摘要

在全球暖化的衝擊下，國際間已逐漸重視人類活動所造成的二氧化碳排放，以及氣候變遷對於生態環境的影響，由於森林資源特有的固碳能力，植林碳匯及森林碳管理為當前林業經營的重要課題,透過例行性森林生長、森林健康以及森林碳匯的監測，不僅能量化分析台灣現有的綠色資源，評估氣候變遷及環境污染對森林環境的衝擊，亦能提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業碳匯移除量的參考資訊，以有效落實政府碳保存、碳吸存、以及碳替代的二氧化碳減量策略。

本計畫以美國地球觀測系統(EOS)系列衛星 Terra 及 Aqua 酬載的中級解析度成像分光輻射度計(MODIS)資料產品作為森林碳吸存、森林生長及森林健康評估的所需資料來源；MODIS 感測器具有 36 個波段頻道，其多光譜、拍攝像幅寬及再訪率高的感測能力，使其相較於其他資源衛星能獲取更多地表植生的動態資訊，並透過美國地球科學事業的資料校正及系統運算，提供植生指標(MOD13 NDVI/EVI)、葉面積指數(MOD15 LAI)、及植生初級生產力(MOD17 GPP/PSNnet)等陸域參數產品，透過此參數產品在時序及空間分佈上的分析，能瞭解台灣當前或歷年的植生綠度及其變遷情形，提供林業管理及植林碳匯所需的參考依據。

衛載遙測由於具有穩定的軌道週期，能提供穩定規律的地表觀測資訊，透過時序性的資料分析，不僅能掌握地表參數的空間性差異，亦能瞭解時序性的變遷，本計畫蒐集處理 2003 年 10 月至 2011 年 9 月 MODIS 初級生產力資料，完成台灣本島、各氣候區、植群帶、林區、以及特定人工林的森林碳匯評估，並藉由時序性的資料分析，瞭解總初級生產力、淨初級生產力的季節性變化,探討影響森林碳匯功能的可能因素；經由分析顯示，台灣全島平均每年每公頃區域能吸存約 6.34~13.08 公噸的碳量(以平均值±1 標準差估算)，如以國有林區範圍進行分析，著重於森林生態系的碳吸存，則每公頃能吸存 7.74~13.36 公噸碳量；而在在台灣本島所屬的七個地理氣候區中，國有林區內的森林碳吸存大抵呈現由南向北逐漸遞減的趨勢，最南側的 SE 區由於充足的日照，以及相較於西部區域較不明顯的乾季，且以中低海拔的榕楠林及楠儲林帶為主要林相，呈現出最高的淨初級生產力，平均每年每公頃區域能吸存 11.27~17.83 公噸的碳量，而位處最北側的 NE 區，恆濕型的氣候型態及雲層雲霧覆蓋，造成較低的光合

作用有效輻射及植生生產力，平均吸存約 6.92~11.14 公噸的碳量；如以台灣的主要植群進行區分，常綠闊葉林呈現最高的碳吸存能力，且隨著海拔升高，林相由榕楠林、楠櫧林、櫟林，轉變為以鐵杉、雲杉、冷杉為主的高山植群，固碳能力呈現逐漸遞減的趨勢；以季節而言，總初級生產力約在夏至時達到高峰，但此時較高的生物量亦造成較高的呼吸成本，淨光合作用在 3-4 月份即已達到高峰，並反應在植生的迅速生長。

在地面驗證資料上，本計畫分析霞雲、巴陵、東石、嘉義氣象站二氧化碳的時序性變遷，並進行通量資料律定及淨生態系統生產力、總初級生產力的推演，完成遙測成果的初步驗證，經由霞雲測站的資料顯示，遙測雖與通量觀測的總初級生產力在時間趨勢上呈現吻合(R=0.79)，但卻有明顯的高估情形(GPP 高估 30.02%, NPP 高估 18.93%)，可能與光合作用有效輻射分量的高估，或其假定中恆定的光能利用效率有關；本計畫另蒐集彙整歷次永久樣區調查資料，分析各地理氣候區及植群帶的碳蓄積變化量、碳吸存量，以與遙測成果進行比較。

由於近年日益嚴重的氣候變遷及空氣污染等環境問題，森林生態系所扮演的減碳功能及對外來壓力的容受能力等森林健康議題，亦逐漸受到各界重視，本計畫透過 MODIS 十年期的植生指標資料分析，建立植生指數參考基準，並透過即期與基期影像的分析，建立植生異常指標，以時序資料探討森林健康與異常情形，並以案例分析方式，探討阿里山火災(2009)、丹大火災(2004)、梨山火災(2009)、中西部山區植生乾旱(2002)、西北部乾旱(2003)、與八八風災後的西南部地表崩塌(2009)等事件所造成的植生異常事件，評估 MODIS 植生指標在森林健康的應用效能。

森林生長之估算與預測，為森林經營最重要的資訊，本研究藉由 2009 年 10 月至 2011 年 9 月各月份 MODIS 葉面積指數產品的處理分析，瞭解各植群型態及特定人工林的森林樹冠生長及葉面積變化情形，並在嘉義蘭潭及台中大雪山山區建立葉面積指數地面測區，進行闊葉、針闊混合林、針葉林、及初植造林地的每月實測，建立遙測與地面資料的分析比對程序，初期的比對成果顯示遙測與地面觀測的葉面積指數相符合，但仍需較多的比對案例以提高在統計上的顯著性。

ABSTRACT

Photosynthesis is the process that converts carbon dioxide (CO_2) into organic compounds by using the energy from sunlight. It has played an important role for the reduction of greenhouse gases in the atmosphere. Since Industrial revolution at the end of the 18^{th} century, the emission of anthropogenic CO_2 has dramatically increased among the greenhouse gases, mostly as a result of combustion of fossil fuels and landuse changes. With the potential threat of global climate change, it is important to quantify the ability of forest ecosystem as the terrestrial source for carbon sequestration.

Moderate Resolution Image Spectroradiometer (MODIS) is the principal observation sensor on-board NASA's Terra and Aqua satellites. With its unprecedented coverage and observation frequency, the space-based terrestrial state measurements provide new opportunities for scientific advances in global and regional mapping of primary productivity, vegetation index, and leaf area index (LAI) at the land-atmosphere boundary. The routine observation also provides a consistent and standardized data source for the forest-related research, such as carbon sequestration, forest health monitoring, and evaluation of forest growth, which is also essential for the administration to consolidate its forest policy on sustainable management and afforestation/reforestation.

This study has acquired MODIS level-4 GPP/PSNnet (MOD17) as the standard data product for estimation of carbon flux among forest ecosystems. The results were further quantified with various terrain features, such as vegetation species, plantation areas, and climatological districts, so as to identify the spatial and temporal trends for different terrain features. The results indicated that Taiwan's national forest could sequestrate on average 7.74~13.06 tC/ha/yr of carbon based on 6-year statistics. The South-East climatological district presents higher uptake capability due to stronger radiation intensity and its primary forest form, which is mainly covered by Fucus-Machilus and Machulus-Castanopsis zones. Conversely, with lower radiation intensity and more cloud cover annually, a lower sequestration rate is demonstrated for the North-East district.

Among different biomes, the study indicated that EBF presents the highest GPP/PSNnet, followed by MF and ENF, and croplands have the lowest primary productivity instead. However, this may also be the cause of local heterogeneity and mixed pixel properties given by MODIS' moderate spatial resolution as 1 km. Meanwhile, Seasonal cycle indicates GPP peaks around summer solstice, marked by the potential highest absorbed PAR. However, this is about a 3 months lag following the highest PSNnet in the mid-March during early growing season. The main reason for this temporal mismatch is the respiration cost induced by primary producers. When in the mid-growing season, higher IPAR is intercepted by flushed leaf areas, but also higher respiration cost is impinged on the plant growth, especially for the perennial species.

To validate MODIS primary productivity results, the study were further compared with CO_2 flux measurements with support from Taiwan Typhoon and Flood Research Institute. The comparison indicated that MODIS GPP were closely related in the temporal trend with tower-based measurements, with correlation coefficient of 0.79 for Shiayun station.However, MODIS products tends to overestimate GPP during the growing seasons(overestimate GPP by 30.02%, and NPP by 18.93%). This may result from overestimate of FPAR or its assumption of constant maximum radiation use efficiency.

Forest health is a critical issue for plantation planning and disease control. MODIS-based normalized difference vegetation index (NDVI) has been used to evaluate the spectral preperties of upper forest canopy in response to natural or anthropogenic disturbances, so as to provide routined observations of forest health. Based on the 10-year dataset, vegetation anomaly index (VAI) has been established and was used to assess the variation of forest vigor and provide a consistent data source for monitoring of forest health. With time-series analysis of VAI, we identified regions with abnormal spectral response, including land use changes and several major vegetation anomaly cases in Taiwan, with identified events such as drought spells in 2002 and 2003, landslides following typhoon Morakot in 2009, and burn scars devastated by Alishan wildfire in 2009, Danda wildfire in 2004, and Lishan fire in 2009.

Leaf Area Index is the projected, one-sided leaf area per unit ground surface. It is an important biophysical parameter to quantify the photosynthesis, radiation and water interception, and transpiration process within the upper canopy. This study used time-series LAI products (MOD15) as the primary indicator for evaluation of forest growth and its seasonal and annual cycle. For the national forest, we found out that a higher LAI was presented for the broadleaf forest. As elevation goes up, and coniferous forest and alpine pasture have become the dominant landscape, LAI drops down accordingly. Meanwhile, to validate MODIS LAI product, the study has conducted monthly LAI field surveys, with study sites covering both broadleaf forest and needleleaf forest. The preliminarily comparisons indicated that results from remote-sensed and ground based approach were related. However, more validation cases are still needed to consolidate this statement.

目錄

摘要…i
ABSTRACT iii
目錄…vii
圖目錄 xi
表目錄 xv
一、計畫目標 1
二、去年度(99 年)計畫完成項目 1
三、本年度工作項目與期末成果概述 2
四、執行進度成果 4
1 森林碳吸存估算 4
1.1 森林碳吸存研究的重要性與研究方法 4
1.1.1 二氧化碳增量與森林碳匯 4
1.1.2 森林碳匯研究方法 6
1.1.3 國家層級的森林碳匯研究及遙測應用 9
1.2 MOD17 產品介紹及資料分析流程 12
1.3 植生初級生產力資料成果及 MODIS 資料應用考量 13
1.3.1 植生初級生產力資料分析 13
1.3.1.1 2003/10-2011/9 台灣全島、氣候分區、植群帶逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化 13
1.3.1.2 2003-2004 年各林區碳匯差異 20
1.3.1.3 全台、國有林區、各地理氣候區、地理氣候區內各植群帶碳吸存量 21
1.3.1.4 均質樣區 GPP 分析-氣候分區與植群帶 24
1.3.1.5 人工林樣區 GPP 分析 26
1.3.1.6 乾旱事件對森林碳匯的影響 28
1.3.1.7 不同植群型態初級生產力及自營性呼吸的探討 29
1.3.1.8 通量測站點位 MODIS GPP 30

1.3.2 MODIS GPP/PSNnet 應用考量 31
1.4 通量塔台觀測與遙測資料比對 32
1.4.1 通量觀測資料收集與塔臺選址考量 33
1.4.2 渦流協變系統二氧化碳觀測成果 35
1.4.3 淨生態系統生產力分析 38
1.4.4 遙測與通量資料成果比較 43
1.5 地面實測資料收集與分析 46
1.5.1 樣區蓄積量測成果 46
1.5.2 大雪山樣區碳蓄積量推估 48
1.5.3 永久樣區蓄積量及蓄積量變化 48
1.5.4 永久樣區碳吸存量 50
2 森林生長分析 53
2.1 森林生長估測與葉面積指數 53
2.1.1 森林生長估測 53
2.1.2 葉面積指數估算方式 54
2.2 MODIS 葉面積指數演算 54
2.3 遙測資料成果 56
2.3.1 各植群帶葉面積指數變化 56
2.3.2 均質樣區葉面積指數分析- 植群帶與氣候分區 57
2.3.3 人工林樣區葉面積指數分析 59
2.4 葉面積指數實地量測 60
2.4.1 植冠分析儀量測方式 60
2.4.2 實地葉面積指數量測規劃 61
2.4.3 LAI 實測成果 63
2.4.3.1 嘉義蘭潭及大雪山葉面積指數實測成果 63
2.4.3.2 不同植群葉面積指數差異 66
2.4.3.3 光照環境對 LAI 實測的影響 67
2.4.4 遙測與實測 LAI 比對 68

2.4.4.1 高解析衛星影像的應用 69
2.4.4.2 LAI 系統性取樣 70
3 森林健康研究 71
3.1 森林健康監測及遙測應用 71
3.1.1 森林健康及森林健康監測 71
3.1.2 以遙測技術應用於森林健康研究 72
3.2 以光學遙測進行森林健康監測 73
3.2.1 以 MODIS NDVI 進行森林健康監測的研究考量 73
3.2.2 常態化差異植生指標及植生異常指標分析 75
3.3 植生異常案例探討 76
3.3.1 2009 年南部山區植生異常-88 風災 76
3.3.2 2002 年中西部山區植生異常 77
3.3.3 2003-2004 西北部區域乾旱 80
3.3.4 阿里山森林火災 81
3.3.5 丹大山區森林火災 86
3.3.6 梨山火災 87
3.4 NDVI 資料比對與森林健康監測評估 88
3.4.1 Terra MODIS 與 SPOT HRV NDVI 資料比對 88
3.4.2 森林健康監測評估 90
五、結論與建議 92
5.1 結論 92
5.2 建議 94
六、參考文獻 97
附錄 A、逐月 MODIS 影像成果 1023
附錄 B、碳吸存推估及植生異常指標分析理論 116
B.1 遙測碳吸存研究方法 116
B.1.1 研究理論基礎-以植生吸收輻射推估植生生產量 116
B.1.2 MODIS 總初級生產力演算式 118

B.1.3 MODIS 淨光合作用量演算式.....121
B.2 渦流協變性系統觀測原理及森林碳收支.....122
B.3 植生異常指標分析.....126
附錄 C、嘉義及大雪山外業調查成果匯整.....128
C.1 蘭潭水庫集水區保安林地（嘉義大學蘭潭校區後山）.....128
C.2 東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地.....142
附錄 D、審查會議及工作會議辦理情形.....152
D.1 期初審查會議辦理情形.....152
D.2 六月份工作會議辦理情形.....156
D.3 期中審查會議辦理情形.....158
D.4 九月份工作會議辦理情形.....161
D.5 期末審查會議辦理情形.....163
附錄 E、教育訓練辦理.....168

圖目錄

圖 1 二氧化碳通量塔站分佈 8
圖 2 加拿大國家森林碳監測、測計、及報告系統模型架構 9
圖 3 澳洲國家碳計量系統模型架構(資料來源 : NCAS) 10
圖 4 日本森林碳監測系統(FCMS)模型架構 11
圖 5 MODIS 初級生產量產品標準作業流程 13
圖 6 2003/10-2011/9 台灣全島逐月平均 GPP 及 PSNnet 時序變化 14
圖 7 台灣全島各氣候區、植群帶(與國有林區交集)、及林區分布圖 15
圖 8 2003/10-2011/9 氣候分區與國有林區交集逐月 GPP 時序變化 16
圖 9 2003/10-2011/9 氣候分區與國有林區交集逐月 PSNnet 時序變化 17
圖 10 2003/10-2011/9 植群帶與國有林區交集逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化 19
圖 11 2003/10-2011/9 植群帶與國有林區交集逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化 20
圖 12 各林區 2003、2004 年碳吸存 21
圖 13 國有林區內各地理氣候區植群帶分佈及 2001-2006 年平均淨初級生產力 22
圖 14 國有林區內各地理氣候區年度碳吸存量(遙測估算成果) 22
圖 15 各植群帶地理氣候區碳吸存量(遙測估算成果) 23
圖 16 各地理氣候區植群帶碳吸存量(遙測估算成果) 24
圖 17 均質樣區(龍崎、三地門、福山、南澳、尖石、棲蘭測區)與氣候分區 25
圖 18 樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年 GPP 時序性變化 26
圖 19 柳杉、扁柏紅檜、二葉松人工林樣區分佈 27
圖 20 柳杉、紅檜及扁柏、二葉松人工林 2010 年 GPP 時序變化 27
圖 21 2002 年中西部山區乾旱事件中遙測植生異常指標、總初級生產力的反應 28
圖 22 2010 年闊葉林、針闊混合林、針葉林、農作區 GPP 及 PSNnet 時序性變化 29
圖 23 LAI 與 GPP，以及 LAI 與自營性呼吸的關係 30
圖 24 2010 年總初級生產力時間趨勢圖(通量塔台周圍 5*5km 區域)-棲蘭鴛鴦湖(CL)、屏東平地造林(PD)、北東眼山(HS)、蓮花池(LHC)、溪頭台大實驗林(ST) 31
圖 25 霞雲水文站及巴陵雨量站 2009 年 8 月份二氧化碳濃度日變化 36

圖 26 二氧化碳季節性變化(每日平均值) 37
圖 27 二氧化碳日夜變化 (每小時整點觀測值) 37
圖 28 6/18 嘉義氣象站及東石農場二氧化碳垂直通量、光合作用有效累積輻射 38
圖 29 霞雲、巴陵、嘉義氣象站、東石農場日間淨生態系統生產力 40
圖 30 霞雲測站日累積光合作用有效輻射與淨生態系統生產力關係圖 40
圖 31 霞雲測站日間淨生態系統生產力與蒸發散關係圖 41
圖 32 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力季節性趨勢 41
圖 33 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力關係圖 42
圖 34 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間均溫關係圖 42
圖 35 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間蒸發散關係圖 43
圖 36 塔台測點總初級生產力分析流程 44
圖 37 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 時間變化趨勢 45
圖 38 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 資料比對 45
圖 39 材積式 47
圖 40 植株分佈圖(嘉義蘭潭樣區點位 2) 47
圖 41 樣區環景照(嘉義蘭潭樣區點位 2) 48
圖 42 永久樣區蓄積量及分佈點位 49
圖 43 各地理氣候區永久樣區蓄積量(第一及第二次量測成果) 49
圖 44 各地理氣候區永久樣區碳蓄積變化量(第一及第二次量測成果) 50
圖 45 蓄積量變化與碳吸存量 51
圖 46 各地理氣候區永久樣區碳吸存量(第一及第二次量測成果) 51
圖 47 各地理氣候區與植群帶碳吸存量(第一及第二次永久樣區調查成果) 52
圖 48 MOD15 A2 LAI 產品連結 55
圖 49 Terra/Aqua-MODIS MOD15 A2 產品月平均 LAI 值標準作業流程 56
圖 50 2009/10-2011/9 各植群帶 LAI 時間趨勢圖 57
圖 51 2010 年福山、南澳、尖石、棲蘭樣區葉面積指數時序性變化 58
圖 52 潮州、林內、玉山、南仁山樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年葉面積指數

時序性變化.....59
圖 53 2010 年柳杉、扁柏及紅檜、二葉松人工林葉面積指數時序性變化.....60
圖 54 LAI-2000 植冠分析儀.....61
圖 55 嘉義蘭潭及大雪山測區位置.....62
圖 56 嘉義蘭潭及大雪山測區位置及測點分佈.....63
圖 57 樣區規劃及植冠分析儀觀測範圍示意圖.....63
圖 58 冠層空照圖-嘉義蘭潭樣區樣點 2(左)及大雪山樣區樣點 4(右).....63
圖 59 嘉義蘭潭測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像.....64
圖 60 大雪山測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像.....65
圖 61 實測 LAI 趨勢比較(a)闊葉林與針葉林；(b)南向與西北坡向；(c)人為與未受人為干擾影響；(d)新生林地與 25 年林齡造林地.....66
圖 62 竹林、防風林、針葉林、闊葉林、果園(柑橘、荔枝)、檳榔園葉面積指數實測點位及觀測成果.....67
圖 63 影響植冠分析儀實測數據的測試.....68
圖 64 SPOT5 衛星 NDVI 影像及葉面積指數實測點位.....69
圖 65 SPOT5 衛星影像 NDVI 及實測葉面積指數相關性.....69
圖 66 大雪山測區 LAI 系統性取樣樣點與樣點林型.....70
圖 67 大雪山測區 16 樣點 LAI 量測成果與 MODIS LAI.....70
圖 68 不同植生健康狀態的光譜反射率.....73
圖 69 植生指標及植生異常指標資料處理流程.....76
圖 70 (a)MOD13 原始像元值；(b)Pixel Reliability；(c)經篩選及像元值轉換後 NDVI.....76
圖 71 88 風災所引發的西南部山區植生異常.....77
圖 72 2001-2008 年年度累積雨量.....78
圖 73 2002 年乾旱事件所引發的植生異常.....78
圖 74 單一像元基期 NDVI 及 2002 年 NDVI 的時序性變化.....79
圖 75 NDVI 差異值、植生異常指標、以及 NDWI 差異值.....79
圖 76 植生異常指標、累積降雨、2001 年時序 NDVI 資料標準差.....80

圖 77 2003-2004 年西北部沿海區域植生異常指標 81
圖 78 西北沿海區域土地利用圖及海拔高程 81
圖 79 MODIS 火點偵測(2009/1/9-1/17)-阿里山火災 82
圖 80 阿里山火災災前、災時、及災後 MODIS NDVI 影像 82
圖 81 阿里山火災事件 MODIS NDVI 及 VAI 時序資料 83
圖 82 阿里山火災事件 MODIS 2009 年 NDVI 及基期 NDVI 時序資料 83
圖 83 阿里山火災事件點位 2001-2010 年 MODIS NDVI 時序資料 84
圖 84 阿里山火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI 85
圖 85 阿里山火災區域福衛影像及現地調查照片 85
圖 86 丹大山區火災事件 MODIS NDVI 及 VAI 時序資料 86
圖 87 丹大山區火災事件 2004-2005 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料 86
圖 88 丹大山區火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI 87
圖 89 梨山火災 2009 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料 87
圖 90 梨山火災 SPOT 影像及 SPOT NDVI 88
圖 91 (a)測試區域分佈；(b)森林資源調查(山區)及 SPOT 分類(平地)影像 89
圖 92 (a)2007/1/29、1/30 HRV NDVI 影像(兩航帶影像)；(b)2007/1/29 MODIS NDVI 影像；(c)2007/1/30 MODIS NDVI 影像 89
圖 93 MODIS 與 HRV NDVI 關係圖 90
圖 B-1 MOD17 資料處理流程 (資料來源: MOD17 ATBD) 118
圖 B-2 BPLUT 低溫及蒸氣壓力差對最大光能利用效率之線性衰減 119
圖 B-3 MODIS 總初級生產量及淨初級生產量產品鏈結 121
圖 B-4 MODIS NDVI-時間維度的二維矩陣 126
圖 B-5 MODIS NDVI 雲區移除 127
圖 C-1 10m×10m 樣方規劃 128
圖 C-2 嘉義蘭潭樣區位置及分佈點位 129
圖 C-3 八仙山事業區大雪山樣區位置及分佈點位 143
圖 E-1 教育訓練現場照片 168

表目錄

表 1 各林區 2003、2004 年總碳吸存及平均碳吸存.....21
表 2 地貌型態類別.....32
表 3 二氧化碳通量塔觀測場址勘查.....34
表 4 渦流協變性系統測站位置及分布.....35
表 5 單株材積及樣區材積計算.....47
表 6 大雪山造林地每木碳蓄積演算成果.....48
表 7 嘉義樣區葉面積指數觀測成果.....64
表 8 大雪山樣區葉面積指數觀測成果.....65
表 9 大雪山測區在不同光照環境下的葉面積指數觀測值.....67
表 10 MOD13Q1 植生指標屬性資料.....75
表 11 NDVI 測試區域.....89
表 A-1 2003 年 10 月至 2004 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表.....103
表 A-2 2003 年 10 月至 2004 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表.....104
表 A-3 2004 年 10 月至 2005 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表.....105
表 A-4 2004 年 10 月至 2005 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表.....106
表 A-5 2005 年 10 月至 2006 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表.....107
表 A-6 2005 年 10 月至 2006 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表.....108
表 A-7 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表.....109

表 A-8 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表.....110
表 A-9 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD15 衛星產品各月份 LAI 套色影像表.....111
表 A-10 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 NDVI 套色影像表.....112
表 A-11 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 EVI 套色影像表.....113
表 A-12 2011 年 001 至 257 期植生異常指標套色影像表.....114
表 A-13 2011 年 001 至 257 期植生異常指標套色影像表.....115
表 B-1 植生碳吸存估算相關名詞表.....117
表 B-2 生態群系參數對照表.....119

一、計畫目標

地球表面由大氣層所包圍，就像溫室的透明玻璃，在陽光照射地球時，有防止地面溫度、濕度散失的功能，使地面溫度不會下降太快，地表年均溫因此能保持於 15°C 左右，但近年來溫室氣體的急速增加，使全球氣溫也隨之升高，藉由不穩定同位素 ^{14}C 及 $^{13}C/^{12}C$ 測量資料，顯示人為因素導致的碳排放在大氣成分比例中逐漸增加，原本藉由生態系的循環以及森林將二氧化碳轉換成本身生物量的功能，可減少大氣中二氧化碳的含量，但過度的砍伐林木，加速了生態系的循環失調；因此，森林的育成與保存對於生態系的平衡則顯得相當重要，亦是影響森林碳匯的根本因子，依據 2001 年政府間氣候變遷特別委員會（IPCC）的預估，若無法有效減緩全球溫室氣體的排放，則極端氣候發生會更趨頻繁，若不採取任何防治措施，則於 2100 年時，地表溫度將增加 l℃至 3.5℃，海平面將上升 15 至 95 公分，故京都議定書明定各國的二氧化碳排放總量，需控制降低到 1990 年的排放水準，針對此全球性溫室氣體增加的趨勢，國際間亦投入相當多的森林碳匯及森林健康、生長的觀測研究。

本計畫以三年期時間，藉由遙測與相關輔助資料進行森林碳吸存、森林生長以及森林健康的評估分析：

1. 植生碳吸存估算：藉由蒐集與處理長年期台灣全島遙測碳匯資料，分析各氣候分區、各植群分區及特殊樹種樣區等在時間上的碳吸存量變化；透過通量觀測資料的比對，提供遙測在森林碳匯分析應用的先驅。
2. 森林生長估算：以遙測葉面積指數描述林木樹冠的生長情形，透過此實際物理量的分析及實測資料比對，瞭解森林生長的季節性變化。
3. 森林健康估算：應用遙測資料演算植生指數，進行各資料期間縱向基期及即期間的比較，並藉由時間橫向的趨勢，詮釋森林植生受非常態性干擾後的光譜異常情形。

二、去年度(99 年)計畫完成項目

1. 完成 2006 年 10 月至 2008 年 09 月及 2009 年 10 月至 2010 年 09 月期間，共三年 36 期 Terra/Aqua-MODIS 碳吸存成果，分析台灣全島、各氣候區及各植群類別之

碳匯意義，並以通量觀測資料比對定性趨勢。

2. 完成 2009 年 10 月至 2010 年 09 月期間 Terra/Aqua-MODIS 衛星產品之葉面積指數（LAI）產品推估台灣全島森林各植群生長趨勢。

3. 完成 2009 年 10 月至 2010 年 09 月期間 Terra/Aqua-MODIS 衛星產品之最大常態化植生差異指標（Max NDVI）與增進植生指標（EVI）推估台灣全島森林健康趨勢。

三、本年度工作項目與期末成果概述

依據三年度計畫規劃與去年研究成果，本年度(100 年度)工作項目為:

1. 蒐集 2003 年 10 月至 2006 年 9 月，共三年 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品，分析及比較台灣本島上各氣候區及各植群類別之碳匯意義。

2. 蒐集 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品，分析及比較台灣本島、各氣候區、各植群類別與特殊樹種樣區之碳匯意義，並藉由實測資料的比對，瞭解衛星遙測在森林碳匯的應用效能。

3. 蒐集 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 植生指數產品(NDVI 及 EVI)，分析國有林基期、即期的植生差異指標。

4. 蒐集 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua-MODIS MOD15 衛星產品，分析各月份國有林內各植群分區的樹冠葉面積指數及其時間趨勢，並進行實測資料的蒐集及遙測資料比對。

依循工作項目規劃，以下簡述森林碳吸存、生長分析及健康評估的執行成果:

1. 植生碳吸存估算：蒐集處理 2003 年 10 月至 2006 年 9 月、以及 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua -MODIS MOD17 產品資料，完成台灣本島、各氣候區、植群帶、林區、以及特定人工林的森林碳匯評估，並藉由時序性的資料分析，瞭解總初級生產力、淨初級生產力的季節性變化，探討影響森林碳匯功能的可能因素；在地面驗證資料上，分析霞雲、巴陵、東石、嘉義氣象站二氧化碳的時序性變遷，並進行通量資料律定及淨生態系統生產力、總初級生產力的推演，完成遙測成果的初步驗證；並透過永久樣區資料的蒐集彙整，分析歷次調查成果在地理氣候區及植群帶的碳蓄積變化量及碳吸存量。

2. 森林生長估算:藉由 2010 年 10 月至 2011 年 9 月各月份 Terra/Aqua-MODIS MOD15 葉面積指數產品的處理分析，瞭解各植群型態及特定人工林的森林樹冠生長及葉面積變化情形，並在嘉義蘭潭及台中大雪山山區建立葉面積指數地面測區，進行闊葉、針闊混合林、針葉林、及初植造林地的每月實測，建立遙測與地面資料的分析比對程序。

3. 森林健康評估：透過 Terra/Aqua-MODIS MOD13 產品十年期的植生指標分析，建立植生指數參考基準，並藉此與歷年植生資料比較，探討森林健康與異常情形，並以案例分析方式，探討森林火災、植生乾旱、地表崩塌等事件所造成的植生異常事件，評估 MODIS 植生指標在森林健康的應用效能。

四、執行進度成果

在全球暖化的衝擊下，國際間已逐漸重視人類活動所造成的二氧化碳排放，以及氣候變遷對於生態環境的影響，由於森林資源特有的固碳能力，植林碳匯及森林碳管理為當前林業經營的重要課題,透過例行性森林生長、森林健康以及森林碳匯的監測，不僅能量化分析台灣現有的綠色資源，評估氣候變遷及環境污染對森林環境的衝擊，亦能提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業碳匯移除量的參考資訊，以有效落實政府碳保存、碳吸存、以及碳替代的二氧化碳減量策略。

本計畫以美國地球觀測系統(EOS)系列衛星 Terra 及 Aqua 酬載的中級解析度成像分光輻射度計(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)資料產品作為森林碳吸存、森林生長及森林健康評估的所需資料來源；MODIS 感測器具有 36 個波段頻道，涵蓋可見光、近紅外、中紅光及熱紅外光，其多光譜、拍攝像幅寬及再訪率高的感測能力，使其相較於其他資源衛星能獲取更多地表植生的動態資訊，並透過美國地球科學事業(Earth Science Enterprise, ESE)的資料校正及系統運算，提供地表覆蓋、植生指標、地表溫度及熱異常、葉面積指數、光合作用有效輻射分量及植生初級生產力等陸域參數產品，作為科學界後續應用的分析依據以及常態性森林生態觀測的資料來源；本計畫主要利用 MODIS 陸域產品(MOD17 GPP/PSNnet、MOD15 LAI/FPAR、MOD13 NDVI/EVI)的時序性資料分析，瞭解當前或歷年的植生綠度及其變遷情形，以提供林業管理及植林碳匯所需的參考依據；以下分別針對 MODIS 遙測產品在森林碳吸存、森林生長及森林健康評估的研究應用進行說明。

1 森林碳吸存估算

1.1 森林碳吸存研究的重要性與研究方法

1.1.1 二氧化碳增量與森林碳匯

全球氣候變遷與溫室效應之間存在著緊密關係。二氧化碳(CO_2)、水蒸氣(H_2O)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O)、臭氧(O_3)、氫氟氯碳化物(CFCs,HFCs,HCFCs)等溫室效應氣體將地表散發的熱能吸收，使大氣溫度保持於適合生物生長，但近年溫室氣體的急速增加，使全球氣溫也隨之升高，加速冰河消退以及海平面的上升，根據政府間氣候

變遷特別委員會(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)第三次評估報告(IPCC, 2003)，認定過去 50 年來全球暖化現象由人類活動所引起，若無法有效減緩全球溫室效應氣體的排放，預估 2100 年二氧化碳濃度將增加至 540-970ppm，全球地表溫度到相較 1990 年上升 1.4 -5.8 ºC，且北半球高緯度地區溫度上升幅度較大，陸域區域的暖化速率較海洋快。伴隨著全球暖化的結果，全球水文收支亦將受到影響，造成極端氣候發生的頻率增加。

在人為產生之溫室效應氣體當中，二氧化碳增量占最重要部份(Gurevitch *et al.*, 2002)，自 1970-2004 年間，二氧化碳排放增加了 80%。南極冰蕊(Etheridge *et al.*,1998)及 Mauna Loa 的氣體取樣(Keeling and Whorf, 2004)顯示，十八世紀工業革命前，二氧化碳含量保持穩定狀態，直到石化工業興起與土地利用型態變遷，大氣中二氧化碳含量開始顯著增加(Walker *et al.*, 2001)，由工業革命前二氧化碳混合比 275-284ppm(parts per million by volume)至現今約 390ppm，不穩定同位素 ^{14}C 及 $^{13}C/^{12}C$ 測量資料亦顯示人為因素導致之碳排放在大氣碳組成成分中比例逐漸增加(Butcher and Charlson, 1992)，故京都議定書中明定各國的二氧化碳排放總量，需控制降低到 1990 年的排放水準，針對此全球性溫室氣體增加的趨勢，國際間亦投入相當研究進行碳循環及碳存量的監測。

Schimel（2000）應用 BIOME-BGC、Century 及 Terrestrial Ecosystem Model（TEM）三種陸地生態系統模型進行模擬，研究氣候與二氧化碳存量變化對生態系統之影響，研究顯示，1980 至 1993 年間，美國本土每年增加 0.08Gt (gigaton)的碳吸存，且多來自二氧化碳增量；Valentini *et al.*(2000)分析 EuroFlux 1996-1998 年 15 種森林類型的二氧化碳通量，其中 14 種類型呈現淨碳吸收，且淨吸收量與緯度變化呈現線性關係，主要由於北方的暖化速度高於南方，且蘊藏著龐大的土壤有機碳庫，此增加的土壤性呼吸作用造成碳排放的增加及碳吸存的減少；在台灣，環保署委託工業技術研究院辦理台灣地區溫室氣體排放量統計，依據 1996 年 IPCC 國家溫室氣體清冊規範，估算各部門(能源、工業製程、農業、土地利用改變與林業、廢棄物) 1990-2008 年度溫室氣體排放，其中 2008 年總溫室氣體排放量為 306,283.74 千公噸 CO_2 當量，扣除林業碳匯與土地利用改變的 19807.33 千公噸 CO_2 當量(6.47%)，淨溫室氣體排放量為 286,476.41 千公噸 CO_2

當量，為 1990 年(132,988.19 千公噸 CO2 當量)的 2.15 倍，顯示台灣地區的溫室氣體排放雖已呈現趨緩，但仍在逐年上升中，與國際間對溫室氣體減量的預期成效仍有落差；由於森林具有將二氧化碳轉換成本身生物量的功能，可減少大氣中二氧化碳的含量，為陸域生態系統中最大的碳庫，故森林的碳吸存及減碳功能逐漸受到各界重視。聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)正式將造林與再造林活動(Afforestation and Reforestation)納入京都議定書中的清潔發展機制(Clean Development Mechanism)項目中，明定各公約國的碳排放交易權，以及森林對二氧化碳的吸存與排放淨值(邱祈榮等，2010)，在台灣地區，二氧化碳佔總溫室氣體排放量的 91.49%(2008 年)，藉由林業活動參與溫室氣體減量，妥善利用台灣地區 58.53%的森林覆蓋資源，強化造林政策以降低大氣中的二氧化碳濃度，已成為未來永續發展的重要課題，期能藉此達到持續經濟發展與溫室氣體減量的雙贏目標。

1.1.2 森林碳匯研究方法

在植生碳吸存的研究上，可藉由實地生物量的取樣、通量塔台觀測、模型推估以及遙測技術等多種方法進行估測，在研究尺度及應用層面上皆存有差異。其中實地取樣係依據生態植群的不同，藉由光學量測、樹徑測量、相對生長分析(allometry)，落葉收集及農作物收割等方式以分別量測或估算地上(aboveground)及地下(belowground)部份的淨初級生產力(ANPP、BNPP)，此方式提供生態系統最直接之碳吸存量測量，但相對人力及時間成本較高，地下植物根莖主要藉由相對生長式，透過迴歸分析式進行生物量推估，缺乏實測數據(Reich *et al.*, 1999)，且由於缺乏生態系統自營性及異營性呼吸量測，所能量測主要為淨初級生產力。

台灣地區有相當豐富的森林資源，依據林務局第三次森林資源及土地利用調查(林務局，1995)，台灣森林的蓄積量達 358.7 百萬立方公尺，森林覆蓋面積 2,102,400 公頃，不少專家學者針對台灣森林的碳匯功能進行調查，藉由森林資源調查所建立的林木蓄積資料庫或衛星影像分析林地覆蓋面積，推估台灣森林每年可吸存約 4.08-6.90 百萬公噸碳量，相當約 14.96-25.30 百萬公噸的二氧化碳(王立志，1996；楊榮啟等，1998；林裕仁等，2002；王義仲，2003；邱祈榮等，2006；林俊成，2007)，由於各研究所估算的碳吸存年代不同，引用的生長率資料不一(第二次、第三次森林資源調查或林務局[台

灣地區林木資源之生長及枯死]調查資料)，估算模式也有差異，造成生物量推估成果的落差，但皆證明了森林資源對二氧化碳減量的貢獻。

通量監測塔站應用氣旋共變異法(eddy-covariance method)進行測量，計算二氧化碳、水氣及微量氣體之流通量為風速之共變異數，藉由微氣象觀測站台，生態系統總初級生產力(GPP)、自營及異營性呼吸(Ra+Rh)及淨生態系統碳交換(NEE)可據以估計，提供場地尺度近連續性之觀測(Curtis *et al.*, 2002)。理論上，為避免過多對流產生及造成通量之不連續性，塔站週遭需為大範圍的平坦地形，並由均質的植被層所覆蓋。其觀測範圍則受風速、大氣穩定性以及塔台高度等綜合影響，一般約介於 100~1000m 之間(Baldocchi *et al.*, 1996)。故氣旋共變異法適合應用於平坦地形之碳通量觀測，在具有地形起伏及豐沛對流之山區地形，其應用則較不適當；而 Fluxnet 為一全球性之通量監測網，由通量監測塔站(flux tower)所組成，作為觀測大氣及陸域生態系間二氧化碳、水氣及微量氣體之交換及動態情形，其主要任務為針對全球主要陸域生態系進行長期之通量監測，並建構一標準資料平台以利資料流通及相互比對分析，目前全球有多個區域性通量監測網路，如 AmeriFlux、AsiaFlux、CarboEurope、OzFlux (Australia、New Zealand)(Fluxnet, 2003)。在台灣地區，目前亦有數個塔站進行森林環境二氧化碳的通量觀測，包含位於長期生態研究試驗地的棲蘭鴛鴦湖(2005 年 4 月開始觀測，具有雙塔站)、惠蓀林場北東眼山(2007 年 10 月開始觀測)、南投蓮花池(2009 年開始 CO_2 觀測)、屏東潮州平地造林地(2008 年開始觀測)(王亞男，2009)、溪頭台大實驗林(2007 年設站)，以及藉由移動式塔站針對不同生態環境所進行的短期通量研究，提供林分尺度近連續性的二氧化碳觀測(圖 1)。

圖 1 二氧化碳通量塔站分佈

相較於實地取樣及通量塔台觀測，遙測技術能以較經濟的方式，在短時間內提供大範圍尺度的地表觀測資訊，彌補單點量測在空間上的不連續性；在碳吸存及碳存量的研究上，大致可區分為林分的蓄積量推估，以及藉由植生對光譜能量的吸收情形，評估碳吸存及排放量等兩種推估方式；光達(LIDAR)由於具有穿透林分與多重回波的特性，透過準確的三維空間定位能力，能獲取地形、樹高、孔隙等森林測計因子，故可應用於森林材積及蓄積量的推估，提供林業單位經營管理的依據；碳吸存的另一研究方法則藉由探討綠色植生的光合作用，評估實際吸收輻射量(APAR)及總初級生產量(GPP)的相互關係，進而推估碳吸存速率，由於各植生種類的吸存排放比率及生長限制因素各異，在實際應用上常需結合廣泛研究的生態參數，以進行適時適地的推估。

