州立大學森林系、和克羅拉多州之林務署森林經營服務中心。茲將報告人參赴之相關機構概述如下：

(1). 美國林務署太平洋西北研究站 (**Pacific Northwest Research Station**) 是美國林務署八(五)大研究站之一。太平洋西北研究站建立於 1925 年。總部位於奧立岡州波特蘭市 (**Portland, Oregon**)，下轄有十個分站，分散於阿拉斯加州、華盛頓州、和奧立崗州。太平洋西北研究站之研究共分成八類別，每一類別均有其各別之任務。與報告人研究相關的類別是資源經營管理和生產力(**Resource Management and Productivity**)。該類別之任務為增加人類對太平洋西北地區森林生態系生物和生產力之瞭解，並發展能促進森林生態系提供林木產品和其他資源價值之經營工具和作業程序與規範。

太平洋西北研究站與申請人研究相關之研究室本稱為育林和森林模式(**Silviculture and Forest Models**)，雖在 2009 年與其它研究室合併，但該研究室原有之研究繼續推展。其研究有五大重點，其中與報告人研究直接相關則是發展森林模式去決定樹木生長、林分結構、育林施業和森林生態系生物和生產力之數量化關係，包括林木品質、數量，森林林分內及地景區域其他生物之豐富度和歧異度並獲得輝煌之研究成果。研究負責人 **Dr. Reutebuch** 和研究員 **Dr. Robert Deal** 非常歡迎報告人之拜訪，並提供研究設備和現場試驗地之踏勘，因此，對報告人之研究任務，提供實際且有效之幫助。

(2) 奧立岡州立大學森林系(**Oregon State University**)在森林模式方面亦有傑出之表現，其中以 **Professor David Hann** 為主要之代表。該校發展出之著名單木生長模式 (**ORGANON**) 廣被太平洋西北地區使用去預測該地區主要樹種(如花旗松、西部鐵杉)在不同育林施業下森林林木生長、林分結構之動態變化。**Professor Hann** 表示願意向申請

人說明 ORGANON 模式之組織架構和建立模式之技術和注意事項，相信對國內人工林動態模式之建立助益良多。

(3) 美國克羅拉多州 Fort Collins 市之林務署森林經營服務中心(Forest Management Service Center)

位於美國克羅拉多州 Fort Collins 市之林務署森林經營服務中心是直接隸屬華盛頓特區林務署總部，該中心之生長收穫研究室是開發和維護 FVS 之中心，該中心定期舉辦 FVS 之短期訓練，包括模式之使用和模式結構之介紹。該中心 FVS 研究室表示歡迎報告者之到訪，並就 FVS 建構之理論和技術之學習提供最大之協助。因此報告者到該中心之研究經驗相信對日後國內人工林動態生長模式之建立必有所助益。

三、研習心得

(一) 森林生長收穫模式

1. 森林生長收穫模式之概述

森林是由一些在長期間呈持續變化狀態的動態生物系統組成，生長則是反映出生物隨時間變化之一種動態過程。就森林資源經營而言，爲了能得到重要資訊以利良好經營決策之制定，實有必要去了解 and 預測未來森林在生物生長和組成之變化。森林經營決策之擬定是基於現有和未來森林資源之狀況。定期或不定期之資源調查提供了資源之現有狀況，但對未來資源狀況之描述則必須仰賴在生物面、邏輯面和生態面都能充分信賴之生長收穫數學模式之預測機能。生長和收穫模式具備描述森林隨時間之動態反應（生長、孔隙更新）之功能，進而可以提供未來資源之狀況。生長和收穫模式因具有更新調查、預測未來收穫、探討經營策略和模擬育林措施影響之能力，故在森林經營上被廣泛地運用，因此，在不同經營策略下預測森林未來生長和收穫作爲經營決策和政策形成之基礎，實爲森林永續經營體系中之重要一環（圖 1）。

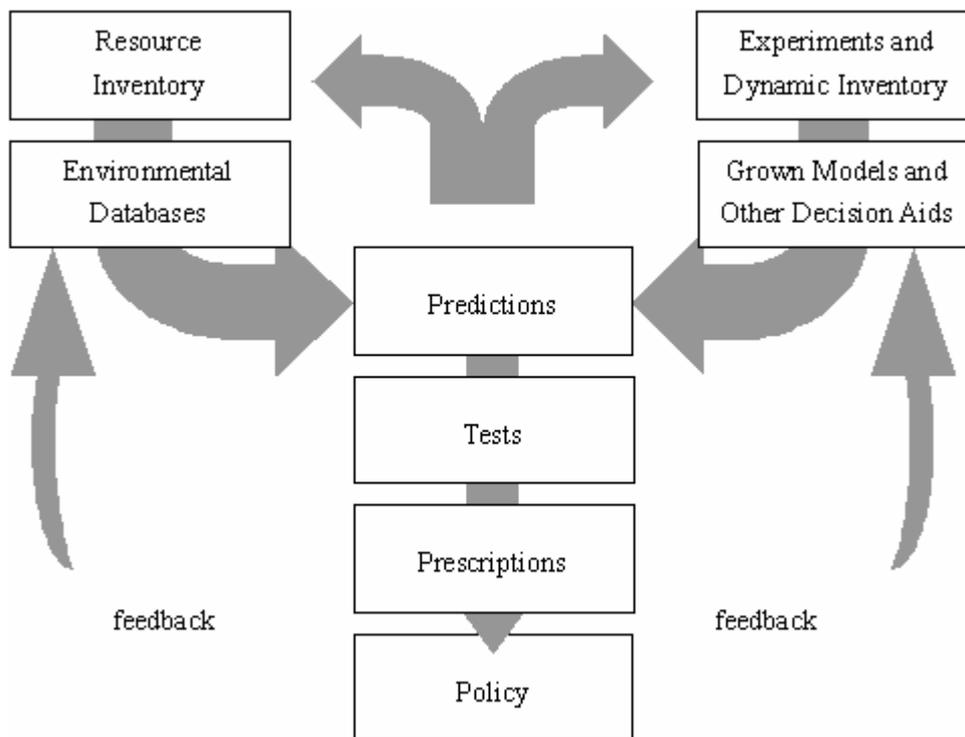


圖 1 森林生長收穫模式在決策、森林經營、和森林政策中角色之示意圖

生長是指森林屬性如體積、重量、生物量等在一特定期間內之變化，收穫是指在一特定時間下森林依樹種、林型、立地、蓄積和經營策略別等之現有量。生長收穫模式實際上是一組關係式，此關係式通常是以隱含於電腦軟體程式內方程式之方式表達。此等方程式是用來評估一特定林分在特定經營策略下林分未來之發展。生長收穫模式可用來產生林分收穫表、預策經營計畫未來植群狀況、更新森林調查資料和比較不同經營策略之結果。

生長和收穫模式之發展在林業界已有悠久之歷史(圖 2)。早在 1850 年初期，中歐之森林家便使用圖形法來處理森林之生長和生產問題。收穫表則在二十世紀初分別於歐洲和美國開始應用而成爲生長和收穫模式之主流，並一直持續到 50 年代。隨著資訊科技之進步，模式之廣泛度和複雜度亦與日俱增。在過去二、三十年內，因數理統計之進展和個人電腦科技之快速發展，同齡林或異齡林之生長收穫模式架構已有充分快速之進展，許多以電腦爲基礎的生長／收穫模式諸如 FOREST、PROGNOSIS、FREPSTEM、FVS 亦陸續開發推出，並廣爲應用在森林經營。因此在資料使用之種類和建立方法上產生許多不同模式研究方法，這些方法均各自有其優缺點。

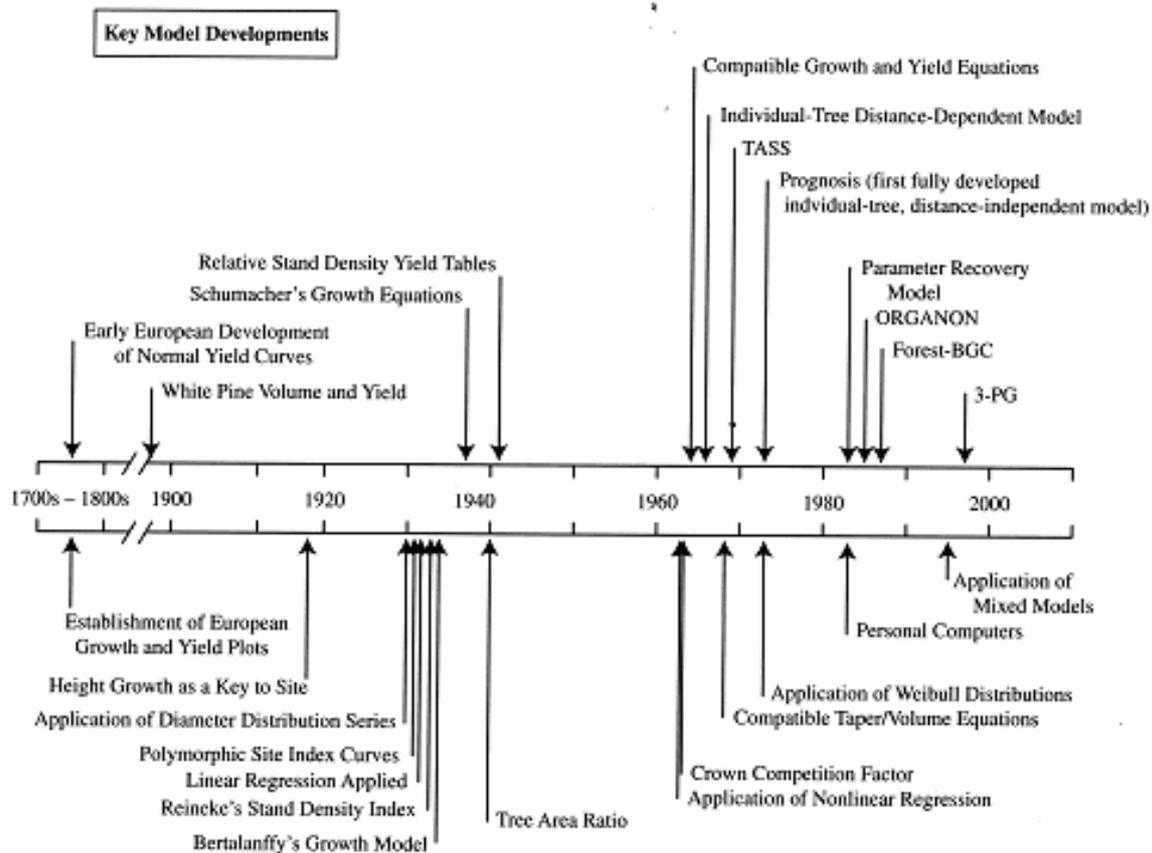


圖 2 森林生長收穫模式發展之歷史和相關之觀念與技術

此外，一些以模擬混淆林或異齡林林木生長和林分動態變化之森林孔隙動態模式(Gap Model)，或稱演替模式亦相繼發展出。此類的第一個模式是由新英格蘭森林發展出的 JABOWA 模式。在過去二十年內，以 JABOWA 模式為基礎，已對不同之森林生態系陸續發展出許多不同之孔隙模式。