模型估測提供另一途徑估算初級生產力及碳存量，生態系統模型乃模擬生態系統中能量、養分及微量元素的循環過程，藉由提供生態系空間區位、生化、及氣象因子等數據條件，即可推估生態系統產出。由於生態過程複雜且交互影響，模型推估的準確性取決於模型設計是否針對不同尺度考量其生態機制及約制因素(Churkina *et al.*, 2003)，故一完整模型建立需要廣泛之基礎實驗研究作為參考依據；而模型推估之優勢在於能彌補實地量測在時間及空間尺度上的不連續性(Turner *et al.*, 2005)，通量塔台觀測及現地調查雖提供場地尺度碳通量數據，可與遙測資料推估值進行驗證，但侷限於小區域內單點或多點之測量，且實地取樣在時間尺度上常呈現不連續性。相對地，衛星遙測方式提供廣泛空間範圍尺度的瞬時觀測，兩者在時間及空間尺度上存在落差，

實證模型能提供連續性的推估資料，彌補實測與遙測推估資料尺度的不對稱性，提供遙測資料一有效驗證途徑，且可對生態系統未來的生態過程及狀態進行預估。

1.1.3 國家層級的森林碳匯研究及遙測應用-以加拿大、澳洲、及日本為例

為有效減緩全球暖化，回應聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)中公約締約國對削減溫室氣體排放的承諾，加拿大政府設立國家森林碳監測、測計及報告系統(National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System, NFCMARS)(圖 2)，整合來自森林資源調查(forest inventories)、臨時性及永久樣區、森林火災與病蟲害及森林生長計量系統等相關資訊，目的為估測及監測森林碳匯、碳匯變遷及非二氧化碳的溫室氣體排放，並藉由對未來森林擾動及管理措施方案的評估，預測碳匯在未來 20 至 30 年的改變；系統主要組成則包含碳收支模型(Carbon Budget Model-Canadian Forest Sector, CBM-CFS)、土地利用改變監測(Tracking Land-Use Change)、森林管理與干擾監測(Forest Management and Disturbance Monitoring)、森林資源、生態資源空間資訊管理架構(Spatial Framework)及其他非常態性計畫(NFCMARS, 2009)。

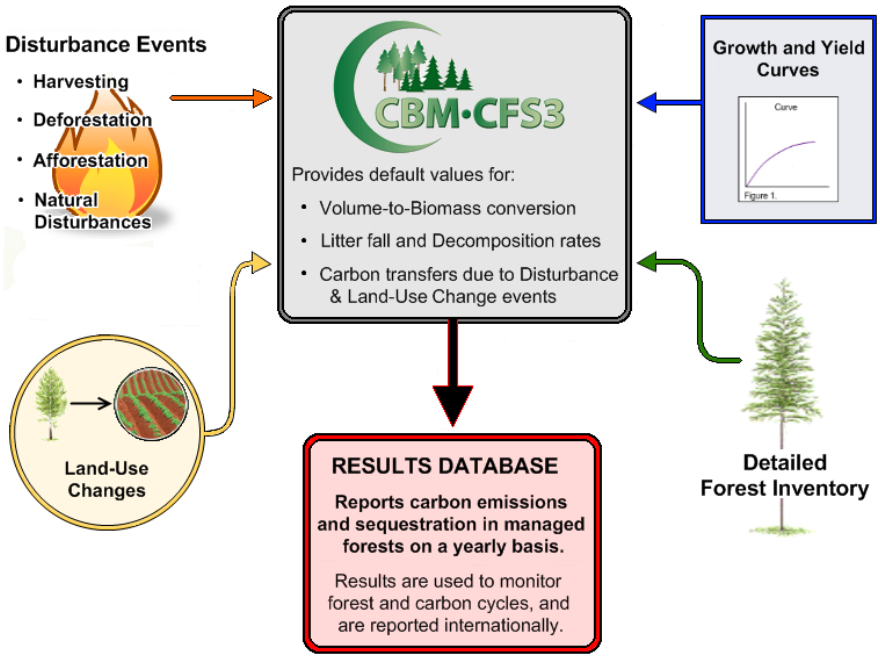


圖 2 加拿大國家森林碳監測、測計、及報告系統模型架構(資料來源 : NFCMARS)

遙測在此系統的應用仍屬先導型研究(pilot study)階段，主要目的為輔助提供碳收支模型(CBM-CFS)所需資訊，透過當前及歷史遙測影像的分析，能提供包含地表覆蓋、過往自然性擾動(火災及病蟲害)、土地管理及混農林業經營措施、土地利用改變(植林、

再造林、毀林)等空間資訊；此先導型計畫目前在 Prince George (BritishColumbia)執行，主要目的為藉由整合遙測研究及碳收支模型，將 CBM-CFS 由單點式的模擬推估進展為分散式的空間碳匯資訊提供，以有效提升 CBM-CFS 在多樣環境及不同空間尺度下的應用效能。

澳洲政府於 1998 年設立國家碳計量系統(National Carbon Accounting System, NCAS)(圖 3)，主要針對人為土地利用引發的溫室氣體(二氧化碳、甲烷、氧化亞氮)排放移除進行估測及預測，由於森林與農作的生長週期、氣象、土壤、土地覆蓋變遷，以及土地經營方式皆為準確測計的重要因素，此系統透過自 1972 年以來的數千幅衛星影像分析土地利用型態及土地利用改變，彙整分析氣象(每月降雨、溫度、濕度)、土壤(土壤類型及土壤碳匯)、植生物種分布、土地經營模式等空間資訊，結合生態系統模型 Full Carbon Accounting Model(FullCAM)的運用，以建立及提供聯合國氣候變化綱要公約(UNFCCC)及京都協定下所需的國家溫室氣體排放清冊，並對未來的排放趨勢進行預測；為有效推廣此計量系統，NCAS 發展提供 National Carbon Accounting Toolbox (NCAT)，以利於使用者針對特定地區的溫室氣體排放及移除進行分析追蹤(NCAS, 2010)。

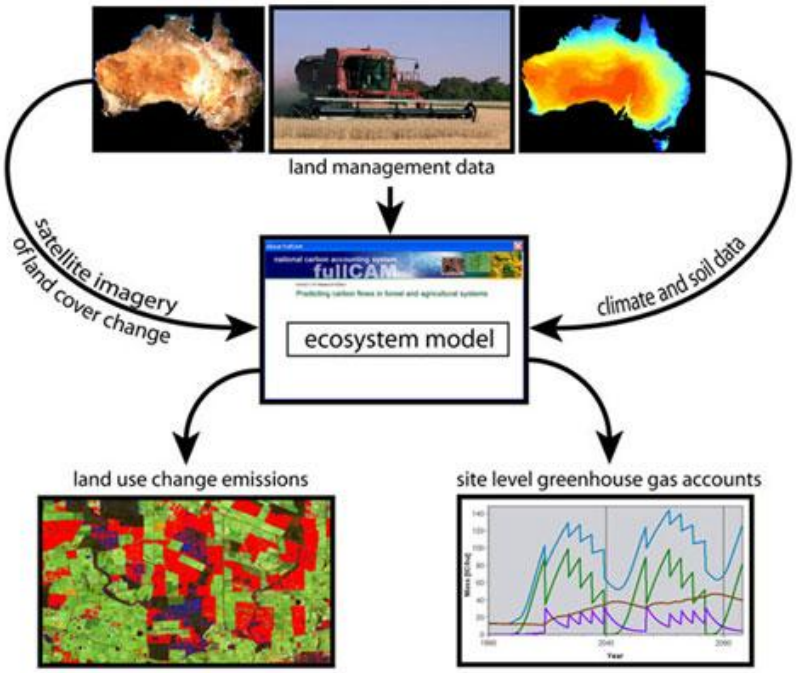


圖 3 澳洲國家碳計量系統模型架構(資料來源 : NCAS)

在澳洲 NCAS 的模型概念下，FullCAM 為其架構核心，藉由整合國家資源下多重觀測平台的空間資訊，提供生態系統模型所需的輸入參數，並作為後續科學驗證的基礎；而遙測在此系統下所扮演的角色，則主要透過長期 Landsat 衛星影像分析，提供涵蓋國家範圍 25m 空間解析力的地表覆蓋資訊，並對土地利用變遷進行長期監測。

日本於 2002 及 2005 年分別制定「地球暖化對策推進大綱」及「京都議定書目標達成計畫」，明確設定森林碳吸存對溫室氣體減量需達成的目標，並由國立環境研究所(National Institute for Environmental Studies, NIES)推行森林碳監測系統(The Forest Carbon Monitoring System, FCMS)(圖 4)，藉由 ALOS 衛星影像及 Plot Network database 森林資源清查數據，配合生態系統模型 Vegetation Integrative SImulator for Trace gases(VISIT)的應用，分析森林結構參數，提供國際碳監測系統所需的碳匯資訊；VISIT 則為一生物地球化學碳循環模型，以 Sim-CYCLE (Ito and Oikawa, 2002) 為主要模型基礎，整合了地球系統中水文循環、碳循環(CO_2)，以及 trace gas (CH_4 、N_2O)的推估，從生物化學的角度，模擬由單一點位擴展至區域尺度的淨二氧化碳交換。

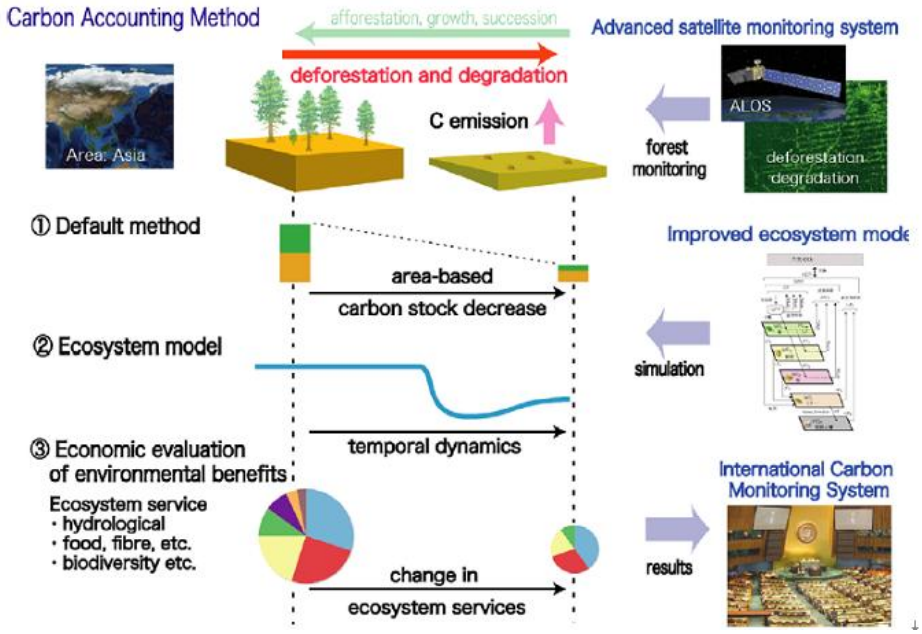


圖 4 日本森林碳監測系統(FCMS)模型架構(資料來源 :NIES)

以國家層級發展的溫室氣體或碳測計系統，多以聯合國 IPCC 國家溫室氣體清冊指南，及 LULUCF 良好作法指南(Good Practice Guideline for Land Use, Land Use Change and Forestry)為主要依據，UNFCCC 要求各締約國採用 LULUCF 的估算方法，進行各國土地利用及林業碳排放及碳移除的估算，在清潔發展機制(CDM)中，亦明確界定植

林碳匯的基線方法學及適用範圍，故各國的測計系統多以此為出發，以傳統森林資源及土地利用調查為基礎，結合不同的生態系統模型，以對廣大空間範圍及未來的變化趨勢進行估測及預測；遙測在此架構所扮演的角色，則主要定位為提供模型估測所需的空間參考資訊；事實上，針對國家層級廣大領土的森林環境，遙測為空間面狀定量實測資料的唯一來源，除了長期土地利用資料的提供，遙測能進一步整合生態模型或地面生態實測，提供森林生物量(biomass)、森林生產力(productivity)與碳吸存、森林覆蓋度等資訊，提供國家溫室氣體清冊中有關森林碳匯分布狀況及碳移除的定量資訊，並與生態模型測計成果進行比較，以提供更多元及不同時空尺度的觀測平台，雖然目前相關理論在台灣方面的應用仍在研究階段，但透過後續不同觀測平台資料的比對驗證，相信能對遙測碳吸存資料的應用提供更好的詮釋；以下針對遙測碳吸存研究的分析流程進行說明，相關理論基礎則於附錄 B 中詳述。

1.2 MOD17 產品介紹及資料分析流程

MOD17 A2 為 Terra MODIS 全球性初級生產力產品，包含 GPP、PSNnet 及 QA 等資訊，具有 1000 公尺空間解析以及 8 日的資料週期，並以各週期的首日作表示，亦即 001(1/1~1/8)、009 (1/9~1/16)、...等；在座標格式上，採用 Sinusoidal 投影，及 HDF-EOS 的儲存格式；為利於台灣地區碳吸存量的分析，在資料處理流程上，依序進行投影座標轉換、資料格式轉換，以及台灣本島區域的資料萃取，並將像元值轉換為 GPP/PSNnet 數值，透過 Science Data Sets 中的 Quality Assurance(QA)資訊，進行資料像元的篩選，剔除受到雲層干擾，以及屬於都市建物、溼地、水體、裸露區、冰雪層覆蓋的區域，以作為後續初級生產力分析的所需資料；此外，為降低雲層遮蔽的影響，以月平均值演算輸出(圖 5)，並以前期資料替補雲層覆蓋區域。

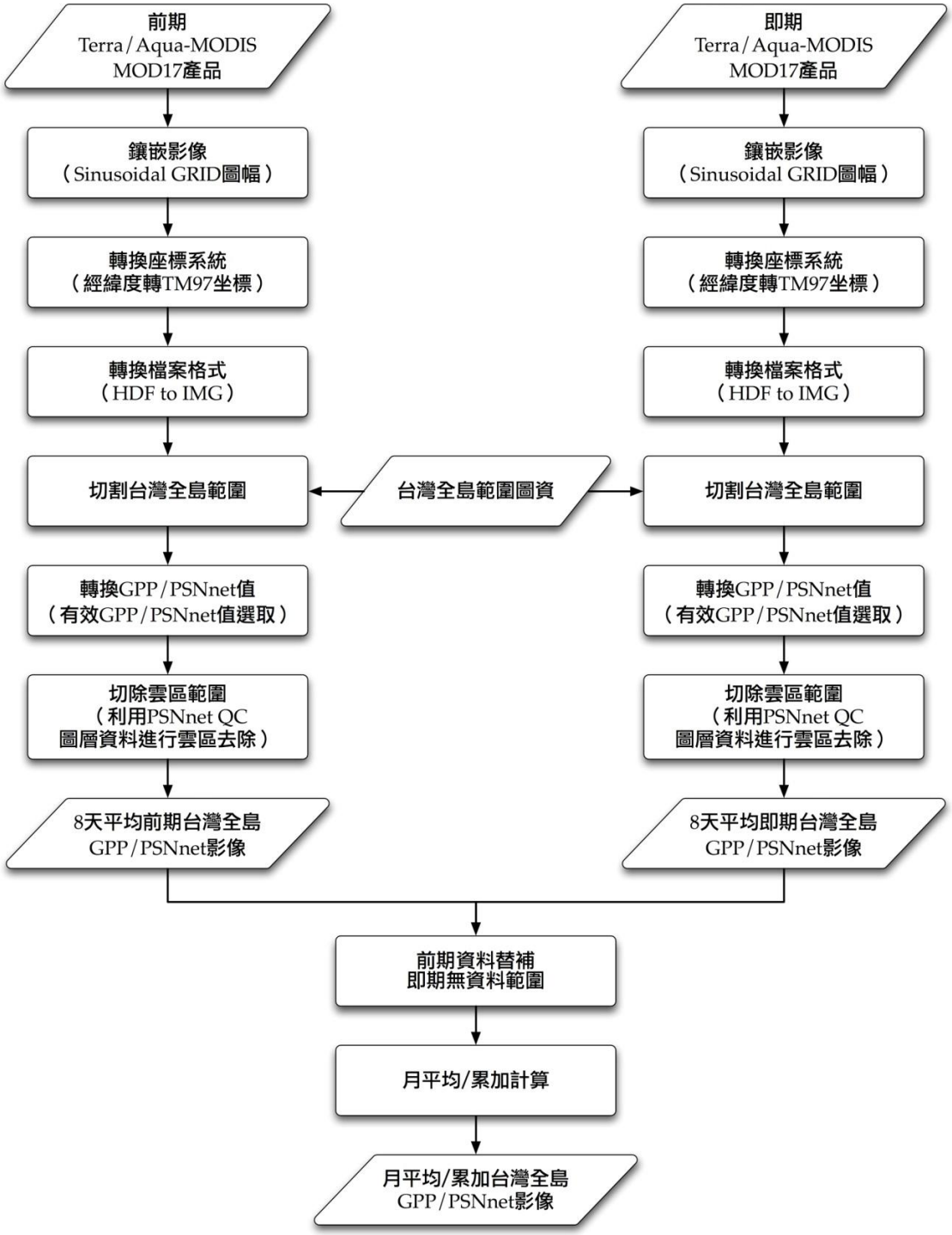


圖 5 MODIS 初級生產量產品標準作業流程

1.3 植生初級生產力資料成果及 MODIS 資料應用考量

1.3.1 植生初級生產力資料分析

1.3.1.1 2003/10-2011/9 台灣全島、氣候分區、植群帶逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化

衛載遙測由於具有穩定的軌道週期，能提供穩定規律的地表觀測資訊，透過時序性的資料分析，不僅能掌握地表參數的空間性差異，亦能瞭解時序性的變遷；圖 6 顯示台灣全島總初級生產力及淨光合作用量的季節性變化，包含天然植群帶及人為作物區的綜合影響，整體而言，逐年 12 月至 1 月間的生產力最低，主要受到低日照強度及非極適生長條件的影響；生長季大致於 2 月中旬開始，西南部區域的耕作亦大致於此時期展開，造成 GPP 及 PSNnet 明顯的上升，但由於生物量仍低，植物維持生理機能所需的呼吸較低，故 GPP 及 PSNnet 的差異不大，隨著植物葉面增長，以及日照時數的提高，植生所能利用的光合作用有效吸收輻射(APAR)逐漸上升，GPP 在 6-7 月底左右達到高峰，但相對而言，此時自營性呼吸成本較先前高出許多，故 GPP 及 PSNnet 有較明顯的差異，而最高的淨光合作用量早 3-5 月份即已發生，反應在生長季初期植生葉面積及生物量的迅速增加。

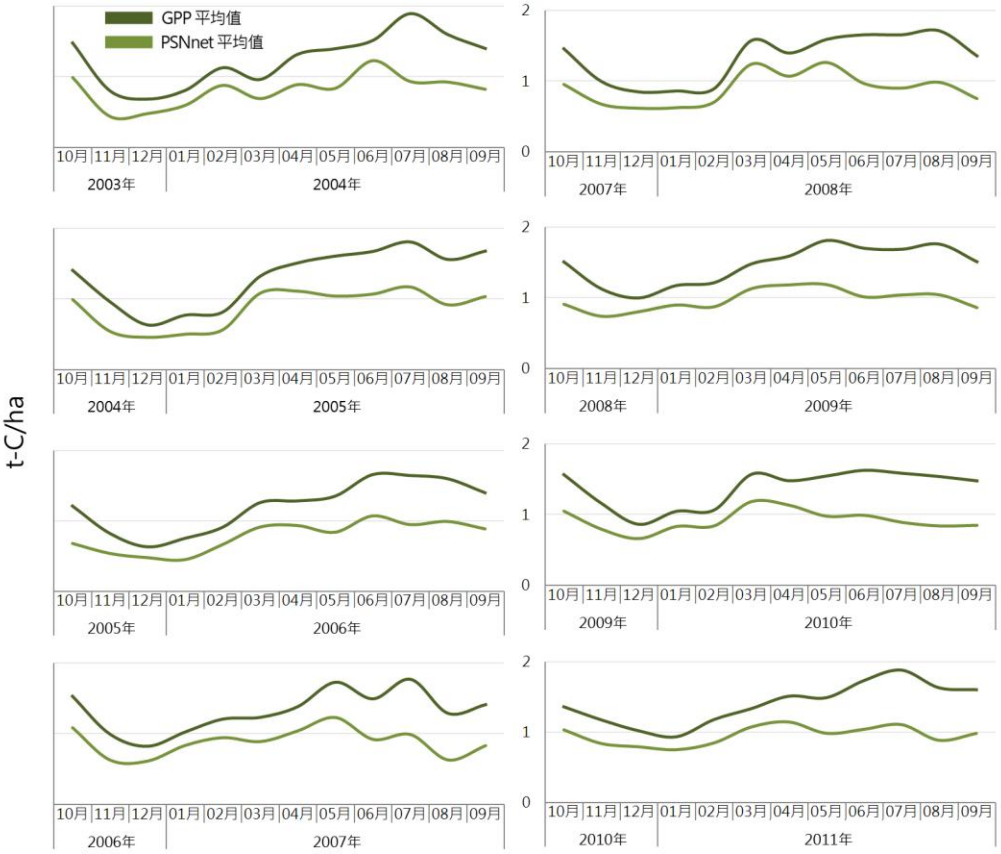


圖 6 2003/10-2011/9 台灣全島逐月平均 GPP 及 PSNnet 時序變化

蘇鴻傑(1992)以地區性雨量及其季節性變異，將台灣本島區分為 7 個地理氣候區(圖 7)，而植群在不同分區的生長條件及外在環境下，其生態行為及碳匯能力的差異為

一有待瞭解的課題；透過地理氣候分區與 GPP、PSNnet 的交集分析，排除非屬國有林區的區域，能降低人為干擾，反應植群的自然生長狀況；圖 8、9 顯示在 7 個地理氣候區中，SE 區由於充足的日照，適當的雨量，且海拔地勢較低，以闊葉林為主要林相，呈現出較高的總初級生產力；但由於葉面及細根生物量較高，需較多的自營呼吸以維持生理機能，造成較高的二氧化碳排放，故與其他地理氣候區在 PSNnet 的差異不如 GPP 來得大；以逐年資料來看，各地理氣候區間最大的固碳差異發生在冬季，此時北部 NE 及 NW 區受東北季風的影響，天候較不穩定，冷濕的天氣型態造成入射輻射及光能利用效率降低，而南部 SE、SW 區暖溫的天候狀況使影響森林生長的約制條件較不明顯，故造成南北間明顯的碳匯差異；在夏季生長高峰時，太陽鄰近北迴歸線，負責碳吸存的植株葉面亦達到旺盛期，各區間除了 SE 區以外，GPP 及 PSNnet 沒有明顯的差異，而 SE 區的高生產則與其低海拔及主要組成林相有關。

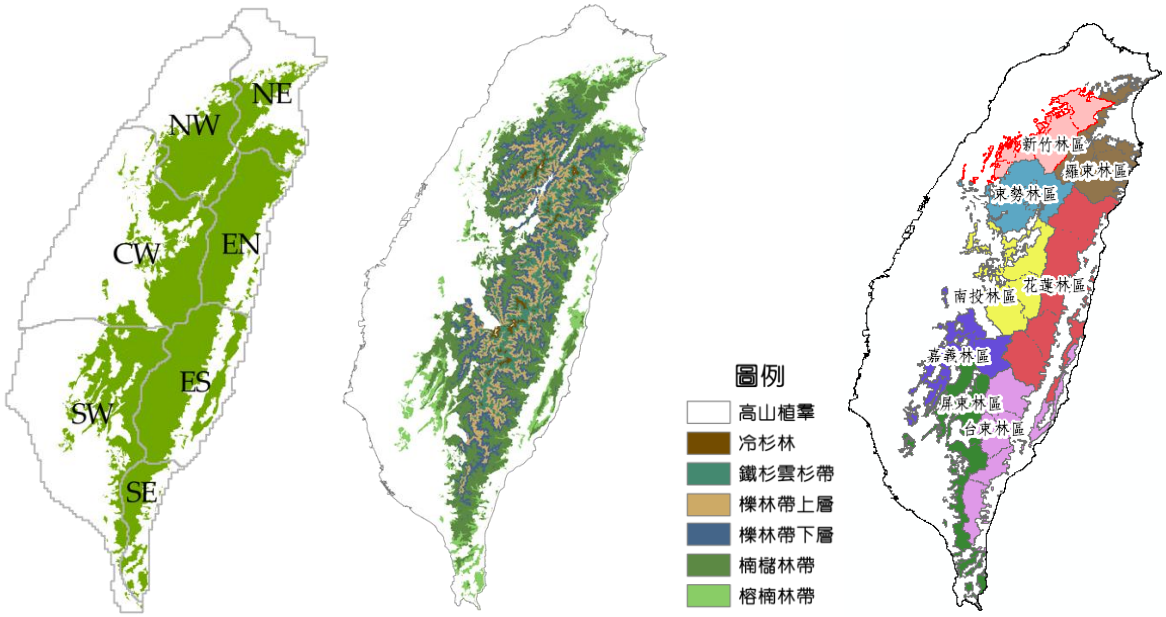


圖 7 台灣全島各氣候區、植群帶(與國有林區交集)、及林區分布圖

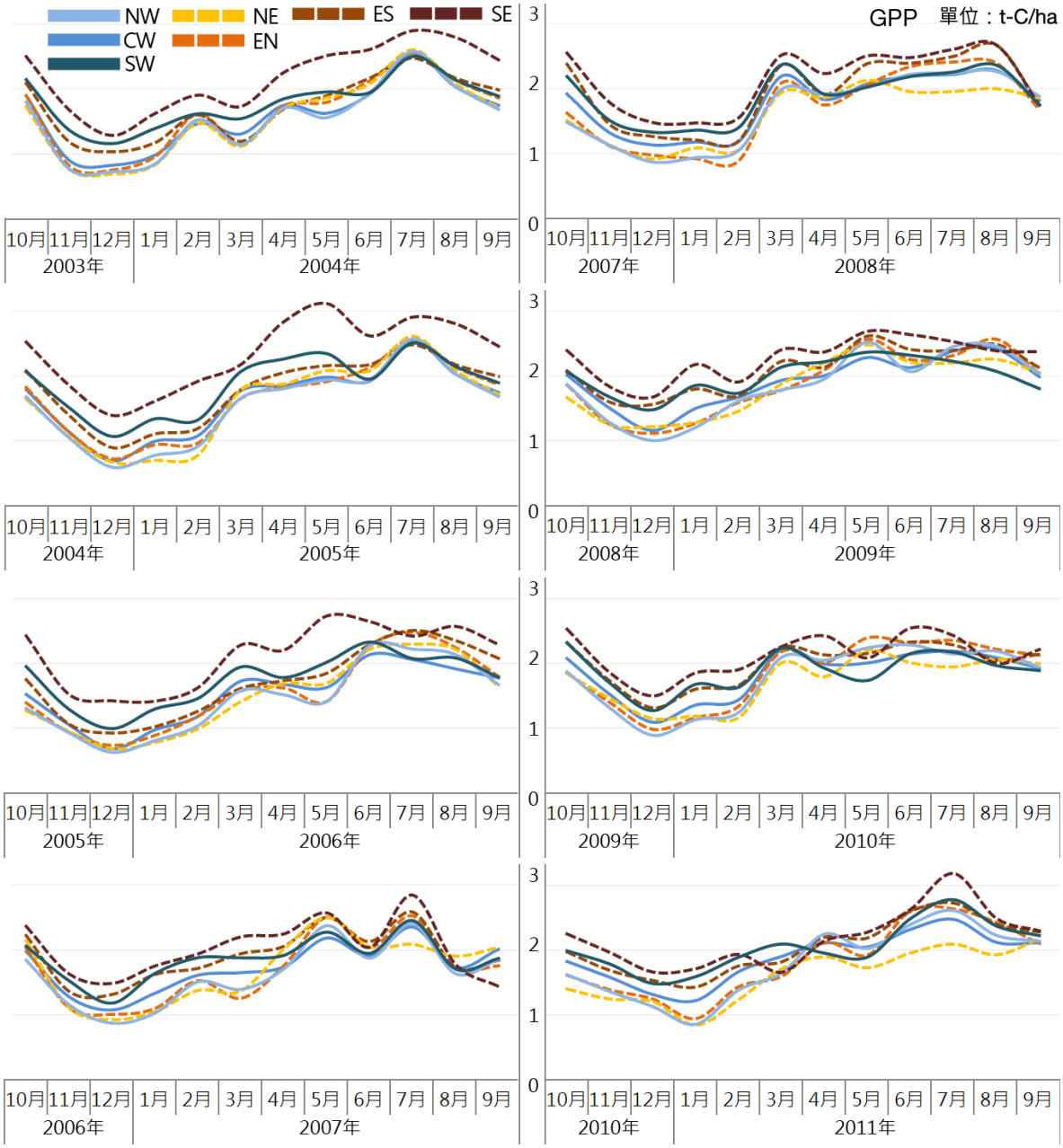


圖 8 2003/10-2011/9 氣候分區與國有林區交集逐月 GPP 時序變化

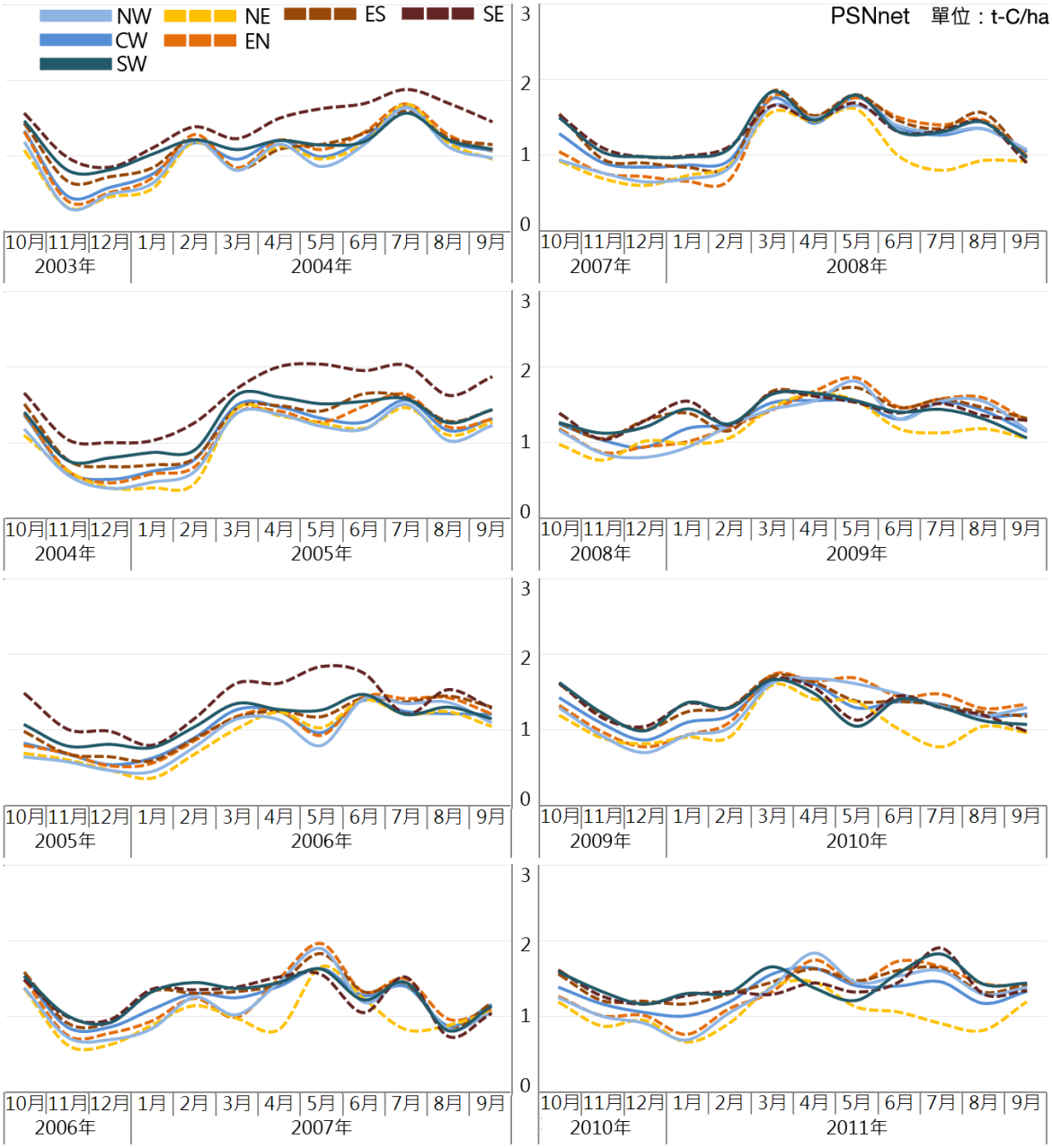


圖 9 2003/10-2011/9 氣候分區與國有林區交集逐月 PSNnet 時序變化

亞熱帶季風氣候的台灣地區，原本控制植生生長的降雨、溫度等控制因子並不明顯，但由於高度的急遽落差，造成低溫及有效累積溫度的明顯差異，造成垂直林相的歧異度；以植群帶分析森林的碳匯功能，不僅能均化前述地理氣候差異對植群的影響，也反應出 MODIS GPP/PSNnet 的演算方式；在 7 種植群帶中，冷杉林帶(Abies zone)、鐵杉雲杉林帶(Tsuga-Picea zone)等針葉林相呈現較低的 GPP 及 PSNnet(圖 10、11)，主要隨著海拔高度的上升，由闊葉林、針闊混淆林、針葉林林相的變遷，植株冠層葉面

積及光能利用效率逐漸降低所造成；而各植群帶 GPP 及 PSNnet 皆呈現等比例的變化趨勢，則由於 MOD17 亦以植群帶作為生態群系對照表中的參考依據，據此推求各植群的最大光能利用效率，以及蒸氣壓差、低溫等約制因子對光合作用效能產生的影響；在此對照表中，最大光能利用效率為一常數，不隨時間地域而所改變，僅受日低溫及水勢壓力的箝制，故在亞熱帶季風氣候的台灣，光能利用效率的變化應較不明顯，因此各植群 GPP 及 PSNnet 呈現等比例的變化；而在植群帶的劃分中，MOD17 採用 University of Maryland 的全球地貌分類，包含針葉林、闊葉林、混合林、草生地、作物區等台灣主要的植生類別，與台灣常引用的植群劃分存有差異，主要由於 MODIS 著重於全球運用，忽略了地區性的變異。

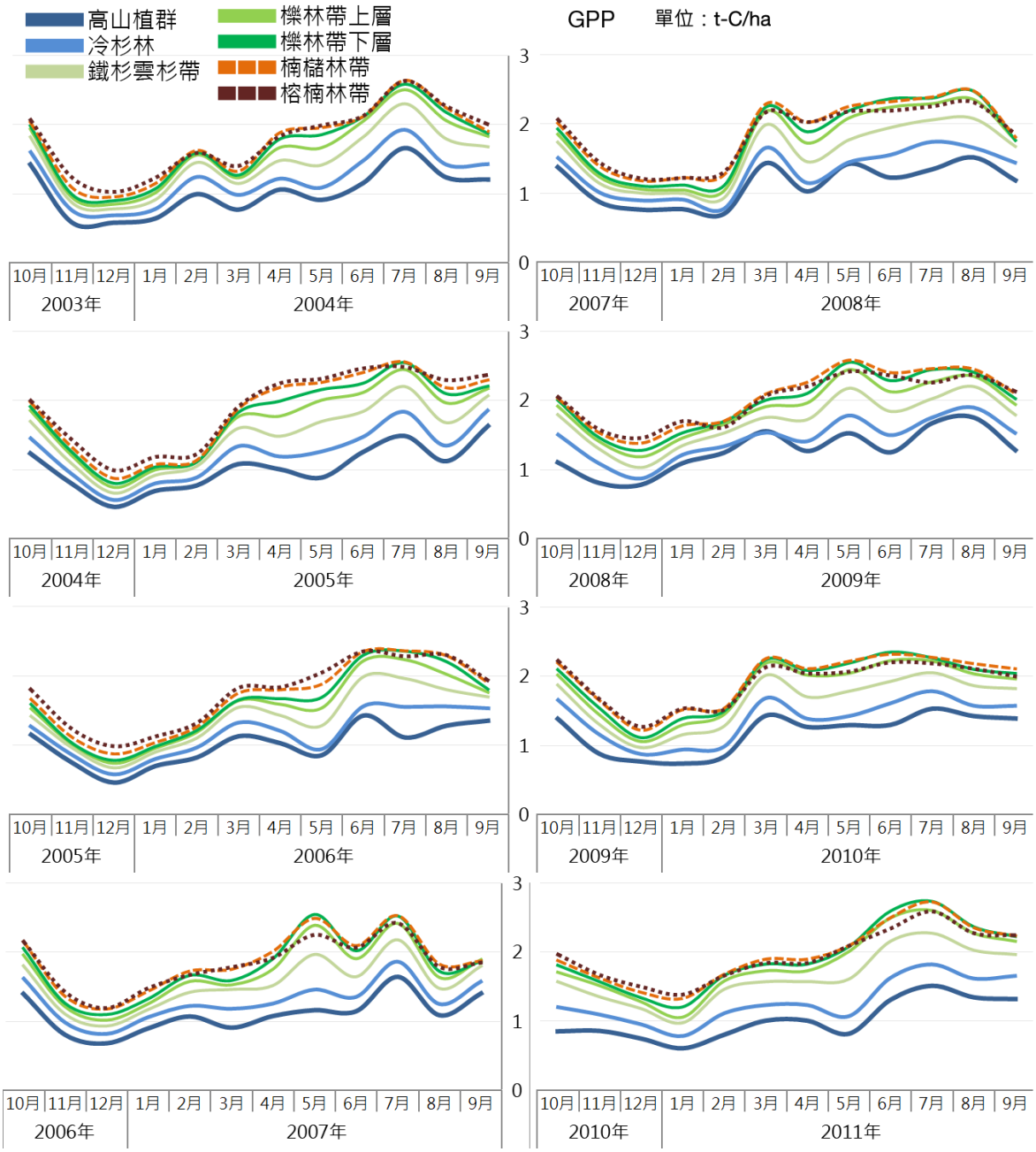


圖 10 2003/10-2011/9 植群帶與國有林區交集逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化

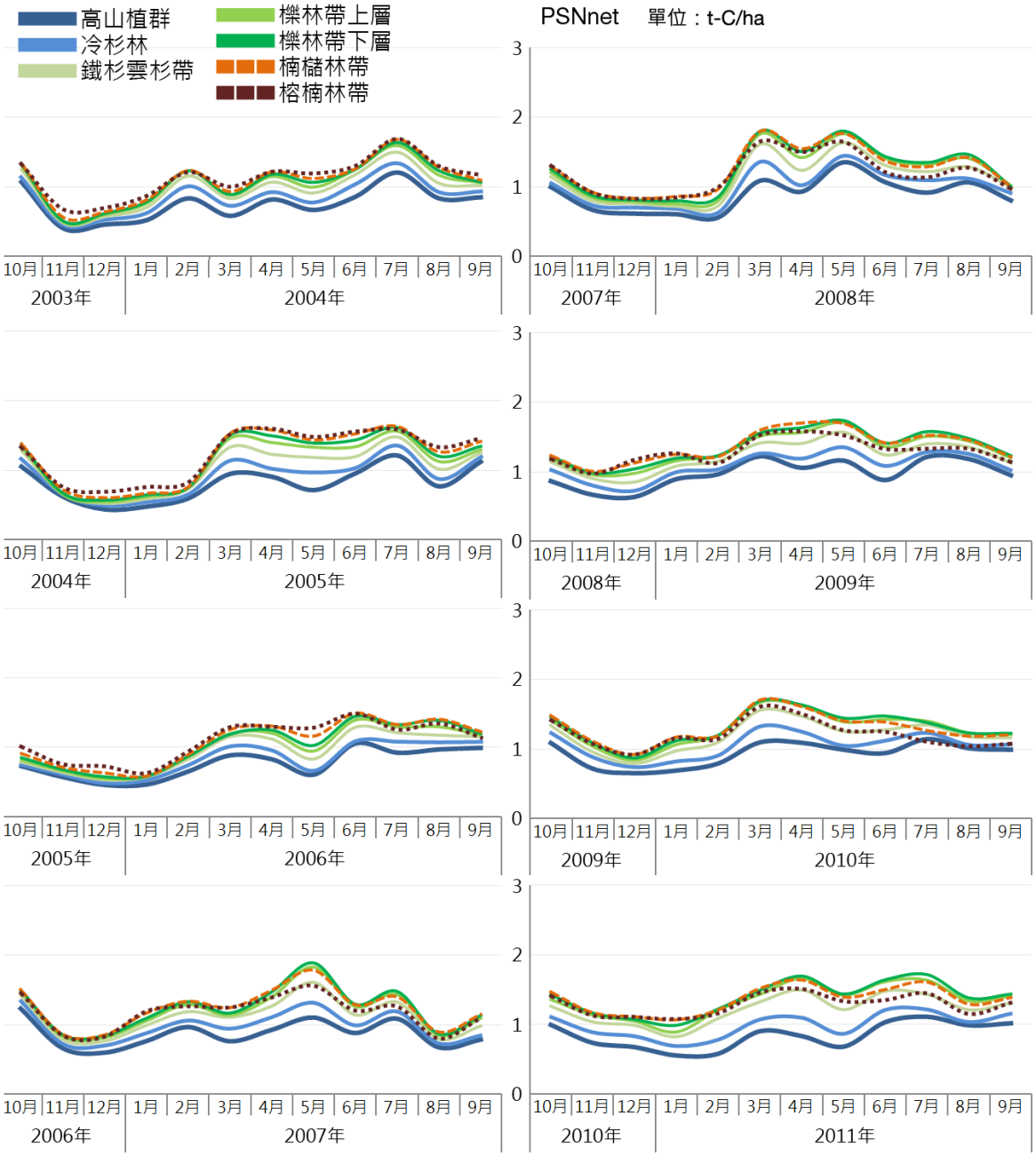


圖 11 2003/10-2011/9 植群帶與國有林區交集逐月 GPP 及 PSNnet 時序變化

1.3.1.2 2003-2004 年各林區碳匯差異

以行政界區為劃分，探討綠色植生碳匯行為的差異，較無法與實際的區位生態因子作連結，但由於實際的行政管理及林業經營仍以此為分劃，為有效輔助林業政策的管理，提供植林碳匯的輔助資訊，仍有必要對此進行初步分析；表 1、圖 12 顯示各林區 2003、2004 年的年度碳吸存(Net Primary Productivity)及單位區域面積碳吸存，花蓮林區由於面積較廣，碳吸存為所有林區最高，2003 及 2004 年碳匯量分別達到 3.18 及

3.42 百萬噸，但若考量單位區域的固碳能力，則以位於南部地理氣候區(SE、ES、SW)的台東、屏東、嘉義林區較高，平均每年每公頃達到 10.33-12.07 噸的固碳效能。當然，此為綜合所有植群、不同林齡的平均數值，為一概觀的總體現況，實際植林政策仍需考量到實地的立地品位及植株種類、以及不同樹苗的生長速度差異等綜合影響。

表 1 各林區 2003、2004 年總碳吸存及平均碳吸存

NPP	年份	2003		2004	
林區	面積(ha)	總碳吸存量(10^6tC)	平均碳吸存量(tC/ha)	總碳吸存量(10^6tC)	平均碳吸存量(tC/ha)
羅東	175038	1.58	9.03	1.70	9.70
新竹	160246	1.36	8.49	1.49	9.27
東勢	161050	1.54	9.55	1.64	10.19
花蓮	323190	3.18	9.85	3.42	10.58
南投	194823	1.96	10.06	2.08	10.69
嘉義	148428	1.53	10.33	1.60	10.77
屏東	198755	2.30	11.59	2.40	12.07
台東	229606	2.58	11.23	2.70	11.75
全台	3606970	33.94	9.41	35.38	9.81

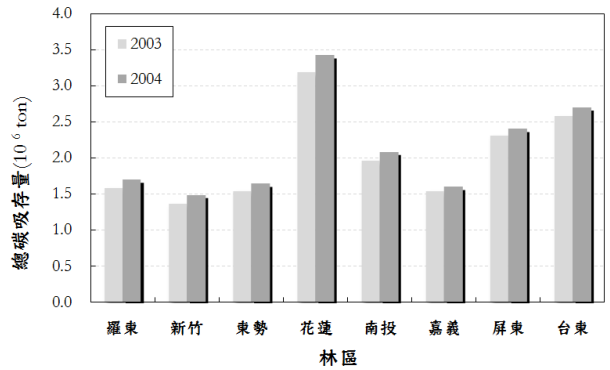


圖 12 各林區 2003、2004 年碳吸存

1.3.1.3 全台、國有林區、各地理氣候區、地理氣候區內各植群帶碳吸存量

森林生態系的碳匯能力，可分別由森林結構(structure)及植物光合作用的功能(function)或過程(process)來分析，森林結構主要透過蓄積量的量測，結合轉換係數的應用，估測林分中木質部分的碳固存量(carbon stock)；而光學遙測則主要透過光合作用效能的推估，以淨生產力反應出植物的碳吸存能力，屬於碳流通量的概念(carbon flux)；圖 13 為藉由 MODIS 遙測資料所推估的 2001-2006 年全台區域淨初級生產力，為反應碳匯碳源的分佈情形，評估各氣候帶及植群型態的碳吸存量，分別分析國有林區內各地理氣候區，以及在地理氣候區內各植群帶的年度平均碳吸存量，以階層的概念，提供國家溫室氣體排放清冊中有關林業活動及溫室氣體減量的參考資訊。

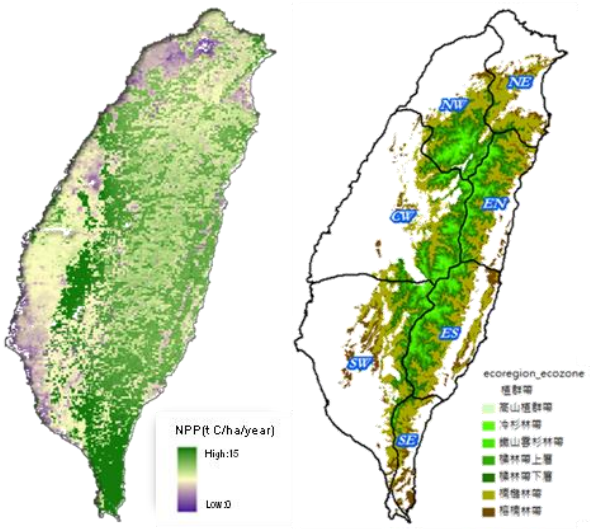
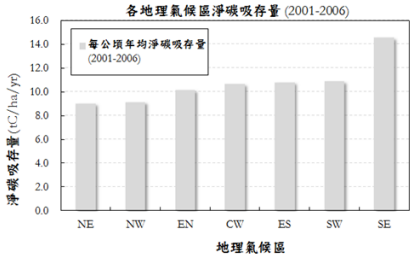


圖 13 國有林區內各地理氣候區植群帶分佈及 2001-2006 年平均淨初級生產力

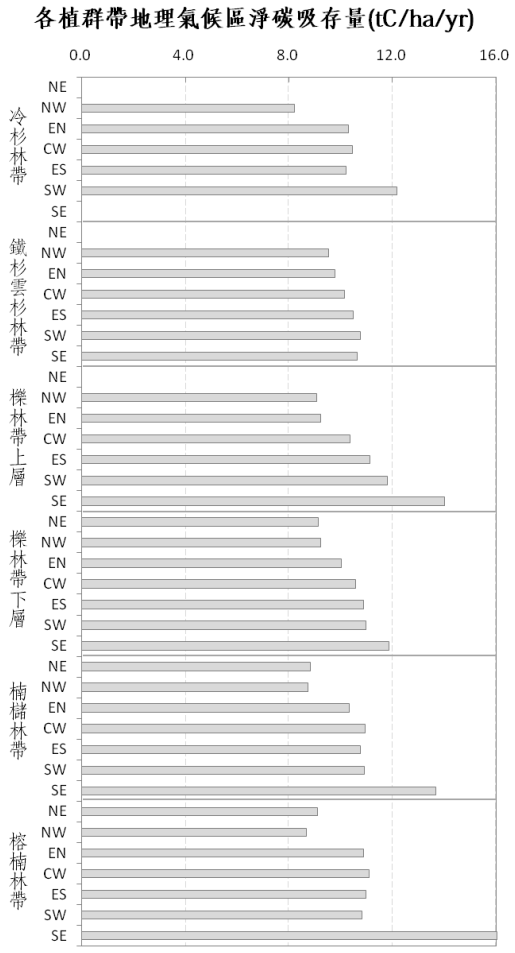
透過 2001~2006 年 MODIS 淨初級生產力的估算，台灣全島平均每年每公頃區域能吸存約 6.34~13.08 公噸的碳量(以平均值±1 標準差估算)，如以國有林區範圍進行分析，著重於森林生態系的碳吸存，則每公頃能吸存 7.74~13.36 公噸碳量；而在在台灣本島所屬的七個地理氣候區中，國有林區內的森林碳吸存大抵呈現由南向北逐漸遞減的趨勢(圖 14)，最南側的 SE 區由於充足的日照，以及相較於西部區域較不明顯的乾季，且以中低海拔的榕楠林(Fucus-Machulus zone)及楠櫧林帶(Machilus-Castanopsis zone)為主要林相，呈現出最高的淨初級生產力，平均每年每公頃區域能吸存 11.27~17.83 公噸的碳量，而位處最北側的 NE 區，恆濕型的氣候型態及雲層雲霧覆蓋，造成較低的光合作用有效輻射及植生生產力，平均吸存約 6.92~11.14 公噸的碳量；此外，如比較中央山脈東側及西側的地理氣候區，其碳吸存量並未呈現顯著的差異，顯示以熱帶及亞熱帶季風氣候區域為主的台灣，就大範圍區域而言，累計日照強度為森林生態系固碳能力差異的主要控制因素。



每公頃年均淨碳吸存量 (2001-2006)			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	9.03	2.11	1421
NW	9.15	1.96	2240
EN	10.16	2.04	2583
CW	10.67	2.26	2850
ES	10.81	2.05	3177
SW	10.88	3.59	2736
SE	14.55	3.28	901

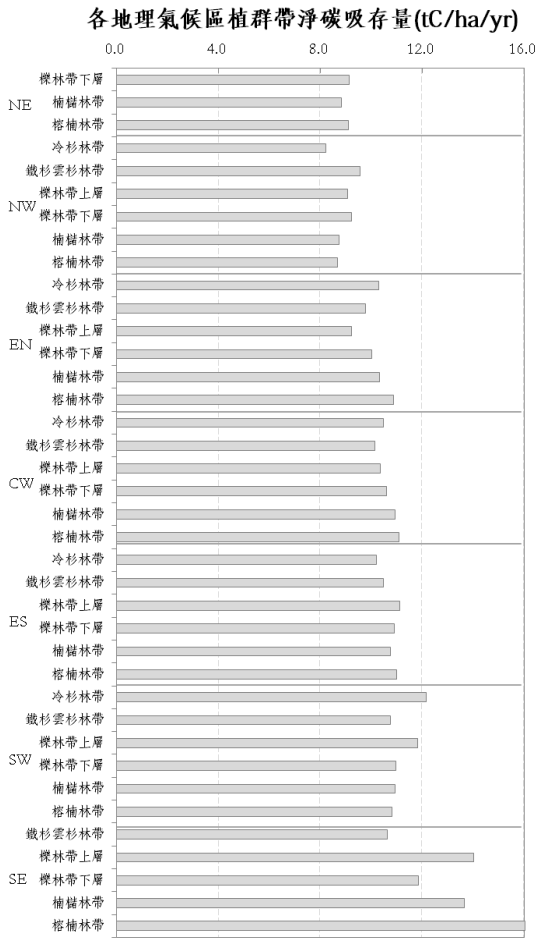
圖 14 國有林區內各地理氣候區年度碳吸存量(遙測估算成果)

以國有林區內地理氣候區劃分為基準，進一步探討各植群帶的固碳能力差異，能呈現相同植群帶在不同地理氣候區，或單一地理氣區中不同植群帶的差異；透過 MODIS 的估算顯示，各植群帶碳吸存仍呈現由南向北逐漸遞減的地理氣候趨勢(圖 15)(高山植群帶由於樣點數過少而未列入計算)，但在各別地理氣候區中，不同植群帶的固碳能力則未呈現出一致的趨勢，顯示出地理氣候區域間的歧異性(圖 16)。



每公頃年均淨碳吸存量 (2001-2006)				
ecozone	ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
冷杉林帶	NW	8.22	2.98	58
冷杉林帶	EN	10.29	0.23	44
冷杉林帶	CW	10.47	0	57
冷杉林帶	ES	10.21	2.17	56
冷杉林帶	SW	12.17	1.57	32
鐵杉雲杉林帶	NW	9.55	1.82	301
鐵杉雲杉林帶	EN	9.78	1.81	325
鐵杉雲杉林帶	CW	10.15	1.81	366
鐵杉雲杉林帶	ES	10.49	1.94	414
鐵杉雲杉林帶	SW	10.76	1.99	136
鐵杉雲杉林帶	SE	10.64	2.98	7
檜林帶上層	NW	9.08	1.65	491
檜林帶上層	EN	9.23	2.26	453
檜林帶上層	CW	10.36	2.39	574
檜林帶上層	ES	11.12	2.22	547
檜林帶上層	SW	11.81	1.61	268
檜林帶上層	SE	14.02	0	30
檜林帶下層	NE	9.15	1.8	103
檜林帶下層	NW	9.24	1.77	583
檜林帶下層	EN	10.02	1.97	582
檜林帶下層	CW	10.59	1.75	650
檜林帶下層	ES	10.9	2.03	603
檜林帶下層	SW	10.97	2.72	471
檜林帶下層	SE	11.86	3.3	103
楠櫧林帶	NE	8.84	1.98	986
楠櫧林帶	NW	8.75	2.05	734
楠櫧林帶	EN	10.32	2.25	985
楠櫧林帶	CW	10.95	2.38	1061
楠櫧林帶	ES	10.75	2.21	1220
楠櫧林帶	SW	10.93	3.78	1270
楠櫧林帶	SE	13.67	2.96	298
樟楠林帶	NE	9.11	2.24	320
樟楠林帶	NW	8.68	2.55	72
樟楠林帶	EN	10.89	2.05	194
樟楠林帶	CW	11.09	3.25	141
樟楠林帶	ES	10.99	2.03	335
樟楠林帶	SW	10.82	4.25	556
樟楠林帶	SE	16.03	2.45	298

圖 15 各植群帶地理氣候區碳吸存量(遙測估算成果)



每公頃年均淨碳吸存量 (2001-2006)				
ecoregion	ecozone	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	櫟林帶下層	9.15	1.80	103
NE	楠儲林帶	8.84	1.98	986
NE	榕楠林帶	9.11	2.24	320
NW	冷杉林帶	8.22	2.98	58
NW	鐵杉雲杉林帶	9.55	1.82	301
NW	櫟林帶上層	9.08	1.65	491
NW	櫟林帶下層	9.24	1.77	583
NW	楠儲林帶	8.75	2.05	734
NW	榕楠林帶	8.68	2.55	72
EN	冷杉林帶	10.29	0.23	44
EN	鐵杉雲杉林帶	9.78	1.81	325
EN	櫟林帶上層	9.23	2.26	453
EN	櫟林帶下層	10.02	1.97	582
EN	楠儲林帶	10.32	2.25	985
EN	榕楠林帶	10.89	2.05	194
CW	冷杉林帶	10.47	0.00	57
CW	鐵杉雲杉林帶	10.15	1.81	366
CW	櫟林帶上層	10.36	2.39	574
CW	櫟林帶下層	10.59	1.75	650
CW	楠儲林帶	10.95	2.38	1061
CW	榕楠林帶	11.09	3.25	141
ES	冷杉林帶	10.21	2.17	56
ES	鐵杉雲杉林帶	10.49	1.94	414
ES	櫟林帶上層	11.12	2.22	547
ES	櫟林帶下層	10.90	2.03	603
ES	楠儲林帶	10.75	2.21	1220
ES	榕楠林帶	10.99	2.03	335
SW	冷杉林帶	12.17	1.57	32
SW	鐵杉雲杉林帶	10.76	1.99	136
SW	櫟林帶上層	11.81	1.61	268
SW	櫟林帶下層	10.97	2.72	471
SW	楠儲林帶	10.93	3.78	1270
SW	榕楠林帶	10.82	4.25	556
SE	鐵杉雲杉林帶	10.64	2.98	7
SE	櫟林帶上層	14.02	0.00	30
SE	櫟林帶下層	11.86	3.30	103
SE	楠儲林帶	13.67	2.96	463
SE	榕楠林帶	16.03	2.45	298

圖 16 各地理氣候區植群帶碳吸存量(遙測估算成果)

1.3.1.4 均質樣區 GPP 分析-氣候分區與植群帶

以全台地理氣候區、植群帶進行 GPP、PSNnet 分析，能看出植生概觀的生產行為，並對遙測推估進行初步的檢驗，但由於影響植生生長的因素相當多元，地區性生態區位或生理反應的所產生的 GPP、PSNnet 變異則無法有效顯現，透過均質樣區的分析，針對特定的變量進行分析，同時限定其他的生態或地理區位因子，更能凸顯此自變數對植生碳匯應變數的影響；本計畫透過第三次森林資源調查的植群圖資，以及近期福衛影像，篩選出 15 個 5*5km 均質林相測區(25 個 MODIS 資料樣本)(圖 17)，透過時序性 8 天週期資料的分析，以突顯個別因子對植生碳匯的影響；圖 18 案例包含台南龍崎(Orchard/SW)、三地門(EBF/SW)、福山(EBF/NE)、南澳(EBF/NE)、尖石(ENF/NE)、棲蘭(ENF/NE)，其中福山屬於長期生態實驗研究地及森林動態樣區，棲蘭鴛鴦湖則除了通量塔台的二氧化碳觀測，亦屬於長期生態研究地的一部分，圖中

GPP 數值為 25 樣本的平均值及±1 標準差，紅點表示受到雲霧影響，無當期演算值，以前後期數值內差而得的數值，ratio of data available 則顯示全年中可用統計資料的比例，代表測區受大氣雲層干擾的狀況以及統計數值的代表性，趨勢線則以二次多項式進行表示；在地理氣候區的比較上，以闊葉林為例，SW 區三地門的生產力則明顯較 NE 區的福山及南澳高出許多，但在生長趨勢上，生長季及非生長季的 GPP 差異則不如 NE 區來得明顯，龍崎由於以果園及茶園為主要地貌，其生產力較其他天然闊葉混合林為低；若以林相差異為分析對象，在同屬 NE、NW 區的福山、南澳、尖石、棲蘭中，闊葉林和針葉林的碳匯能力則沒有明顯的差異，此與預期有些落差，此應與 NE 區低中海拔恆濕的霧林帶，造成較低的入射有效輻射有關，故 NE 區闊葉林的碳匯能力較其他地理氣候區的相同植群為低，而此也反應到光學遙測可用資料的降低，以及 GPP 推估值的劇烈波動。

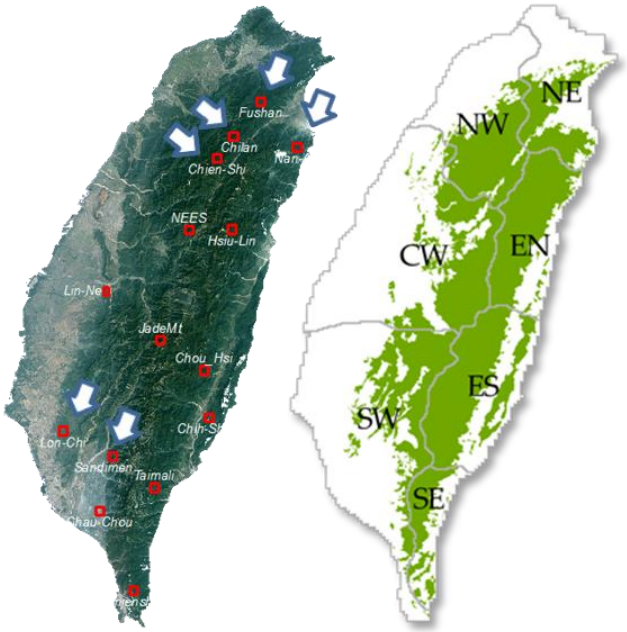


圖 17 均質樣區(龍崎、三地門、福山、南澳、尖石、棲蘭測區)與氣候分區

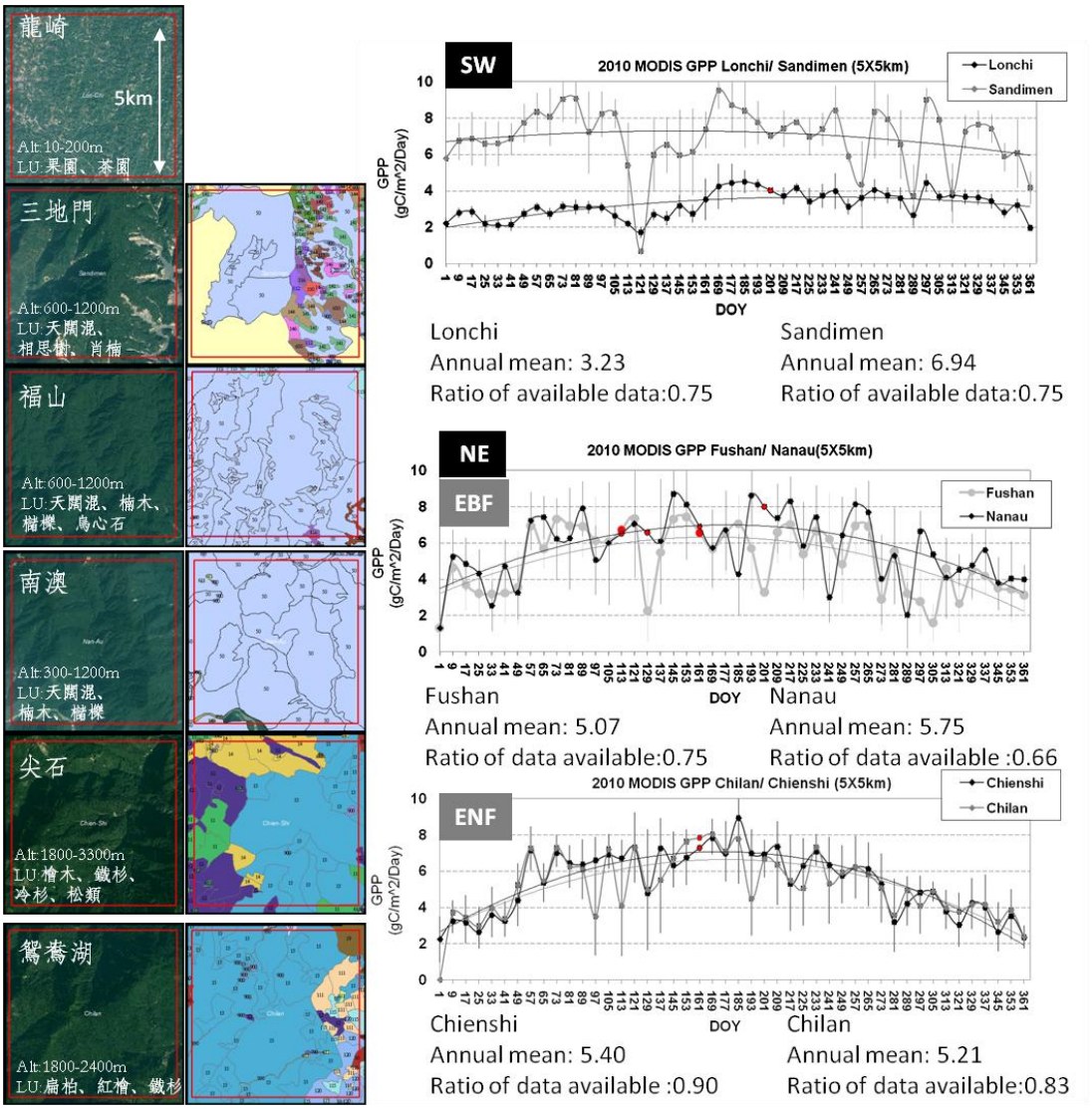


圖 18 樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年 GPP 時序性變化

1.3.1.5 人工林樣區 GPP 分析

植林碳匯為當前林業管理的重要課題，亦反應由森林多目標經營、森林整體綜合資源調查、到森林環境監測的林業經營歷程；透過遙測資料的分析，不僅能作為各林區概觀的碳匯調查資料，更能提供植林碳匯管理的參考依據；在植林效益的評估上，所關切者為各林型、各樹種的固碳能力及其生長速度，本計畫選擇同屬 NE 區的柳杉(*Cryptomeria japonica* D. Don)、扁柏(*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* (Hay.) Rehd.)、紅檜(*Chamaecyparis formosensis* Matsum)、二葉松(*Pinus taiwanensis* Hay.)等針葉造林樹種，挑選均質林相(以 1*1km MODIS 像元為分析單元)的人工林區域進行分析(圖 19)，其中柳杉造林位於太平山事業區，包含柳杉及其他闊葉樹種，柳杉分佈比例為 5-100%，林齡 20-40

年，扁柏、紅檜樣區位於和平事業區，亦包含其他針葉造林樹種，扁柏約佔 1-14%，紅檜佔 9-23%，林齡為 20-60 年，二葉松樣區則位於大甲溪事業區，屬於純林造林地，林齡約 20-40 年；在資料分析上，為顧及林型覆蓋的均質性，且以充足樣本數為統計考量，故各造林樹種的有效樣本並不一致；圖 20 顯示各樹種 2010 年 GPP 的時序變遷，在近似的地理氣候環境及同屬針葉造林下，各類別的碳匯趨勢及固碳效果皆相當近似，年度平均則以扁柏、紅檜林稍高，或許與其較高的林齡及樹冠鬱閉度有關。

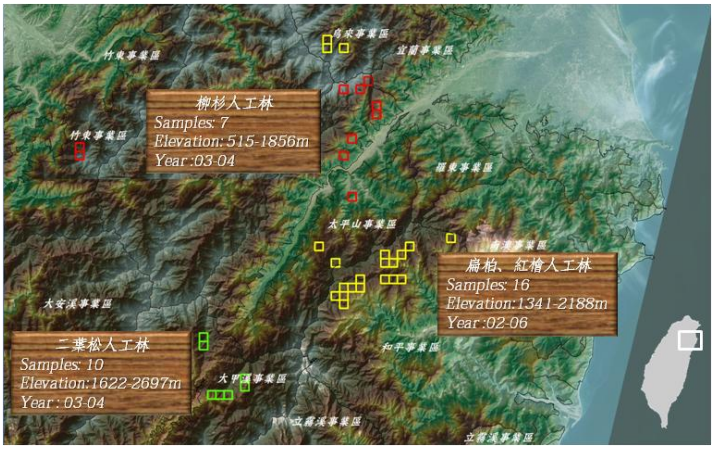


圖 19 柳杉、扁柏紅檜、二葉松人工林樣區分佈

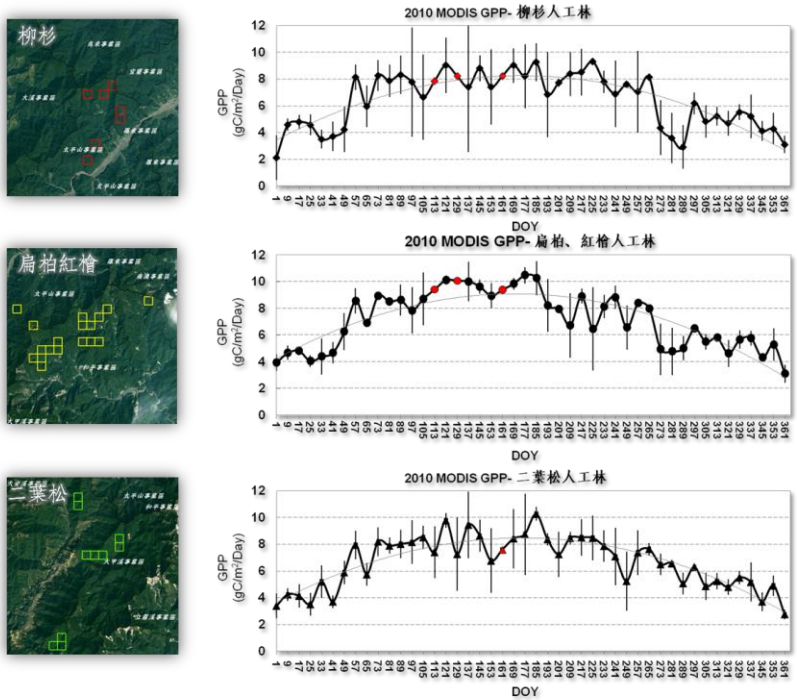


圖 20 柳杉、紅檜及扁柏、二葉松人工林 2010 年 GPP 時序變化

1.3.1.6 乾旱事件對森林碳匯的影響

在全球暖化及極端氣候事件驟生、外來種入侵等綜合影響下，森林生態的調適與演替為當前林學研究的關注議題，而在此調適過程中，所反應的森林生長及對森林碳匯能力的衝擊，則可透過時序性的遙測資料加以分析比較。台灣地區在 2002-2004 年各區域受到不同程度的乾旱災情影響，而遙測推估數值是否能反應此非常態性的約制條件，而呈現較低的森林生產及固碳能力，可作為 MODIS GPP 對災害事件敏感度的評估依據；圖 21 呈現 2002 年時序性的植生異常指標(Vegetation Anomaly Index，VAI)及總初級生產力，並以 2001 年(非乾旱年)作為 2002 年 GPP 變化的參考基準；由 VAI 顯示，中西部山區在 2002 年在 5 月中旬前呈現明顯的光譜異常反應，植生指標較 2001-2010 年的參考基準值低出許多，但相對而言，有關森林生長的 MODIS GPP，如以 2001 年為參考依據，則 2002 年未如預期的降低，整體而言反而較高，此與 MODIS GPP 推演的方式有關，主要由於在乾旱時期，有更充足的累積日照量，而蒸氣壓差在季風氣候的台灣地區又不如沙漠區域來得明顯，未能對光能利用效率產生明顯的抑制，故整體而言，MODIS 推估 GPP 較非乾旱年為高，無法有效反應植生水勢壓力對其碳匯能力的影響；事實上，地區性的生長限制因素皆因時因地而有所不同，而遙測參數推估皆有其假定條件，在全球演算運用的前提下，地區性的生態因子未必能在全球尺度上顯現出來，故在資料解讀及地區性應用上，皆需以此假定條件為前提，以權衡適合解讀的範圍。

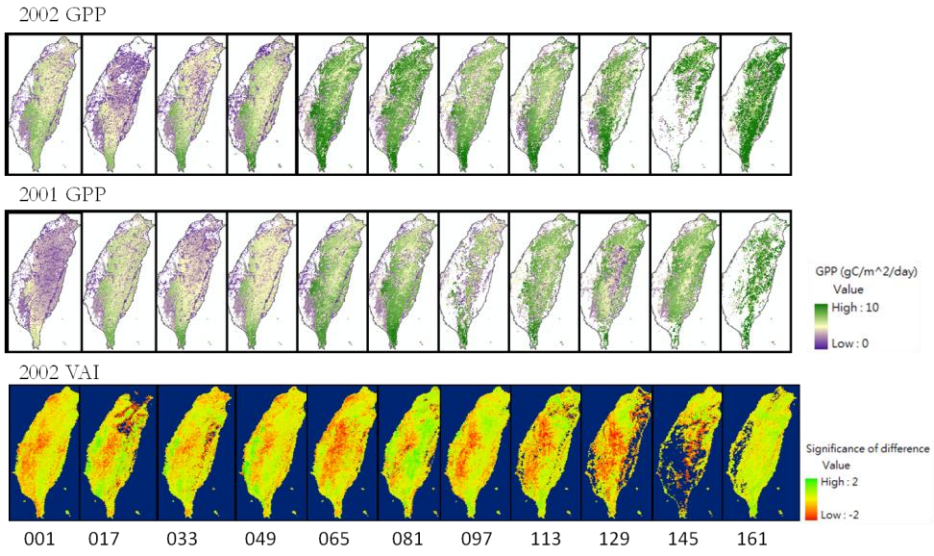


圖 21 2002 年中西部山區乾旱事件中遙測植生異常指標、總初級生產力的反應

1.3.1.7 不同植群型態初級生產力及自營性呼吸的探討

在 MODIS 初級生產力的演算邏輯下，入射短波輻射(SWrad)、有效輻射吸收比例(FPAR)、光能利用效率(ε)、及植生生物量(以 LAI 為主要推估依據)為主要的演算變數，其中 FPAR、ε、LAI 皆與生態群系有明顯的相關；為瞭解各參數對初級生產演算的影響，故以 UMD 的植群劃分方式，分析 EBF、ENF、MF、Cropland 等主要台灣地貌的生產行為，透過時序性的資料分析，詮釋初級生產力的季節性變遷，及分析遙測演算的主要影響因子；圖 22 顯示 2010 年常綠闊葉林、針闊混合林、常綠闊葉林、農作區 GPP 及 PSNnet 的時序性變化，以生長趨勢來看，各植群 GPP 皆在 6 月底至 7 月初，臨近夏至的時期達到生產量高峰，但實際的生長旺期，則反應在最高的 PSNnet，約在 3 月底即達到極大期，會有此 3 個月的生長季落差，則與葉面指數變化有明顯的關係；在 6 月底左右，太陽短波輻射達到極大期，而 LAI 亦於 7 月份呈現最高值，造成最高的總碳吸存量，但相對而言，較大的葉面質量亦造成較高的呼吸成本，故實際最高的生長期，早於此時期即已發生，在生長季初期，雖然葉面尚未完全成長，但配合較低的維持呼吸成本，有較高的碳匯能力，促成此時生物量的迅速累積；圖 23 呈現 LAI 及 GPP，以及 LAI 與自營性呼吸(Ra)的關係，LAI 一方面加速 CO_2 的吸收，一方面又箝制植生無限制的增長，兩者皆呈現正向的關係；而 LAI 與 GPP 間呈現一對數型態的關係，則由於 LAI 與有效輻射吸收比例(FPAR)間亦呈現對數型的正向關係，而 FPAR 與 GPP 間則為一線性關係。

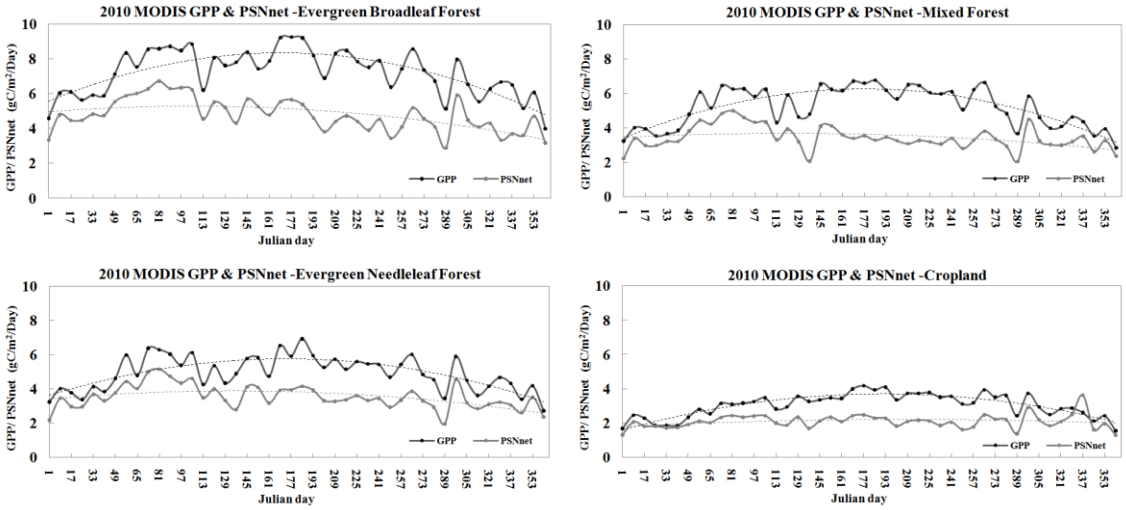


圖 22 2010 年常綠闊葉林、針闊混合林、常綠闊葉林、農作區 GPP 及 PSNnet 時序性變化

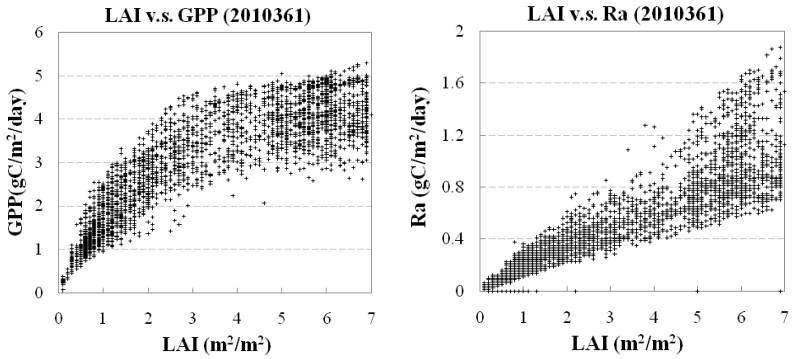
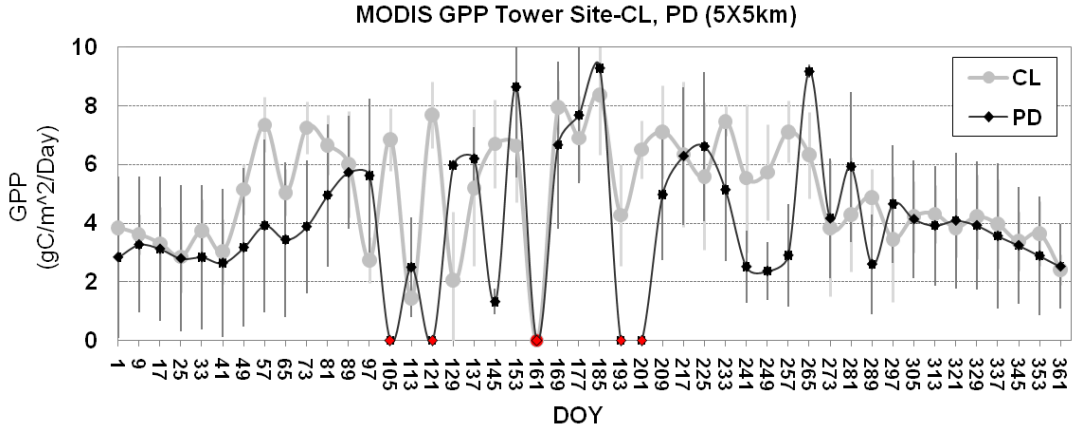


圖 23 LAI 與 GPP，以及 LAI 與自營性呼吸的關係

1.3.1.8 通量測站點位 MODIS GPP

衛載遙測由於具有規律再訪的特性，能提供穩定持續且涵蓋大範圍空間區域的地表資訊，透過時續性的資料分析，配合空間地貌圖資，即能掌握碳匯碳源在空間及時間上的變異情形，圖 24 顯示 2010 年台灣各主要二氧化碳通量塔點位周圍 5*5km 的 GPP 平均值及變異情形(±1 SD)，由其時間趨勢來看，GPP 與森林生長的季節性變遷有關，但在年度內亦呈現高度變化，此應與天候狀況及光照環境的差異有關，在各測站中，惠蓀(HS)、蓮花池(LHC)、溪頭(ST)測站由於具有地緣關係，GPP 變化較為一致，而棲蘭(CL)及屏東(PD)測點由於所處氣候、海拔高度及地貌植生皆不相同，GPP 趨勢的差異亦較大。各塔站高度分別為棲蘭鴛鴦湖(1650m)、屏東平地造林(71m)、惠蓀北東眼山(2000m)、蓮花池(760m)、溪頭(1535m)。