2. 森林生長模式之分類

森林生長模式之種類繁多，範圍甚廣，其使用之分佈範圍可從整個生態系、林分到個別單木，其模式建立之目的可從林分收穫之預測到生態過程之描述。森林生長模式之分類在不同學者間有不同之分類，依據最新 Weiskittel et al (2011)之分類，森林生長模式(或稱森林林分發展模式，forest stand development model)因模式建立目的之不一，可分成統計性(statistical)、處理性(process)、混合性(hybrid)和孔隙性(gap)模式四大類。

統計性模式是指將林分屬性之動態變化歸因於屬性本身之改變和對環境因素反應之不同所致。使用統計理論和經驗資料(empirical data)探討林分屬性變化和周遭影響因素間之因果關係，並預測當影響因素在某一特定水準時林分屬性之推估量。多元迴歸則是常用之方法。因此，因果關係之掌握和預測之正確性成爲此類模式首要之考量。代表性之模式有 DFSIM(Curtis et al 1981)、TASS (Mitchell 1975)、ORGANON(Hann 2011)和 FVS 等。

處理性模式或稱解釋性模式是依據探討和瞭解植物之生理過程如光合作用，來推估林分之生長。代表性之模式有 Forest-BGG (Running and Gower 1991)和 Balance (Grote and Pretzsch 2002)等。處理性模式之提倡者認爲世界上實物之系統是由一些狀態變數(如生物量、營養庫等)組成，而各變數之間是依各種處理(如同化作用、呼吸作用、營養吸存)而彼此連結，且連結之結果常會產生回饋之過程。這些系統之動態行爲取決於外在因素對系統之影響和系統內各處理和變數間相互結構之影響，因此，他們認爲系統中所謂的輸入和輸出變數間之相互關係只是臨時性之架構，而不能使用科學方法來進行此等行爲之一般化解釋和未來預測之推定。他/她們認爲統計性模式唯有在系統動態變化緩慢和外在因素在長期間維持不變之狀態下才能發揮其預測之功效。

混合性模式則是(hybrid)在實務上結合統計性模式和處理性模式之優點來同時瞭解植物生理行爲和強化預測之正確性，由於難度過高因此數量較少，代表性之模式有 3-PG(Landsberg and Waring 1997)和 CABALA(Battaglia et al. 2004)。

孔隙性模式則是利用生態學之理論來探討和解釋森林長期之生態過程、機制和物種動態與競爭和環境因素間之關係，以從對生態相互機制之瞭解去控制森林物種之演化(succession)，代表性之模式有 JABOWA (Botkin et al 1972) 和 SORTIE (Coates et al. 2003)。

任何系統動態過程之特性取決於其組成部分在時間尺度之特性。以森林爲例，這些時間尺度可從以分鐘爲單位的過程(如氣孔之開關)、或以小時(如土壤水分之動態)、或以天(如養分動態、物候等)、或以月(季節循環，生長)、年(林木生長和衰老)、十年(森林演替)、百年(森林對氣候變遷之反應)等，而這些不同尺度之強調性取決於模式建立之目的。

森林動態一般泛指的時間尺度範圍是從年到世紀。因基於將森林之發展過程描述成爲立地特徵、微氣候、森林經營和森林狀態變數及彼此間相互作用函數之假設下，森林動態研究之目的通常是要將森林在某一特定條件下之發展，做出可信賴的描述，和對其未來行爲之趨

勢，提供可信賴的預測。因此，重點是在強調描述之行爲有效性，而不在於對未來收穫精確數字之預測。此乃因爲，如果系統描述不能真實反應出決定特徵動力和對環境改變之反應動態過程，則其統計上之精確度亦不重要。

基本上預測和解釋是不同之概念。預測是將系統視爲一個黑箱，找出一系統輸入和輸出間之關係並藉某一輸入值去得到輸出之估計值。例如，若只是欲探討或預測(非解釋)某一生態系統其生產力和生長季節降雨量之關係、那麼使用足夠之歷史資料去配置迴歸方程式則足夠了。

雖然如此，處理模式之提倡者並不否認當生長過程中不受特徵動力(如光合作用曲線、呼吸參數等)顯著影響下，使用統計性模式來推估森林(林木)生長變數間關係之必要性與實用性。他們只是質疑用此類模式來描述複雜系統中之動態行爲。他們認爲只要內部的動力沒有顯著之改變，使用包含環境因素爲輸入因子之多元迴歸，可以對輸入因子改變之影響提供可靠的反應推定。

一般來說，處理過程之解釋模式可以依其處理動態之方式，分成兩大類：第一類是從林木之觀點探討生理作用過程之林木處理模式，另一類則是站在森林或林分階段探討樹種間競爭作用過程之孔隙模式。前者處理之時間是以一株林木或單一樹種同齡林之生長週期爲其範圍，而後者則是描述世紀間森林之演替過程。

雖然森林生長模式有上述之 4 種分類，但從作預測之觀點而言統計性模式是最佳選擇，因此現在大多數被使用之林生長模式都屬統計性模式。在統計性模式中因所需資料和預測結果解析度(resolution)之不同進一步又可分成全林分模式(whole stand model)、直徑級模式(size class model)和單株林木模式(individual tree model)三大類。

全林分模式是指模式處理之單元體是以一林分整體爲對象，模式需要之輸入資料和產出結果都是林分之屬性或變數如林分年齡、林分斷面積、林分材積和林分枯死和生長等。全林分模式是歷史最長久之模式也是最易發展之模式，只要輸入少許之資料就可以模擬林分生長，但所獲結果只粗略提供林分一般之資訊。國內從事生長模式之研究大都屬於此類。相反地，直徑級模式則是需要提供林木直徑級之分佈資料，使用林分表預測法(stand table projection)去估算林分直徑級之株數分佈之變化。第三類模式則是以林分內各單木層級作爲處理單元，

輸入各單木資料，產出亦是單木之變化，再透過加總機制便可獲得林分單位面積之相關結果。因處理林木間競爭方式之不同，單株林木模式又可進一步分成距離相依(distance dependent)和距離獨立(distance independent)兩種。

對於單一樹種同齡林經營之林分，適合發展全林分模式是因其建立較易，且通常會有較高之正確度。雖然全林分模式主要是提供林分單位面積之資訊，但在模式內可利用林分直徑分佈之統計方法加入林分直徑級項目使其產出除林分單位面積資訊外，還能提供林分直徑級之分佈。報告者對六龜地區台灣杉人工林所發展出之生長模式則有如此功能。

但對於多樹種混合或異齡林經營之林分，全林分模式之功能則明顯不足，因為全林分模式架構之限制。此時單株林木模式本身因有較大之彈性，能在不同之林分狀況下正確地掌握林木間之競爭和生長變化，同時其提供之訊息有助於其它類似木材品質和野生動物棲息環境之評估，因此單株林木模式適合用於混合樹種或異齡林林分，因為其能較理想地表示不同樹種或大小林木間之競爭。

和全林分模式相比，雖然單株林木模式有許多優點，但缺點則是發展單株林木模式需要許多資料，這些資料常需花成本和時間去收集，加上單株模式之構造複雜，建置昂貴以及可能的顯著之累計誤差，使得對大面積森林調查更新時應用困難。

3. 森林生長模式之建置與使用

一般來說模式之發展要經過三個階段，分別是(1) 起初建立(initial construction)；(2)評估與修正(evaluation and calibration)；(3) 執行與使用(implementation and use)。然而模式有一特點就是模式很少被完成(finished)，也就是說模式可以一直使用直到有更好經驗、數據或分析方法時被升級(upgrade)或被取代(replacement)。因此一個可運行之會回饋(operational feedback loop)對於模式版本之發展(evolution)和新模式之建立是很重要。

3.1 起初建立

在決定建立一模式前首先必需決定模式之目的(如檢視假說、比較不同育林系、更新森林庫存或決定區域林木砍伐量等)和模式之使用者，以導出模式之結構與解析度。其次在滿足模式之目的和模式之使用者下評估需要使用那類之資料來界定模式之範圍和子尺度，最後再決

定適當的統計分析技術來建立所需之方程式。

一般來說建立模式所需之森林生長數據可來自樹幹解析、臨時樣區和永久樣區。此三類來源優劣之比較在森林測計學之領域中已討論甚久。在現有應用之模式裏，有許多模式是同時利用此三類之資料。

模式之行爲和對外推估之能力主要取決於模式之形態(model form)。在選擇適當之模式形態時要考慮很多因素諸如經驗模式形態或理論模式形態之使用、模式反應族群變異性之彈性度、模式表示族群預期行爲之容易度和比較不同模式形態準則之選擇與使用。對於所面對之資料選擇最佳之模式形態並不是容易之事，必需經過許多配置適合度(goodness of fit)或配置欠缺度(lack of fit)統計值如平均偏差、平均誤差平方根或是訊息準則法(information criterion)之檢驗。

在模式參數推估上有許多統計方法可供使用去推估模式應變數和自變數間之關係，基本上單一方程式之迴歸模式是主要之推估方法，此外，代數差分法(algebraic difference approach)、聯立方程式、貝氏理論和無母數推估法亦有用到。雖然推估方法眾多，但沒有一種推估法是可以克服資料不全、錯誤或不具代表性之問題，換言之，在模式發展中始終要注意資料之品質。

3.2 評估與修正

在模式建立過程中(含模式設計、模式配置和模式執行)，模式評估是很重要之項目。模式可以許多方式如資料品質、配置統計值、敏感度分析或誤差分析等進行評估。模式之評估主要包含了模式評論(model criticism)和模式基準評價(model benchmarking)。

模式評論或是稱驗證(verification)是要從使用者之觀點檢驗下(1)模式形狀和參數化(model form and parameterization)；(2)變數選擇和模式簡單化(variable selection and simplicity)；(3)生物現實性(biological realism)；(4)相配性(compatibility)；(5)穩定性(reliability)；和(6)調適性(adaptability)。

在模式形狀和參數化之驗證中主要是檢驗模式之配置、外推之能力和配置資料之適當性。變數選擇和模式簡單化中主要是檢驗模式內選用變數之邏輯性和合理性，另外，由於所有之統計生長模式使用之資料都是來自族群中之樣本，複雜之模式雖然可以改善配置效果，但也可能因為過度迎合某一樣本地區之特點而喪失對臨近族群之外推能力，所以模式應儘可能簡

單化但要有必要之複雜度。

雖然生長模式是現實物體之抽象體，但預測出之結果必需能符合生物之真實性。最簡單之方式是檢驗參數推估值是否具有與生物真實性相同之符號方向，以確保達到生物之真實性。模式相配性則是指模式內使用之迴歸式(生長式和收穫式)間要符合相配性之原則，或是不同尺度之預測值間有相配性。

模式穩定性是指模式在其敘述環境下產生一致性預測結果之能力，最常用之方法是敏感度分析和 Monte Carlo 技術以探討某一或某些變數之波動對預測結果之影響。模式調適性是指模式在不同使用者或平台間之流通度(portability)，在新地區使用之延展度(extendibility)，原始程式之可供度(source code availability)和說明文件之足夠度(adequate documentation)。

模式基準評價是指使用獨立之資料去確認(validation)模式之有效性，困難之處是要決定那一種程度之誤差是可以接受，因為此與模式想要應用之對象有關。一般常用之母數統計界量或非母數法(如 Kolmogorov-Smirnov test 或 Wilcoxon signed-rank test 等)可供使用進行模式基準評價。