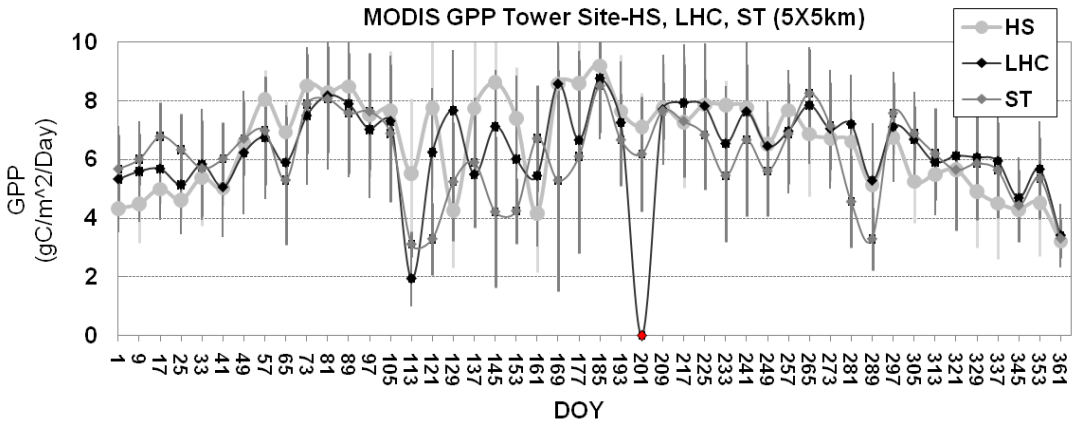


圖 24 2010 年總初級生產力時間趨勢圖(通量塔台周圍 5*5km 區域)-棲蘭鴛鴦湖(CL)、屏東平地造林(PD)、北東眼山(HS)、蓮花池(LHC)、溪頭台大實驗林(ST)

1.3.2 MODIS GPP/PSNnet 應用考量

MOD17 初級生產量演算主要參酌 Monteith(1972)光能利用效率研究，並應用推廣為全球各生態群系的碳吸存量估算，提供民間及學界參考，但在此全球性尺度、高頻率再訪且自動化運算的任務需求下，建構一般化演算式，且忽略部分地區性變異乃在所難免(Heinsch *et al.*, 2003)，故以 MODIS 資料詮釋台灣地區森林環境的碳匯碳源分布，有必要將此假定條件納入考量，並有待後續多重觀測技術的比對驗證；以下針對其主要的簡化假設進行說明。

恆定的生態群系參數：在 MOD17 產品運算邏輯中，最主要的簡化假設即為依生態群系劃分的各生物參數，並不隨時間及地域變動而有所改變，亦即假定台灣地區及北美地區的常綠針葉林具有相同的生物特性，且不因子生態群系中各別控制因子的影響而有所差異，此簡化假設主要考量在全球且及時的應用需求下，要因地制宜取得所有相關參數有其困難性，且將衍生出更多的輸入變數，造成輸出演算的不確定性，故在演算式中僅依據主要生態群系進行劃分，忽略地域及時域上的變異，以及區域性的控制因子。

全球性應用下的 MODIS 地貌分類：在全球性尺度的運算需求下，MODIS 生態群系分類主要依據 Boston University UMD 地物類別，將全球區分為 16 種生態群系(表 2)，生態性質參數對照表(BPLUT)依此分類進行劃分，且上層演算輸入產品如葉面積指數(LAI)、光合作用有效輻射分量(FPAR)亦依此分類為主要依據。故在針對生態系統的各

別子生態群系，由於其差異特徵受到不同控制因子所主導，較難於此 16 項類別中呈現出差異性。

表 2 地貌型態類別 (資料來源: MOD17 ATBD)

UMD Land Cover Types	
Class Value	**Class Description**
0	Water
1	Evergreen Needleleaf Forest
2	Evergreen Broadleaf Forest
3	Deciduous Needleleaf Forest
4	Deciduous Broadleaf Forest
5	Mixed Forest
6	Closed Shrubland
7	Open Shrubland
8	Woody Savanna
9	Savanna
10	Grassland
12	Cropland
13	Urban or Built-Up
16	Barren or Sparsely Vegetated
254	Unclassified
255	Missing Data

氣象與遙測資料的尺度差異：MOD17 仰賴全球性氣象資料，包含短波輻射、平均及最低溫度、比溼度(specific humidity)，據以計算入射光合作用有效輻射(IPAR)及最大光能利用效率的衰減乘數(最低溫及蒸氣壓力差)。此氣象資料由 NASA 資料融合中心(DAO)所提供，主要藉由地面及衛星觀測資料，配合全球循環模型(global circulation model)的模擬演算，提供 6 小時頻率及 1°*1.25° 空間解析度的資料，此空間解析與 MOD17 產品 1km 網格解析度有明顯落差，區域性的氣候特徵較難於此大規模尺度中加以分辨，僅能呈現出大空間範圍的一般化氣象資訊。

1.4 通量塔台觀測與遙測資料比對

陸域生態系統的碳循環在空間尺度上，既受到全球及區域性環流所控制，又受到微氣象環境及生物生理機能的影響，在全球氣候變遷及生態演替的時間格局下，短時距的氣象變動又左右著生物生態反映，為了研究碳循環在不同尺度的時空變化，須整合多重、獨立而又互補的碳水循環研究，以了解各生態系統碳匯或碳源的分布及趨勢變化；衛星遙測及氣候循環模式提供了全球及區域性尺度的碳匯觀測或估測，渦流協變性系統則提供了個體生態量測與遙測全球尺度間的尺度推移連結，並能作為數值模

式的基礎研究資料。

渦流協變性系統由於能量測大氣邊界層二氧化碳、水氣潛熱、可感熱及其他微量氣體的通量變化，已廣泛用於森林氣象、水文、環境監測等研究領域，提供場地尺度近連續性的微氣象觀測，國際間亦有數個通量觀測網路(AmeriFlux, EuroFlux, AsiaFlux, OzFlux)合作，針對不同生態系進行常態性的渦流協變性系統觀測；本計畫藉由與國家實驗研究院颱風洪水研究中心合作，進行森林生態系的二氧化碳通量觀測，分析林分層級(100-1000m)的淨生態系統交換(Net Ecosystem Exchange)，並藉由夜間生態系統呼吸作用(Ra+Rh)與生物溫度的關係，估算總初級生產力(GPP)，藉此與 MODIS 遙測 GPP 成果進行定量上的比對驗證，以下分別就通量塔觀測規劃、二氧化碳觀測資料成果、NEP 資料分析流程以及比對成果進行介紹。

1.4.1 通量觀測資料收集與塔臺選址考量

MODIS 遙感資料提供大範圍區域森林碳匯的概觀資訊，但遙感推演所需的生態參數、理論模型及文獻中資料驗證的實驗基地皆以國外森林環境為主，為驗證 MODIS GPP/PSNnet 在台灣地區的適用情形，藉由不同觀測平台進行適地的比對驗證，能提供遙測資料在應用上較客觀的詮釋，並能對不同時空尺度的碳源碳匯變異情形更有效的掌握；本年度計畫透過與外單位合作，蒐集各通量塔台二氧化碳的觀測成果，並透過國家實驗研究院颱風洪水研究中心(以下簡稱颱洪中心)的協助，以移動式塔台持續進行碳水循環的觀測，並與遙感碳吸存資料進行比對驗證；目前已蒐集資料包含颱洪中心提供的霞雲水文站(2009/5/22-2010/1/8)、巴陵氣象站(2009/5/22-2009/12/26)、嘉義氣象站(2009/6/3-2009/6/26)、東石農場(2009/6/4-2010/5/14)的通量資料，中興大學莊秉潔老師提供的惠蓀林場北東眼山塔台資料(2009/1/1-2010/12/31)，以及由台灣通量網所下載，東華大學夏禹九老師所主持的棲蘭鴛鴦湖(2005/4/8-2006/12/13)通量觀測資料。

為能準確藉由渦流協變系統進行二氧化碳通量觀測，減少複雜地形下平流通量的影響，實驗場址的選地其實具有諸多考量，除了平坦地勢、地貌均質的森林環境，尚包含其他技術性考量，例如儀器安全(以現有人員駐守測站較佳)、無線資料傳輸的可及性、MODIS 資料產品涵蓋區域(以利資料比對)、儀器架設可行性(須能車行抵達架

設升降機)，若顧及二氧化碳的資料解讀，則架設場址以具有長期生態量測及氣象觀測的實驗場區為佳；受到台灣地區平地環境高度利用的影響，要尋覓適合的觀測場址其實具有相當的困難性，本計畫分別於一月及二月份針對南投蓮花池、嘉義氣象站、桃園石門水庫、新竹新豐地區進行初步的現場勘查(表 3)，並進行場址選定條件的初步評估；經由與颱洪中心協調，在考量儀器安全、穩定電源供應、交通便利等前提條件下，初步規劃於阿里山氣象站進行架設，而氣象站長期的氣象觀測資料，以及位處中高海拔地勢(2400m)的針葉林林相，能在現有塔站觀測中佔有其獨特性；唯實際的架設時程，仍需考量颱洪中心的儀器配置規劃，以及氣象局方面的溝通協調，本計畫持續與颱洪中心進行磋商討論，預期於年底進行嘉義山區的二氧化碳通量觀測及森林碳吸存估算，並於明年度計畫持續進行遙測與通量資料的比對驗證。

表 3 二氧化碳通量塔觀測場址勘查

場址	大雪山	阿里山氣象站	長興(石門水庫)	高饒(石門水庫)	新豐	桃園區農改場	蓮花池
縣市	台中縣	嘉義縣	桃園縣	桃園縣	新竹縣	桃園縣	南投縣
高度(m)	1840	2402	338	336	54	37	773
地貌類別	ENF	ENF	EBF	EBF	EBF	Cropland	EBF
坡度(°)	10	12	5	4	6	0	10
衛星影像 1km*1km							
現地照片							
日期	2011/3/22 2011/4/13	2011/1/28	2011/2/22	2011/2/22	2011/2/22	2007/11/14	2011/1/27
符合架設條件	2,3,6,7,8	2,3,4,5,6,7,8	1,2,3,6,7,8	1,2,3,6,7,8	1,2,3,6,7,8	1,4,5,6,7,8	2,3,4,5,6,7,8

註:架設條件-通量觀測考量條件:1 平坦地勢；2 地貌均質；3 森林環境；技術性考量條件: 4 儀器安全；5 電源供應；6 無線資料傳輸的可及性；7MODIS 資料產品涵蓋區域；8 車行抵達(儀器升降機架設)

渦流協變系統主要透過三維風速計及二氧化碳/水氣分析儀進行生態系統的碳水循環觀測，為有效解讀通量資料及生態系統的能量收支，渦流協變系統通常伴隨其他能量傳輸、水文收支及基本氣象變數的觀測，例如下行及上行短波/長波輻射、光合作用有效輻射、地表溫度、土壤熱通量、土壤溫度、土壤含水量、氣壓、氣溫、相對

濕度等參數；本計畫透過颱洪中心通量塔的設置及資料提供，進行二氧化碳通量與其他相關參數(例如光合作用有效輻射、溫度、蒸發散量)的分析，藉由與遙測資料的交互分析，能對森林碳收支在時空尺度的變化、碳吸存與光化反應以及碳循環與水文收支的物理機制有更概觀的了解。

1.4.2 渦流協變系統二氧化碳觀測成果

為了解二氧化碳在不同時空尺度的變化，並進行 MODIS GPP/PSNnet 資料比對，本單位與颱洪中心、水利署、石門水庫管理中心合作，於石門水庫霞雲水文站及巴陵雨量站架設渦流協變系統，取得 2009 年 5-12 月此兩測站的二氧化碳通量觀測資料，以及颱洪中心於嘉義氣象站及嘉義東石農場的觀測成果(表 4)；以下分別針對二氧化碳濃度及通量的觀測成果進行說明。

表 4 渦流協變性系統測站位置及分布

測站名稱		坐標、高度(m)	測站位置示意圖	觀測期程	測站地貌	地形
桃園	霞雲水文站	X:286,899 Y:2,742,827 Z:323		2009/5-至 2010/1	常綠闊葉林定居地	山區
	巴陵雨量站	X:290,000 Y:2,730,971 Z:1210		2010/5/-2010/12	常綠闊葉林定居地	山區
嘉義	嘉義氣象站	X:192,929 Y:2,599,131 Z:5		2010/6-2010/6	定居地	平地建物
	東石農場	X:163,753 Y:2,600,190 Z:1		2010/6-2011/5	草生地 水體 定居地	平地

註：坐標系統為 TWD97

光合作用的必要條件為 CO_2、水分、及光照環境的存在，CO_2 就如同作物耕植所用的肥料，左右植物的外在生長條件，故人為 CO_2 的急遽排放，以及大氣中濃度的急

遽上升，對不同植群的影響及其可能引發的植生演替與生物行為調適，皆為值得研究的課題；透過通量塔 CO_2 觀測資料的分析，能對植生生長及植林碳匯的外在環境有更充足的解釋；圖 25 顯示霞雲水文站及巴陵雨量站 2009 年 8 月份的二氧化碳濃度日變化，其值約介於 550 ~750mg/m^3 之間，除了明顯可見的日夜變化，在不同的高度海拔環境，受到重力的影響，二氧化碳濃度亦存有顯著的差異，且由於二氧化碳分子量(~44g/mol)較一般空氣平均值為高(~29g/mol)，濃度隨高度攀升而逐漸遞減，造成巴陵測站的環境背景值較霞雲為低;此外,劇烈天候事件影響紊流氣旋所產生的延散傳輸，且高濕度環境亦影響二氧化碳/水氣分析儀的觀測準確性，造成八八風災期間二氧化碳濃度值的劇烈波動。

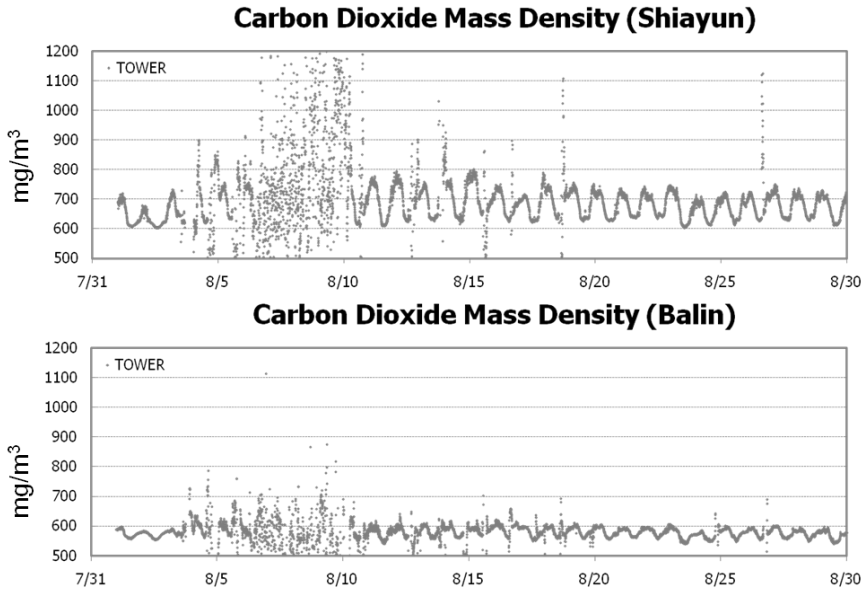


圖 25 霞雲水文站及巴陵雨量站 2009 年 8 月份二氧化碳濃度日變化

二氧化碳除了明顯的日夜變化，如將時間尺度延展，亦能觀測其季節性、大環境的變遷型態，圖 26 顯示東石(SE1)、巴陵(SE3)、霞雲(SE4)的每日二氧化碳質量濃度平均值，除了由於測點高度落差造成 CO_2 基線的差異外，所處區位差異亦造成 CO_2 週期變化時程的偏移，位處相似地理氣候區的霞雲、巴陵，其最低 CO_2 濃度值約在秋分時節，而在南方的東石測站則在週期上有往後挪移的現象，此反映出季節性的變遷不僅受到全球性太陽光照變化的影響，區域性的碳匯作用及天候型態亦左右其調幅的時程；就如同日夜濃度變化的相位隱含在季節性變遷中，區域性的影響亦依附在大尺度的全球氣候帶之內。

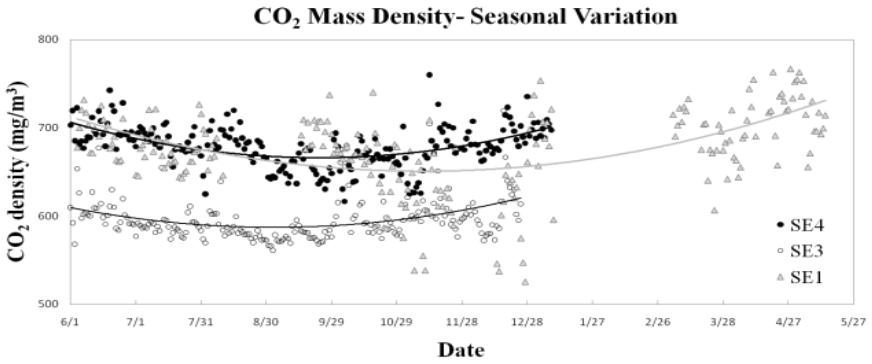


圖 26 二氧化碳季節性變化(每日平均值)

由於通量測點位處不同的地貌型態，林相及土地利用差異對 CO_2 濃度變化的影響為一值得探討的焦點；圖 27 顯示各測站每小時整點的觀測值，除了明顯的日夜週期變化，其變化型態則隨地貌而有相當大的差異，以自然植生為主的東石、霞雲、巴陵，白日的光合作用造成最低濃度值約在 10am-2pm 之間，振幅介於 50-100mg/m^3，而以都市建物為主的嘉義氣象站(SE2)，由於缺乏植生碳匯，人為的 CO_2 碳源左右濃度的急遽變化，造成日夜差異達到 500mg/m^3，且最高濃度值發生在 12-2pm 之間，週期型態恰好與天然植生區相反。

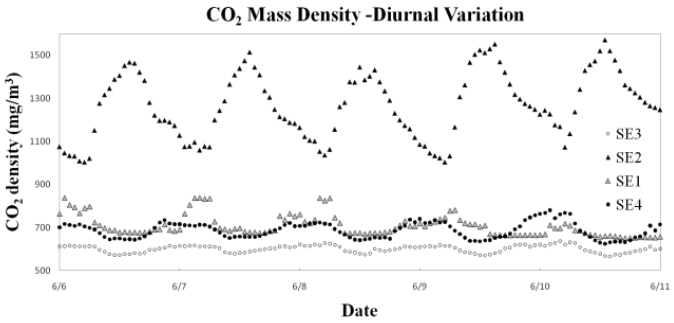


圖 27 二氧化碳日夜變化 (每小時整點觀測值)

如同 CO_2 濃度，CO_2 垂直通量亦呈現明顯的日夜變化，但所代表的觀測尺度卻有明顯的差異，濃度觀測為區域環境的背景值，代表大範圍尺度的 CO_2 存量(stock)，而垂直通量則主要針對觀測儀器下墊面的碳匯或碳源進行偵測，代表單位區域及時間上的變化量(flux)，受到儀器架設高度的影響，所觀測到上風處的 CO_2 交換不必然反應到此背景存量的差異上，此退耦現象則與觀測值的代表區域(受儀器架設高度、地形風場影響)及其均質性有關；圖 28 顯示渦流協變系統於 2009/6/18 嘉義氣象站及東石農場每五分鐘的輸出成果(20Hz 觀測頻率)，通量負值表示二氧化碳沉積，主要受到日間植

生固碳作用的影響，正值則代表二氧化碳排放，與人為排放源或呼吸作用造成的碳排放有關；由於東石農場的地貌型態以平坦均質的草生地及常綠闊葉林為主，6/18 二氧化碳通量呈現淨沈積(平均值:-0.191mg/m^2/sec)，亦即淨生態系統吸存；而嘉義氣象站位於都市建地，雖然下墊面為植草觀測坪，受到周遭工業及交通碳排放的影響，通量觀測呈現二氧化碳淨排放(平均值:0.066 mg/m^2/sec)，且通量由正轉負(碳排放轉換為碳吸存)的轉置時間較晚，此外，建物區複雜的地形風場亦造成觀測通量值的明顯波動；相對而言，東石測站二氧化碳通量的波動起伏較小，則與其資料輸出頻率，以及周遭較平緩的地形有關(觀測頻率皆為 20Hz，但輸出頻率相異，東石測站每 10mins 輸出(10mins 平均值)，嘉義氣象站為 5mins 輸出)。

在植生區，日間 CO_2 的垂直通量變化則與光合作用所需的短波輻射有關，圖 28 顯示東石測站每半小時的光合作用有效輻射(400-700nm)累積值，其變化量在時間上與白晝 CO_2 的通量變化呈現耦合現像，且無明顯的時間落差，表示在同一測點及短期距的情況下，入射輻射強度決定了生態系統的固碳能力。

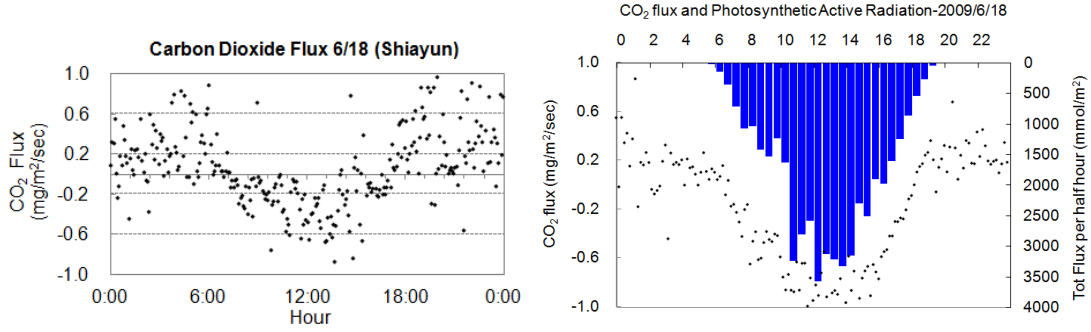


圖 28 6/18 嘉義氣象站及東石農場二氧化碳垂直通量、光合作用有效累積輻射

1.4.3 淨生態系統生產力分析

渦流協變系統以微氣象觀點出發，量測大氣圈與生態圈交界近地層的二氧化碳瞬時通量(二氧化碳沉積或排放)，提供高時間頻度的二氧化碳觀測(Net Ecosystem Exchange, NEE)(gCO_2/m^2/sec)，但由於生態系統的生態生理過程複雜，且受到不同時空尺度及背景環境的影響，生態研究除了著重此高頻的變化，亦關心在較長時間尺度下的淨生態系統生產力(Net Ecosystem Productivity, NEP) (gC/m^2/day)(式 1)，故本計畫透過高頻通量資料的篩選分析，演算日間光合作用及呼吸作用，以及夜間呼吸作用影響下的每日淨生態系統碳吸存(或碳排放)，以描述不同生態體系下的碳匯碳源分布，

並提供通量觀測與遙測資料的比對平台。

$$NEP = k * \sum NEE \text{ ……………………………… 式 } 1$$

k：碳與二氧化碳質量比

以渦流協變系統觀測的二氧化碳生態系統交換演算淨生態系統生產力，主要假定在理想的地形環境(下墊面地形平坦且植被均質)及大氣條件，當渦流發展良好，二氧化碳被紊流運動所混合，且平流通量較小的背景環境下，淨生態系統交換可以紊流產生的垂直通量來表示，此外，在每日的時間尺度下，土壤淋洗作用所產生的橫向交換可予以忽略；在實際的地形及大氣條件下，此理想環境時常難以充分滿足，且非理想的觀測環境亦呈現在通量資料品質上，故事前謹慎的定位選址，以及後續的資料篩選及資料填補(gap filling)為通量資料分析必須面臨的課題；在 NEE 的資料律定中，以鏡面汙染程度(AGC)、摩擦風速(U_{star})，能量平衡(energy balance)為主要的篩選條件，以確保分析數據為符合渦流協變系統觀測條件下的觀測數值，此外，以±1g/m^2/sec 為 NEE 篩選門檻值，主要考量在不穩定的天候條件下(降雨、颱風事件)，渦流協變系統觀測受到影響，造成通量值明顯的上下劇烈波動，且此非實際的通量背景值，故透過一絕對門檻值進行濾除；此外，為進行遙測碳吸存資料的比對，著重於生態系統的碳吸存或排放，故藉由二氧化碳分子量的比例(12/44)求取碳質量。

透過前述的資料律定及 NEP 分析流程，圖 29 呈現霞雲、巴陵測站 2009 年 5 至 8 月，以及嘉義及東石測站 6 月份的日間 NEP 分析成果，圖中實線則為各測站 NEP 趨勢線；在此四個觀測站中，東石農場 6 月份的 NEP 觀測值最高，此或許與其較低的海拔高度(較高二氧化碳濃度)、旺盛的闊葉林與草生地生長以及較充份的日照有關；其鄰近的嘉義氣象站則受到周圍人為排放源的影響，NEP 呈現較低數值，此外，即使為同一測站，NEP 日變化亦呈現劇烈擾動，部分日期呈現碳排放(負值)，而非碳沉積，此應與天候條件(日照強度、雲層遮蔽、降雨)對植生光合作用的影響，或降雨風災對渦流觀測的影響有關。

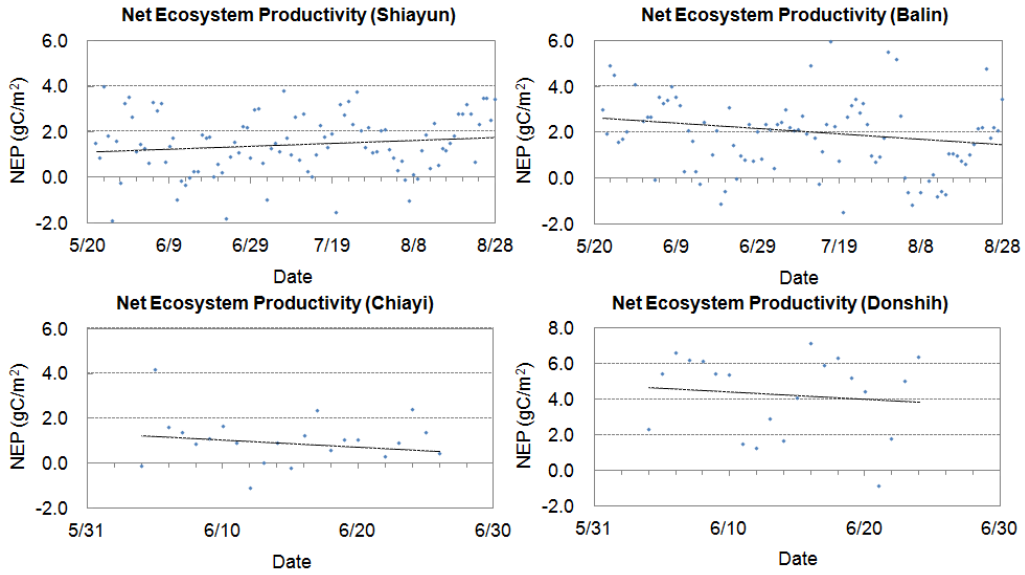


圖 29 霞雲、巴陵、嘉義氣象站、東石農場日間淨生態系統生產力

日間 CO_2 的垂直通量變化與光合作用所需的短波輻射有關(圖 32b)，而此相關性不僅反應在單日逐時的變化，若以日累積有效輻射及淨生態系統生產力(NEP)來看(圖 30)，兩者也呈現一線性關係($p<0.05$)，當然，若將時間尺度拉長，則影響 NEP 的變量則不僅是輻射強度，還包含了葉面積變化及其他氣候因子所產生的約制效應，但整體而言，此線性相關仍間接佐證了 Monteith 的研究，以及 MODIS 初級生產力演算式中 APAR 與 GPP 間的線性關係;而此線性關係亦反應當日累積輻射低於 0.011mol/m^2/day 時，綜合而言，東石農場將由碳匯吸存轉變為碳源排放。

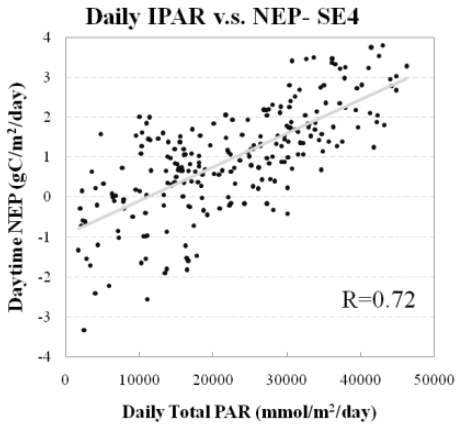


圖 30 霞雲測站日累積光合作用有效輻射與淨生態系統生產力關係圖

植物光合作用及固碳效率不僅受到入射光源強度的影響，在葉面氣孔打開的同時，植生水份亦受到蒸氣壓差的牽引，由植物內部蒸散出來，故植生蒸散及初級生產力的

偶合效應也為森林碳吸存能力的探討焦點，可作為植物水勢狀況與碳匯能力的評估依據；圖 31 為渦流系統觀測的每日日間淨生態系統生產力及潛熱累計值關係圖(霞雲測站 2009 年 5-12 月觀測值)，顯示兩者呈現一正向關係($p<0.05$)，但由於在夏季及雨季月份，水分蒸發主導了蒸發散(蒸發及蒸散)的潛熱貢獻，且此時有充足的水分，水勢壓力不構成光合作用的箝制因素，造成兩者間的的關係性不如在夜間來得顯著。

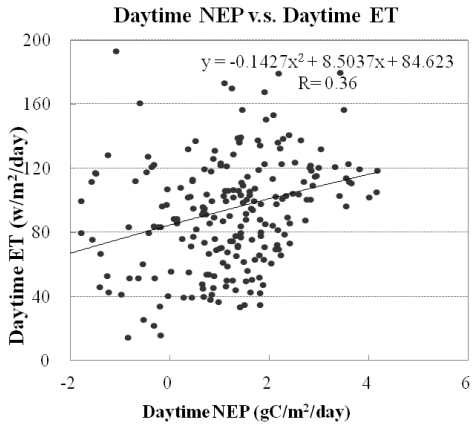


圖 31 霞雲測站日間淨生態系統生產力與蒸發散關係圖

在季節性的尺度上，日間與夜間的淨生態系統生產力趨勢線呈現一對應關係，顯示日間較高的光合作用固碳能力，亦需要較強的呼吸作用來支持，造成夜間較高的二氧化碳排放；由於植物葉面積呈現明顯的季節性變化，與此相對應的生物量亦須透過呼吸作用取得代謝所需的能量，且仰賴初級生產者的異營性生物及其活動亦與季節性變化有關，故日間與夜間的淨生態系統生產力受到近似的季節性因素所約制(例如生物溫度、水勢壓力)。

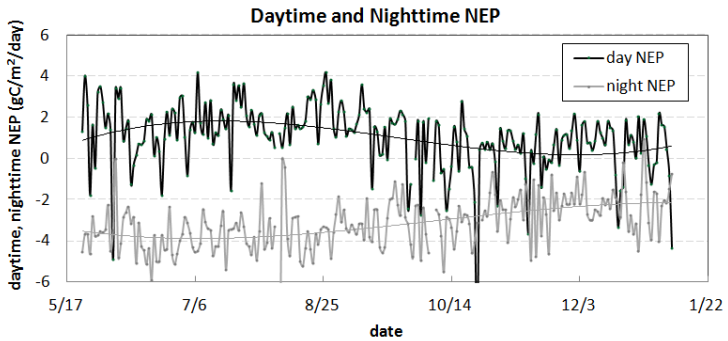


圖 32 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力季節性趨勢

但如將時間尺度縮短，則日間與夜間淨生態系統生產力在季節性的對應關係，並未充分反應在逐日資料的比對上(圖 33)，主要由於光合作用與呼吸作用分屬不同的機

制，日間及夜間受到不同的箝制因素所致，例如單日的雲層覆蓋造成白日的光合作用量降低(日間淨生態系統生產力降低)，但既有的生物本體仍需既定的呼吸作用來維持其生理機能(相對穩定的夜間淨生態系統生產力)，故兩者在微觀的時間尺度上，呈現出較不明顯的相對關係。

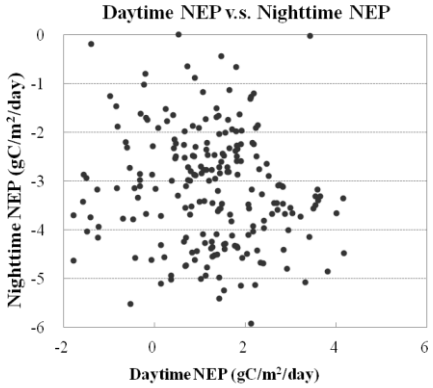


圖 33 霞雲測站日間與夜間淨生態系統生產力關係圖

日間逐時的淨生態系統交換與逐日的淨生態系統生產力，皆與光合作用有效輻射呈現明顯的正相關(圖 28、圖 30)，相對而言，夜間的淨生態系統生產力則單純受到呼吸作用的影響，故嘗試透過夜間溫度與蒸發散進行分析；圖 34 及 35 分別為霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間均溫及蒸發散的關係圖，其中夜均溫與呼吸作用(包含自營及異營生物)呈現出線性的相關性($p<0.05$)，而在蒸發散的比較上，夜間碳排放與蒸發散的相關性，則相較於日間碳吸存與蒸發散的相關性(圖 31)高出許多，顯示較高的日間溫度造成蒸發在蒸發散中佔有較大的潛熱貢獻比例，故在夜間較能呈現出呼吸作用與植物水分釋出的相關性。

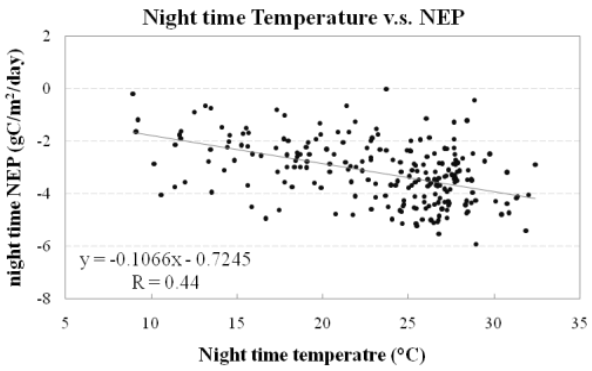


圖 34 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間均溫關係圖

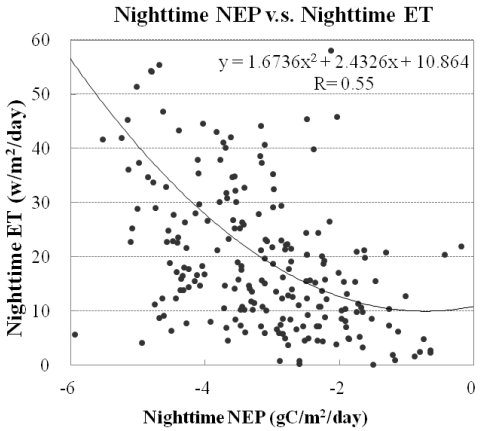


圖 35 霞雲測站夜間淨生態系統生產力與夜間蒸發散關係圖

1.4.4 遙測與通量資料成果比較

遙測技術透過冠層植生的光譜反應，在假定的環境條件下(土壤、地貌植生類別、氣候條件)，反演光合作用引發的初級生產力，故實際而言，遙測並非實際量測生態系統的碳吸存，僅為感應此生理過程所引發的光譜強度差異；為提供大範圍區域碳匯碳源分布的定量資訊，遙測成果與在地資料的比對驗證為遙測資料應用的前置條件，並能對其應用效能進行評估及改善，提供政策應用參考。

相較於遙測的推估，渦流協變系統則從森林氣象的觀點，以統計方式量測觀測下植被的淨二氧化碳交換，但由於並非從複雜的生理機制出發，無從得知量測淨值為自營生物的光合作用(碳匯)，或自營及異營生物的呼吸作用(碳源)所引發，僅能得知淨生態系統生產力；相對而言，光學遙測則結合生態系統模型，透過冠層植被的光譜吸收反應，提供自營性生物總初級生產力(GPP)及淨初級生產力、淨光合作用(NPP、PSNnet)的估算，但由於感測不到冠層下土壤及異營生物的生態行為，故無 NEP 的估測；由此可知，遙測及通量觀測由於立基不同，且有各自的假定條件，量測及推估的物理量也有所不同，但為進行兩者資料的比較，以對遙感估測資料進行驗證，需先建立合適比對的共同物理量；所幸在塔台通量觀測上，一推估呼吸量較通則的方式，為藉由夜間溫度及呼吸量的關係式，配合日間溫度的量測，推演日間自營及異營生物的綜合呼吸量，並透過此推估值與日間淨生態系統生產力量測值的加總，求得總初級生產力；本研究以此法進行塔台測點總初級生產力的推估，並進行 MODIS 遙測資料的定量驗證(圖 36)。

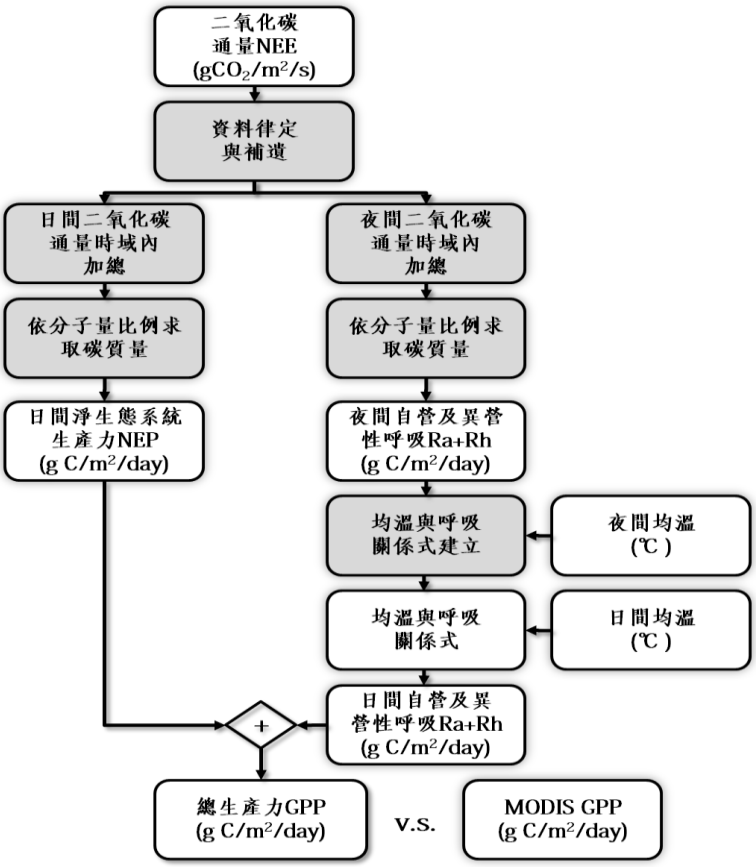


圖 36 塔台測點總初級生產力分析流程

以遙測與渦流協變技術觀測森林碳匯，不僅觀測的物理機制有所差異，觀測成果的時空尺度亦不相對稱，MODIS GPP 資料為 8 日週期，涵蓋全台範圍的 1km*1km 網格資料，而塔台觀測為每 5 分鐘的輸出週期，量測塔台上風處約 200-800m 區域(依塔台架設高度相對於冠層高度而定)，故進行資料比對，須先匹配兩者的時空範圍；圖 41 顯示 2009 年 5-12 月霞雲測站 MODIS 與塔台 GPP 的時間變化趨勢，MODIS 資料為塔台點位周圍 5*5km 區域內平均值(±1 標準差)，以 5*5km(25 像元區域)區域為分析範圍，主要考量到遙測光學影像的空間幾何誤差及雲層覆蓋影響；塔台 GPP 則配合 MODIS 的資料週期，演算為 8 日平均值(±1 標準差)，圖中空白圈號則表示無 MODIS 觀測，主要由於在 8 日觀測週期內皆受到雲層遮蔽的影響，無法取得光合作用有效輻射分量，故無 GPP 推演值；由圖 37 及 38 的資料比對可知，儘管兩觀測平台各有不同的假定條件，其 GPP 仍呈現相似的變化趨勢(相關係數 0.7994)，顯示遙測資料能大致反映實地森林碳匯的定性變遷,但在定量的比對上， MODIS GPP 呈現出高估的趨勢，且在生長季產生較高的高估現象，可能與光合作用有效輻射分量的高估，或恆定的光

能利用效率有關，整體而言，如以塔台 GPP 為基準，則 MODIS GPP 高估約 30.2%；當然，通量觀測也有不確定性的存在，例如日間溫度與呼吸量的關係，未必如夜間溫度與呼吸量間所呈現的線性關係，其他如渦流協變系統量測的假定條件，以及降雨或颱風事件對通量觀測的影響，皆會提高塔台觀測數據的不確定性。

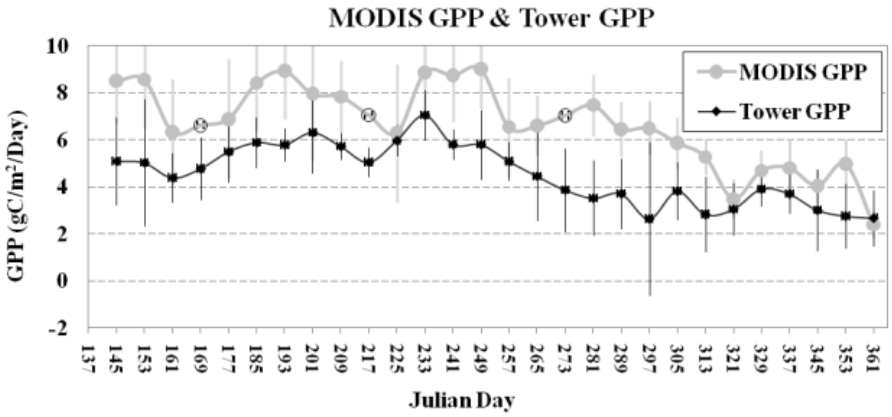


圖 37 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 時間變化趨勢

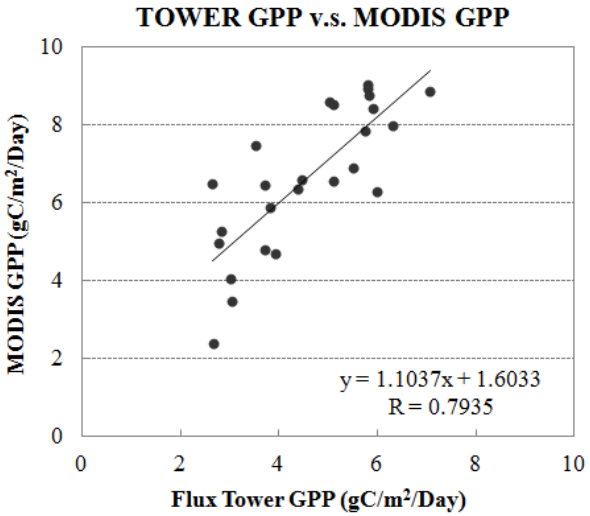


圖 38 2009 年 5 月至 12 月 MODIS 與塔台 GPP 資料比對

渦流協變系統原先發展於平坦、均質的下墊面植被，並推廣至全球不同生態體系下的二氧化碳、水氣、可感熱通量研究，台灣地區由於平地區域土地高度利用，森林環境主要位於地形起伏的山地區域，在非理想的假定條件下，其平流通量及夜間林下儲存項的分析，為當前國內渦流協變理論研究的重要課題；本計畫在通量資料分析上，主要參酌前人研究，藉由通量資料篩選律定，降低非理想觀測環境的影響，並透過日間呼吸量與 GPP 的估測，進行遙測推估資料的比對，明年度也將針對其他通量測站

的資料進行分析，透過多測站平台，多元地貌的初級生產力驗證，能對生態系統的碳匯碳源行為進行更詳細的詮釋，並對 MODIS 在台灣地區的應用效能進行較完整的評估。

1.5 地面實測資料收集與分析

森林碳匯的功能，可有兩方面來詮釋，其一為以遙測及渦流協變技術所量測或估測的碳通量，以單位時間及區域內的變化量表示，另一為碳存量，透過生質量的型式，以單位區域的碳質量來表示；生質量可透過 LiDAR、RADAR 等遙測技術進行蓄積的推估，或透過實地樹高、胸徑、及植株密度的系統性取樣量測，而後者為聯合國 IPCC 清潔發展機制中明定的計量方法，也為各締約國進行林業碳移除及建立國家溫室氣體排放清冊的主要依據；本研究雖以遙測植生初級生產力為主要的分析方法，提供台灣全島植生碳匯的概觀評估，但為求對森林固碳功能進行更全面的解析，亦嘗試蒐集蓄積量實測資料，透過多平台觀測方式的整合，從存量及通量來共同解讀森林碳匯在空間及時間上的變異，並期望能藉由多時期生質量的觀測數據，以差異數值評估碳通量及存量變化在定性趨勢的異同，或在定量上的比例差異。以實地量測進行的二氧化碳固存量推估，主要透過以下公式:

$$C_{plant} = V_{stem} \cdot V_{whole/stem} \cdot (W_0 / V_g) \cdot C_{con} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(式\ 2)$$

C_{plant}: 單株碳固存量

V_{stem}: 幹材材積

$V_{whole/stem}$: 擴展係數(Expansion Factor)

W_0/V_g: 基礎密度(Density)

C_{con} :碳含量轉換係數(Carbon Fraction)

上式中，$V_{whole/stem}$一般介於 1.3-2.0，但會隨林齡有所改變，W_0/V_g則介於 0.3-0.5 之間(IPCC 採用 0.5)，而 C_{con}則位於 0.46-0.49，一般以 0.5 進行計算(陳朝圳等，2011)。

1.5.1 樣區蓄積量測成果

配合葉面積指數地面樣區的建立，為了對生育地進行更完整的描述，結合森林生長及森林碳匯的探討，本研究在嘉義蘭潭及台中大雪山測區進行每木調查(樣區調查規

劃於 2.4.2 說明)，記錄樣區植株分佈、樹高、胸徑、植株種類、以及相關的生育地因子，並透過中興大學馮豐隆教授建立的立木材積推估模組，將各樹種材積式代入(圖 39)，分別針對闊葉及針闊葉林測區的單株材積及樣區材積進行演算，嘉義測區(樣區 2)的植株分佈記錄、材積計算、以及現場照片範例如圖 40-41、表 5，所有測區量測成果匯整於附錄 C。

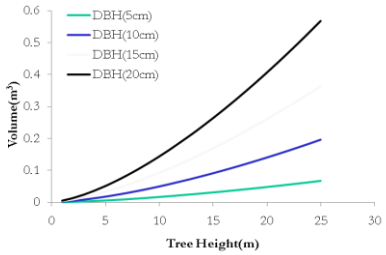


圖 39 材積式(以榕樹(*Ficus microcarpa* Linn.)為例)

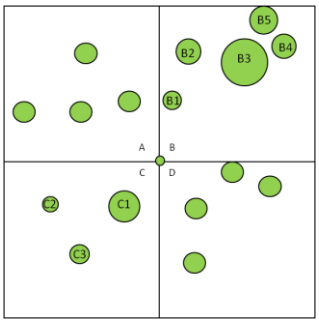


圖 40 植株分佈圖(嘉義蘭潭樣區點位 2)

表 5 單株材積及樣區材積計算(嘉義蘭潭樣區點位 2)

樹種組成		大葉桃花心木*8、鐵刀木*1		
平均樹高(m)		9.3		
總材積(m^3)		0.47		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	大葉桃花心木	9.24	9.92	0.0301
B2	大葉桃花心木	10.32	9.66	0.0366
B3	鐵刀木	27.23	6.90	0.1819
B4	大葉桃花心木	9.52	9.55	0.0308
B5	大葉桃花心木	10.67	5.77	0.0234
C1	大葉桃花心木	12.90	17.07	0.101
C1	大葉桃花心木	9.04	7.82	0.0227
C3	大葉桃花心木	10.06	9.36	0.0337
中心	大葉桃花心木	6.59	7.98	0.0123
註：每木調查為B、C象限				
材積式 $V= aD^bH^c$ V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)： 大葉桃花心木(a：0.00003556；b：2.000000；c：1.000000) 鐵刀木(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)				

圖 41 樣區環景照(嘉義蘭潭樣區點位 2)

1.5.2 大雪山樣區碳蓄積量推估

陳朝圳等(2011)匯整國內外現有文獻中的碳轉換係數資料(擴展係數、基礎密度、碳含量轉換係數)，為考量生育環境差異對林木生長的影響，參酌 IPCC 依雨量變異與高度海拔分佈，劃分台灣地區之氣候區與生態區，建立以生態氣候區所劃分之碳儲存推估系統；本研究以大雪山造林地測區(東勢林管處八仙山事業區第 38 林班地)為例，透過實地的胸徑、樹高量測，藉此系統推估每木的生物量、二氧化碳蓄積量(表 6)。

表 6 大雪山造林地每木碳蓄積演算成果

樣區	單株	樹種名稱	胸徑(cm)	樹高(m)	蓄積(m^3)	全株生物量 Mg(頓)	碳蓄積量Mg(頓)	二氧化碳蓄積量Mg(頓)
1	1B1	台灣杉	8.12	3.8	0.0089	0.006	0.003	0.01
	1B2	台灣杉	7.8	4.2	0.0091	0.006	0.003	0.01
	1B3	台灣杉	7.48	4	0.008	0.005	0.002	0.009
	1B4	肖楠	4.46	2.4	0.0017	0.002	0.001	0.004
	1B5	台灣櫸	11.78	5.7	0.0281	0.035	0.017	0.061
	1B6	台灣櫸	5.57	5.5	0.0061	0.008	0.004	0.015
	1B7	台灣櫸	5.89	5.4	0.0067	0.009	0.004	0.016
	1C1	台灣櫸	9.39	5.4	0.0169	0.024	0.012	0.042
	1C2	台灣櫸	9.24	4.3	0.0131	0.018	0.008	0.031
	1C3	台灣櫸	1.08	7	0.0003	0	0	0.001
	1C4	台灣杉	4.68	3.1	0.0024	0.002	0.001	0.003
	1C5	台灣杉	6.21	4.2	0.0058	0.004	0.002	0.006
	1中心	台灣杉	7.01	5.1	0.0089	0.005	0.003	0.009
2	2B1	台灣櫸	4.17	3.2	0.002	0.003	0.001	0.005
	2B2	台灣杉	13.38	5.25	0.0334	0.02	0.009	0.035
	2B3	肖楠	5.73	3.4	0.004	0.005	0.002	0.008
	2C1	台灣杉	5.25	3.2	0.0031	0.002	0.001	0.004
	2C2	台灣櫸	5.41	3.5	0.0036	0.005	0.003	0.01
	2C3	台灣杉	8.92	3.4	0.0096	0.007	0.003	0.012
	2C4	台灣櫸	5.92	5.2	0.0065	0.009	0.004	0.016
	2中心	台灣櫸	8.12	5.8	0.0136	0.018	0.008	0.031
3	3B1	肖楠	7.32	3.7	0.007	0.008	0.004	0.014
	3B2	台灣櫸	7.1	5.2	0.0093	0.013	0.006	0.022
	3B3_a	台灣櫸	12.8	5.8	0.0338	0.041	0.02	0.072
	3B3_b	台灣櫸	13.54	6.2	0.0404	0.049	0.023	0.085
	3C1	台灣櫸	9.71	5.3	0.0178	0.023	0.011	0.04
	3C2	台灣櫸	5.25	5	0.0049	0.007	0.003	0.012
	3C3	肖楠	4.33	4.3	0.0029	0.003	0.002	0.006
	3中心	台灣櫸	6.27	3.2	0.0045	0.007	0.003	0.012
樣區	總計株數		平均胸徑	平均樹高	總蓄積(m^3)	樣區生物量 Mg(頓)	樣區碳蓄積量Mg(頓)	樣區二氧化碳蓄積量Mg(頓)
1	13		6.82	4.62	0.12	0.124	0.06	0.217
2	8		7.11	4.12	0.08	0.069	0.031	0.121
3	8		8.29	4.84	0.12	0.151	0.072	0.263

1.5.3 永久樣區蓄積量及蓄積量變化

台灣地區自 1997 年起，各林管處即針對轄內林區進行永久樣區的每木調查，並以每隔約 5 年的期距進行複查，每樣區至今約有 2-3 筆的量測成果，可作為全台森林

碳匯分佈及遙測資料比較的參考依據；本計畫透過委辦單位協助，藉由林務局森林資源碳吸存資料庫管理系統，取得蓄積量匯整資料，並透過宜蘭大學王兆桓老師，取得紅檜、扁柏、肖楠、台灣杉、香杉純林樣區共計 227 筆的資料；經由歷次調查資料的匯整、樣點座標的匹配、資料篩選律定，進行蓄積量、碳蓄積變化量、以及光合作用碳吸存量的分析，探討不同地理氣候區及植群帶的碳匯能力，與遙測資料共同詮釋台灣地區森林碳匯的分佈情形。

歷次永久樣區分佈點位如圖 42 所示，蓄積量則透過樣區面積換算，以 m^3/ha 表示，其中第三次調查仍在進行，僅列舉已取得的資料成果；經由資料篩選，排除有疑慮的資料(蓄積量>2000m^3/ha)，在各地理氣候區中，以位處西部的 CW、SW、及 NW 蓄積量較高(所有樣區平均值)，並以位於中央山脊南北兩端的東北部 NE 區，及東南部 SE 區蓄積量較低。

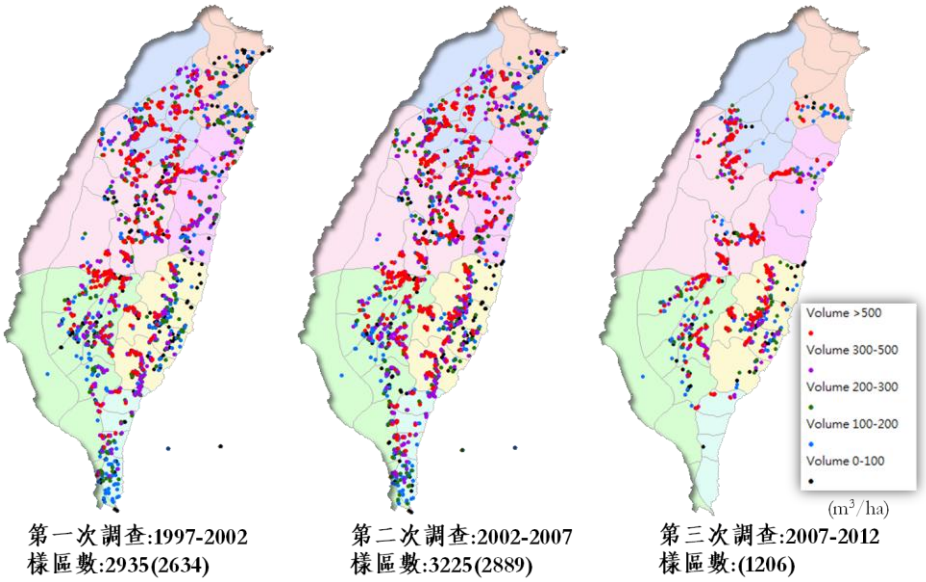
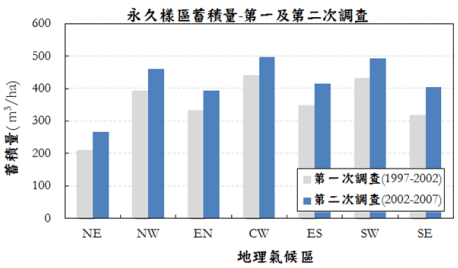


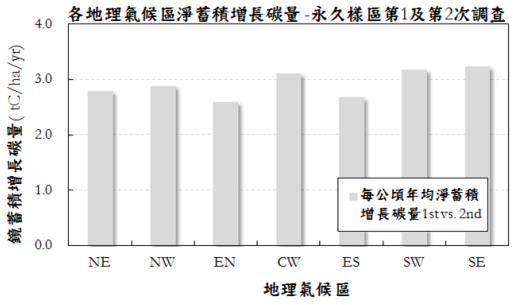
圖 42 永久樣區蓄積量及分佈點位(底圖為地理氣候分區)



永久樣區調查-每公頃蓄積量					
ecoregion	第一次調查(1997-2002)		第二次調查(2002-2007)		samples
	mean(m^3/ha)	stdev(m^3/ha)	mean(m^3/ha)	stdev(m^3/ha)	
NE	209.80	200.94	266.02	227.28	176
NW	392.76	303.66	459.84	327.59	225
EN	333.27	266.64	393.36	311.00	223
CW	439.78	359.80	497.72	392.25	432
ES	348.83	315.91	415.15	353.73	312
SW	431.08	365.76	494.01	409.71	393
SE	318.31	236.58	404.93	322.99	124

圖 43 各地理氣候區永久樣區蓄積量(第一及第二次量測成果)

在碳蓄積量的分析上，可透過歷次調查的蓄積量差異值，經由基礎密度(以 0.5 計算)與碳含量轉換係數(以 0.5 計算)的換算、調查期距的換算，分析每公頃年均碳蓄積變化量(tC/ha/yr)；以第一次(1997-2002 年)及第二次永久樣區調查(2002-2007 年)為例，經由資料篩選(碳蓄積變化量<20 tC/ha/yr)，在台灣本島的七個地理氣候區中，以位於南部及西部的 SE、SW、及 CW 區的碳蓄積變化量較高，並以東部的 EN 及 ES 區較低(圖 44)。



每公頃年均淨蓄積增長碳量1st vs. 2nd			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	2.79	3.67	176
NW	2.88	4.38	223
EN	2.59	4.09	218
CW	3.11	4.75	430
ES	2.67	5.39	303
SW	3.18	5.20	389
SE	3.23	5.43	119

圖 44 各地理氣候區永久樣區碳蓄積變化量(第一及第二次量測成果)

1.5.4 永久樣區碳吸存量

傳統森林碳吸存研究主要藉由蓄積量的淨消長，分析碳蓄積變化量，而蓄積量則以生立木為調查對象，枯死木及土壤碳庫則未顧及，但森林生長屬於動態過程，樣木枯死後，成為土壤碳庫的一分子，但仍為植生碳吸存的實際產出，雖一部分經由分解釋放至大氣中，但亦需耗費相當的時間，故僅透過生立木蓄積量的變化，排除枯死木的碳庫，其實是以較為保守的方式，來評估植生碳吸存的效能；以圖 45 為例，T_{j+1}(後期)生立木的蓄積量小於 T_j(前期)，如單純以蓄積量差異來判定碳吸存，則所呈現的是負值碳排放，但在實際的動態過程中，碳吸存一直持續在進行，並反應在 T_{j+1} 時留存木的生長量(樣木 2)、新增木(樣木 4)、以及枯死木在 T_{j+1} 枯死前的增長量(樣木 3)(式 3)，故有必要區分出自營生物的碳吸存，以及異營生物的碳排放，分別探討吸存及排放的效能(速率)，才能對森林的碳動態有較好的詮釋。

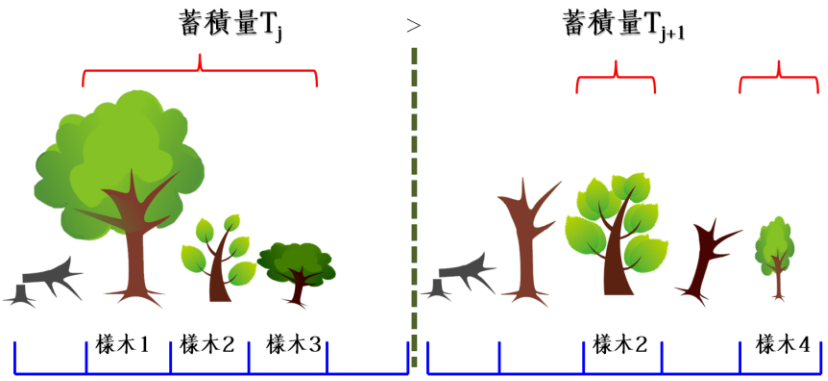
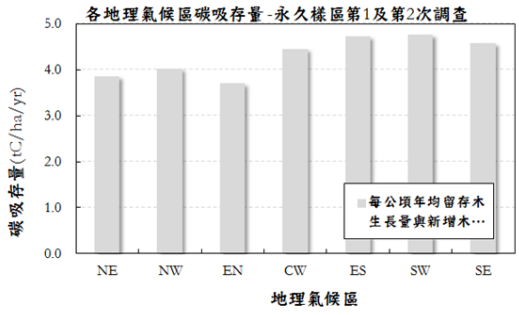


圖 45 蓄積量變化與碳吸存量

T_{j+1} 與 T_j 間碳吸存量=留存木生長量碳量+新增木碳量+枯死木枯死前生長量碳量(式 3)

透過林務局森林資源碳吸存資料庫管理系統，能取得各事業區樣區資料及兩期樣區材積(第一及第二期、第二及第三期)，包含前期樣區總材積、本期樣區總材積、本期存活木前期時材積、以及本期存活木材積等欄位資訊，本研究以本期存活木材積及本期存活木前期時材積之差，視為留存木生長量，而新增木材積則以本期樣區總材積及本期存活木材積之差進行演算，透過新增木與留存木生長量的加總，視為此期距間光合作用產生的材積增長量(永久樣區調查僅針對生立木進行調查，無從取得本期枯死木材積)，並透過基礎密度與碳含量轉換係數、調查期距、以及樣區面積的換算，分析出每公頃年均碳吸存量(tC/ha/yr)。

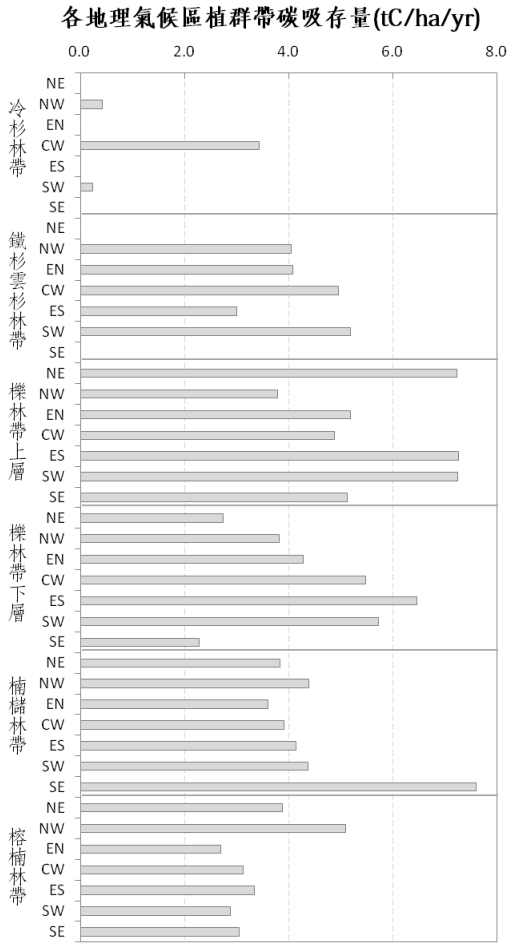
以第一次(1997-2002 年)及第二次永久樣區調查(2002-2007 年)為例，經由資料篩選，排除有疑慮的資料(碳吸存量>20 tC/ha/yr)，在台灣本島的七個地理氣候區中，以南部的 SW、ES、及 SE 區具有較高的碳吸存量，平均值介於 4.57~4.72 tC/ha/yr 之間，而北部的 EN 區及 NE 區較小，其值約為 3.70~3.85 tC/ha/yr；在空間趨勢而言，反應出光合作用量的南北差異，與地表淨輻射量的緯度分佈有關。



每公頃年均留存木生長量與新增木碳量1st vs. 2nd			
ecoregion	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	3.85	3.45	176
NW	4.02	3.42	225
EN	3.70	3.30	218
CW	4.45	3.85	432
ES	4.72	4.27	302
SW	4.76	4.34	384
SE	4.57	4.14	117

圖 46 各地理氣候區永久樣區碳吸存量(第一及第二次量測成果)

以階層為概念，進一步探討地理氣候區內各植群帶的碳吸存量(圖 47)，顯示各地理氣候區未呈現一致的植群碳吸存分布趨勢;若以相同植群帶進行分析,則楠儲林帶、櫟林帶上層、以及櫟林帶下層，在南部的地理氣候區大致呈現出較高的碳吸存，但榕楠林帶則以北部的地理氣候區較高。



每公頃年均留存木生長量與新增木碳量(1st vs. 2nd)				
Ecoregion	Ecozone	mean(tC/ha/yr)	stdev(tC/ha/yr)	samples
NE	櫟林帶上層	7.22	4.79	4
NE	櫟林帶下層	2.73	1.92	12
NE	楠儲林帶	3.83	3.31	99
NE	榕楠林帶	3.88	3.79	60
NW	冷杉林帶	0.42	0.48	4
NW	鐵杉雲杉林帶	4.05	3.11	23
NW	櫟林帶上層	3.78	2.65	57
NW	櫟林帶下層	3.81	2.71	50
NW	楠儲林帶	4.38	4.02	77
NW	榕楠林帶	5.09	5.22	13
EN	鐵杉雲杉林帶	4.07	3.69	17
EN	櫟林帶上層	5.19	3.52	23
EN	櫟林帶下層	4.27	3.30	32
EN	楠儲林帶	3.60	3.20	71
EN	榕楠林帶	2.70	3.03	54
CW	冷杉林帶	3.43	4.35	4
CW	鐵杉雲杉林帶	4.95	4.60	41
CW	櫟林帶上層	4.87	4.28	100
CW	櫟林帶下層	5.47	4.42	77
CW	楠儲林帶	3.91	3.22	179
CW	榕楠林帶	3.13	2.00	31
ES	鐵杉雲杉林帶	3.00	2.44	17
ES	櫟林帶上層	7.25	5.32	46
ES	櫟林帶下層	6.46	5.15	41
ES	楠儲林帶	4.14	3.80	147
ES	榕楠林帶	3.34	2.61	50
SW	冷杉林帶	0.23	0.16	3
SW	鐵杉雲杉林帶	5.19	5.94	19
SW	櫟林帶上層	7.24	5.28	49
SW	櫟林帶下層	5.72	4.57	82
SW	楠儲林帶	4.37	3.88	163
SW	榕楠林帶	2.87	2.50	69
SE	櫟林帶上層	5.11	4.38	4
SE	櫟林帶下層	2.28	2.30	9
SE	楠儲林帶	7.59	4.95	29
SE	榕楠林帶	3.05	2.51	65

圖 47 各地理氣候區與植群帶碳吸存量(第一及第二次永久樣區調查成果)

2 森林生長分析

2.1 森林生長估測與葉面積指數

2.1.1 森林生長估測

森林生長之估算與預測，為森林經營最重要的資訊。早期估測林木的生長量，以估算森林蓄積量、收穫量、輪伐期等，為林木生產業的重要資訊。林木生長潛力雖可由立地品位決定，但實際生長仍依現存樹種、林木密度與經營輔育方式而定。而近年來森林經營整合永續、水源涵養、土石保固及生物多樣性等原則，更注重森林碳吸存之功能及林木的生長蓄積過程。

森林生長主要在於植生的總生產量（Gross production）與維持呼吸消耗量（Total community respiration）的關係，在森林建立之初，生產量大於維持呼吸消耗量，故消費者可以逐漸獲取能量，此現象稱為生長系統（Growth system）或發育系統（Developmental system）。待森林成長至穩定狀態，總生產量與維持呼吸消耗量呈現平衡後，稱為穩定系統（Steady system），此時森林雖無法釋放多餘能量，但可保持土地肥力、防止水土流失，及維持穩定的森林生態系。當森林總生產量小於維持呼吸消耗量時，則森林生態系隨即發生退化，稱為老化系統（Aging system）。

在森林生長的估測上，主要分為單木生長與林分生長兩大項目。單木為構成林分之主要基本單位，保留過去的生長路徑，為估測及預測林分生長之基本資料來源。單木樹高、胸徑、樹幹形狀、材積生長曲線式的配置及立木材積式的推定，同為研究單木生長之基礎（陳朝圳，1985）。相較於單木生長，林分生長比其所組成之單株樹木生長複雜，因其除單木生長外，尚與隨時間變化之林分結構狀態及樹種或大小分佈有關。且林分生長測計及預測之實施，需要應用單株樹木生長之知識（邱祈榮，2006）。

森林資源調查涵蓋的範圍因調查的目的與內容而有所不同，目前已有三次全國性的調查，而第四次的森林資源調查正在進行中，其他森林調查多著重於局部生產林地或事業區，如每隔五至十年一次的檢訂調查。傳統上推估大面積林分生長，為先設置樣區並進行每木調查，針對胸徑、樹高等參數進行量測，再利用各樹種單株立木材積轉換公式求得樣區材積，進而推估全林分之生長，之後尚有藉由彩色正射影像配合地面樣區調查以估算林分材積。近年來應用遙測資訊進行林分調查逐漸增多，例如以空

載光達技術(LiDAR)推估林木樹高及樹冠孔隙等林木結構，或以被動式光學遙測進行植生指標、葉面積指數、淨初級生產力的推演，衛載遙測由於具有資料獲取週期短、涵蓋範圍廣、具重複觀測性及降低人事成本等特點，已廣泛應用於森林生態研究等領域。但被動式光學遙測並非實際量測森林生長，僅為藉由冠層葉面對光譜吸收反射的特性，感應光合作用的物理化學過程，進而反演其植生生產力及葉面積指數，因此利用遙測資訊推估森林生長需配合地面實測或透過多平台的觀測資料以進行佐證。

2.1.2 葉面積指數估算方式

植物葉面為陽光光譜吸受反射最主要的反應介面，也為光合作用植生生產最重要的營養器官，葉量多寡會影響生態系的初級生產力、呼吸作用、蒸散作用等生理反應，以及森林底層的透光度及泥砂沖蝕，為控制碳、水、養份、及光環境的重要因子，植物葉量常以葉面積指數來表示，即單位土地面積上的單面葉面積(單位 m^2/m^2)(Norman and Campbell,1989)，葉面積指數可作為評估林木初級生產力與環境狀態的指標，為森林結構和功能的基礎參數（Gholz, 1982）。植物在不同季節的抽芽、展葉、落葉等現象也會使得葉面積指數在一年內不同月份之間有可觀的變動（Maass *et al*,1995），通常在生長季達到最高，休眠季最低。自然環境的改變與人為經營的方式亦會造成葉面積的變動，例如當出現不利於林木生長的狀態，LAI 值會降低。

針對不同空間尺度，葉面積估算所採用的方式亦不相同，空間尺度較小者主要為地面估算法，包含破壞性取樣、落葉收集、光學儀器法等，區域較大乃至於全球尺度者，可透過結合遙測技術及統計模型或冠層反射模型進行推估，葉面積推演由於考量到冠層結構及光學遙測對樹冠反應的特性，故能有效反應高植生環境的森林生長情形。

2.2 MODIS 葉面積指數演算

本計畫引用 Terra-MODIS 葉面積指數產品作為森林生長的現況觀測及評估指標，透過每 8 日週期資料的時序分析，可初步瞭解國有林內森林冠層結構的季節性變化。MOD15 葉面積指數演算主要奠基於一植被冠層的輻射傳輸模型(Myneni *et al*., 2003)，此模型描述在既定的冠層結構(包含樹冠葉面積)、土壤型態以及特定陽光、視角的觀測

幾何下，能決定各光譜波段的雙向反射分配函數(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)，此模型藉由 Green's Function 及其他伴隨方程式以描述植生冠層中複雜的光譜散射吸收特性；在此模型架構下，遙測的葉面積指數演算其實為一反演問題的解決(Inverse Problem)，亦即給定 BRDF 及觀測幾何等相關參數，推演其相對應的冠層結構或冠層葉面積；由於不同的冠層葉面、冠層型態、及植生背景皆可能導致相同的冠層反射，且遙測所測得的冠層反射亦存有不確定性，故反演問題實際可能導致相當多解，而最終葉面積指數即由此多解的平均值所決定，且其精度則與離散程度有關。

MOD15 產品主要針對森林及草生地等自然環境進行 LAI 反演，在地貌分類屬於定居地、裸露地、水體濕地、冰雪覆蓋的區域，則無 LAI 演算值；圖 48 為 MOD15 的產品連結，其上源產品包含 MOD09 七個波段的地表反射值(648、858、470、555、1240、1640、2130nm)、MOD12 地貌分類及相關屬性資料；透過每 1-2 日的觀測，匯整為 8 日週期的資料產品，以降低大氣影響及不同觀測幾何所產生的成果差異。

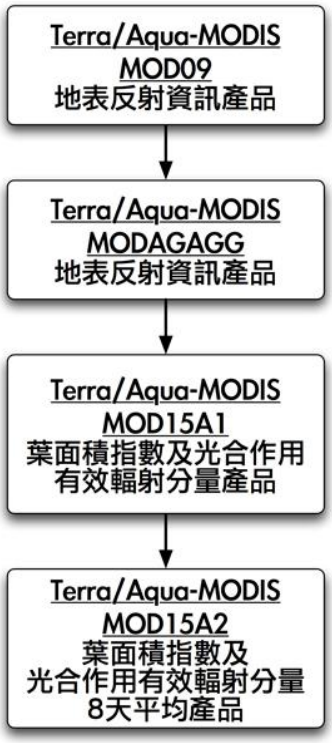


圖 48 MOD15 A2 LAI 產品連結

為降低雲層遮蔽的影響，並提供森林生長季節性的資訊本計畫將 MOD15 A2 產品以月平均 LAI 值輸出，其標準作業流程如圖 49 所示。

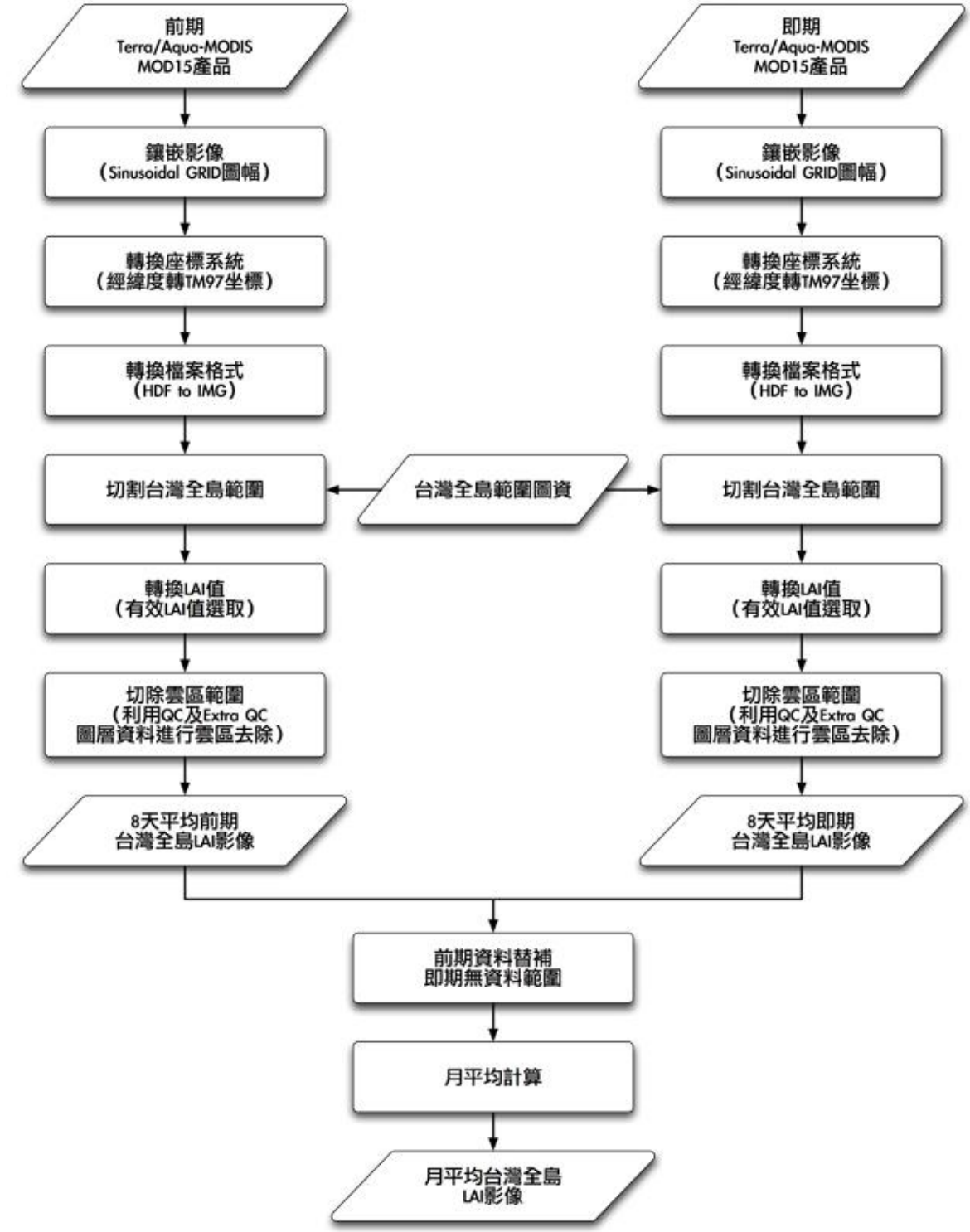


圖 49 Terra/Aqua-MODIS MOD15 A2 產品月平均 LAI 值標準作業流程

2.3 遙測資料成果

2.3.1 各植群帶葉面積指數變化

圖 50 為 2009/10-2011/9 國有林區各植群帶逐月 LAI 的分析成果，顯示當海拔上

升，各植群帶葉面積指數有逐漸下降的趨勢，而中低海拔的闊葉林帶，如榕楠林(Ficus-Machilus zone)、楠櫧林(Machilus-Castanopsis zone)與櫟林帶(Quercus zone)下層，呈現的葉面積指數較為相似；櫟林帶上層為針闊葉混合林型，因此葉面積略低於闊葉林的冠層狀態；其他如鐵杉、雲杉(Tsuga-Picea zone)及冷杉林帶(Abies zone)均為針葉林及高山植群，其葉面積較低。以生長趨勢來看，各林帶的季節性生長反應均呈現相似的情況，1 月份葉面積平均值較低，2 月後開始持續上升，但在 5 月略為減緩，或許與滯留鋒面有關，到了 6 月份，葉面積平均值上升的幅度較大，高葉面積持續至 9 月底，隨著生長季的結束，葉面積持續下降，整體而言呈現明顯的季節性趨勢。

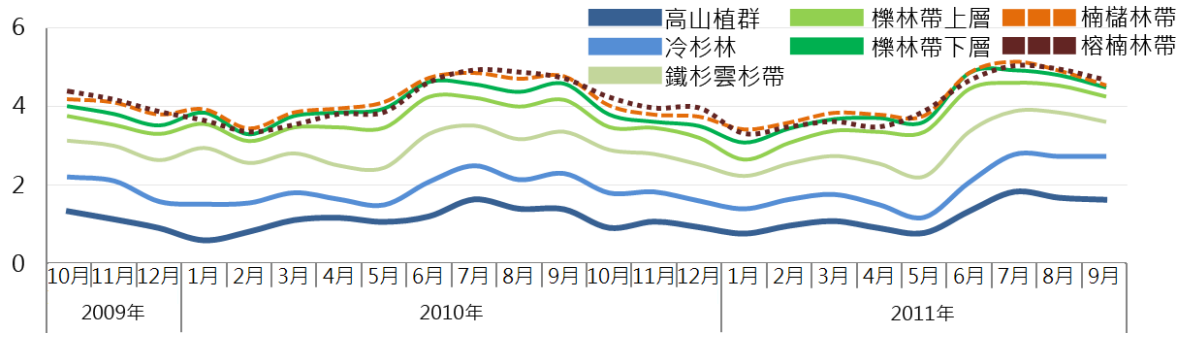
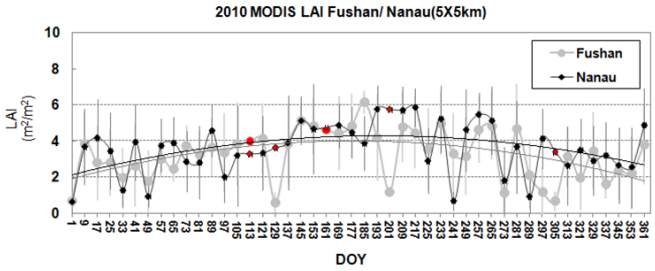