模式基準評價後若發現有缺失則需要進行模式之修正，模式修正有三種方法：(1)就某些方程式重新推估新變數；(2)就所有方程式均重新推估新變數；和(3)使用簡單尺度因素(simple scale factor)去調整預測值。由於前兩種方法較需長時間和大量資料，因此第三種方法較合理。

3.3 執行與使用

模式經過建置、評估和修正後便要執行和使用模式。然而在執行和使用模式前使用者必需和模式開發者合作處理下列事項：(1)收集適當的資料；(2)決定時間尺度；(3)決定空間尺度；(4)電腦之使用界面；(5)與視覺化系統之結合；和(6)產出內容之決定。

模式發展之目的就是能有用，滿足使用者之需要和要求，因此，開發者必須使模式具有從不同取樣設計中讀取資料或產生相關資料、提供彈性之電腦軟體界面、連接視覺工具和產生不同程度內容產出等之能力。而使用者則必須提供正確和適當之資料與選擇最佳模式達到其對時間上和空間尺度之要求。整體言之，適當地執行和使用生長模式是模式者、程式設計者和終端使用者間之動態互動關係。

4.森林模式發展之未來方向

雖然森林模式最終之發展狀況很難預測，但基本上現有林業面對著一些嶄新或困難之重要事項會影響森林模式未來之發展。這些事項包含如何整合現有各類之生長模式和結合地理統計分析技術(geostatistical technical)以改善預測；結合地理資訊系統和衛星航空影像技術如光達(Lidar)改善輸入資料之精確度；和增進模式處理大量資料之能力如和資料庫系統之連接，和增進產出視覺化能力以改善電腦軟體功能等。然而確定的是，不管模式之未來方向如何，森林生長收穫模式必需依據現有之知識，透過嚴謹之檢驗和傳播給各類之使用者。

(二) 森林林分結構數量化

森林林分(stand)是指森林裡由一群在組成、年齡、立地狀況和林分處理均類似之植群構成，但與臨近地區之林木有所區別。在森林施業上林分是育林或經營單元體。林分結構(stand structure)則是指林分內組成個體在林分內水平方向和垂直方向之分佈狀況。此等個體包括林木之胸徑、樹高、樹冠層、上層林木、灌木、下層草本植物、立枯木、和倒木等。

森林林分結構是林分經過過去干擾和經營活動所產生之結果。瞭解過去干擾和經營活動(如森林火或採伐)是如何影響現存之林分結構，以及其對林分未來結構之發展(即森林林分動態)，對於生長模式在進行比較不同經營策略方案和育林方案模擬時是很重要的。

在決定野生動物棲息環境品質和物種多樣性時，森林/林分空間結構成爲重要之決定因子。森林/林分垂直和水平空間結構之趨向異質化(heterogeneity)，會增加物種之多元性和生態之穩定度(Pretzsch 1998, Humphrey et al 2000)。此外，森林結構異質度之改變亦會對森林微氣候環境造成影響(Heithercker and Halpern 2006, Weng et al 2007)。因此發展出能衡量區分不同森林結構之數量化指標以評估棲息地之優劣成爲研究和實務上均甚重要之議題。此外，Pommerening (2002)亦指出森林結構之數量化，尤其是林木和其屬性在空間分佈之狀態訊息實有助於對林分 alpha 歧異度之瞭解。

林分結構數量化因分析方法之不同可分成距離獨立和距離相依兩大類，前者不考量結構在林分空間上之分佈，在計算指標時不需要或不能顯示空間訊息(spatial information)，如林木胸徑分布、Shannon index；後者則是考量結構在林分空間上之分佈狀態，在計算指標時則

需要或能顯示空間訊息(spatial information)，如許多最近發展出之結構指標如聚集指標 (aggregation index)、傳播指標(contagion index)、胸徑分化指標(diameter differentiation index)、和結構複雜度(structural complexity index)等。

茲將上述之結構空間指標說明如下：

1. 聚集指標 (Aggregation index)

Clark and Evans 於 1954 提出一個以單一數值來衡量整體林分林木空間位置變異程度之聚集指標 (aggregation index)，其公式如下

$$R = r_A / E(r)$$

式中之 $E(r) = 1/2 * \sqrt{N/A}$

r_A ：一林分內各林木至最近鄰居林木之平均距離 (m)

$E(r)$ ：在林木空間位置呈完全逢機分佈之林分內，各林木至鄰近林木之期望平均距離 (m)

N ：林分株數

A ：林分面積 (ha)

聚集指標是用來衡量一現實林分內，林木空間位置之實際分佈狀態與其呈逢機分佈狀態時之偏離程度。一般上若聚集指標數值為 1 表示此林分之林木位置成全逢機分佈， $R > 1$ ，表示林分之林木空間分佈格局上有呈規則化之趨勢； $R < 1$ ，表示林分之林木空間分佈格局上有呈聚集(clump)之狀態；若 $R \neq 1$ ，表示林分之林木空間分佈不呈完全逢機分佈，可從下式之常態分佈統計來檢定此林木空間分佈偏離常態逢機分佈之程度。

$$Z = (YA - E(r)) / G_{E(r)}$$

式中之 Z 為標準常態分佈界量

$G_{E(r)}$ ：為具有和現實林分相同密度但林木位置呈完全逢機時各林木和其最近鄰居平均距離之標準誤差。當林分密度為 ρ 時，且

$$\text{其 } G_{E(r)} = 0.26136 / \sqrt{N * \rho}$$

2. 傳播指標 (Contagion index)

Gadow et al. (1998) 提出一指標來衡量一林分內各單株林木在空間位置分佈之規整性。此指標之理論概念說明如下：

假設在一林木空間位置呈完全規整之林分內，對第 i 株主體木而言，其和鄰近二株林木之理論夾角 α_0 應為 $360^\circ / n$ ，其中 n 為最近距離之鄰近林木株數。以常用之最近距離 4 個鄰居林木之情形 ($n = 4$) 而言， $\alpha_0 = 90^\circ$ 。傳播指標(Contagion index) 則定義為主林木和兩個鄰近木實際夾角 α 小於理論夾角 α_0 之比例，其數學式如下：

$$W_i = 1/n \sum W_{ij}$$

式中 W_i : 第 i 株林木之傳播值

$W_{ij} = 1$ 當第 i 株林木和第 j 株鄰木之實際夾角 α 小於理論夾角 α_0 。

$= 0$ 其他

傳播指標之分佈可以用來評估林分內林木位置點分布之格局形態。一林分內各林木之平均傳播指標則可將林木位置點分布之格局分成規整、逢機，和聚集三大類。Albert (1999) 之模擬研究顯示當林木之平均傳播指標大於 0.6 時，林分內林木位置點分布之格局是呈聚集狀態；介於 0 和 0.5 是呈規整狀態；介於 0.5 和 0.6 是呈逢機狀態，但 Albert 亦指出有時其界線點不是很顯 (Albert 1999)。

3. 胸徑分化指標(Diameter differentiation index)

胸徑分化指標是使用連續性尺度來衡量一林分內各鄰近林木間胸徑大小差異在空間之分布狀況。以主林木 (i) 和其第一最近距離之林木 (j) 而言，胸徑分化指標定義如下：

$$T_{ij} = 1 - [\min (DBH_i, DBH_j) / \max (DBH_i, DBH_j)]$$

式中 DBH 表示林木之胸徑 (cm)

胸徑分化指標值會隨著鄰近林木間大小差異之增加變大。胸徑分化指標值可以分成四種分化之程度，從 0.0 - 0.3 之小 (small) 程度；0.3 - 0.5 之中 (average) 程度；0.50 - 0.70 之大 (big) 程度和 0.70 - 1.0 之非常大 (very big) 程度 (Pommerening 2002)。

此外，為探討胸徑分化是否會受鄰近林木距離遠近之影響，除了使用第 1 最近距離之林木外，還可使用第 2，第 3 最近距離之鄰近木以觀測鄰近木距離對主體木大小之影響。

4. 結構複雜度(structural complexity index)

依據林分內林木垂直分級與相鄰林木距離，Zenner and Hibbs (2000) 提出式 3 之結構複雜度指標 SCI 來描述林分空間結構之複雜程度。

$$SCI = SAT / A_T$$

式中：SAT 為由林木位置與樹高合成之三度空間所構成的鄰近空間三角形之表面積總合， $SAT = 1/2 a * b$ ， $i = 1, \dots, N$ 是樣區內三角形之數量， $a * b$ 使是向量 AB 和向量 AC 之乘積，各向量三度空間座標為 $a = (x_b - x_a, y_b - y_a, z_b - z_a)$ 和 $b = (x_c - x_a, y_c - y_a, z_c - z_a)$ 。A_T 為所有三角形投影面積之總合。

SAT 在計算上是為樣區中的 N 個三角形每個三角形空間坐標兩個向量的乘積總和。此二分之一的向量的乘積值即是結合林木之 Z(高度或胸徑)坐標和林木位置 X, Y 坐標(平面)之三度空間之三角形面積。由此三度空間三角形的表面總面積和投影三角形面積總合之比值大小，便可依相鄰林木樹高與大小之不同比較結構上複雜度之差異。

(三) 森林植群模擬器 FVS

森林植群模擬器(Forest Vegetation Simulator, FVS)是一種用來預測全美國森林林分動態之模式。FVS 是一種被美國不同聯邦政府機關包括農業部林務署、內政部土地管理局(USDI Bureau of Land Management)，和內政部印第安事務局(USDI Bureau of Indian Affairs)使用之標準模式。此外亦被州政府如華盛頓之州自然資源部(Washington Department of Natural Resources)、私人企業和私有林地主使用。在分類上 FVS 是一種距離獨立單株生長收穫模式。到目前為止，因應地區之差異，FVS 已發展出 20 種版本以應用於全美國各地區。FVS 可以模擬不同樹種、林型、育林處理下林分之動態演變，是美國使用最為廣泛之森林生長收穫模式。

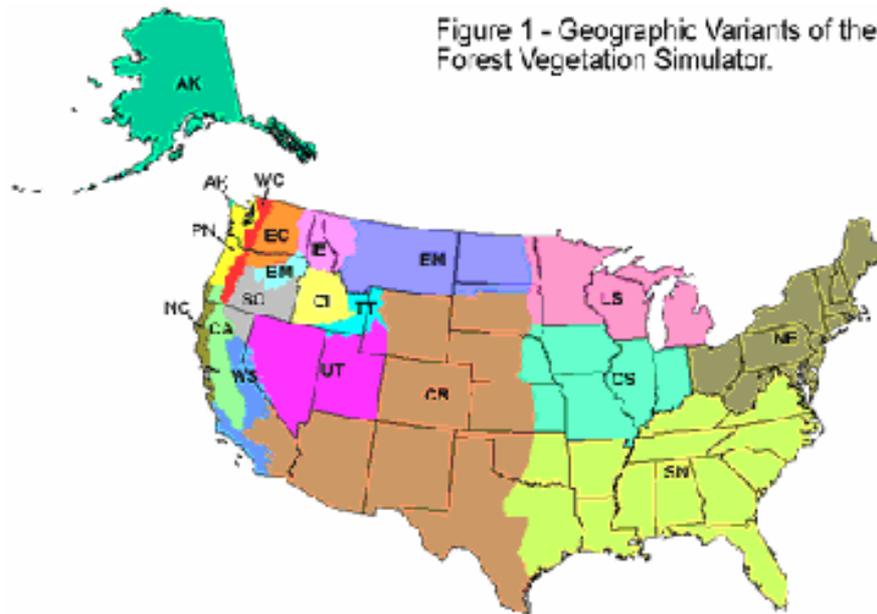


圖 3 FVS 在美國地區版之分佈圖

FVS 之發展歷史久遠。發展之初是以 1973 年為 northern Idaho and western Montana 地區使用之 Prognosis model 為範本，收集其它地區之資料以擴展 Prognosis model 之應用範圍。到了 1980 年代初期 Prognosis model 更名為 FVS，並由美國農業部林務署國家森林系統 (USDA Forest Service National Forest System) 做為國家標準之森林生長和收穫模式。

FVS 是由位於美國 Colorado 州 Fort Collins 市直屬美國林務署華盛頓特區之森林經營服務中心負責模式之維護、支援、發展和訓練。森林經營服務中心擔當技術轉移之角色，和不同地區國有林林務人員和研究人員合作將當地之發現納入 FVS。因此，該中心經常改進現有之版本和新版本之發展。

FVS 模式之軟體系統是由區域版本(regional FVS variants)、模式延展(model extensions)、使用者繪圖界面(graphical user interface)和一群後處理程式(post-processing programs)組成，經由標準化和客製化(customized)之方式達到使用者之需求。

FVS 一個版本是指生長和枯死模式調整(calibration)後適合於美國一特定地區。到目前為止全美國共有 20 個版本。使用者可依據所在地區選擇適當之版本，並調整樹種以符合當地之樹種。FVS 除了上述 20 個基版本，還有延長版(extensions)去模擬不同森林生態干擾(如虫害、

病害和火災)對森林生長和枯死之影響。這些延長版包括虫害和病害，森林火和燃料，氣候變遷和經濟收益等版本。除了林木資源外，在森林火和燃料延長版中還估算不同森林林分組成中(如活立木、枯立木、燃料表層)碳隨時間變化之庫存量。

森林經營者廣泛地使用 FVS 去了解現有林分之狀態，還可在各種經營方案下預測林分之未來情況和更新調查資料，所得結果可做為森林規劃模式和其它分析工具所需資料之來源。此外，FVS 還可和林務署其它軟體資料庫和地理資訊系統相連。

FVS 之使用不幾僅只限於林木經營管理方面，其它之使用包含考量經營措施如何影響森林結構和組成、野生動物棲息環境林分適宜性之決定、森林火災或病蟲害發生危險度之評估、森林火災或病蟲害損失之預測和氣候變遷對森林影響之模擬等。

FVS 系統事實上是由一串軟體工具組成，茲將 FVS 模式重要之構成單元體簡述如下：

1. 前處理器(Pre Processors)：

前處理器是指一群程式用來處理林分調查資料庫之儲存、建置、分析和生產作為 FVS 輸入之用。FVS 輸入資料要儲存成 Suppose 介面能接受之格式，除了使用 Suppose 介面直接輸入 FVS 所需之資料外，也可以由使用者自行發展前處理器將資料輸入 FVS。

2. Suppose 使用者介面(Suppose User Interface)

Suppose 是 FVS 軟體在視窗操作環境下運轉時所需要之一種繪圖使用介面(Graphical User Interface, GUI)，透過 Suppose 介面使用者能以 point-and-click 方式快速地產生 FVS 輸入檔案，開始生長模式模擬和進入後處理器之作業。

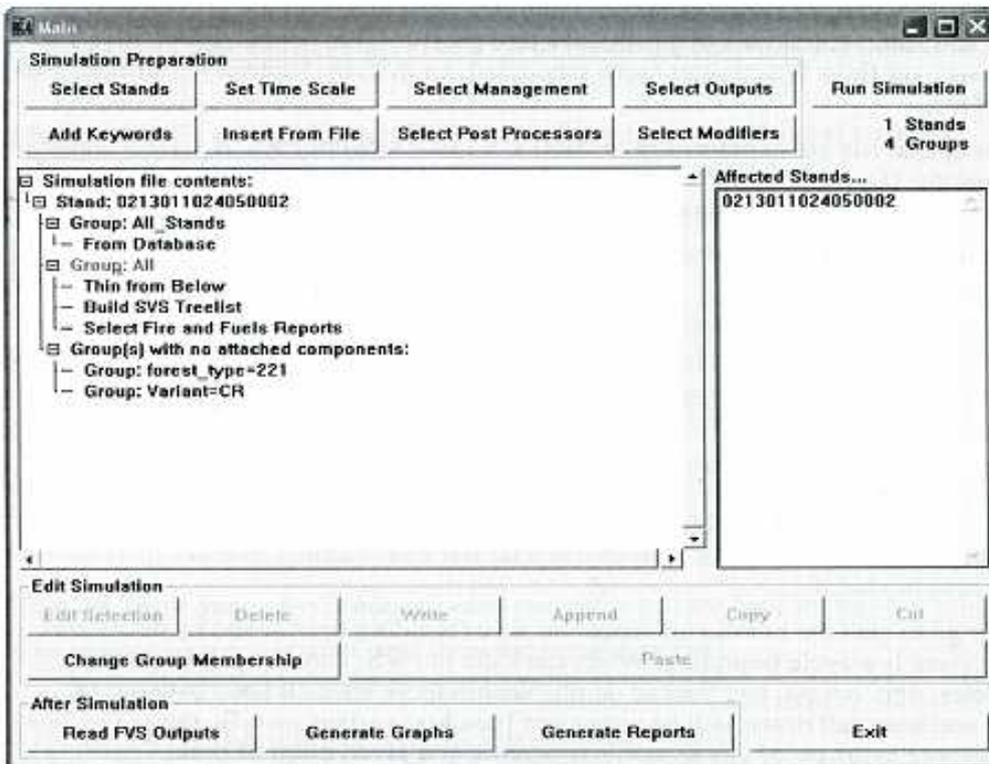


圖 4 Suppose 2.2 使用者介面

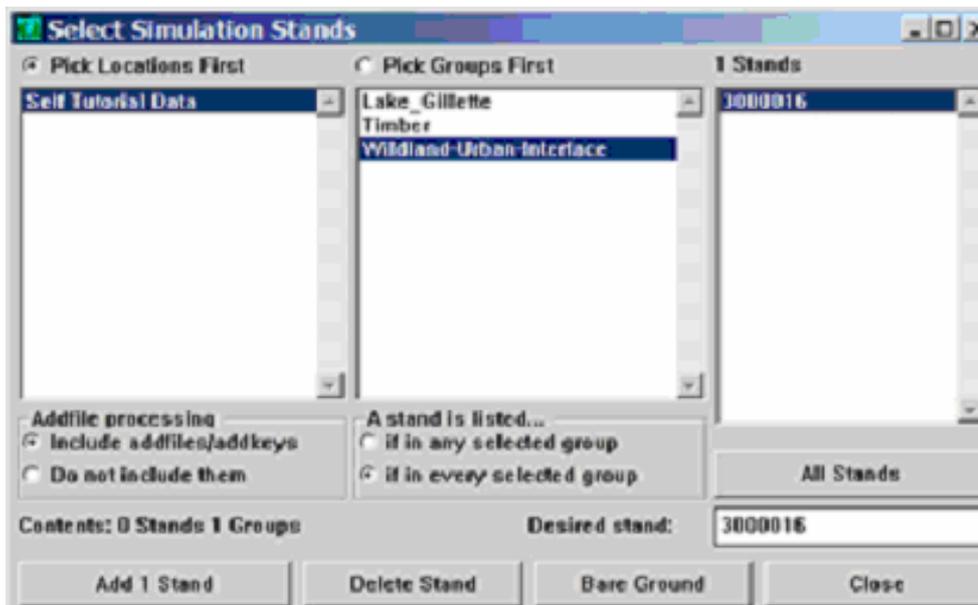


圖 5 選擇欲模擬之林分

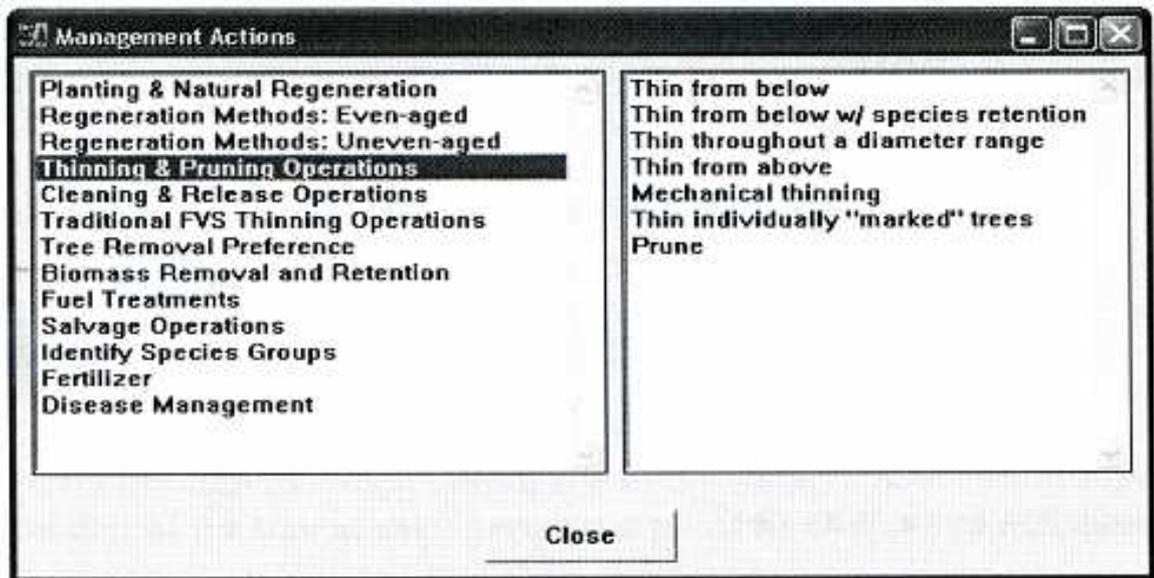


圖 6 模擬林分之經營活動

3. FVS 模式

FVS 模式是為 FVS 系統之主體，隨著地區之不同，所用計算生長、枯死和材積之公式不同。許多版本中還包含燃料、生物量、火災和病蟲害。除了少數外，所有版本均使用相同之輸入程序和產生相同內容之報表。

在運轉 FVS 時通常需要兩種資料輸入格式。第一種是關鍵字記錄檔 (keyword record file)，第二種是林木資料檔 (tree data file)。關鍵字記錄檔是一群助記碼 (mnemonic words) 提供使用者告訴模式要做什麼，使用關鍵字輸入林分層級之參數諸如坡度、坡向、海拔、地區和林地生產力等。此外，關鍵字亦用來描述經營處理、控制產出報表之產生等。林木資料檔則是由林木層級之資料組成，必要資料包括每株林木之樹種和 DBH，另外提供選擇者是，樹高、枝下高和其它在森林調查中所收集之項目。林木資料可由林木資料庫輸入 FVS。

FVS 模式是為現實林或裸露地設置，因此，在後者情況下所需之一般資料則為立地狀況 (含坡度、坡向、海拔、生態區、林區和地位指數等)。對於前者除立地狀況外還包含林分調查之設計 (調查樣區之形狀、面積與數量)、林分調查林木屬性之測計。在調查之