圖 50 2009/10-2011/9 各植群帶 LAI 時間趨勢圖

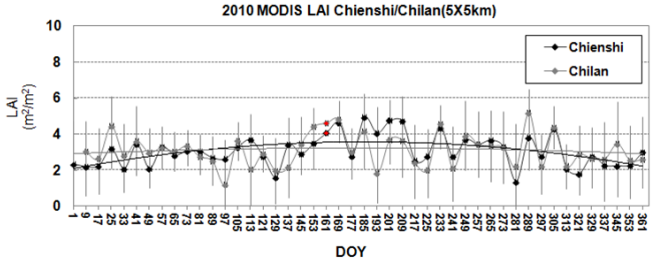
2.3.2 均質樣區葉面積指數分析- 植群帶與氣候分區

透過均質樣區的葉面積指數分析，以及樣區間葉面積指數的比較，能區隔影響森林生長的地理氣候區、生態植群因子，以對季節性的生長變遷進行更詳細的解釋；圖 51 為 2010 年福山、南澳、尖石、棲蘭樣區每 8 日週期的葉面積指數成果，為 25 樣本數的統計值；在同為 NE 區或鄰近 NW 區的 4 樣區，屬於闊葉林相的福山、南澳呈現較高的葉面積指數，且生長季與非生長季的葉面指數差異較針葉林的尖石、棲蘭樣區更為明顯；圖中 LAI 的上下波動，應為受到雲層干擾的影響，主要應關注季節性的變化趨勢。



Fushan
Annual mean: 3.26
Ratio of data available:0.75

Nanau
Annual mean: 3.63
Ratio of data available :0.66



Chienshi
Annual mean: 3.08
Ratio of data available :0.90

Chilan
Annual mean: 3.12
Ratio of data available:0.83

圖 51 2010 年福山、南澳、尖石、棲蘭樣區葉面積指數時序性變化

除了針葉林及闊葉林相的比較，竹林、高山植群、或南部的熱帶林相在生態區位上皆具有其獨特性，但在全台的分析中受到均化的影響，較難呈現其歧異度，本計畫藉由近期福衛影像及植群調查圖，挑選同屬或鄰近 SW 區(暖溫型氣候區)的屏東潮州、林內、玉山、南仁山樣區，分別為代表造林地、竹林、高山植群、熱帶林林相的 5*5km、或 3*5km 均質測區，分析其季節性的葉面積指數變化；其中玉山測區鄰近塔塔加長期生態實驗研究地，以及楠梓仙溪、沙里仙溪動態樣區，南仁山樣區亦為長期生態研究網的一部分，具有長期的生態觀測資料，而潮州造林地則為通量塔台的觀測點位；由分析成果顯示(圖 52)，林內竹林的葉面積指數較闊葉林為低，而高山植群的葉面指數亦較針葉林相為低，潮州植林地則屬於平地造林初期，故呈現較低的葉面積指數，相對而言，南仁山樣區以闊葉林相為主，呈現較高的葉面指數，且其森林生長的季節性趨勢呈現熱帶性氣候的型態，全年無明顯生長季的差異，亦即冬季及夏季的葉面積指數無明顯落差，此在台灣地區的生態環境具有特殊的意義。

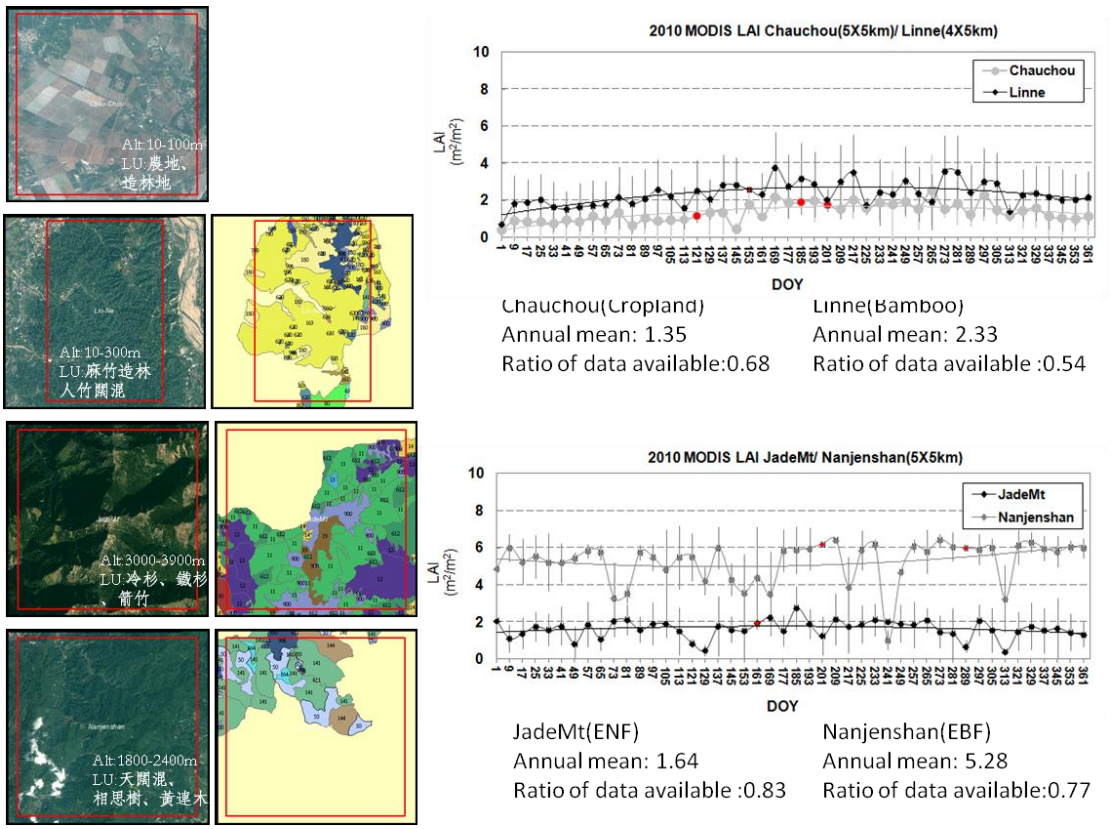


圖 52 潮州、林內、玉山、南仁山樣區衛星影像、植群類別、以及 2010 年葉面積指數時序性變化

2.3.3 人工林樣區葉面積指數分析

人工林的森林生長為林業經營的觀察重點，而粗放或集約的輔育方式會影響林木的生長狀況；本計畫針對位於太平山、和平、大甲溪事業區的柳杉、扁柏及紅檜、二葉松人工林進行葉面積指數的時序性分析(樣區描述詳見 1.3.1.5)，以瞭解林木生長的季節性變化；由圖 53 顯示，不同造林樹種在 2010 年的葉面積指數並沒有太大差異，以年度平均來看，以扁柏、紅檜為主的和平事業區樣區，其葉面積指數較高，此或許與其較早的造林年份有關，而此高葉面積指數，也反應在其年度較高的碳匯能力。

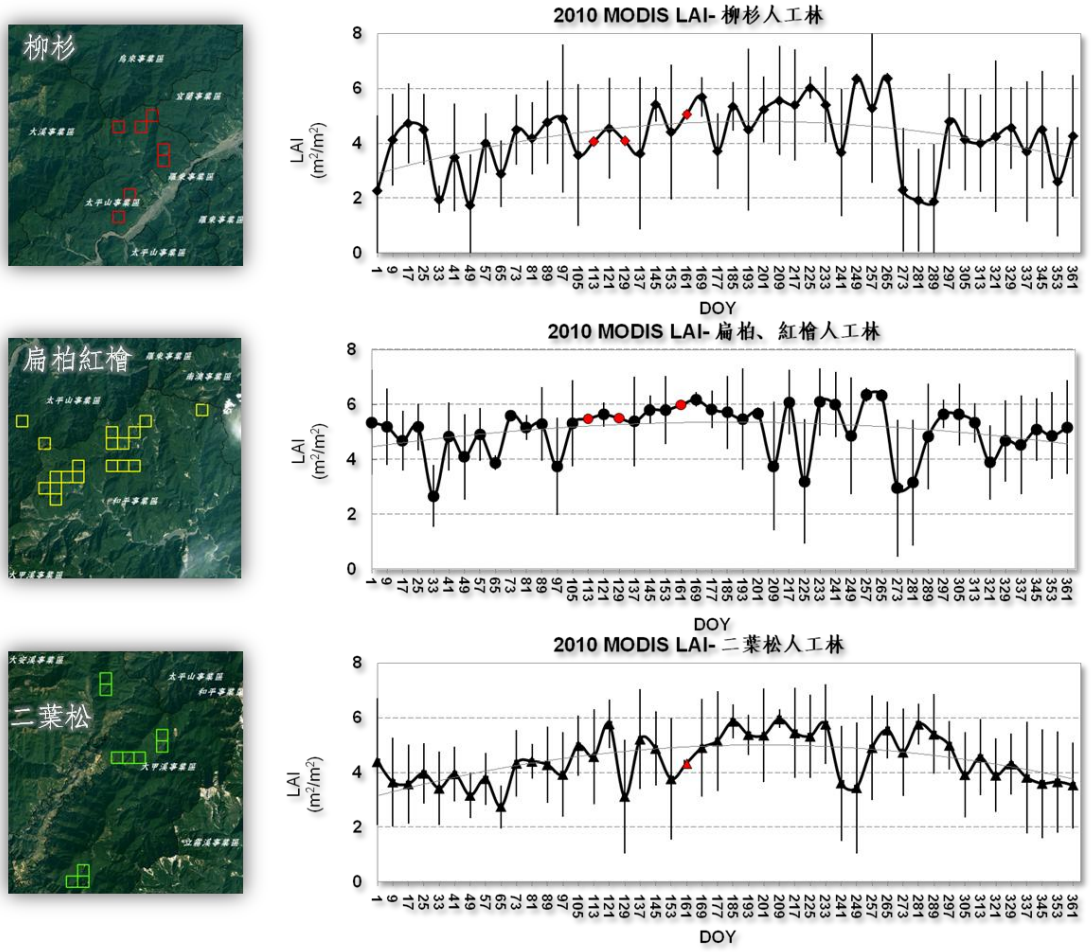


圖 53 2010 年柳杉、扁柏及紅檜、二葉松人工林葉面積指數時序性變化

2.4 葉面積指數實地量測

2.4.1 植冠分析儀量測方式

為驗證 MODIS LAI 資料，評估其在台灣地區森林生長研究的應用效能，今年度計畫與颱洪中心及中興大學合作，利用植冠分析儀(plant canopy analyzer)進行葉面積指數的實地量測；以 LI-COR LAI-2000 為例(圖 54)，其觀測原理為假定冠層葉片呈現隨機的空間分布，在既定的單一葉片消光程度下，即能透過測定太陽輻射通過林木冠層後的衰減比例，估算有效葉面積指數；LI-COR LAI-2000 由控制紀錄器及魚眼光感應鏡頭所組成，鏡頭上的感應器可同時監測 7°、23°、38°、53°及 68°五個角度的散射光，依此區分為五個環形，並使用濾光鏡限定入射的光譜波長介於 320 至 490nm 間，減少綠色葉片的反射光波，透過冠層上方(林外開闊空地或於林內高塔)及下方所測得的光

照環境相比，可分別求得樹冠孔隙率(gap fraction)及葉面積指數（LI-COR，1992）；為降低儀器觀測誤差，避免太陽直射影響，該儀器量測的首要條件為均質的光照環境，故較適宜在陰天或太陽仰角低於 30°的清晨或黃昏時量測，以減緩背景光照環境差異所產生的影響。

圖 54 LAI-2000 植冠分析儀(資料來源：Campbell Scientific)

2.4.2 實地葉面積指數量測規劃

為驗證 MODIS 葉面積指數資料在台灣地區的適用性，並分析其誤差範圍及評估資料應用上的考量與限制條件，本計畫分別在嘉義蘭潭(經度:120.4939˚,緯度: 23.4758˚)及台中大雪山區(經度:120.9698˚,緯度: 24.2256˚)建立葉面積指數實測測區(圖 55)，進行每月到每兩月的葉面積指數觀測；嘉義樣區屬於蘭潭水庫集水區保安林地，以相思樹(*Acacia confusa* Merr.)、血桐(*Macaranga tanarius* (L.) Muell. -Arg.)、麻竹(*Dendrocalamus latiflorus* Munro.)、桃花心木(*Swietenia macrophylla* King)、台灣欒(*Koelreuteria elegans* Dummer)為主要的闊葉林相，並以壤土為主要的土層結構，海拔高度介於 84-125m；大雪山樣區則位於東勢林管處八仙山事業區第 38 林班地，海拔高度介於 1680-1886m，包含以香杉((*Cunninghamia lanceolata* var. *konishii* (Hay.) Fujita))、台灣杉(*Taiwania cryptomerioides* Hay.)為主要林相組成的人工針葉混淆林(1985 年造林)，以及以肖楠(*Calocedrus formosana* (Florin) Florin)、台灣杉、台灣櫸(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)為主的人工針闊混淆林(2003 年造林)，依據鞍馬山工作站台帳資料，此區的植株密度分別為 680 株/ha 及 1280 株/ha，並定期進行幼齡人工林的刈草、補植等撫育作業。

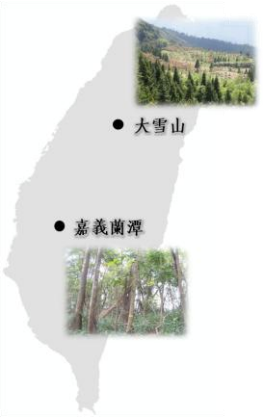


圖 55 嘉義蘭潭及大雪山測區位置

在量測樣區的規劃上，嘉義測區由於地形上的歧異度較大，著重於不同坡向的光照環境因子，以及人為干擾對植株生長的影響，配合數值地形模型分析的坡度、坡向，以及衛星影像分析的植生指標，挑選歧異度較大且步行可及的 6 個樣區；大雪山測區則著重於針葉及針闊葉混淆林的比較，以及不同林齡造林地的生長變化，同樣配合衛星影像植生指標的分析，共規劃 4 個樣區(圖 56)；在樣區設計上，每一樣區為 10m×10m 樣方(57)， 每一樣方以中心點位劃分為 A、B、C、D 4 象限，分別進行地上部材積量測、葉面積指數量測以及現地拍攝；葉面積指數量測分別於 4 象限中心點，以背對中心點，LAI-2000 儀器高度離地約 1m 進行量測(腰際處)，並以 4 筆資料平均值及標準差作為該樣區的量測數值；生物量量測則包含樹種辨識、植株分佈記錄、以及 B、C 象限每木植株的樹高、胸徑量測，藉此推算單株及全株生物量；樣區拍攝則分別針對 4 象限的樹冠鬱閉(仰式拍攝)、樹種以及中心點的環景進行拍攝；而植冠分析儀所需的冠層上光照背景值量測，則以鄰近的開闊地量測作為表示。在圖 56 中，各樣點周圍區域(以黃圈標示)則為植冠分析儀的觀測範圍，由各樣區平均樹高及量測儀器高度的落差，配合植冠分析儀鏡頭的 73˚觀測視角推算而得，主要由於實地觀測資料須配合衛星影像進行分析，故須明確界定實地量測數據在影像空間上所代表的範圍，以準確建立不同觀測平台量測參數間的關係。

圖 56 嘉義蘭潭及大雪山測區位置及測點分佈

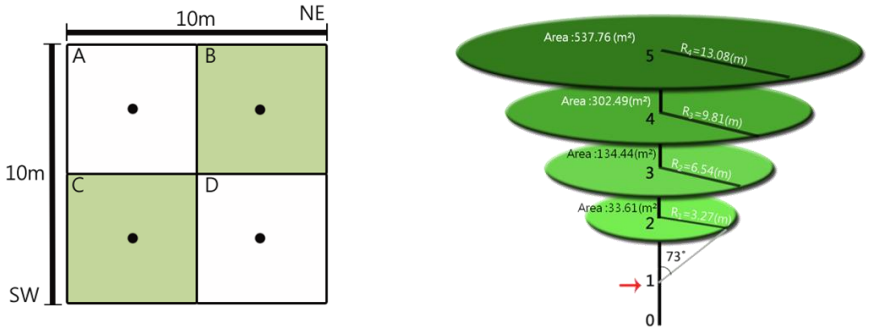


圖 57 樣區規劃及植冠分析儀觀測範圍示意圖

2.4.3 LAI 實測成果

2.4.3.1 嘉義蘭潭及大雪山葉面積指數實測成果

本計畫自今年度 3 月及 4 月份起，開始每月嘉義蘭潭及大雪山樣區的葉面積指數實測，記錄資料包含葉面積指數(LAI) (表 7、8)、冠層透光比例(DIFN)、平均葉面傾角(mean tilt angle)，及冠層狀況(圖 58)與光照環境的照片拍攝(詳細資料匯整於附錄 A)，並透過鄰近實測日期 SPOT 衛星影像的蒐集，分析測區的植生狀況(圖 59、60)。

圖 58 冠層空照圖-嘉義蘭潭樣區樣點 2(左)及大雪山樣區樣點 4(右)

表 7 嘉義樣區葉面積指數觀測成果

嘉義蘭潭試驗區實測LAI													
樣區		No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	
統計值		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
LAI量測成果	2011/3/23	2.31	o.15	3.43	0.07	2.76	0.03	1.55	0.12	3.12	---	3.47	---
	2011/4/20	2.88	0.14	3.30	0.18	2.92	0.13	0.68	0.13	2.29	0.19	2.99	0.15
	2011/5/18	3.07	0.12	3.68	0.26	2.61	0.16	1.78	0.06	3.77	0.19	3.19	0.18
	2011/6/22	3.61	0.13	4.15	0.07	3.49	0.39	2.36	0.14	2.09	0.24	3.55	0.17
	2011/7/28	4.19	0.14	4.14	0.05	4.43	0.63	2.96	0.13	3.05	0.30	4.05	0.25
	2011/9/21	5.43	0.40	4.54	0.09	4.40	0.37	2.11	0.18	2.62	0.49	3.15	0.21
	2011/10/19	5.15	0.29	4.56	0.27	4.77	0.16	2.37	0.14	2.72	0.29	3.21	0.13
林相		闊葉林		闊葉林		闊葉林		闊葉林		闊葉林		竹闊混合林	
坡向		西北		南		東北		---		---		---	
經營型態		自然生長		自然生長		自然生長		人為干擾		自然生長		自然生長	

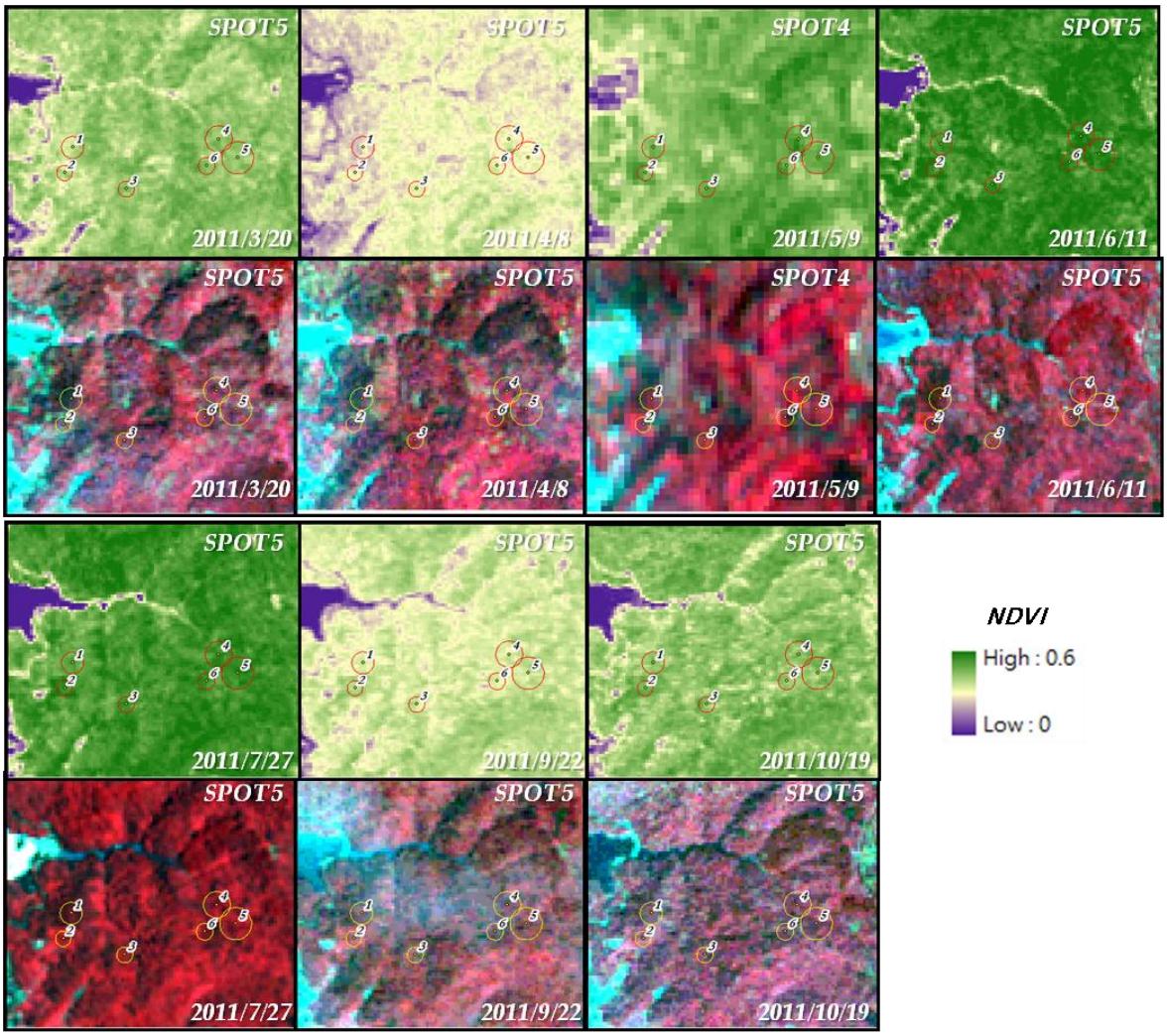


圖 59 嘉義蘭潭測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像

表 8 大雪山樣區葉面積指數觀測成果

台中大雪山試驗區實測LAI									
樣區		No.1		No.2		No.3		No.4	
統計值		平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差	平均值	標準差
LAI量測成果	2011/4/19	0.90	0.13	0.36	0.11	1.28	0.07	2.67	0.09
	2011/5/18	0.70	0.04	0.64	0.10	1.23	0.19	2.47	0.04
	2011/6/22	1.16	0.14	0.36	0.11	1.34	0.25	3.01	0.13
	2011/7/28	1.03	0.08	1.19	0.12	1.32	0.22	2.62	0.20
	2011/9/21	1.04	0.12	1.00	0.09	1.40	0.20	2.99	0.17
	2011/10/19	0.81	0.07	0.85	0.09	1.33	0.13	3.11	0.19
林相		人工針闊混合林		人工針闊混合林		人工針闊混合林		人工針葉混合林	
坡向		南		南		南		東	
造林年份		2003		2003		2003		1985	

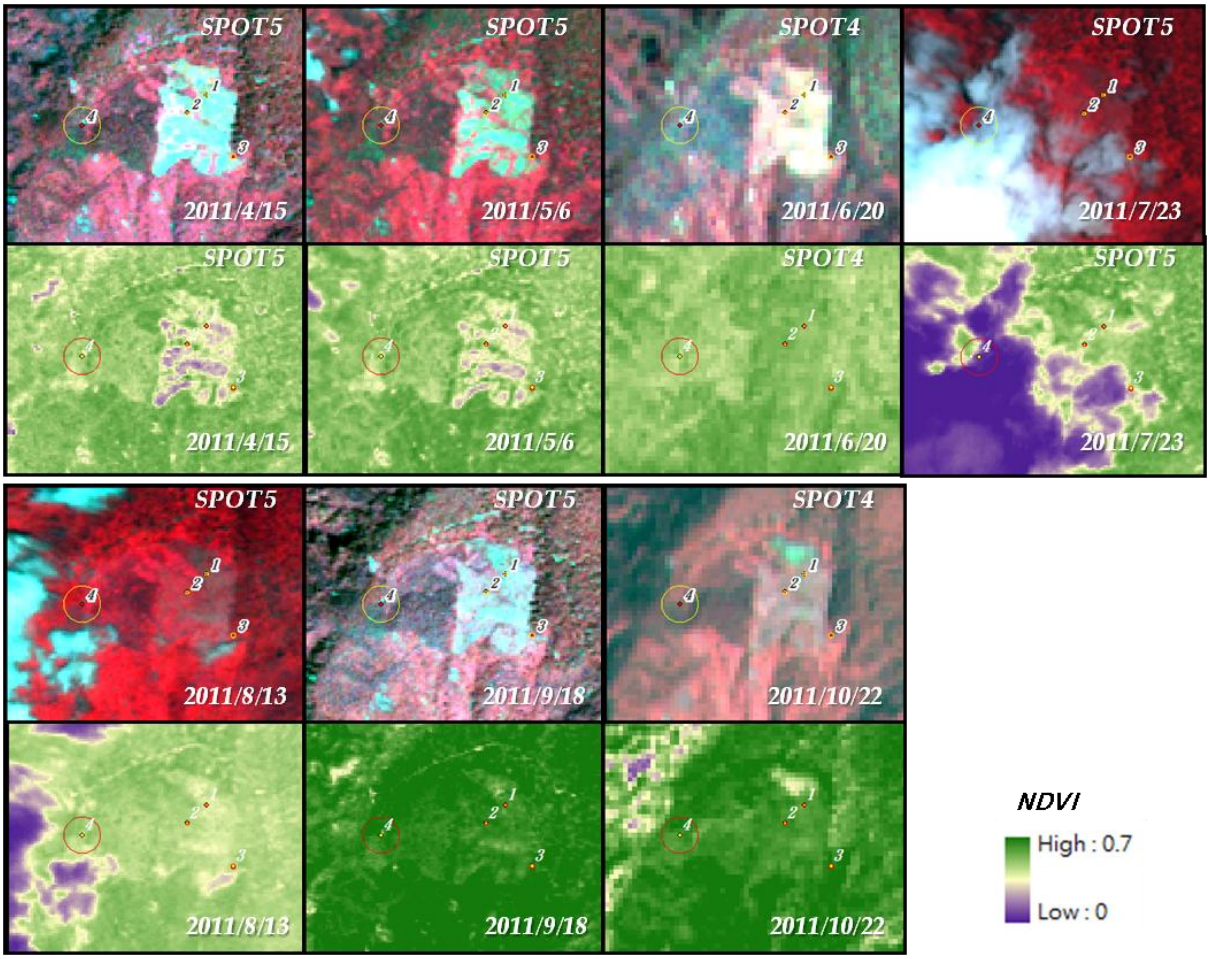


圖 60 大雪山測區 SPOT 衛星影像及 NDVI 影像

由葉面積指數觀測成果所示，嘉義及大雪山樣區分別在 4 月及 5 月底的觀測數值呈現微幅降低，隨後逐漸升高，但各測點的生長趨勢卻不相同；在針葉及闊葉林的比較中，嘉義闊葉林相一般的觀測數值高於針葉林相(大雪山樣區 4)(圖 61a)；而在嘉義測區不同坡向的測點中，南向測點 2 的觀測值在生長季初期高於西北向的測點 1，但

此差異值逐漸縮小，到了夏末秋初後，反以西北向測點的 LAI 數值較高，顯示光照環境差異以及植物水勢壓力對森林生長的影響(圖 61b)；在嘉義測區點位 4 及點位 6 的比較中，則顯示人為干擾對光照環境的影響，造成點位 4 冠層下的透光度提高，並降低 LAI 量測數值(圖 61c)；而大雪山樣點 1 及點位 3 屬於新植林地，冠層尚相當稀疏，故相較於具有 25 年林齡的樣點 4，其葉面積指數較低(圖 61d)。

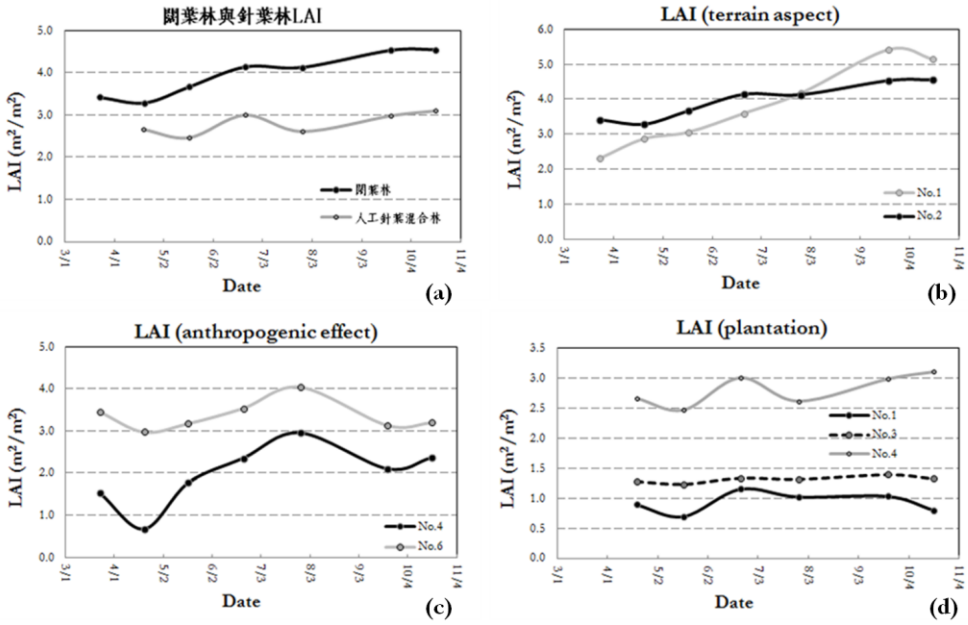


圖 61　實測 LAI 趨勢比較(a)闊葉林與針葉林；(b)南向與西北坡向；(c)人為與未受人為干擾影響；(d)新生林地與 25 年林齡造林地

2.4.3.2 不同植群葉面積指數差異

本計畫除了在嘉義蘭潭及大雪山測區，進行每月至每兩月時序性的葉面積指數觀測，也針對竹林、防風林、果園、檳榔園等台灣常見的植生型態，進行同時期多點多地貌的觀測；圖 62 顯示各地貌型態在 5-6 月份的量測成果，整體而言，以大葉桃花心木、血桐、相思樹為主的闊葉林相，其葉面積指數高於木麻黃(*Casuarina equisetifolia* Forst.)防風林及綠竹林(*Bambusa oldhamii Munro*)，而針葉林又低於前述的林相；在人工果園及檳榔園中，荔枝樹的單株葉面積大於柑橘類果樹，而檳榔園則介於兩者之間，不過檳榔園的觀測數值可能受到冠層下灌木及地形遮蔽的影響，造成觀測值的高估。

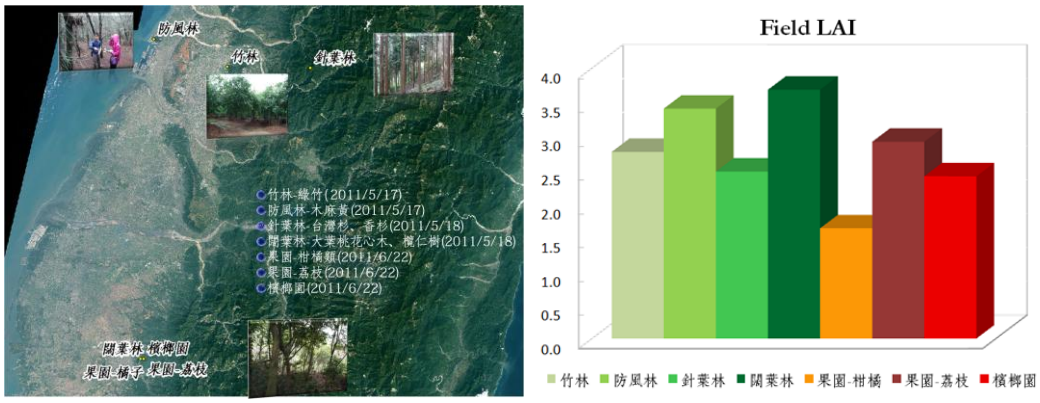


圖 62 竹林、防風林、針葉林、闊葉林、果園(柑橘、荔枝)、檳榔園葉面積指數實測點位及觀測成果

2.4.3.3 光照環境對 LAI 實測的影響

以植冠分析儀(LAI-2000)進行葉面積指數實測，主要透過量測冠層上下方光照環境的對比，在假定的冠層結構及葉片消光情形下，求得葉面積指數，故在理論上，不同時點及光照環境的差異，將影響量測到的數值；為確認此影響的程度，說明觀測成果可能產生的誤差，本研究針對同一測點，在不同的光照環境下進行多次觀測；表 9 為大雪山測區 4/19、4/20 共三次的量測成果，4/19 下午 3:00-5:00 屬於太陽直射光的光照環境，下午 5:00-6:00 及隔日早晨 6:30-7:40 則為散射光的環境，在直射光時的量測，以背對太陽光源，避免光源直射進入鏡頭的方式進行觀測，由觀測成果顯示，若以早晨及傍晚的兩組數據為對照組，直射光時的量測數據(配合前述的量測方式)並無明顯的高估或低估的現象。

表 9 大雪山測區在不同光照環境下的葉面積指數觀測值

樣區	LAI Mean1	LAI SD1	LAI Mean2	LAI SD2	LAI Mean3	LAI SD3
觀測時間	15:00-17:00		17:05-18:00		06:30-07:40	
樣區1	0.88	0.19	1.05	0.13	0.9	0.13
樣區2	0.42	0.03	0.43	0.02	0.36	0.11
樣區3	1.03	0.11	1.18	0.13	1.28	0.07
樣區4	--	--	--	--	2.67	0.09

為確認儀器的觀測高度是否會影響觀測數值的差異，並確定量測時所需的手持儀器高度，本研究也針對不同的量測高度進行測試，並以單一葉片完全覆蓋鏡頭的方式進行量測(圖 63)；經由觀測顯示，如地被層無叢雜的灌木或植生覆蓋，則在腰際 1m 處及地面 0m 的量測成果無明顯差異，但如有植生覆蓋(如姑婆芋)，則兩者數值即有顯著的差異；為確認此一影響，本研究以單一黃槿葉面覆蓋在鏡頭上，葉片上則為透空

環境，量測數值顯示其葉面積遠高於 1，由此兩項成果顯示，影響量測數據的因素不在量測高度，而是在所欲儀器量測的範圍，亦即儀器感應的不只是葉片的消光情形，還包含樹冠的結構，所以當鏡頭完全為單一葉面覆蓋，在儀器上所代表的是冠層已完全鬱閉，透光比例(DIFN)為 0，唯有高葉面積的冠層結構才能達成，故推算葉面積指數遠高於 1。

在儀器實測時，除了前述的使用考量，在某些特定環境下，也會影響觀測數據的代表性；理想的觀測環境為光照衰減主要受到葉面吸收所影響，但如在觀測環境內有過多非葉片的遮蔽因素(例如在密竹林內的觀測，或受到植株幹材遮蔽的影響)，則會明顯提高量測到的數值；此外，人為干擾也會影響光照環境的變化，例如冠層下的修枝、整地，造成冠層下的高透光度，進而降低量測到的葉面積數值。

圖 63 影響植冠分析儀實測數據的測試

2.4.4 遙測與實測 LAI 比對

MODIS 葉面積指數演算主要立基於一植被冠層的輻射傳輸模型，藉由接收可見光及近紅外光波段的冠層反射輻射，反演光合作用有效吸收輻射分量及葉面積指數，但由於 MODIS 著重於全球性的應用，其模型假定忽略地區性的變異乃在所難免，故實際應用仍需藉由實測資料的比對驗證，以評估在台灣地區的適用性。

在MODIS LAI與實測資料的比較上,所面臨的最大問題即為空間尺度的差異性，在地形地貌歧異度較大的台灣山區，要尋求均質的 LAI 測區具有相當的困難性，此均

質性包含林型、林齡、地形坡向、海拔高度等環境梯度，且實地取樣亦需顧及交通上的便利性及取樣所需的光照環境；在今年度的計畫中，嘗試透過不同的實驗設計，進行遙測與實測資料的初步驗證，其一為藉由高解析衛星影像的應用，作為遙測與實測空間尺度差異的間接橋梁，另一則為藉由 MODIS 單一像元內的系統性取樣，以量測平均質視為代表像元的觀測數值。

2.4.4.1 高解析衛星影像的應用

以高解析衛星影像作為間接橋梁，主要假定植生指標與實測葉面積指數間存在一對應關係，透過此關係式的建立，以及高解析影像演算的植生指標影像，能將點狀的 LAI 量測推估為面狀的 LAI 影像，並藉由相對應區域的平均值演算，與 MODIS 單一像元 LAI 進行比對；本計畫於 5 月份在大雪山林道 30.3km 造林地進行初步的實驗(圖 64)，配合鄰近實測日期的 SPOT5 衛星影像，分析量測 LAI 與對應影像像元的 NDVI 數值，並藉由此關係式(圖 65)，建立 10m 解析度的 LAI 影像，此影像與 MODIS 像元區域進行區域套合，LAI 影像平均值為 3.018，而 MODIS LAI 則為 3.033。

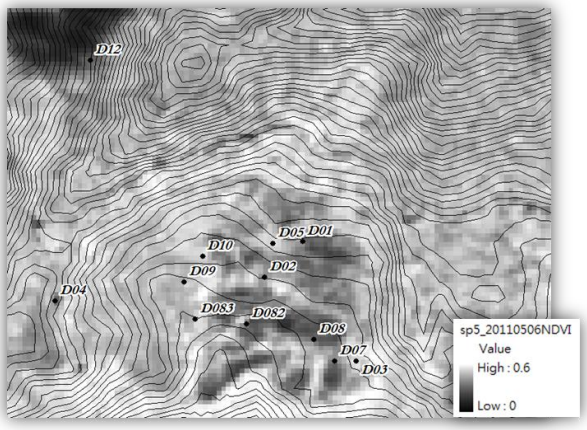


圖 64 SPOT5 衛星 NDVI 影像及葉面積指數實測點位

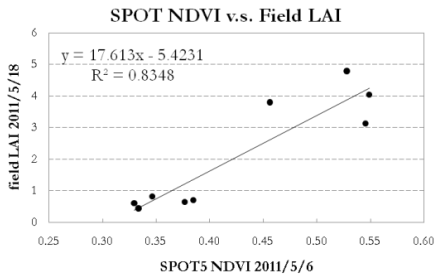


圖 65 SPOT5 衛星影像 NDVI 及實測葉面積指數相關性

2.4.4.2 LAI 系統性取樣

高解析影像應用雖取得初步的成果，但在實驗假定上卻存有相當瑕疵，包含 LAI 與植生指標間的假定關係、地形陰影影響，以及植生指標的在高植生區的飽和問題，故本計畫在大雪山林道 46km 處另進行 LAI 系統取樣，將 MODIS 單一像元區域區分為 16 個網格區域，並盡可能在網格的中心點位取得 LAI 觀測數值(圖 66)，透過此 16 點位的觀測(每點位取 3-4 筆觀測值，共計 60 筆觀測)，演算平均值為 3.62(m^2/m^2)，而 MODIS 相對應的 LAI 數值則為 3.8(m^2/m^2) (圖 67)。