項目中有些是基本必要因子如所屬之樣區、樹種和現有之 DBH。其它可供選則之項目則包含林木歷始記錄、定期胸徑生長量、樹高、樹冠比、林木受害程度和離林木價值等級等。此等選擇性項目之提供有助於林分之描述和改善預測之結果。

Average Summary Table - FVS Post Processor

FVS SIMULATION: ex1-2
SIMULATION DONE: 10-07-2011 09:43:45

AVERAGE* SUMMARY STATISTICS BY COMMON CYCLE

START OF SIMULATION PERIOD				REMOVALS**				AFTER TREATMENT				GROWTH THIS PERIOD				HAZ				
YEAR	AGE	TREES	BA	SDI	CCF	HT	QMD	TOTAL MERCH	MERCH	NO OF	TOTAL MERCH	MERCH	NO OF	TOTAL MERCH	MERCH	NO OF	PERIOD	ACCRE	MORT	HAZ
CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	CU FT	YEARS	PER	YEAR	CU FT	
2006	0	1999	159	425	190	72	3.9	4214	2783	11573	0	0	0	0	159	425	190	72	3.9	0.0
2012	6	1927	173	421	202	74	4.1	4613	3169	15460	0	0	0	0	173	451	202	74	4.1	0.0
2022	16	1708	191	482	225	76	4.5	5159	3003	18326	0	0	0	0	191	482	225	76	4.5	0.0
2032	26	1559	202	489	255	78	4.9	5439	4200	20878	0	0	0	0	202	499	255	78	4.9	0.0
2042	36	1346	208	487	261	79	5.4	5645	4499	22578	0	0	0	0	208	487	261	79	5.4	0.0
2052	46	1195	215	490	267	80	5.8	5862	4754	23976	0	0	0	0	215	490	267	80	5.8	0.0

*STANDS WERE GIVEN EQUAL WEIGHT.
**REMOVAL AVERAGES ARE BASED ON VALUES FROM ALL STANDS, INCLUDING THOSE IN WHICH ZERO VOLUME WAS HARVESTED THAT CYCLE.

THE FOLLOWING STANDS WERE SUMMARIZED:
0403010010050033 0403010010050036 0403010010050039

圖 7 林分摘要表輸出檔

通常 FVS 會產生 4 種產出檔案。其中主結果產出是在每一次模擬時都會產生，內容主要是依據經營措施和行動下提供林分組成統計數據隨時間之變化，產生林分摘要表和所有經營活動之總結等結果。另外三種產出檔案則視需要而定，分別是林木列舉檔、只有林分摘要表檔和可供經濟分析之經濟檔。

Stand and Stock Table - FVS Post Processor

FVS Run: ex1-2
Stand: 0213011014050032
Regn ID: NONE
Year: 2006

FOREST VEGETATION SIMULATOR
STAND AND STOCK TABLE
Zero-acre values are based on total stand acres

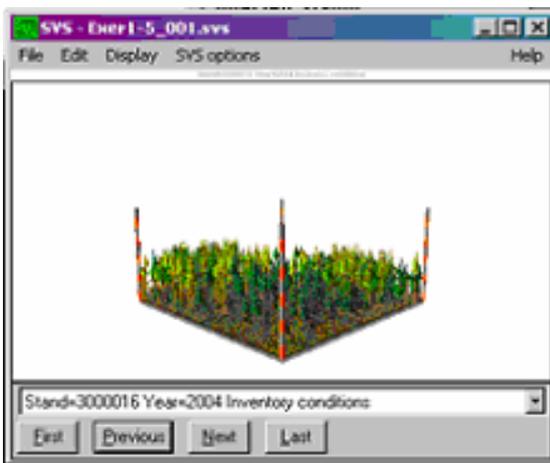
Species: All Year: 2006 Regn ID: NONE Stand: 0213011014050032

CLASS	SPEC	LIVE TREES						HARVESTED TREES						MORTALITY TREES								
		TREES	AVG	BASAL	TOTAL	MERCH	MERCH	TREES	AVG	BASAL	TOTAL	MERCH	MERCH	TREES	AVG	BASAL	TOTAL	MERCH	MERCH			
		PER ACRE	HT	AREA	CU FT	CU FT	PER ACRE	HT	AREA	CU FT	CU FT	PER ACRE	HT	AREA	CU FT	CU FT	PER ACRE	HT	AREA	CU FT	CU FT	
1		300.0	4.7	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4		75.0	11.0	7.2	86.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8		26.3	17.6	5.2	73.4	44.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9		34.3	31.7	22.1	255.5	220.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20		21.0	58.4	22.5	224.5	221.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22		31.4	40.5	25.0	504.1	533.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24		16.7	47.1	27.0	462.0	426.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16		9.8	70.2	22.5	340.1	304.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18		1.1	75.0	2.5	60.6	59.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22		5.0	79.8	25.0	465.3	430.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24		2.5	83.3	7.5	237.7	220.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26		0.5	74.0	2.5	71.2	65.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10		1.2	32.3	5.0	189.5	157.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30		0.5	82.0	2.5	79.1	72.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34		0.8	84.1	5.0	321.5	140.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total		531.2	23.6	133.7	3334.8	2896.6	14047.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

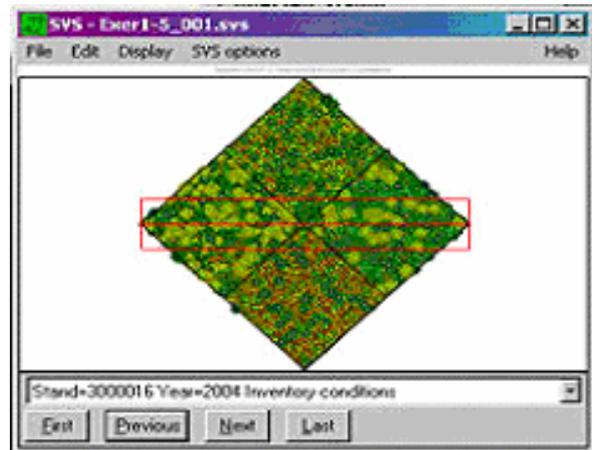
圖 8 FVS 主結果輸出檔

4 · 後處理器(Post Processor)

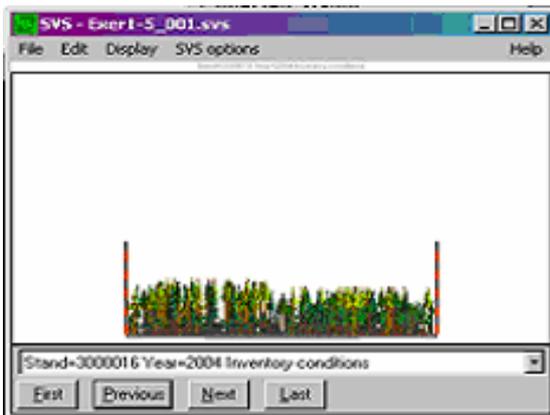
後處理器是指一些處理 FVS 產出結果之程式。這些程式將 FVS 產出之結果輸入後經過計算再產生一些報表如林分表和蓄積表，或是使用林分視覺系統(Stand Visualization System, SVS)將報表轉換成圖形與影像。使用者可自行開發或由 Suppose 使用者介面提供後處理器。



PERSPECTIVE VIEW



OVERHEAD VIEW



PROFILE VIEW

圖 9 林分視覺系統

(四) ORGANON

Organon 是一種距離獨立之林木單株生長收穫模式。主要是發展供美國 Oregon 州西南地區、Oregon 州西北地區和華盛頓州之林分經營合作(Stand Management Cooperative)地區，模式主要是用於預測在不同樹種混合、林分結構和經營活動下林分之未來發展。

Organon 模式之發展已近有 30 年之歷史，是由 Oregon State University 森林系教授 David Hann 博士領軍並經過許多 David Hann 博士指導之碩、博士生(包括現在宜蘭大學森林系之王兆桓教授)共同努力不斷修正而得。Organon 模式之最初版是在林業強化研究項目(Forestry Intensified Research program)之研究經費支助下完成，在建立模式之初，本是要建立建立於主電腦上 PROGNOSIS 模式之新版，但由於那時 IBM PC 已開始發展，為能增加可及性，David Hann 教授決定在個人電腦上發展其模式奠立現在以個人電腦為平台之基礎。

到目前為止，Organon 模式已發展出可應用於 4 個地區和不同之林分結構：分別為(1) Oregon 州西南地區混合林、同齡林或異齡林經營年齡可達 350 年之 SWO 版本，(2) Oregon 州西北地區花旗松(Douglas fir)和西部鐵杉(Western hemlock)之同齡林或異齡林經營，年齡在 120 年以下青年生長(young-growth)林分之 NWO 版本，(3) Oregon 州西部、華盛頓州和加拿大 哥倫比亞地區之 SMC 版本，和 (4) Oregon 州西部和華盛頓州 30 年生以下赤楊(red alder) 人工同齡林之 RAP 版本。

Organon 模式是利用 13 大類之方程式來預測林分內 13 種林分屬性或變數之變化。分別為 枯孤立木之最大樹冠寬度、林分內林木之最大樹冠寬度、樹冠剖面、 樹皮厚度、立木材積、樹幹尖削度、樹高胸徑曲線、林木枝下高、林木優勢木樹高和地位指 數、樹高生長、胸徑生長、樹冠衰減率和枯死率。每一大類之方程式 對不同之版本都有各自之參數，並使用線性或非線性迴歸技術，配合各地區之樣木或樣區資 料進行模式參數之配置。

在建立 Organon 模式所需要之資料均全數來自研究樣區(research plot)。Organon 州西南地 區版(SWO)和 Organon 州西北地區版(NWO)之資料是來自健康並有經營過產生不同林分結構

(如單一或混合樹種組成、同齡林或異齡林經營)之林分中所設置之臨時樣區。在此樣區內所有高於 1.0 英尺之林木均編號進行胸徑、樹高、林木枝下高之每木調查，並記錄林木枯死之時間。此外，樣木之受損危害之種類和程度也予記錄。所有胸徑大於 1.0 英尺之林木使用生長錐去獲取過去之生長量。在樹高生長量部份，對於那些能從外觀得知樹齡之林木直接用樹高儀計算林木之高生長，然對於那些不能從外觀得知樹齡之林木，則必須透過樹幹解析之方式得到樹高之過去生長資料。Organon 模式另外兩個版本之資料則來自包含各種育林作業(如施肥、疏伐和栽植密度)之試驗地。

Organon 模式建立使用後經過許多文獻之驗證。驗證之範圍包括模式結構、方程式、資料之適當性、統計方法和預測結果之可靠性。驗證結果顯示 Organon 模式在美國西北地區之可行性與優越性。ORGANON 是在交談式(interactive mode)環境中使用電腦程式語言 FORTRAN 撰寫而成。其整體架構如圖 11 所示。此外 ORGANON 也提供使用者以批次(batch mode)方式中跑 ORGANON。

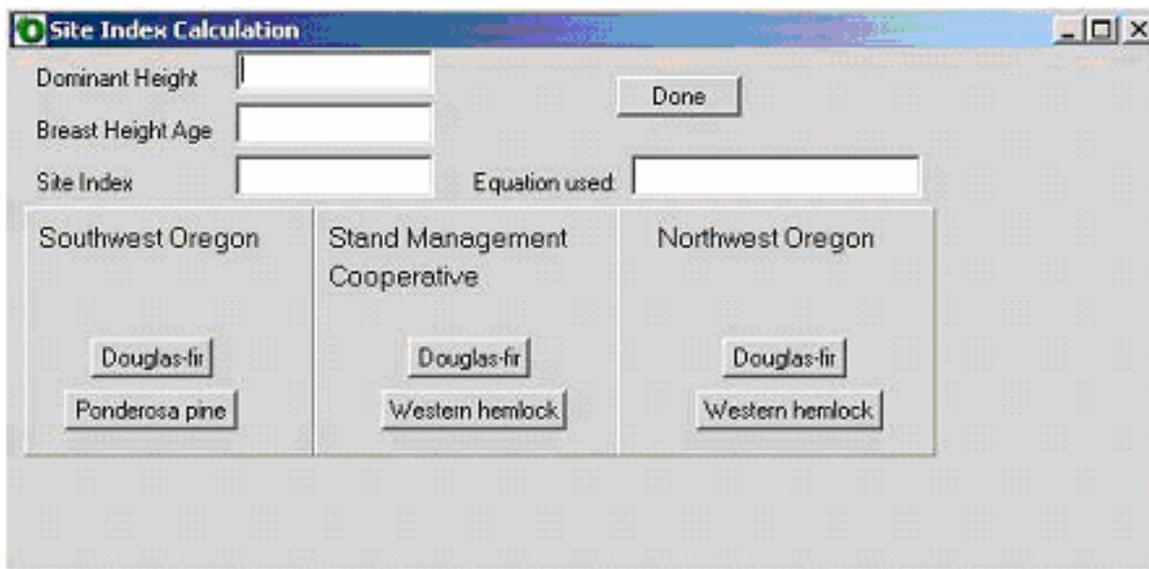


圖 10 ORGANON 計算地位指數

GROWTH CYCLE FLOW CHART

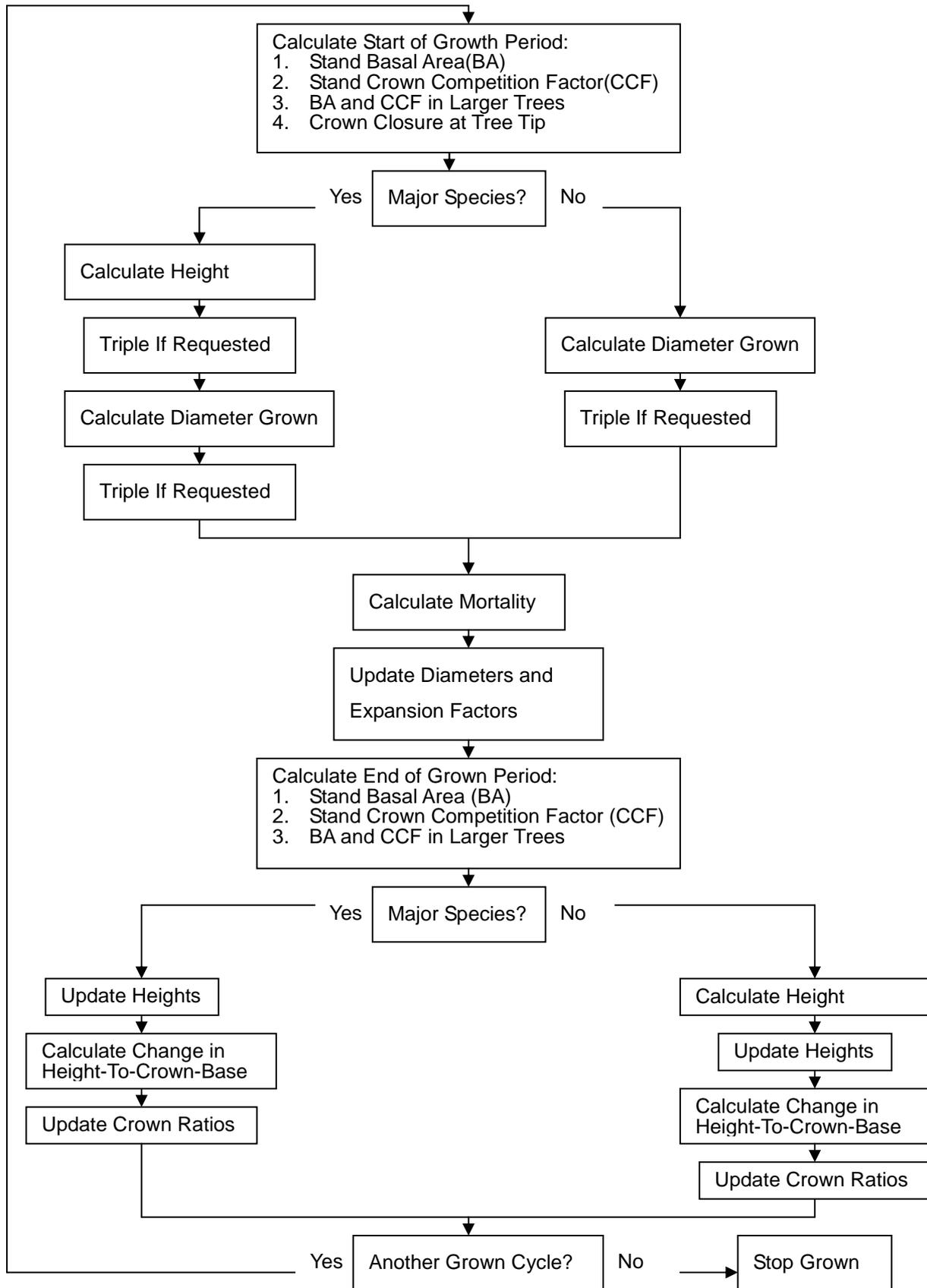


圖 11 Flowchart of ORGANON

茲將 ORGANON 所產生之重要結果列表如下

```

INITIAL PER ACRE STAND TABLE EXAMPLE
+-----+
| TEST PLOT           | 10-21-2005  8:46 AM | Page 1 |
| INITIAL PER ACRE STAND TABLE AT 36 YEARS FOR ALL SPECIES |
|
| ***** E N D I N G ***** NET 0-YEAR CHANGE ***** |
| DIAM  | TREES/      CF  SCRIB | TREES/      CF  SCRIB |
| CLASS | ACRE   BA   VOL  VOL | ACRE   BA   VOL  VOL |
+-----+
| 0 - 2* | 57.3   .0   0.   0. |
| 2 - 4* | 229.1 15.0 142.  0. |
| 4 - 6* | 71.6   8.4 112.  0. |
| 6 - 8* | 43.0  12.4 197. 571. |
| 8 - 10* | 20.0  10.0 158. 357. |
| 10 - 12* | 30.2  20.0 362. 701. |
|
| TOTALS 451.9 65.8 970. 1628. |
+-----+

PER ACRE STAND TABLE EXAMPLE
+-----+
| TEST PLOT           | 10-21-2005  8:47 AM | Page 1 |
| PER ACRE STAND TABLE AT 41 YEARS FOR ALL SPECIES |
|
| ***** E N D I N G ***** NET 5-YEAR CHANGE ***** |
| DIAM  | TREES/      CF  SCRIB | TREES/      CF  SCRIB |
| CLASS | ACRE   BA   VOL  VOL | ACRE   BA   VOL  VOL |
+-----+
| 0 - 2* | 53.9   0.2   2.   0. | +3.4  0.2   2.   0. |
| 2 - 4* | .0     0.0   0.   0. | -229.1 -15.0 -142.  0. |
| 4 - 6* | 266.1  35.2  485. 780. | 194.6  26.8  373. 780. |
| 6 - 8* | 42.5  11.6  204.  613. | +0.4  +0.7   8.  42. |
| 8 - 10* | 28.4  13.4  275.  615. | 7.6    3.4  117.  258. |
| 10 - 12* | 20.8  14.4  281.  570. | +9.4  +5.6  +80.  +131. |
| 12 - 14* | 30.1  28.4  615. 1512. | 30.1  28.4  615. 1512. |
|
| TOTALS 441.9 103.2 1862. 4090. | -10.0  37.5  802.  2462. |
+-----+

```

圖 12 林分表

INITIAL RESIDUAL STOCKING TABLE EXAMPLE

```

=====
|                                     R E S I D U A L S T O C K T A B L E                                     |
| TEST PLOT                                                                    |
| DATA FILE: TESTPLOT [ 10-21-2005 8:46 AM ] |
|-----|
| AT: TREES/      CF  SCRIB | TREES/      CF  SCRIB |
| SPECIES YR: ACRE  BA  VOL  VOL | ACRE  BA  VOL  VOL | | |
|---|---|---|---|
|                                     | ENDING |                                     | 0-YR CHANGE |
| Doug Fir 36| 451.9  65.8  970.  1628. |                                     |
|
| TOTAL:    451.9  65.8  970.  1628. |
|-----|
|
| Stand Density Index: 157.      Relative Density Index: .295 |
| Quadratic Mean Diameter: 5.2      Height of 40 Largest: 48.7 |
| Mean Diameter: 4.4      Mean Crown Ratio: .899 |
| Estimated % Crown Closure: 68.0 |
|-----|

```

RESIDUAL STOCKING TABLE EXAMPLE

```

=====
|                                     R E S I D U A L S T O C K T A B L E                                     |
| TEST PLOT                                                                    |
| DATA FILE: TESTPLOT [ 10-21-2005 8:46 AM ] |
|-----|
| AT: TREES/      CF  SCRIB | TREES/      CF  SCRIB |
| SPECIES YR: ACRE  BA  VOL  VOL | ACRE  BA  VOL  VOL | | |
|---|---|---|---|
|                                     | ENDING |                                     | 5-YR CHANGE |
| Doug Fir 41| 441.9  103.2  1862.  4060. | -10.0  37.5  892.1  2461.8 |
|
| TOTALS:    441.9  103.2  1862.  4060.  -10.0  37.5  892.1  2462. |
|-----|
|
| Stand Density Index: 224.      Relative Density Index: .422 |
| Quadratic Mean Diameter: 6.5      Height of 40 Largest: 60.6 |
| Mean Diameter: 5.8      Mean Crown Ratio: .767 |
| Estimated % Crown Closure: 76.1 |
|-----|

```

圖 13 林分蓄積表

(五) 現地考察

1. Capitol Forest Research Tour

Capitol State Forest 是隸屬華盛頓州之州有林，位於離華盛頓州州政府 Olympia 約 5 英哩之距離。從 1955 年起，Capitol State Forest 提供華盛頓州居民不同類別之旅遊機會，同時亦進行林木收穫作業。華盛頓州自然資源部和林務署太平洋西北研究站奧林匹亞分站在 Capitol Forest 合作進行各類研究計劃，其中與報告人研究有關者則是在 Oregon 州西部和 Washington 州之大面積之育林處理計畫。

太平洋西北研究站奧林匹亞分站研究員陪報告者參訪他們位在 Capitol State Forest 之試驗地。該試驗之目的是探索在 50 年生之花旗松(Douglas-fir)人工林內進行 6 種不同程度上木之保留(0, 8, 16, 24, 32 和 40%之完全立木度)對林下 3 種栽植木(花旗松、西部鐵杉 western hemlock 和西部紅杉 western red cedar)之生長和林分結構之影響。10 年之觀察結果顯示在有上木保留之林分內，因土壤水分和土壤養分之競爭，上木是影響栽植木生長之主要因子，在上木密度超過每英畝斷面積 100 平方英尺時光線成爲栽植木生長之限制因子，林下灌木和雜草之適度清除會增進栽植木之生長，但全面清除並未有額外之顯著效果。