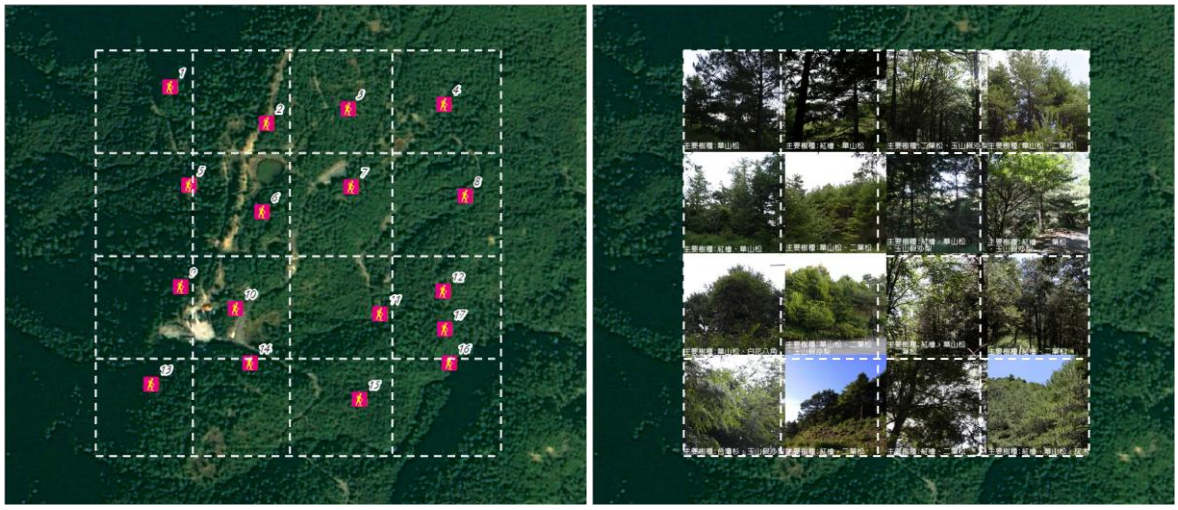
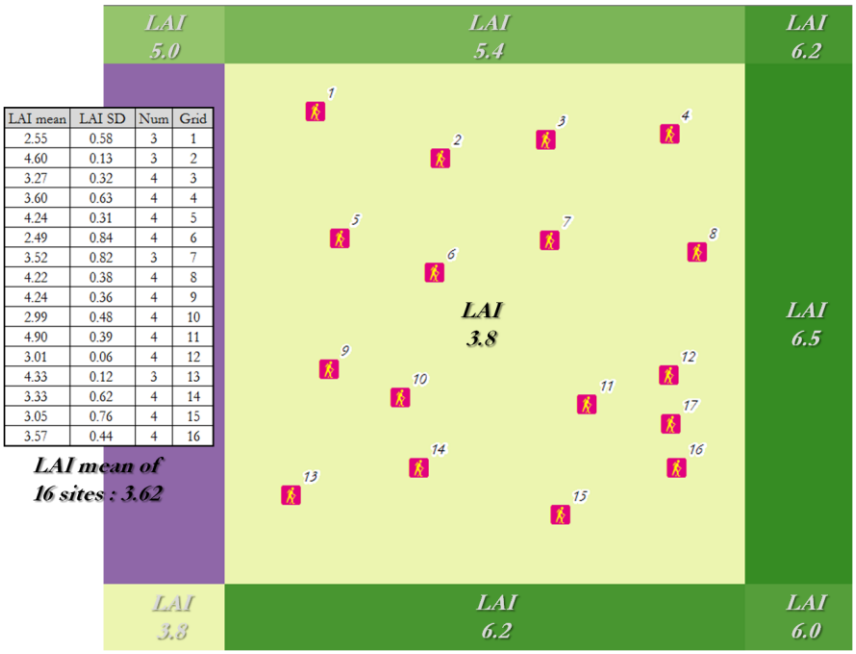


圖 66 大雪山測區 LAI 系統性取樣樣點與樣點林型



LAI mean	LAI SD	Num	Grid
2.55	0.58	3	1
4.60	0.13	3	2
3.27	0.32	4	3
3.60	0.63	4	4
4.24	0.31	4	5
2.49	0.84	4	6
3.52	0.82	3	7
4.22	0.38	4	8
4.24	0.36	4	9
2.99	0.48	4	10
4.90	0.39	4	11
3.01	0.06	4	12
4.33	0.12	3	13
3.33	0.62	4	14
3.05	0.76	4	15
3.57	0.44	4	16

圖 67 大雪山測區 16 樣點 LAI 量測成果與 MODIS LAI

3 森林健康研究

3.1 森林健康監測及遙測應用

3.1.1 森林健康及森林健康監測

森林健康是指森林生態系統對於乾旱、病蟲害、火災等外界壓力，具有一定抵抗能力，可保持良好的生態特性和更新狀態，以提供野生動物棲息環境、涵養水源、保固土石、並滿足人類對於森林木材生產等需求，發揮森林公益功能。傳統的森林健康監測以地面調查為主,配合因素分析法及判別分析法,萃取對森林健康最有利的指標，以判定林木的健康程度(王兆桓、陳子英，2002；羅時凡等，2008)。

由於近年日益嚴重的氣候變遷及空氣污染等環境問題，森林生態系所扮演的減碳功能及對外來壓力的容受能力等森林健康議題，亦逐漸受到各界重視(Smith, 2002；Moore and Allard, 2008)。美國農業部林務署(Forest Services)及環境保護局(Environmental Protection Agency)自 1990 年起即進行合作，執行常態性的森林健康監測計畫(Forest Health Monitoring),透過廣泛林分尺度的取樣調查,針對各樹種的冠層情形(樹冠密度、樹冠透視度、樹冠梢枯(Crown dieback)、活冠層比例)、根部狀態、植株生長及劣化(tree damage, growth, mortality, regeneration)、臭氧危害、苔蘚地衣層生物指標(bioindicator)、土壤養分及土壤侵蝕、植生多樣性、倒木及燃料負載(fuel loading)、動物棲地等多項指標進行現場調查，以提供例行性的森林健康及生長趨勢評估，並配合儀器或觀測站監測森林危害，作為林業管理及立法單位的法源依據（USDA Forest Service, 2005；肖文發等，2001；肖興威等，2005）；歐盟則以國際合作機構(International Cooperative Programme Forests, ICP Forests)執行森林保育計畫，探討大氣污染對森林健康所造成的影響,執行上則主要區分為兩個層面,包含 defoliation 及 discolouration 的視覺評估(visual assessments)，以及針對森林生態系對空氣污染的容受能力及環境因子的調查分析，包含土壤及土壤水分、空氣與降水品質、植株生長及葉面理化(foliar chemistry)、地被層植物組成及氣象資料等森林測計因子，以進行歐洲地區完整詳細的森林健康監測。

透過國家資源的森林管理及國土資源調查，雖可精確的針對森林健康或相關危害做詳細的監測，但相對的要花費較多的人力、物力成本，在有限的資源條件下，配合航測或衛載遙測技術，快速取得可重複性的大範圍空間資訊，為現今森林資源管理的

重要課題，並可藉由地理資訊系統的空間分析及系統整合功能，匯整多重觀測平台與類型的資料，以提升森林健康監測的效能(陳朝圳，2005；羅時凡等，2009)。

3.1.2 以遙測技術應用於森林健康研究

以遙測技術進行森林健康監測，能在相較於單株及林分尺度的詳細縱向調查下，於短時間內提供大範圍空間區域的橫向資訊，降低時域變化對植生生長所產生的影響，以有效輔助外業調查進行更完整的森林健康監測；光達 LIDAR 由於具有準確的三維空間定位能力，透過多重回波特性，能獲取樹高、鬱閉度、林分密度等森林結構資訊，以評估冠層閉合狀態及生物量等森林健康測計因子(Solberg *et al*, 2004)。

被動式光學遙測(0.4~2.5μm)則主要透過葉片中柵狀葉肉(palisade mesophyll)的葉綠素 a、b 及 β 胡蘿蔔素對可見光波段的吸收作用、海綿葉肉組織(spongy mesophyll)對近紅外光的散射作用，以及葉面水含量的分子震動過程(vibrational molecular process)，對樹冠葉面的光譜反應進行感測；Stone(2001)指出受到病蟲害的植生在光譜特性上與健康的植生會呈現明顯的差異，健康的植生吸收紅光(0.6-0.7μm)及藍光(0.4-0.5μm)，反射近紅外光(0.7-0.9μm)及綠光(0.5-0.6μm)(圖 68)，而非健康的植生受到葉綠素及含水量的變化，葉面顏色變黃甚至掉落，而造成光譜反射上的差異 (Green *et al*., 1997; Price and Bausch, 1995；謝漢欽，1998；陳朝圳等，2007)；因此，藉由不同波段的資訊組合，能對冠層葉片的枯損、落葉、褪色及枯死進行健康監測，常用的植生指標包含常態化差異水含量指標(NDWI)、土壤大氣修正植被指標(EVI)、植生亮度指標(PRI)、常態化差異植生指標(NDVI)，或藉由多波段輻射通量密度及反射輻射，評估光合作用吸收輻射比率(FPAR)及葉面積指數(LAI)；Zarco-Tejada *et al*.(2002)利用空載光學譜影像找出光譜反射與葉綠素含量間的相關性，並利用葉綠素含量瞭解植生劣化的情形；Pontius *et al*.(2005)利用空載高光譜影像偵測鐵杉受到干擾時之波譜反應，藉由遙測植生指標，鑑定其劣化狀況。

相對於光學波段主要針對冠層葉片特性的遙感探測，微波遙測則能藉由多角度、多波段、多偏極的遙感資訊，進行喬木冠層、灌木層、地被層、甚至土壤層，有關樹冠結構、介電性、土壤含水量、生物量等資訊，作為森林健康多項參數的評估依據。

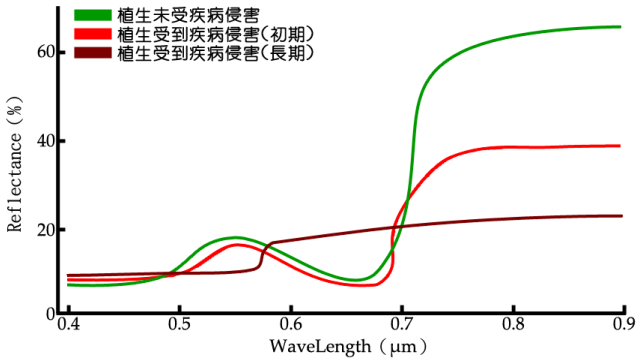


圖 68 不同植生健康狀態的光譜反射率(陳朝圳，2007)

3.2 以光學遙測進行森林健康監測

3.2.1 以 MODIS NDVI 進行森林健康監測的研究考量

植物生長會隨季節及環境而有不同的生長特徵，藉由遙測影像資料可瞭解植生樹冠在光譜特徵上的空間差異及動態變化，並可依據植生綠度反應植生量的高低(焦國模，1997)。以 MODIS 影像進行森林健康評估應用，能提供規律常態性且大範圍區域的地表資訊，藉由遙測植生參數提供一相對性的樹冠健康資訊，輔助林分尺度針對冠層的植生鬱閉度、林分密度、落葉以及及葉面褪色的視覺評估；遙測植生參數如常態化差異植生指標、植生初級生產力及葉面積指數，由於能反映地表植生覆蓋及植生生長狀況，可藉以評估植物受到外力影響(乾旱、病蟲害、林火、風暴、污染、人類干擾)所產生的植生劣化情形，作為冠層葉面植生健康的分析依據；但由於不同植株的光譜反應特性不同，且在 MODIS 遙測資料的空間解析度下，常包含多重植生種類的混合像元資訊，以單幅衛星影像所代表的植生資訊，往往僅呈現出不同像元區域的植生組成差異，而非實際森林健康差異所造成，且植生亦隨季節而呈現不同的生長特徵，夏季的植生反應較冬季為高，僅為生長週期的差異，不適合依此即判定夏季的植生較冬季健康；森林健康的評定，應有一參考基準，且考量到植生生長在時間及空間性的變量，才能探討森林受到病蟲害、火災、乾旱等非常態性干擾後的森林生理反應，並可藉由綠度改變評定其健康情形；Terrra MODIS 自 2000 年發射升空，至間已有近 10 年的地表觀測資訊，雖與全球氣候變遷及生態研究的時間尺度仍有落差，但能提供近年森林生態的動態概觀資訊，透過歷年(2001-2010)同期(每 8 日、16 日為一資料週期)植生參數的資料律定，能建立森林健康評定的參考基準，並藉此與特定年份且同期的植生參

數比較，能辨別植生綠度的差異程度及變異區域，降低季節性因素的時間變量影響，且由於此差值影像由相互獨立的分析像元所組成，每一像元維持其原有的植生分布比例，差異分析為時間縱向，而非空間橫向的分析，故能減緩空間變量造成光譜反應差異的影響。

在遙測植生參數的選定上，由於牽涉到歷年間影像的比較，需偵測出綠度變遷的區域，故植生參數的穩定性及準確性(repeatable)為首要條件，在光學遙測的應用上，大氣中雲層、氣膠的影響及觀測幾何(sun-earth-sensor geometry)的差異，為影像間比對分析的考量因素，其一解決方法為藉由準確的絕對輻射校正，以減緩大氣因素對散射光譜的影響，而在多時影像的分析上，可藉由選取晴空時期及最接近近地點(nadir view)觀測的影像，以減緩大氣及觀測幾何差異所造成的貢獻，當然，其前提條件為藉此輻射觀測值所推演的地表物理量，在多時影像的資料週期內無太大變化(故週期中某一日的準確觀測即能有效代表該週期的平均值)；MODIS 航帶跨幅 2330km，以台灣地區的緯度，每 1-2 日即能重複觀測，而 MODIS NDVI 以 16 日為資料週期，在各週期 NDVI 觀測值的篩選上，採用 Maximum Value Compositing(MVC)，亦即各 NDVI 像元值代表 16 日週期中的最大值，主要即考量雲層及氣膠皆傾向降低 NDVI 數值，而光學路徑(optical path length)愈長，受到的大氣影響亦較嚴重，故採用 MVC 方法，能篩選出最不受大氣雲層影響，及最接近近地點觀測的 NDVI 觀測值，在某種程度上亦達到常態化觀測幾何的效能，且由於 NDVI 藉由紅光及紅外光反射率演算求得，為地表植生光譜反應最直接的呈現；相對而言，GPP 及 LAI 雖亦為森林生長及植生綠度的參考指標，但其準確性除了受到前述大氣因素及觀測幾何差異對散射光譜的影響，另一考量因素則為模型推演的準確性，而在 MODIS 全球性觀測的前提下，其模型假定忽略地區性變異乃再所難免，故針對特定地區的應用，仍有賴多平台或地面實測以進行比較驗證，此亦為今年度森林生長及森林碳吸存研究的重要課題。

常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)由於能反映地表植生覆蓋及植生綠度，可藉以評估森林受到非常態性干擾所造成的植生異常情形，作為森林健康的分析依據，並廣泛應用於衛載遙測在陸域系統的森林生態研究及變遷分析(Eidenshink and Faundeen, 1994；Goward *et al.*, 1994)，其演算方式由紅光(620-670nm)

及近紅外光(841-876nm)波段的地表反射率演算而得(Huete *et al.*, 1999)(式 4)

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{\mathrm{Red}}}{\rho_{NIR} + \rho_{\mathrm{Red}}} \quad \text{.....（式 4）}$$

ρ_{NIR}=近紅外光反射率

ρ_{Red}=紅外光反射率

健康植生由於較高的葉綠素含量，以及較高的植生覆蓋，對陽光輻射中的紅外光波段產生較高的反射率，並吸收紅光輻射值，故在光學遙測影像中呈現較高 NDVI，相對而言，當植生受到外力干擾（乾旱、病蟲害、林火、風暴、汙染及人為干擾）及植生弱化，則呈現較低的植生指標數值。本計畫藉由 Terra MODIS 衛星例行常態的植生指標產品，評估台灣地區歷年間的植生情勢及植生異常情形，作為森林健康的探討依據。

3.2.2 常態化差異植生指標及植生異常指標分析

MOD13Q1 為 Terra MODIS 全球性植生指標資料，具有 250 公尺的空間解析(表 10)，以及 16 日的資料週期，在資料時序上，以一年中的日期天數(Day of Year, DOY)，以及每 16 日週期的首日作表示，亦即 001(1/1)、017(1/17)、...、353(12/19 or 12/18)，代表 16 日中其中一日的觀測值；本計畫蒐集 2001-2011 歷年觀測資料進行植生指標演算分析；在資料處理流程上(圖 69)，須先進行投影座標、資料格式的轉換，以及台灣本島區域的萃取，後續將像元值轉換為 NDVI 數值，並藉由 Science Data Sets 中的 Pixel Reliability，進行資料像元的篩選，剔除受到雲層、冰雪覆蓋影響的區域，以作為後續植生異常指標演算的所需資料(圖 70)。

表 10 MOD13Q1 植生指標屬性資料(資料來源：MOD13 ATBD)

Temporal Coverage	2000/2~
Area	~10 X 10 lat/long
Projection	Sinusoidal
Data Format	HDF-EOS
Dimensions	4800 X 4800 rows/ columns
Resolution	250 meters
Science Data Sets	12

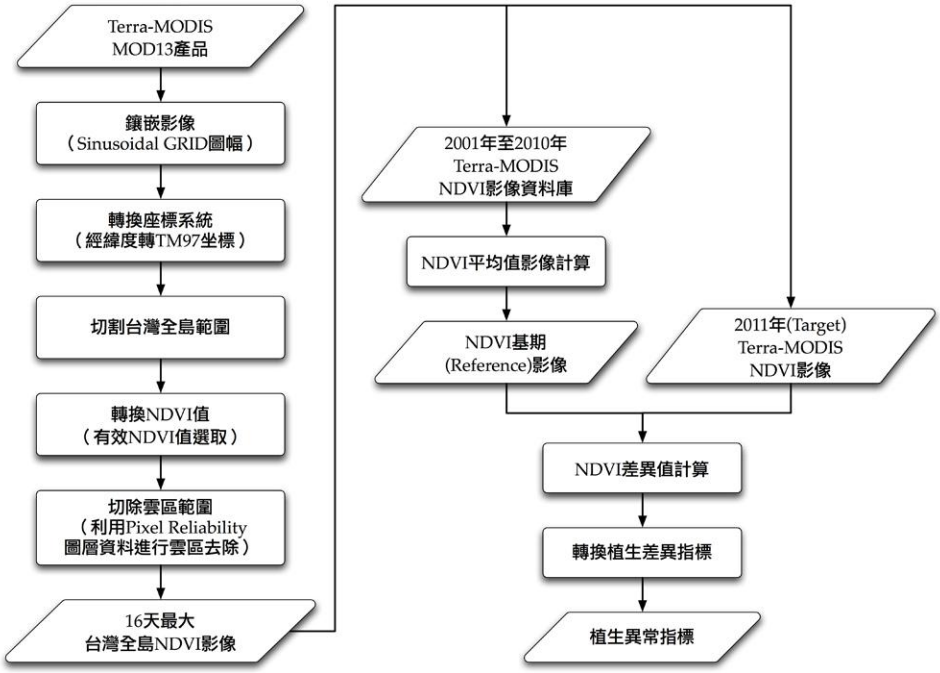
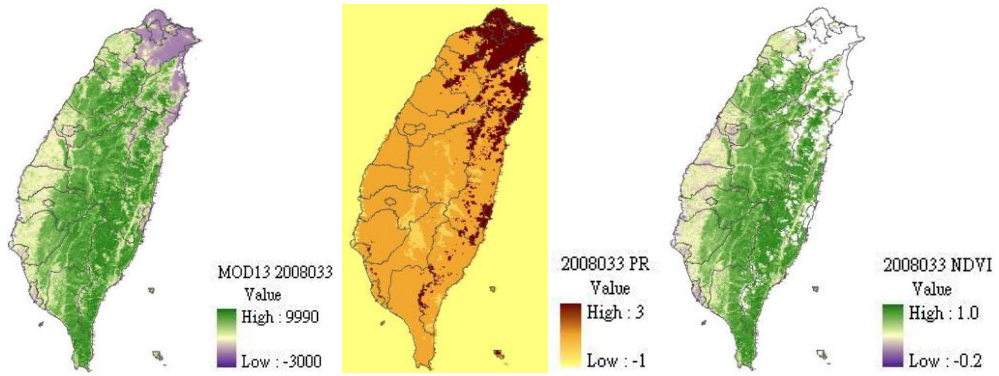


圖 69 植生指標及植生異常指標資料處理流程



(a) (b) (c)

圖 70 (a)MOD13 原始像元值；(b)Pixel Reliability；(c)經篩選及像元值轉換後 NDVI

3.3 植生異常案例探討

3.3.1 2009 年南部山區植生異常-88 風災

2009 年 88 風災在全台各地引發了不少災情，包含小林村的土石掩埋，以及西南部山區的大範圍崩塌，透過基期及即期影像的比較，以及植生異常指標的分析，可見西南部山區在此災害事件所受的影響；由於崩塌災害造成岩層的裸露，以及植生覆蓋的降低，VAI 中深紅色部分的區域，即為在本次事件中 NDVI 降低已超過 2 倍標準差的區域(圖 71)，且由於各像元間在空間上為獨立演算，互不影響，可視為各別的獨立事件，故圖中植生異常區域的聚集，亦提高了植生異常的可信度。

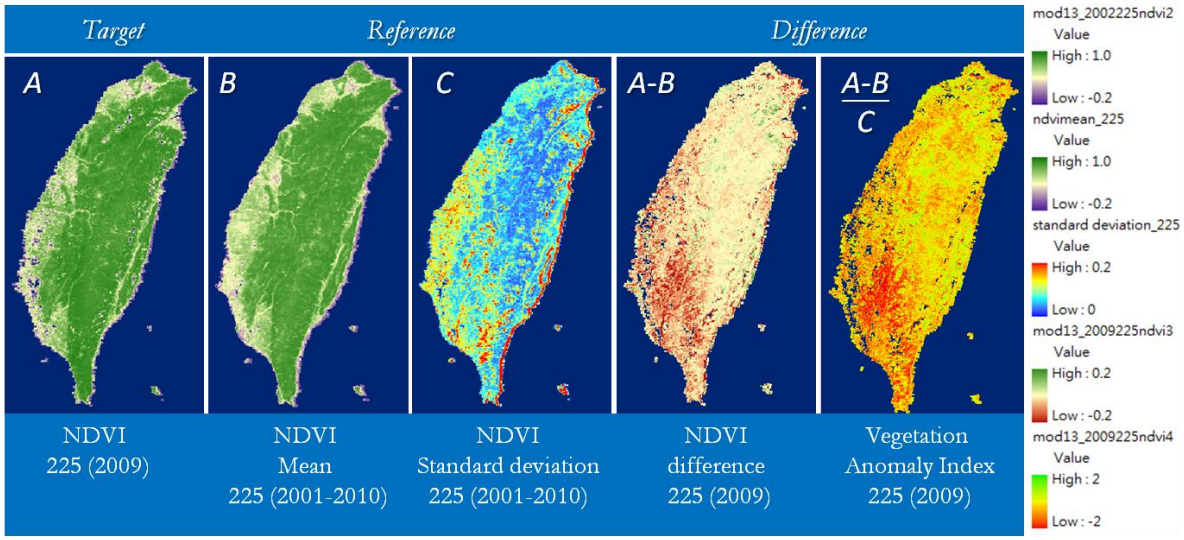


圖 71 88 風災所引發的西南部山區植生異常

3.3.2 2002 年中西部山區植生異常

由於光學影像會受到雲層的干擾，且雲層在空間上也常呈現聚集的現象，如以單期的植生異常指標進行異常現象判釋，很可能產生錯誤的解讀，但如在橫向時序上皆呈現相同的異常趨勢，且呈現近似空間上的聚集，則此異常事件的可信度又大為提升；台灣地區在 2002-2004 年，多數地區呈現不同程度的乾旱災情(圖 72)，在此以 2002 年植生乾旱為例，透過時序性異常指標的分析，評估乾旱事件對植生健康的影響；圖 73 分別顯示植生異常指標、pixel reliability、歷年同期觀測次數、以及每 16 日的累積降雨，其中 pixel reliability 影響到即期影像的可信度(主要為受到雲層干擾)，歷年觀測次數則關係到基期資料的樣本數；透過此長達半年的時序資料，顯示於 2002 年初開始，中西部山區即逐漸呈現植生旱象，並於四月至五月初時植生異常最為明顯，直到五月下旬的連續降雨(129 期-145 期)(無資料區域主要受到雲層或降雨的影響)，植生旱象才逐漸解除 (161 期)；相對而言，西部作物區由於仰賴灌溉水源，且 2001 年的降雨蓄水仍屬穩定，故在中西部山區植生乾旱初期(033 期-049 期)，作物區仍維持正常耕作，無呈現農業乾旱災情，兩區域間產生迥異的植生現象。

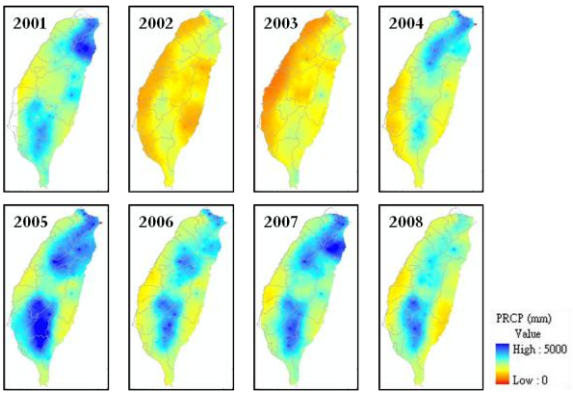


圖 72 2001-2008 年年度累積雨量

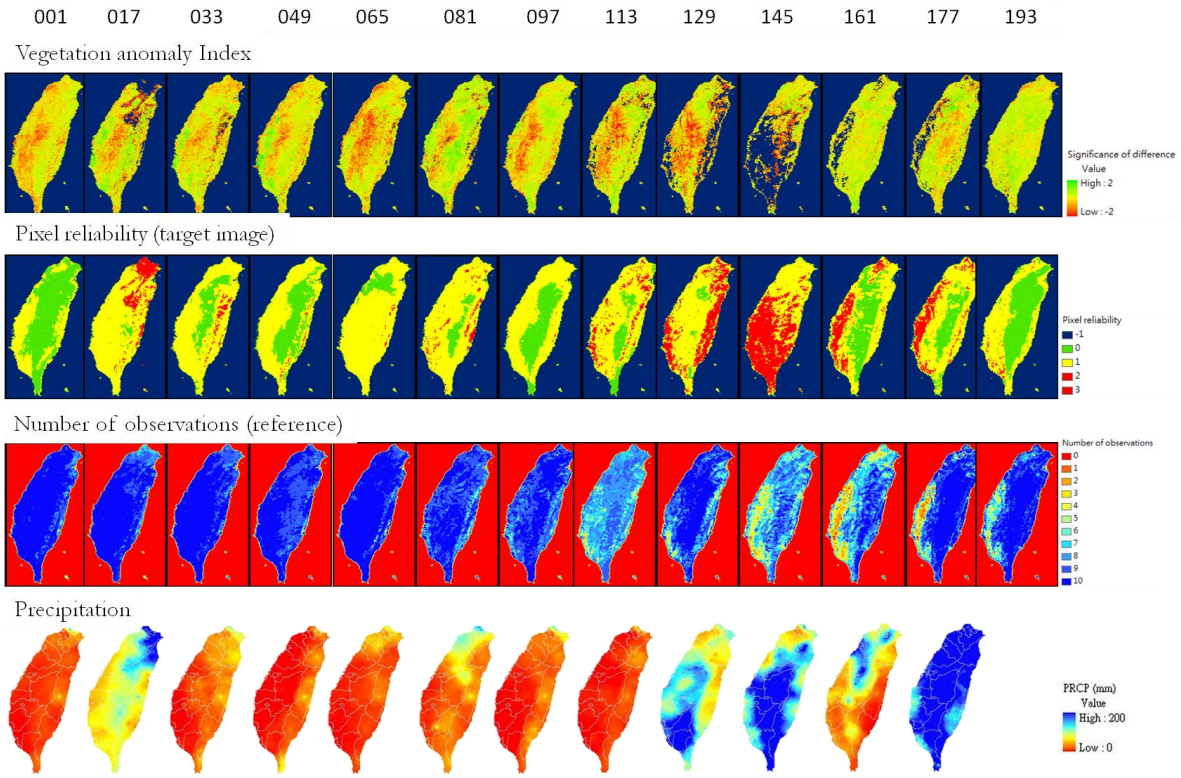


圖 73 2002 年乾旱事件所引發的植生異常

2002 年乾旱對植生的影響，也可透過單一像元中 NDVI 的時序性資料來表示，圖 74 中淺色線為基期平均值及歷年同期的 NDVI 標準差，2002 年乾旱造成 NDVI 較此基準值低得許多，直到 5 月底、6 月初後，隨著旱象的解除，植生指標才逐漸回升，並上升到原先的基準值，而 DOY 321 的急遽下降，則為受到雲層干擾的影響。

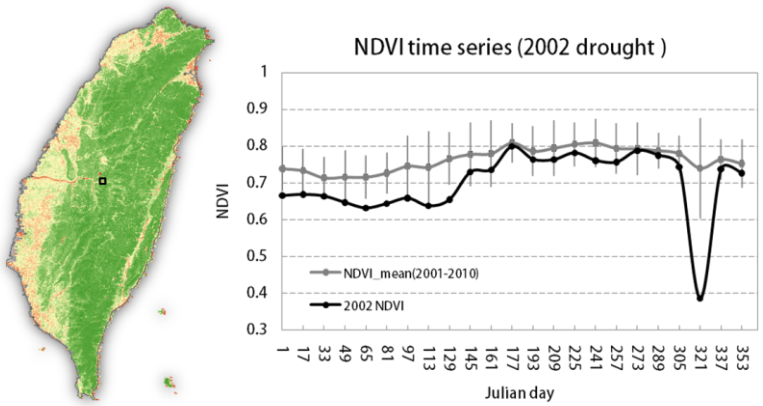


圖 74 單一像元基期 NDVI 及 2002 年 NDVI 的時序性變化

除了植生異常反應，乾旱災情對植生造成的水勢壓力，也能在常態化差異水指標中呈現(式 5)，並進而佐證此異常的發生原因；圖 75 中 NDWI 差異值，為 2002 年 DOY065 NDWI 與 2001 年同期資料的差異成果，顯示與 NDVI 差異值及植生異常指標近似的空間分佈。

$$NDWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad \text{.....（式 5）}$$

ρ_{NIR}:近紅外光反射率

ρ_{SWIR}:短波紅外光反射率

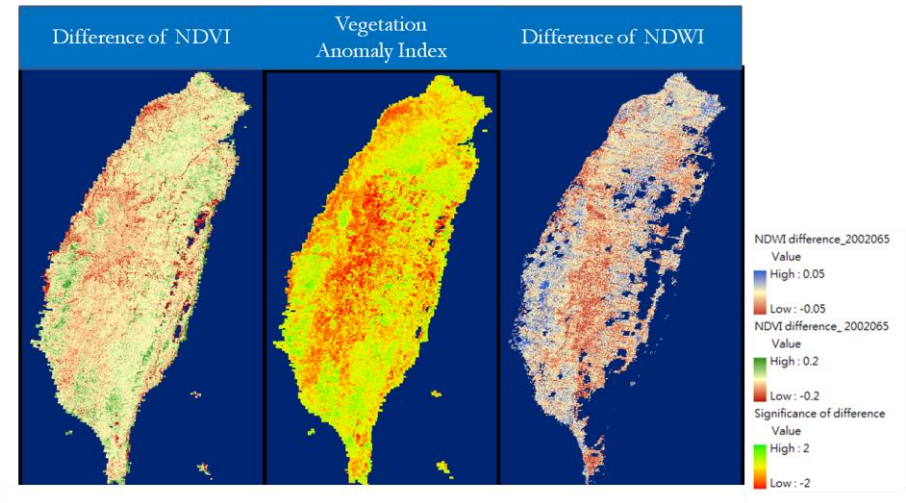


圖 75 NDVI 差異值、植生異常指標、以及 NDWI 差異值

乾旱事件的驗證具有相當的困難性，在一般的報載或研究文獻上頂多為定性的描述，遙測資料或許為空間範圍分佈上的唯一資料來源，故僅能透過不同平台的觀測資料加以佐證，圖 76 分別為 2002097 期植生異常指標、2002097 前六月的累積降雨，以

及 2001 年時序 NDVI 資料標準差，乾旱異常在空間分佈上與 250mm 等雨量線呈現吻合，而西部作物區域由於仰賴灌溉水源，未受到當地降雨短缺的立即影響而休耕，故未呈現異常情形，此作物區由於在季節性的 NDVI 時序資料上呈現明顯的耕植期及非耕植期變化，故在年度 NDVI 資料上(一年 23 筆資料)呈現較高的變異情形。

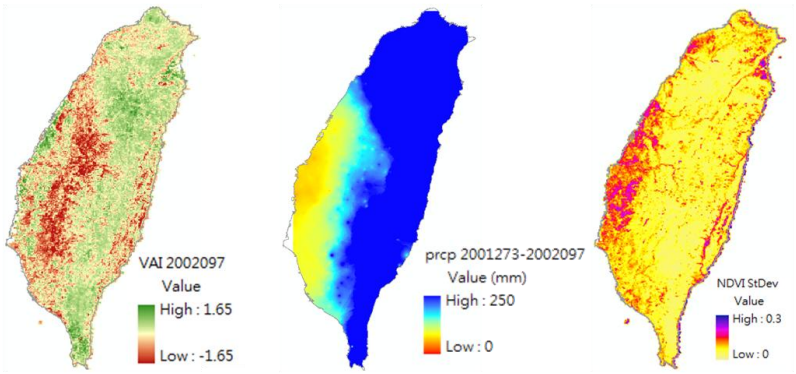


圖 76 植生異常指標、累積降雨、2001 年時序 NDVI 資料標準差

3.3.3 2003-2004 西北部區域乾旱

西北部地區連續受到 2002-2003 年降雨短缺的影響，2003 年底旱象逐漸加劇(DOY305)，持續至 2004 年 1 月下旬(DOY 017)至 2 月份的降雨後才逐漸和緩(圖 77)，為近年西北部濱海地區較顯著的乾旱現象；配合地貌分類及高程資料(圖 78)，顯示植生乾旱主要發生於沿海作物區及闊葉林地，約介於 0-300m 的高程區域，且有沿等高線發展的旱象趨勢；2004 年植生異常的變化情形，則為受到降水時程的影響，每當降雨事件發生，旱象即逐漸和緩，但直到 3 月份後，旱象才完全解除。

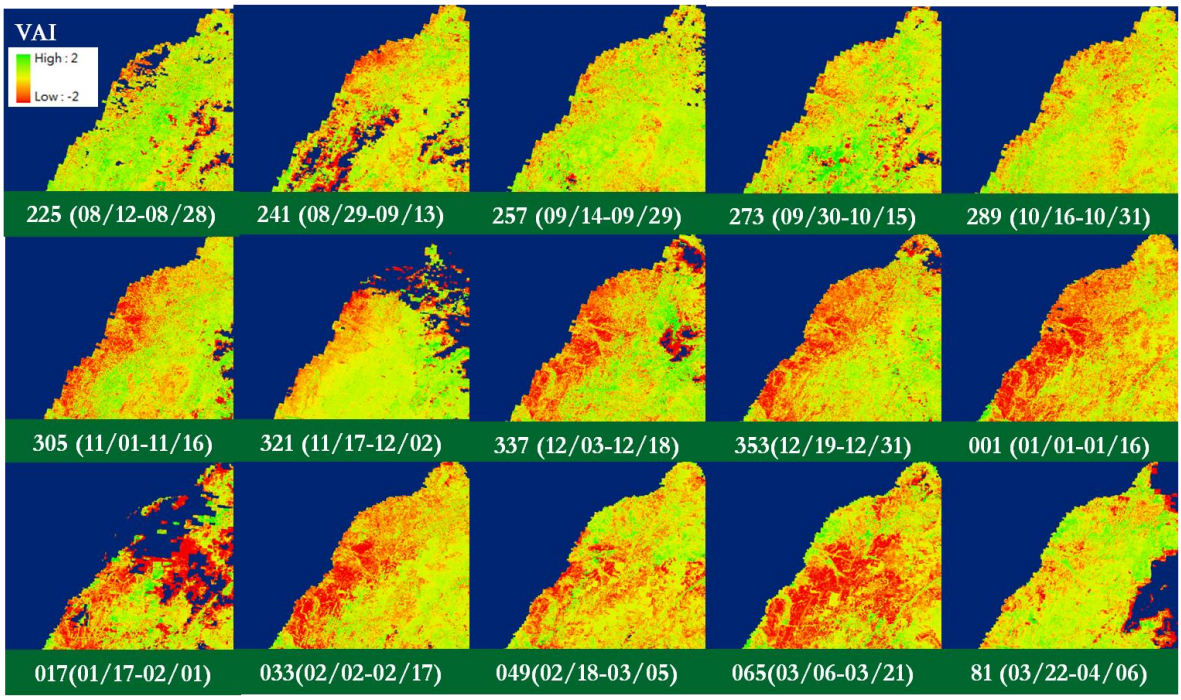


圖 77 2003-2004 年西北部沿海區域植生異常指標

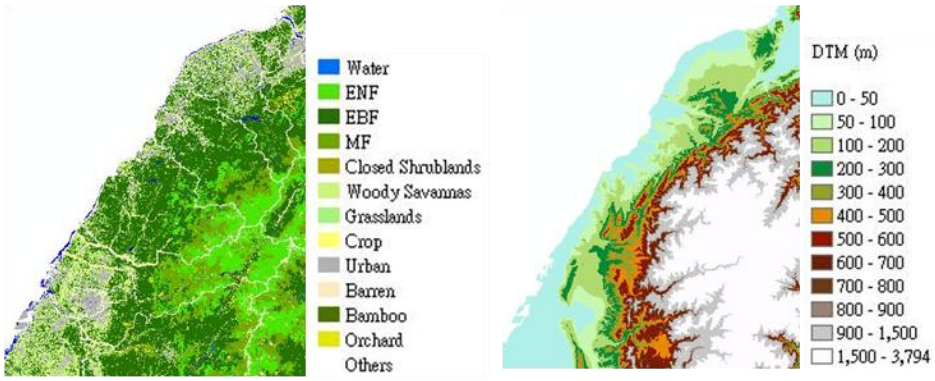


圖 78 西北沿海區域土地利用圖及海拔高程

3.3.4 阿里山森林火災

遙測在森林火災事件的應用，除了火災遺跡的界定，森林健康的評估、植生復育的追蹤，亦可透過火災產生的異常熱源，藉由接收地表發射的熱紅外光輻射，進行火災初期的即時火點偵測，以提供救災及減災的輔助支援；2009/1/12 大埔事業區的阿里山火災，在 MODIS MOD14 火災及熱異常資料中，也能即時的偵測出來(圖 79)；其原理主要透過 3.96 及 11 μm 熱紅外波段，藉由與背景輻射值的比較，以進行熱異常的界定；此外，透過 Terra/Aqua MODIS 的整合觀測，每日能進行 4 次(01:30、10:30、13:30、22:30)的地表監測，也大幅提升了 MODIS 在及時火災監測的效能。

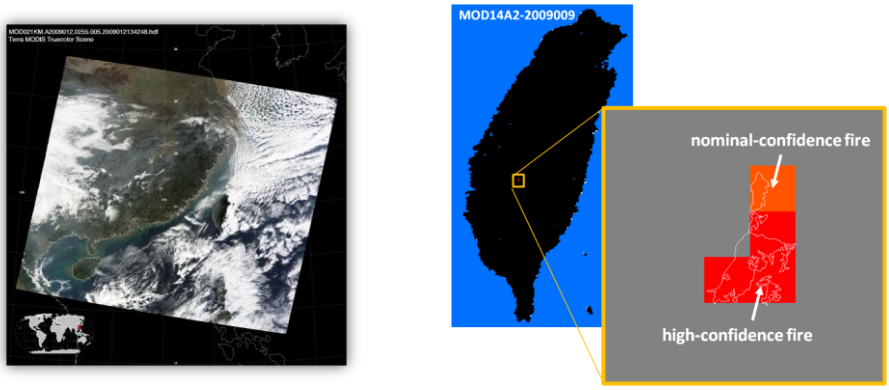


圖 79 MODIS 火點偵測(2009/1/9-1/17)-阿里山火災

透過火災發生時的即時 MODIS 影像，能進行火點偵測及延燒方向的判定，圖 80 分別為災前、災時、災後的 MODIS NDVI 影像及短波紅外光套色影像，由於火災煙霧降低植生指標，且火源造成較高的紅外光發射，透過即時影像分析，能判定災時風場及可能的延燒風向，提供救災輔助支援；藉由數值地形資料的分析，阿里山火災的起火點應位於南側的東南向山脊，受到北北西風向的影響，火勢逐漸往北延燒，但未橫跨稜線往西向發展，火勢在 1/13 10:00AM 的衛星影像中判定即已有效控制。