除了進行上層木密度控制之試驗外，奧林匹亞分站研究人員還帶報告者參訪他們另外一項面積更爲廣大之研究計劃試驗地。該計畫是要從地景管理之觀點來評量何種森林施業和育林體系可被使用降低林木收穫作業對視覺景觀之衝擊，同時能維持林木和其他價值之高產出。該計畫是由華盛頓州自然資源部、林務署太平洋西北研究站、華盛頓大學森林學院、愛達荷大學森林野生動物和放牧學院、和奧立岡州立大學森林學院共同參與。使用 6 種森林施業方式(皆伐、複層林、區塊伐採、群狀伐採、重復疏伐和不伐採)，在 3 個不同地型和林分狀況之地點實施。進行林木生長和林分發展、經濟收益、視覺品質、野生動物等議題之研究。



圖 15 Capitol State Forest 上層木密度試驗區

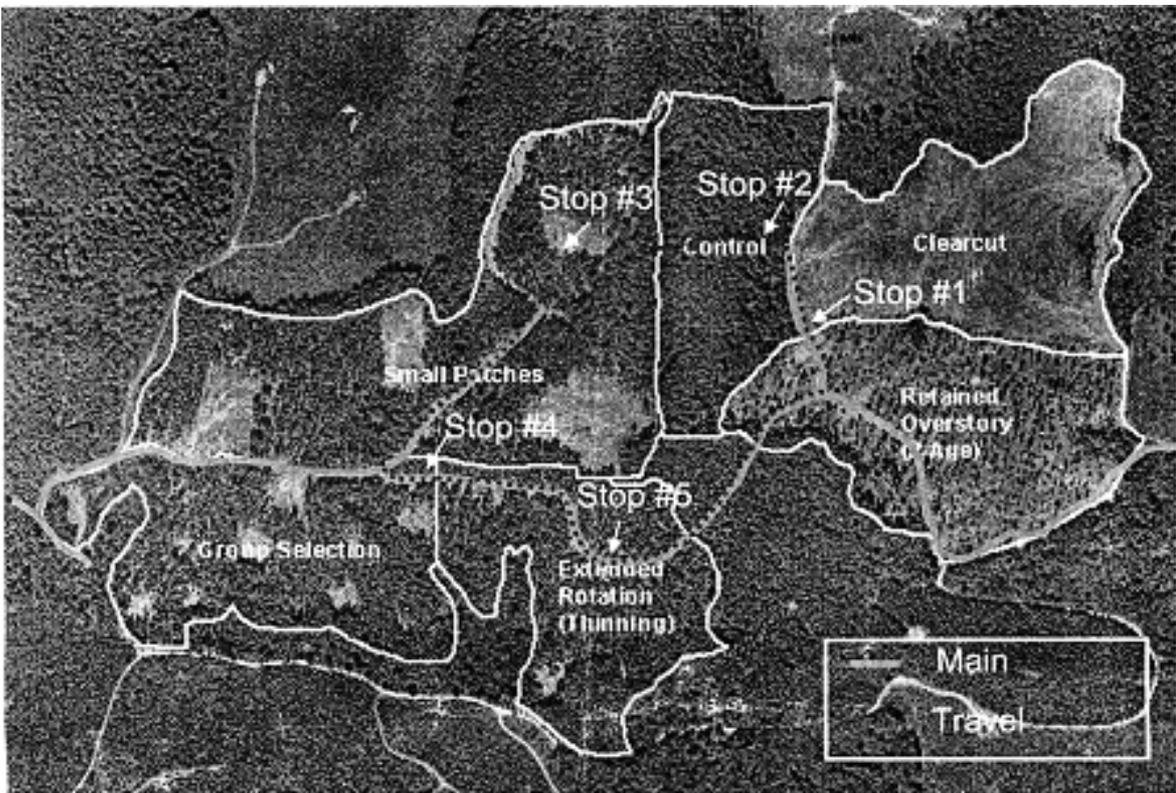


圖 16 Capitol State Forest 森林施業和育林體系試驗區

2. Wind River Experimental Forest in Gifford Pinchot National Forest.

Gifford Pinchot National Forest 是以紀念美國林務署第一任署長為名之國有森林，位於華盛頓州西南地區，面積約為 1,368,300 英畝，是美國最古老之國有森林之一，創立於 1908 年，本來稱為 Columbia National Forest，後於 1949 年改名為 Gifford Pinchot National Forest. 國有林境內提供許多不同之環境，其中又以佔地 110,000 英畝之 Mount St. Helens 最為有名。

The Wind River 試驗林是位於 Gifford Pinchot 國有林西南，Cascade Mountain 之西，哥倫比亞河縱谷之北，距華盛頓州之溫哥華市約 1.5 小時之車程。Wind River 試驗林是美國林務署於 1932 年成立之試驗林，是太平洋西北地區森林研究之搖籃，主要是從事長期育林作業和生態方面之研究。

美國西北地區雖然是以針葉樹為主，但最近闊葉樹之造林也引起林業界之重視，因而成立美國闊葉樹育林合作協會。在美國西北地區目前最受重視之闊葉樹則是美國赤楊(red alder)，因此，美國赤楊之種植與育林作業之改進是目前西北地區研究混合林經營之重點。

Dr. Deal 邀請報告者參加他們 2012 年之年會，並赴 Wind River 試驗林參觀美國赤楊和花旗松帶狀之混合人工林和美國赤楊和花旗松之不同組合之造林地。研究結果顯示美國赤楊之存在使森林土壤內氮素和有機物較花旗松純林為高，因此在地位差之花旗松和赤楊之混合造林地內，美國赤楊之存在會顯著地促進花旗松之生長，但在地位好之造林地則無明顯之效用。為了能提供足夠之氮且不會影響花旗松之生長空間，每畝林地宜保留均勻分佈 20-40 株赤楊。

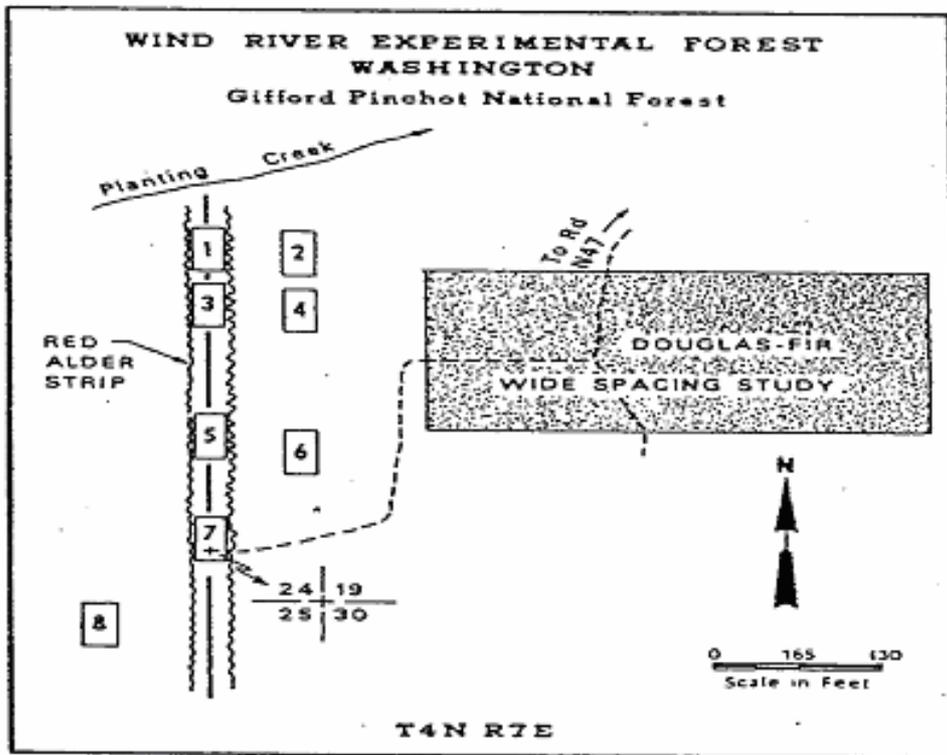


圖 17 美國赤楊和花旗松帶狀之混合人工林



圖 18 5301 試驗地之位置

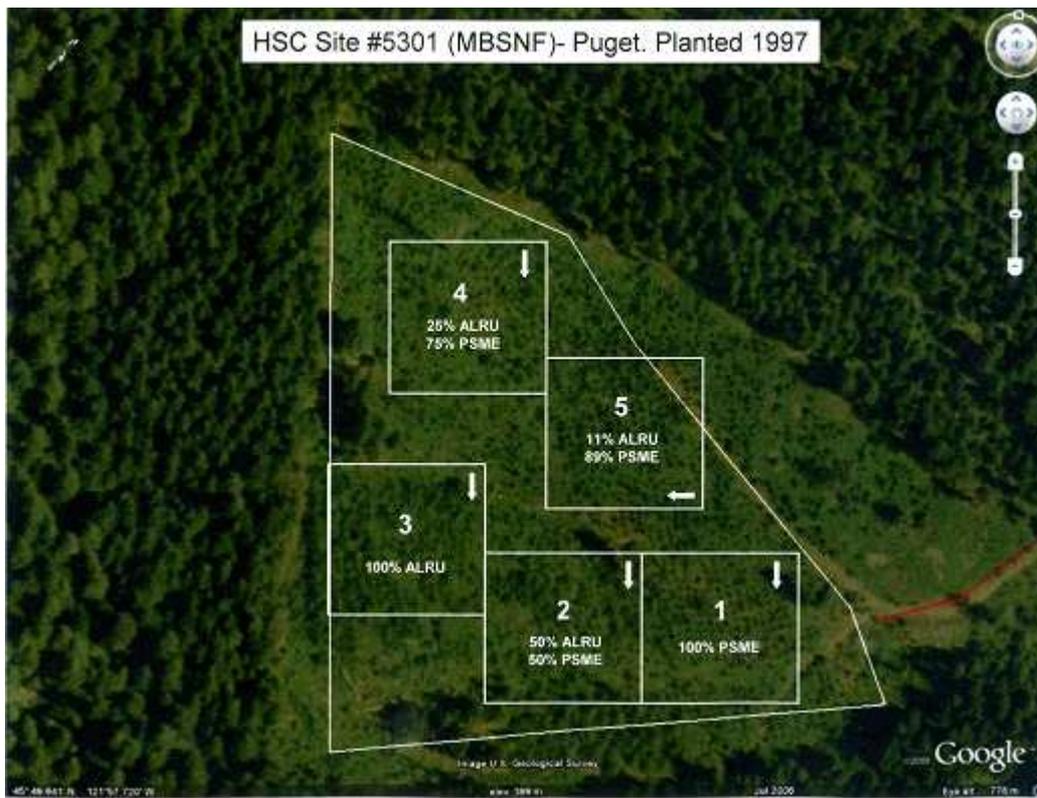


圖 19 美國赤楊和花旗松之不同比例組合之造林地

四、建議事項

1. 加強台灣對森林生長研究和人才之培育

森林生長模式於森林經營決策中提供林分蓄積量的可靠預測，得以使經營者或決策者能夠針對實際情況而調整經營方式，因此是現代化森林經營上不可或缺之經營工具。相對於其他領域之研究，台灣對於森林生長之研究明顯不足。雖然對於一些樹種過去有針對某一林分屬性進行其生長之研究，但對於林分整體各屬性生長間之關係之探討和整合之模擬研究則甚為闕。日後除應加強利用 FVS 或 ORGANON 之觀念和模式建立技術建置臺灣主要造林樹種之生長模擬模式外，對於不同尺度生長模式間之結合問題亦應盡早進行研究。

目前國內從事森林生長研究之人員大多屬資深研究人員，年輕研究人員投入森林生長研究者較少，為期森林生長研究能持續發展，應在大學森林科系加強國內未來有意從事森林生長研究才之人才之培育和訓練。

2. 寬編預算進行林試所永久樣區之設置、維護與調查

森林生長研究所需要之資料有三種來源，樹幹解析、臨時樣區和永久樣區。雖然這三種來源各有優缺點，但因為唯有永久樣區才能提供(1)生長模式進行樣區間和樣區內有效統計上之比較以檢驗模式之有效性確定，(2)對林木枯死、樹冠發育和林分屬性之動態提供可靠和一致之資料，在整體上永久樣區是提供資料之最好來源。然而永久樣區之設置與維護所須之費用也較高。

林業試驗所自從民國 82 年開始在六龜試驗林內陸續就人工林進行永久樣區之設置，大部份之永久樣區是為台灣杉人工林而設，到民國 89 年為止六龜試驗林內設置了 73 個永久樣區。此等永久樣區對於林試所從事林木生長和模式建置之研究擔當者不可或缺之角色。日後隨者研究樹種之增加，永久樣區之數目亦會增多。然而近年來由於經費之減少和人力之短缺使得永久樣區設置、維護和重測之工作越來越難，連帶地減弱或喪失永久樣區提供長期觀測資料之功能。因此建議寬編必要之經費以利現有和日後永久樣區之設置、維護與調查。

3. 加強現有全省林務局所設置永久樣區資料之運用與生長模式之建立

林務局於1997年起於臺灣之國有林班地開始設置永久樣區，以立意取樣法選取調查樣區，依照各事業區設定海拔、林型、樣區數量，調查目標設定後，再由調查人員找尋符合條件之林地設置樣區。永久樣區之規劃方式乃是以每一事業區為單位，以林型圖資料與數值地形資料分析各種特定林相的生長分佈範圍，並在此特定海拔高範圍內設置樣區，再配合各事業區交通路線狀況及地形圖等資料決定永久樣區之相關位置，設置永久樣區，並於每五年複查一次，因天災損毀之樣區，由相同海拔林型新設之樣區遞補。到目前為止，台灣森林永久樣區第一期及二期已累計6,216個樣區。

在如此眾多之樣區資料下，國內有關研究機構和學校已開使使用樣區資料進行永久樣區生長量與枯死量之分析，並依據區域土地利用型之主要樹種組成及海拔高低計算不同天然林林型包含冷杉、雲杉、鐵杉、檜木、松類、闊葉樹及混淆林之5年定期生長量和不同人工林型5年之定期生長量。此等研究雖然對於生長之研究已提供了良好之開始，但還欠缺台灣主要樹種之整體生長收穫模擬體系去模擬林分或單木族群未來消長之動態變化，因此應在永久樣區資料之基礎上加強不同區域主要樹種各自生長收穫模擬體系之建置與運用。

3. 實施森林不同撫育方法之試驗

森林生長模式主要是預測林分未來動態之演變。林分之演變除受自然因素(如風災、火災和病蟲害)影響外，亦取決於林分施業和撫育方法，因此在實務上必需有許多提供森林不同撫育方法之試驗地，進行長期之觀察，並用所得資料進行模式之較正和驗證。雖然目前林業試驗所已在若干地區對台灣杉和柳杉人工林設立不同栽植密度和不同疏伐度之試驗地，但對其他主要樹種之人工林，類似之試驗地則甚欠缺，因此宜加強有關森林不同撫育方法之試驗研究。

五 照片



報告者美國林務署太平洋西北研究站 Portland 總站留影



報告者與太平洋西北研究站 Portland 總站研究員 Dr. Robert Deal 合影



報告者在太平洋西北研究站 Portland 總站研習之研究室



報告者在太平洋西北研究站 Portland 總站進行研究成果之報告



報告者在太平洋西北研究站 Portland 總站進行台灣人工林經營研究之專題演講



報告者參與美國闊葉樹育林合作協會之工作會議



報告者參訪美國闊葉樹育林合作協會試驗地與同行者合影



報告者與太平洋西北研究站西雅圖分站研究員 Dr. Reutebuch 與 Dr. McGaughey 合影



報告者位於太平洋西北研究站奧林匹亞分站前留影



報告者與太平洋西北研究站奧林匹亞分站研究人員合影



報告者與太平洋西北研究站奧林匹亞分站研究人員就研究議題相互交流



太平洋西北研究站奧林匹亞分站研究員 Dr. Harrington 向報告者解釋現場之試驗狀況



太平洋西北研究站奧林匹亞分站研究員 Dr. Harrington 進入試驗地前向報告者解釋現場之狀況



Dr. Harrington 研究員介紹不同疏伐方式與強度



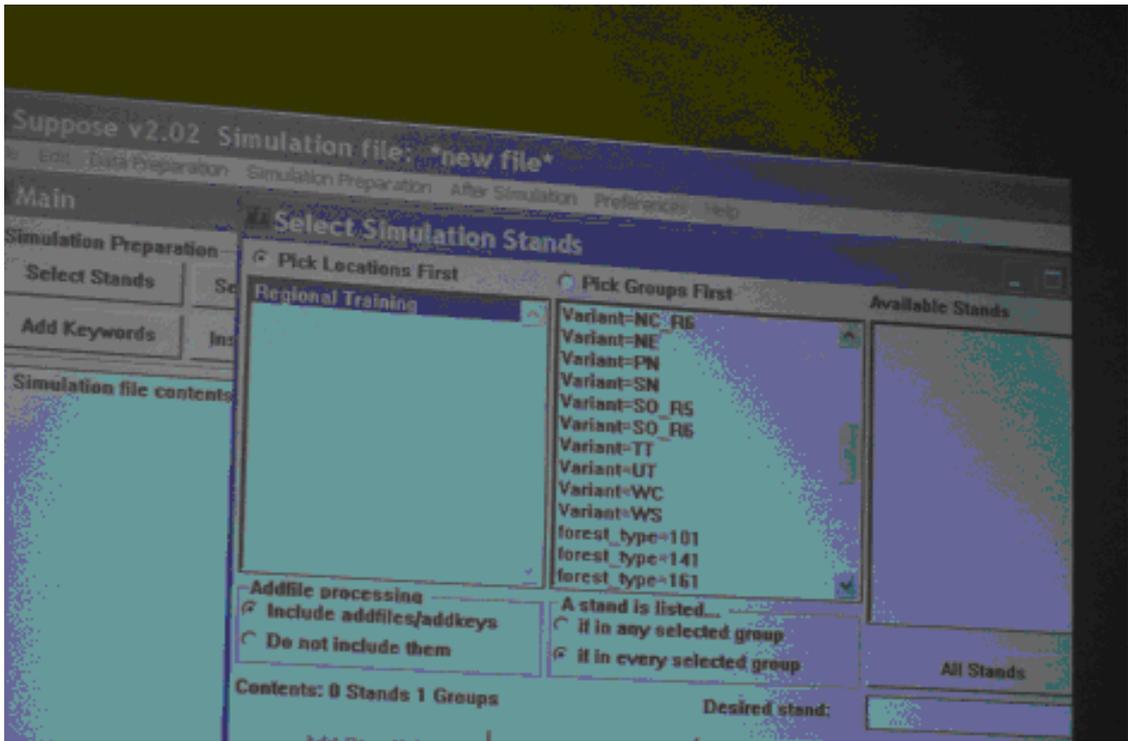
報告者與 FVS Center 主任 Dr. VanDyck 合影



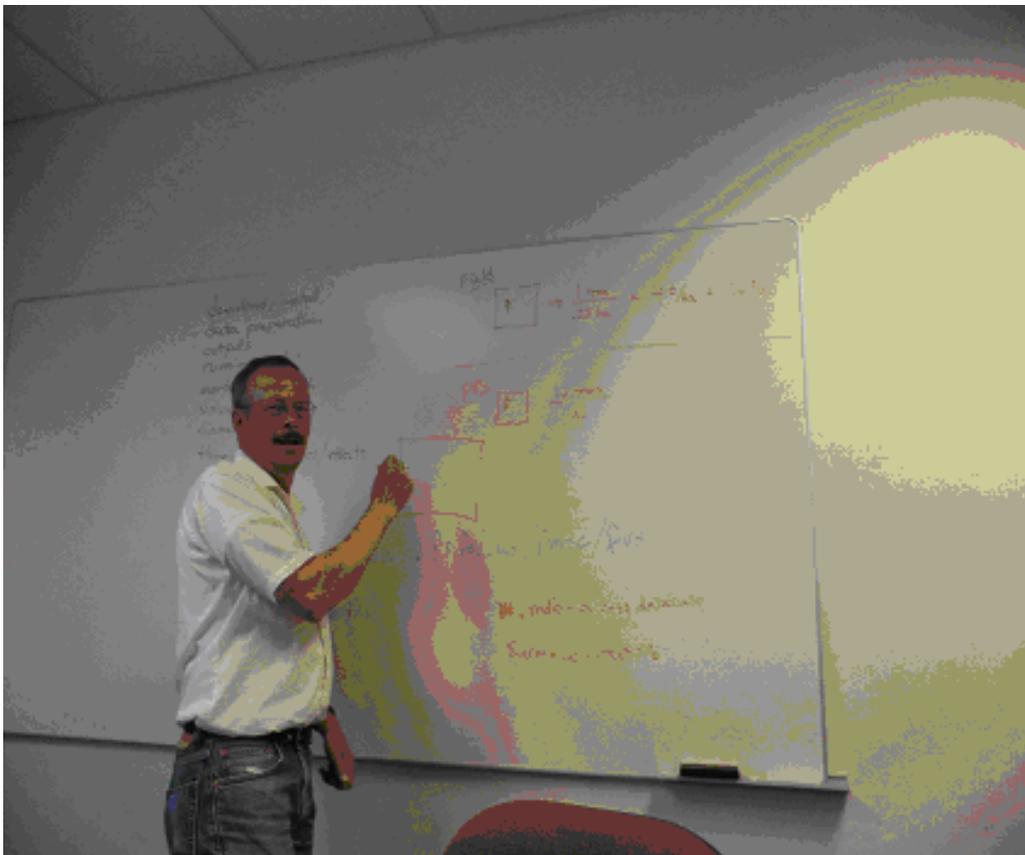
報告者與 FVS Center 研究人員 Dr. David 學習操作 FVS 模擬器



FVS Center 研究人員安排教授 FVS 模擬器課程之分配



FVS Center 研究人員教授使用 FVS 模擬器



FVS Center 研究人員說明使用 FVS 模擬器



與奧立岡州立大學森林系(Oregon State University) Professor David Hann 合影



和太平洋西北研究站 Corvallis 分站研究員 Dr. Stuart 合影



Wind River Experimental Forest 中花旗松和美國赤楊帶狀混合之試驗地



花旗松(左)和赤楊(前右)