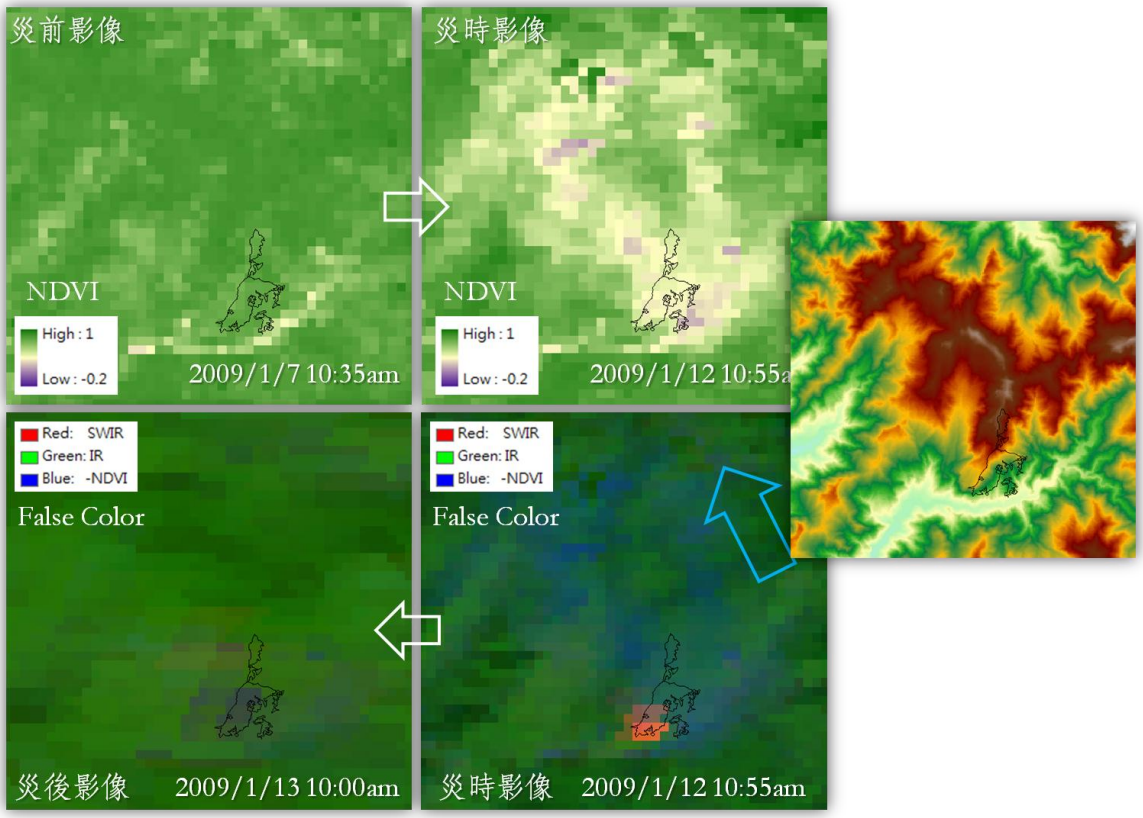


圖 80 阿里山火災災前、災時、及災後 MODIS NDVI 影像

在森林健康的評估上，可透過時序性的植生指標監測，以評估其異常情形，圖 81、82 分別為 2009 年的 NDVI 及植生異常指標影像，以及基期及 2009 年即期的 NDVI 時序資料，可見到在火災發生後，植生反應急遽的降低(DOY 017)，並持續約 5 個資料週期，但隨著生長季開始，植生反應也迅速回復，到了 5 月份，植生的光譜反應已和先前年份無太大差異，顯示出迅速的植生生長及地貌變化，但火災前後的地貌型態卻可能有所不同。

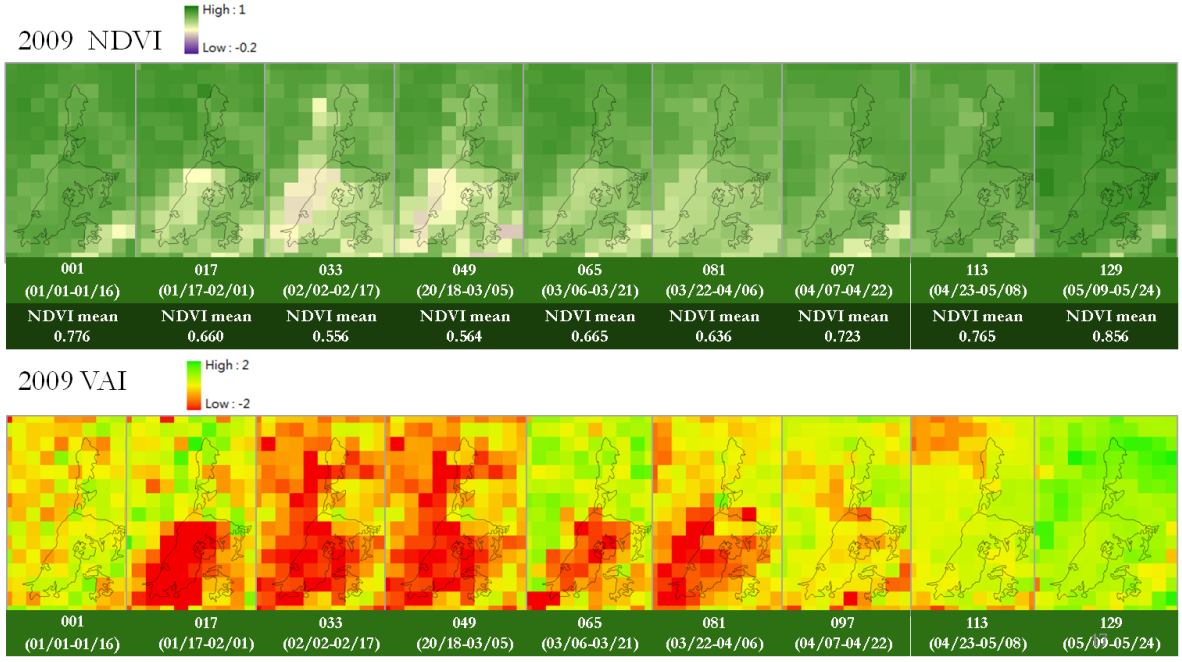


圖 81 阿里山火災事件 MODIS NDVI 及 VAI 時序資料

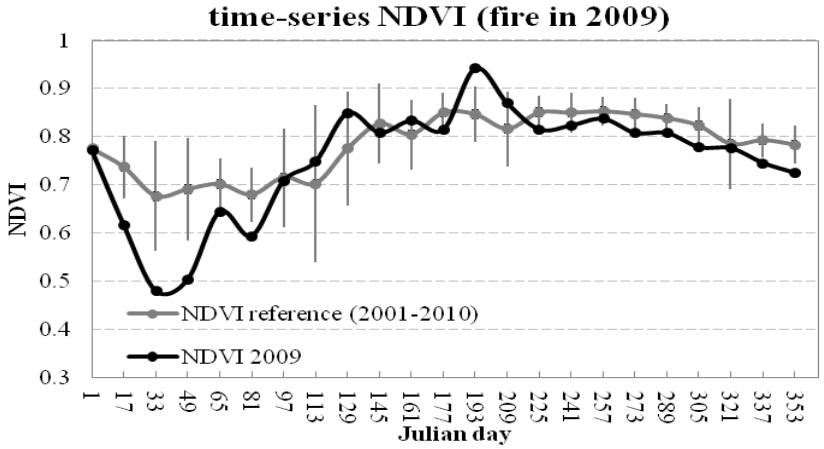


圖 82 阿里山火災事件 MODIS 2009 年 NDVI 及基期 NDVI 時序資料

透過常態時序性的植生指標觀測，能對火災區域的植生背景及災後復育進行瞭解，圖 83 為阿里山火災點位 2001-2010 年的 MODIS NDVI 時序資料；在歷年的觀測中，此區域呈現近似的生長型態，在生長季前的 1-4 月份，NDVI 逐漸遞減，並在低點後迅速上升，顯示受到相同的生長條件所約制(土壤水分)，而生長季開始後，NDVI 迅速抬升，研判應與降雨有關；此外，NDVI 在 2005 年 1 月份急遽降低，是否如同 2009 年受到火災事件的影響，仍有待進一步釐清，不過綜合而言，此區域高頻率的火災周期可能與乾季的植生型態有關。

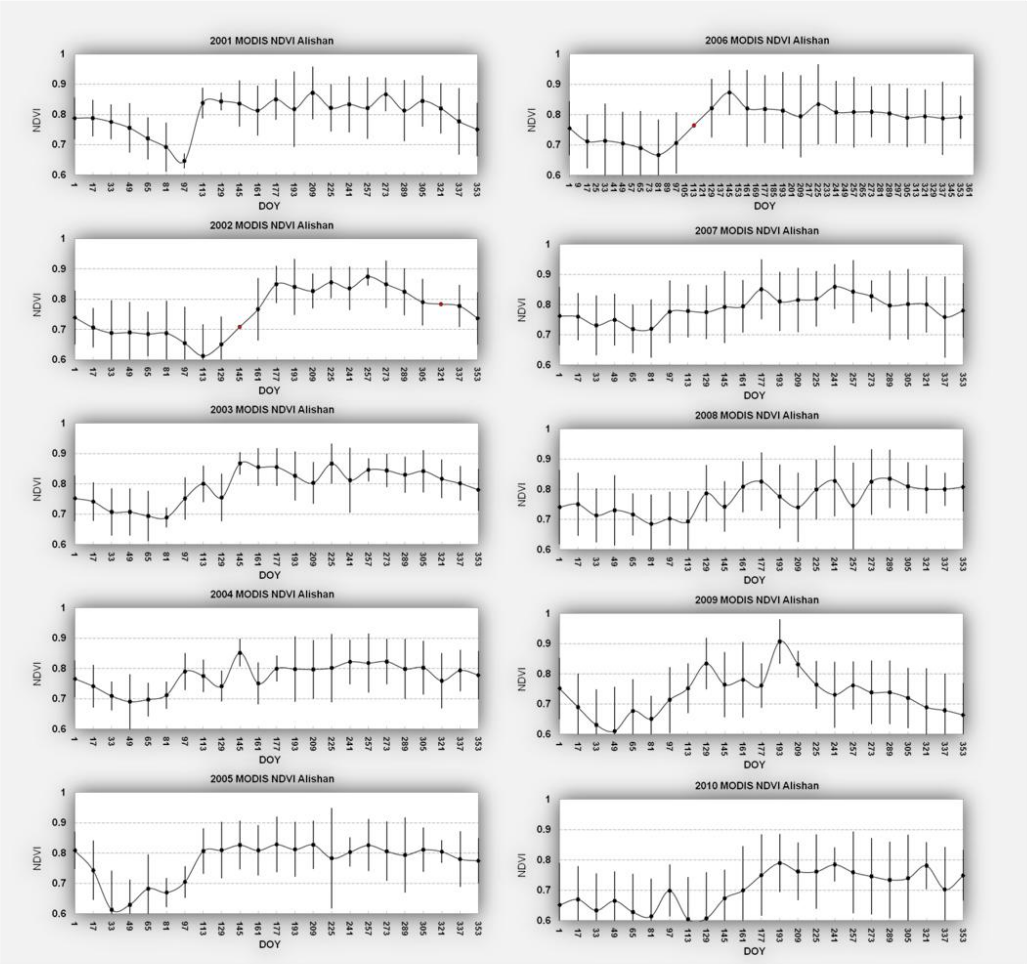


圖 83 阿里山火災事件點位 2001-2010 年 MODIS NDVI 時序資料

MODIS 影像雖能針對大範圍區域進行森林火災初期的火點偵測，並進行常態性的森林健康評估，但如要進行火災範圍界定，高解析遙測影像仍為不可或缺的工具，圖 84 為災前及災後的 SPOT 衛星影像及植生指標，藉由火災範圍界定，焚燒面積共

計約 140ha，且透過時序性植生指標影像，同樣呈現在火災後的四個月，地表已多為植生覆蓋。

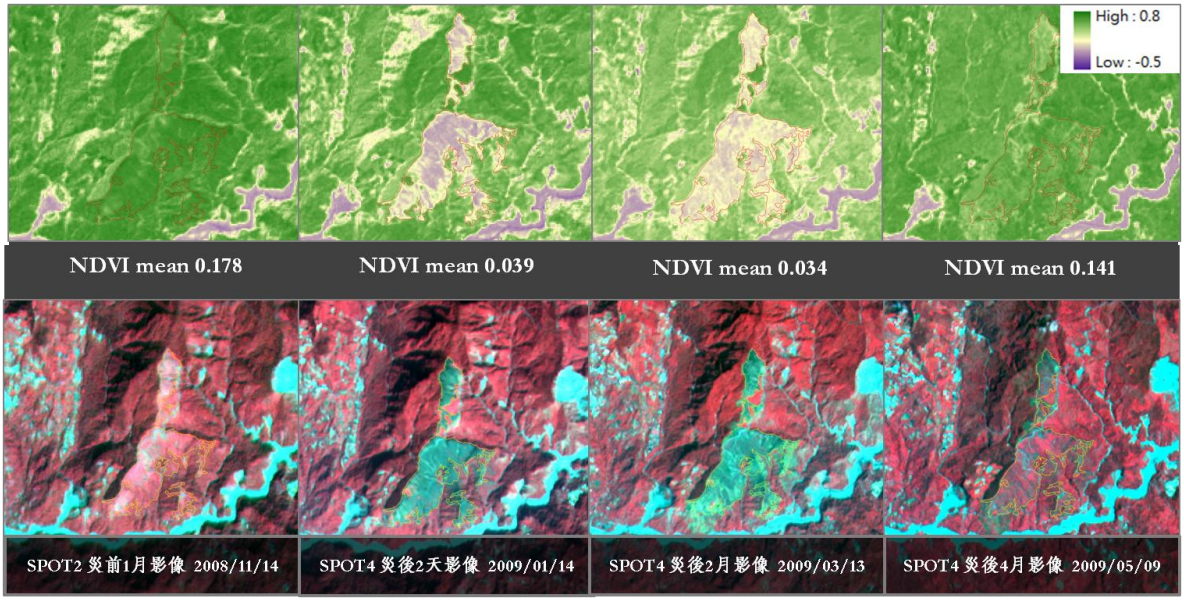


圖 84 阿里山火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI

為判定火災發生及火災後的植生狀況，本計畫於今年度 8 月份進行阿里山區現場調查，透過高解析福衛影像及現地照片(圖 85)，可見火災後此區域主要為草生地所覆蓋，與火災範圍外的喬木及竹林呈現明顯對比，也由於草本植物的迅速生長，造成植生指標在災後的四個月後即迅速上升。

圖 85 阿里山火災區域福衛影像及現地調查照片

3.3.5 丹大山區森林火災

南投縣信義鄉的丹大山區在 2004/11/21 發生森林火災，焚燒面積達到 168 公頃，為近年較大的火災事件；透過時序性的植生指標分析，可見此區域在火災後植生指標急遽降低，2 月份逐漸回復，但在 3 月份又呈現異常情形(圖 86、87)，研判為火災後的草生地覆蓋及 1 月底的短暫降雨使植生指標迅速回復，但由於仍處於乾季，水份逐漸短缺，並造成草生地 NDVI 的迅速下降，最後在 4 月底的降雨後，植生指標才逐漸回復。

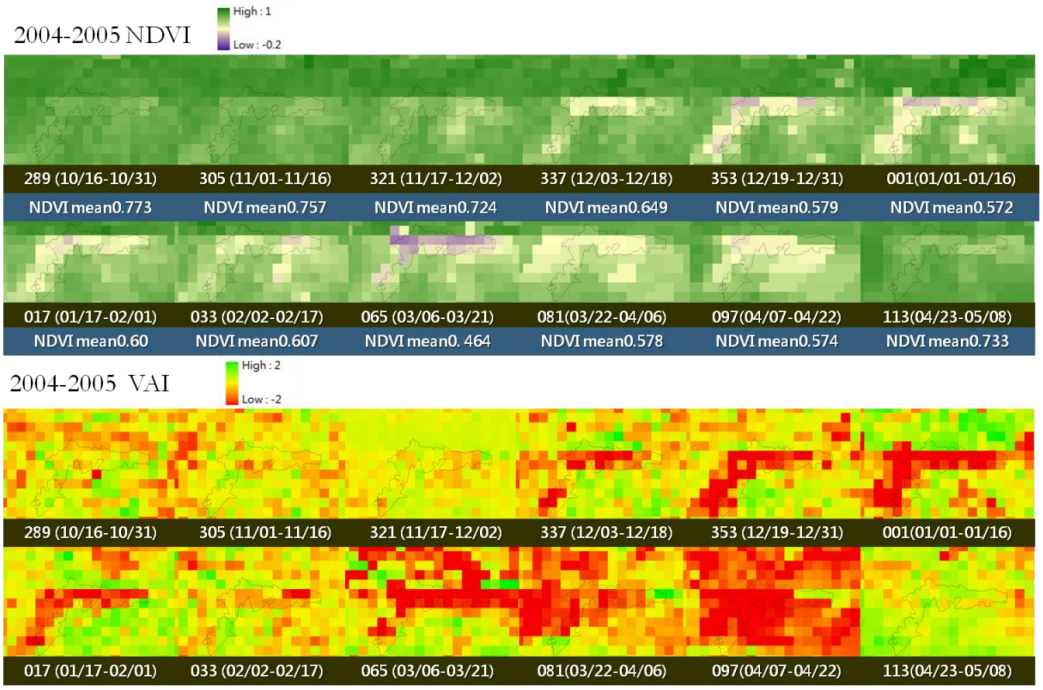


圖 86 丹大山區火災事件 MODIS NDVI 及 VAI 時序資料

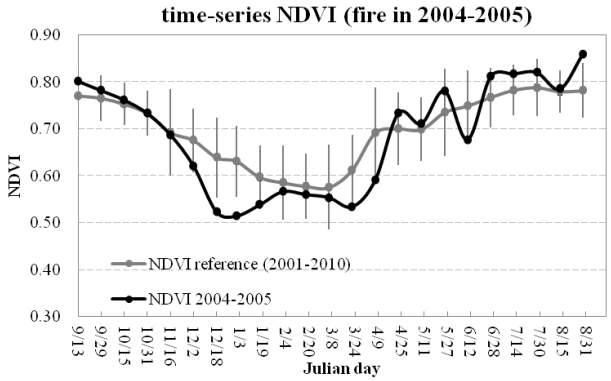


圖 87 丹大山區火災事件 2004-2005 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料

藉由災前的SPOT衛星影像研判，此區域在火災發生前即為天然草生地(或作物區)，且主要的受災範圍也與此植生型態的分佈相符合，故火災應屬於淺層的迅速延燒，造成較大的焚燒面積，在災後 6 個月後，植生指標雖已逐漸回復(先前即為草生地)，但在空間範圍上仍與周圍的木本植物有所區隔(圖 88)。

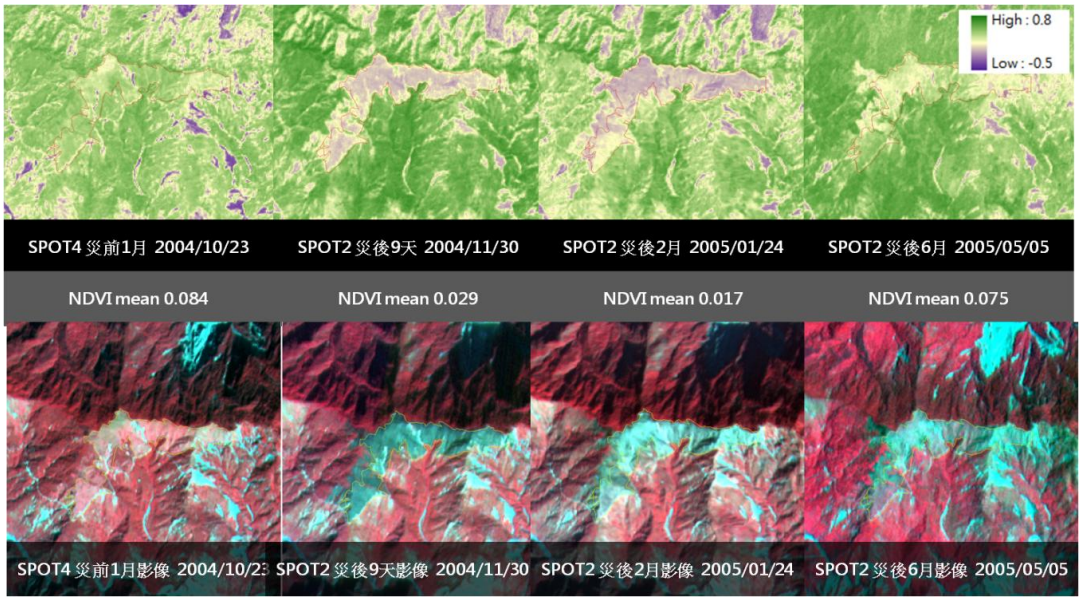


圖 88 丹大山區火災事件 SPOT 影像及 SPOT NDVI

3.3.6 梨山火災

台中縣和平鄉的梨山區域在 2009/9/12 發生火災，焚燒面積約 27.2 ha；透過時序資料的分析，顯示此區域歷年此時仍屬於生長季節，且火災發生前並無水份短缺造成植生指標逐漸下降的趨勢，與先前阿里山及丹大火災的背景資料有所不同(圖 89)；藉由災前 SPOT 影像的研判(圖 90)，此區域應非天然植生區域，且在火災後的 3 個月份，植生指標雖無明顯上升，但已與歷年無明顯差異。

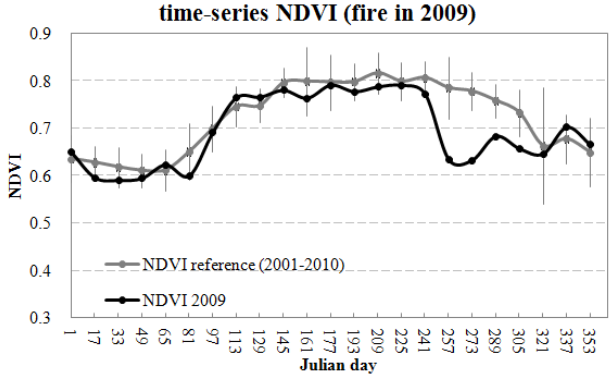


圖 89 梨山火災 2009 年 MODIS NDVI 及基期 NDVI 時序資料

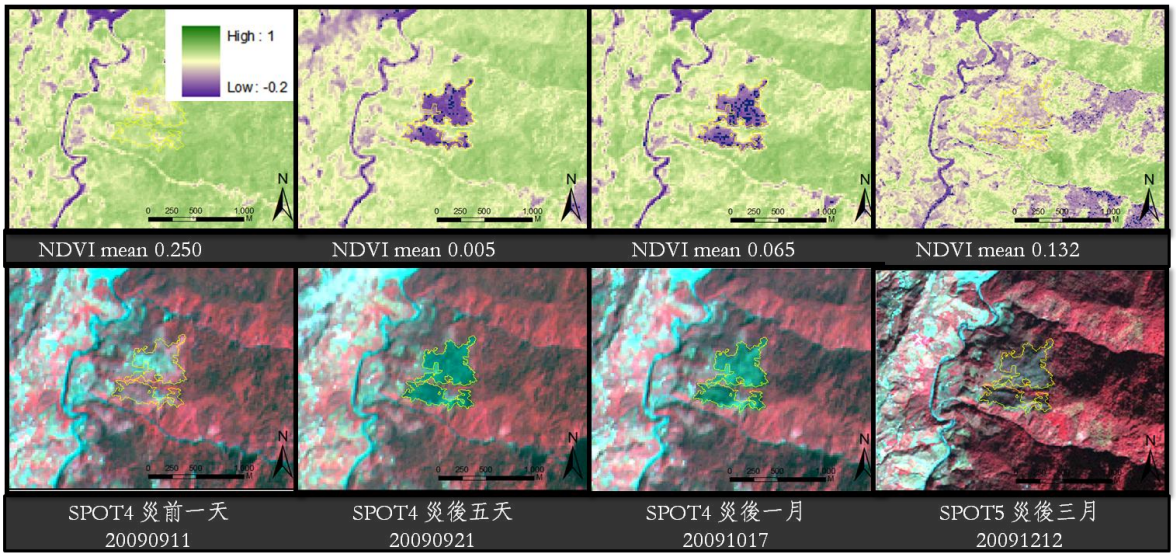
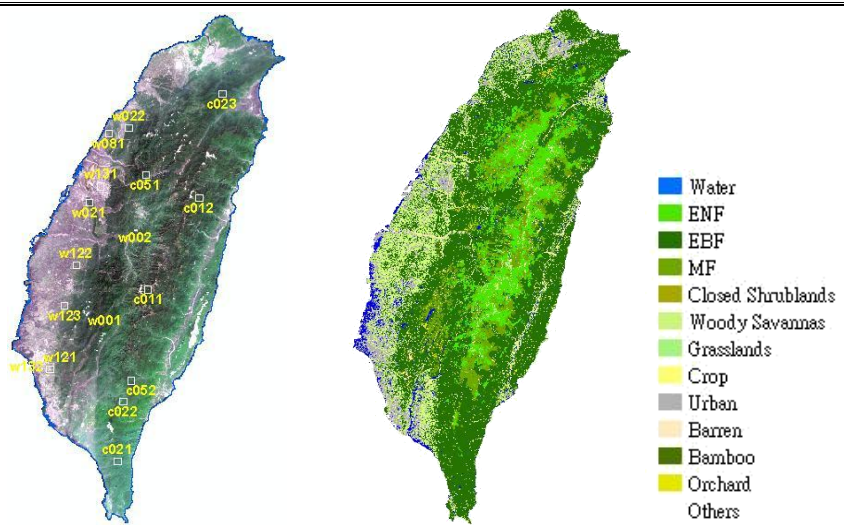


圖 90 梨山火災 SPOT 影像及 SPOT NDVI

3.4 NDVI 資料比對與森林健康監測評估

3.4.1 Terra MODIS 與 SPOT HRV NDVI 資料比對

MODIS 資料雖能提供冠層葉面的光譜反射資訊，藉由植生指標評估森林生長狀況與異常情形，但畢竟仍為一相對性的參考指標，在地形地貌較為複雜的台灣地區，MODIS 中尺度的空間解析是否適合於台灣森林環境的應用，仍需仰賴不同平台的資料進行比對驗證；由於 SPOT 衛星已長年應用於台灣全島綠色資源評估，故蒐集 2007/1/29、2007/1/30 Terra MODIS 及 SPOT-2 HRV 紅光及紅外光波段光譜資料，據以演算 NDVI，並藉由第三次森林資源調查分類圖資及 2006 年 SPOT 影像分類成果，選定 5km*5km 均質區域(山地測區藉由森林資源調查成果，平地區域藉由 SPOT 分類成果)(圖 91、表 11)，包含常綠針葉林(ENF)、闊葉林(EBF)、針闊葉混合林(MF)、作物(Cr)、草生地(Gr)及都市區域(Ur)等台灣地區主要地貌類型，以進行不同感測器 NDVI 值的比對分析(圖 92)。

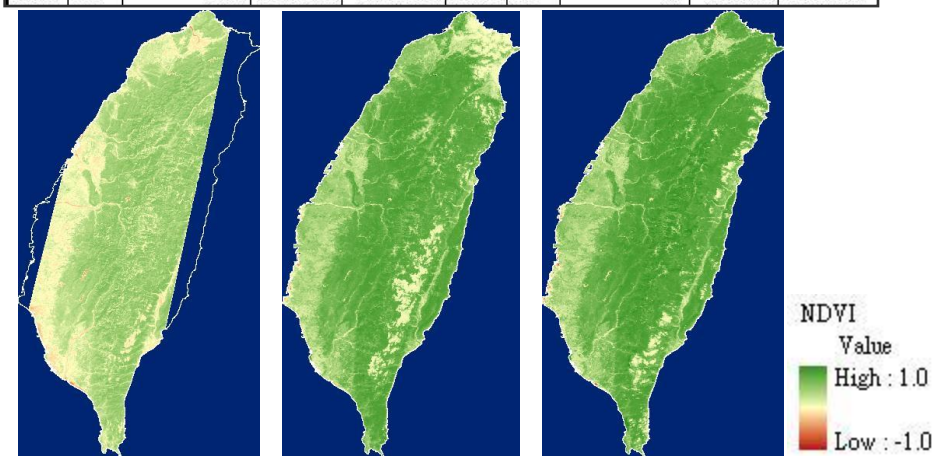


(a) (b)

圖 91 (a)測試區域分佈；(b)森林資源調查(山區)及 SPOT 分類(平地)影像

表 11 NDVI 測試區域(5km*5km)

Site	LC	Elevation(m)	X(m)	Y(m)	Site	LC	Elevation(m)	X(m)	Y(m)
c011	ENF	2790	250277	2596164	w021	EBF	124	206864	2660495
c012	ENF	2436	287770	2664047	w022	EBF	131	235674	2716143
c021	EBF	644	227781	2468293	w081	Gr	64	221072	2712196
c022	EBF	1558	231728	2512495	w121	Cr	21	177659	2536964
c023	EBF	654	300400	2741796	w122	Cr	42	197392	2613924
c051	MF	1662	248698	2681017	w123	Ur	29	188709	2583535
c052	MF	1681	237648	2527887	w131	Ur	85	215152	2672335
w001	Wa	222	205285	2577220	w132	Cr	16	170555	2545647



(a) (b) (c)

圖 92 (a)2007/1/29、1/30 HRV NDVI 影像(兩航帶影像)；(b)2007/1/29 MODIS NDVI 影像；(c)2007/1/30 MODIS NDVI 影像

MODIS 與 HRV NDVI 比對成果如圖 93 (單一測區 MODIS 樣本數: 400；HRV 樣本數:62500)，其中水體(W001、W002)、都市建物(W131、W132)及作物區(W121、W122)皆呈現較低的 NDVI 數值，常綠針葉林、闊葉林及混合林的 NDVI 則沒有顯著差異，

此外，作物區由於涵蓋零星散佈的建物，故 HRV NDVI 變異值較大，而內陸水體區域則由於涵蓋到周邊植生區域，亦造成較大的 NDVI 變異情形；整體而言，兩感測器 NDVI 呈現高度相關性，故以 MODIS 資料進行植生分析，雖其空間解析度無法有效反應細微地貌資訊，但在中、大尺度範圍的應用上，應能如 SPOT HRV 資料，有效反映出地表植生情形，作為全台森林健康的評估資訊。

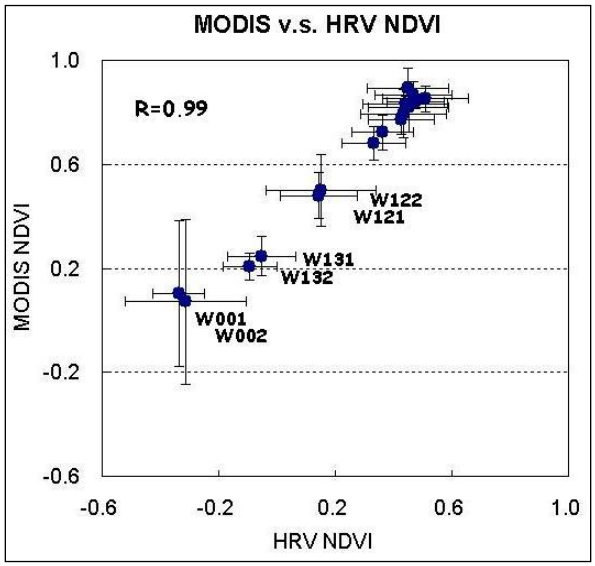


圖 93 MODIS 與 HRV NDVI 關係圖（±1 SD）(R=0.99 (線性))

3.4.2 森林健康監測評估

藉由 MODIS 常態且長期的森林觀測以及植生異常指標的演算，雖能提供量化的森林植生變異程度及範圍，但其變異的原因仍有賴其他參考資料的詮釋，以輔助並佐證此異常情形，例如氣象資料對乾旱的解釋，及森林病蟲害、林火等相關報告，以適時適地的評估森林環境變遷及森林健康情形。

NDVI 及 VAI 提供一相對性的參考指標，但並非對森林健康程度進行評分，僅為對森林生態進行體檢，挑選出植生光譜反應不同於常態的地方，此與傳統森林健康研究的現地觀測(冠層結構、土壤養分及侵蝕、地被層組成、植生多樣性、燃料負載、動物棲地)及評比方式仍有相當落差，故若需結合遙測觀測及傳統森林健康的評估方式，仍需透過廣泛的外業調查資料，針對單株及林分尺度進行詳細的健康評分及取樣分析，並考量到實際 MODIS 資料的空間解析(最小單一像元 250*250m)，以分析森林健康與遙測森林冠層葉面資訊的相關性，建立植生異常指標與森林健康評比的迴歸關係式，以進一步推廣為大範圍區域的評估應用；有鑑於目前台灣地區的實地森林健康研究主

要仍針對少數特定樹種及生態區域進行，在台灣森林環境多樣生態組成及 MODIS 中尺度空間解析力的前提考量下，要有效結合健康評比及 MODIS 指標仍有相當的尺度落差，故本計畫主要仍著重於 MODIS 遙測影像的分析，進行全台尺度的植生異常研究，以輔助林業單位並提供國有林區森林健康的參考資訊。

五、結論與建議

5.1 結論

森林碳吸存估算

1. 完成 2003 年 10 月至 2006 年 9 月、以及 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua -MODIS MOD17 產品資料的蒐集處理，以及全台各地理氣候區、植群帶的碳匯分佈分析，並選取均質樣區，進行柳杉、紅檜扁柏、二葉松人工林以及多種林型的碳匯比較。
2. 透過 2001~2006 年 MODIS 淨初級生產力的估算，台灣全島平均每年每公頃區域能吸存約 6.34~13.08 公噸的碳量(以平均值±1 標準差估算)，如以國有林區範圍進行分析，著重於森林生態系的碳吸存，則每公頃能吸存 7.74~13.36 公噸碳量；而在在台灣本島所屬的七個地理氣候區中，國有林區內的森林碳吸存大抵呈現由南向北逐漸遞減的趨勢，最南側的 SE 區由於充足的日照，以及相較於西部區域較不明顯的乾季，且以中低海拔的榕楠林及楠儲林帶為主要林相，呈現出最高的淨初級生產力，平均每年每公頃區域能吸存 11.27~17.83 公噸的碳量，而位處最北側的 NE 區，恆濕型的氣候型態及雲層雲霧覆蓋，造成較低的光合作用有效輻射及植生生產力，平均吸存約 6.92~11.14 公噸的碳量。
3. 在碳吸存的植群分佈上，隨著高度海拔的提升，林相由榕楠林、楠櫧林、櫟林，轉變為以鐵杉、雲杉、冷杉為主的高山植群，固碳能力亦逐漸下降；以季節性趨勢而言，總初級生產力(GPP)在 6 月底至 7 月初，臨近夏至的時期達到生產量高峰，但實際的生長旺期，約在 3 月底即達到極大期，並反應在最高的淨光合作用量(PSNnet)，會有此 3 個月的生長季落差，與植物葉面與細根的呼吸作用有關。
4. 在各林區中，花蓮林區由於面積較廣，碳吸存為所有林區最高，2003 及 2004 年碳匯量分別達到 3.18 及 3.42 百萬噸，但若考量單位區域的固碳能力，則以位於南部地理氣候區(SE、ES、SW)的台東、屏東、嘉義林區較高，平均每年每公頃達到 10.33-12.07 噸的固碳效能。

5. 透過霞雲、巴陵、東石、嘉義氣象站渦流協變系統通量資料的分析，能呈現出各測站二氧化碳濃度的日夜變化及季節性變遷，日間的淨生態系統生產力與光合作用有效輻射強度有關，而夜間的二氧化碳排放(呼吸作用)則與夜均溫及蒸發散量呈現相關。
6. 在地面驗證資料上，本計畫進行通量資料律定及淨生態系統生產力、總初級生產力的推演，完成遙測成果的初步驗證；初期比對成果顯示遙測與通量資料的季節性趨勢相符，相關係數 0.79，但若進行量級上的比較，則遙測成果呈現高估的趨勢(GPP 高估 30.02%，NPP 高估約 18.93 %)，且在生長季的高估現象更為明顯，推測可能與光合作用有效輻射分量的高估，或與假定中恆定的最大光能利用效率有關；但目前僅完成單點資料的驗證，實際應用情形，仍有待多點多地貌測站較完整的評估。
7. 為分析國有林區的碳匯分佈情形，本計畫並透過永久樣區資料的蒐集彙整，分析歷次調查成果在地理氣候區及植群帶的蓄積量、碳蓄積變化量及碳吸存量，研究成果顯示，在各地理氣候區中，以位處西部的 CW、SW、及 NW 蓄積量較高(所有樣區平均值)，並以位於中央山脊南北兩端的東北部 NE 區，及東南部 SE 區蓄積量較低，但如以碳匯效能來看，則以以南部的 SW、ES、及 SE 區具有較高的碳吸存量，平均值介於 4.57~4.72 tC/ha/yr 之間，而北部的 EN 區及 NE 區較小，其值約為 3.70~3.85 tC/ha/yr，故在空間趨勢而言，反應出光合作用量的南北差異，與地表淨輻射量的緯度分佈有關。
8. 經由永久樣區與遙測碳匯成果的比較，在量級上，遙測約為永久樣區成果的 2~2.5 倍，其差異原因仍需進一步探討。

森林生長分析

1. 完成 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua -MODIS MOD15 產品資料的蒐集處理，進行國有林區各植群帶葉面積指數分析；並選取均質樣區，進行柳杉、紅檜扁柏、二葉松人工林以及多種林型的季節性生長比較。
2. 2009 年 10 月至 2011 年 9 月的研究成果顯示，當海拔上升，國有林區內各植群帶葉面積指數有逐漸下降的趨勢，其中中低海拔的闊葉林帶，如榕楠林、

楠櫧林與櫟林帶下層，呈現的葉面積指數較為相似，而櫟林帶上層為針闊葉混合林型，葉面積略低於闊葉林的冠層狀態，其他如鐵杉、雲杉及冷杉林帶均為針葉林及高山植群，其葉面積較低；以生長情形來看，各林帶季節性的生長反應呈現相似的趨勢。

3. 本計畫透過植冠分析儀，進行每月至每兩月的地面資料收集，研究區域包含常綠闊葉林(嘉義蘭潭測區)、針葉林、針闊混淆林(台中大雪山測區)等不同林型，並進行不同年齡人工林、坡向、林型間的葉面積指數比較，
4. 透過系統性取樣與高解析衛星影像的應用，完成遙測與地面實測資料的初期比對，研究顯示兩資料成果呈現近似，但由於僅針對少數點位進行比較，遙測在大區域的應用效能仍有待多點多地貌的比對驗證，以提升在統計上的代表性。

森林健康評估

1. 完成 2010 年 10 月至 2011 年 9 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 植生指數產品(NDVI 及 EVI)的蒐集處理，並透過十年期的植生指標分析，建立植生指數參考基準，並藉此與歷年植生資料比較，探討森林健康與植生異常情形，
2. 以案例分析方式，探討森林火災(阿里山(2009/1/12)、丹大(2004/11/21)、梨山(2009/9/12))、植生乾旱(2002 年中西部山區、2003-2004 年西北部山區)、地表崩塌(八八風災)等事件所造成的植生光譜異常反應。
3. 透過現地調查及多元資料的比對分析，佐證阿里山火災及 2002 年乾旱事件的分析成果。

5.2 建議

森林碳吸存估算

1. MODIS 遙測能提供規律常態性的全島碳匯定量監測，但由於中尺度空間解析力的限制，在地形地貌複雜度較高的台灣地區，考量地區均質性及空間對位的誤差，較不適宜進行單點資訊的應用，或針對特定的小範圍區域進行分析，而較適合提供大範圍區域的碳吸存概觀資訊。
2. 渦流協變性系統提供高時間解析度的實地觀測資料，不僅能提二氧化碳動態

的變化資訊，也能透過氣象、水文、輻射等觀測參數的綜合分析，探討影響碳吸存的控制機制，但由於侷限於少數塔台點位的觀測，較難在空間上提供碳吸存的分佈趨勢，故透過遙測與通量資料的綜合分析，能在時間及空間上對森林碳匯及其影響機制進行較完整的詮釋。

3. 通量觀測與遙測在碳吸存的推估及假定上皆有所不同，以通量觀測為例，需要平坦均質的下墊面，以及紊流發展良好等環境條件，在非理想的假定條件下，平流通量及夜間林下儲存項的分析，仍為國內當前渦流協變理論研究的重要課題，故如要進行遙測與通量觀測參數的比對，確實很難釐清差異來源為遙測或塔台觀測誤差所造成，故建議未來分析著重於遙測及塔台在碳匯分析上的優勢，共同詮釋森林碳匯在空間及時間上的變異，而非僅著重於兩者資料是否相符。
4. 樣區調查提供高精度的森林碳匯資訊，但由於空間代表性較小，在林型及地形複雜度較高的台灣山區，取樣設計成為重要的考量，在環境梯度較大的台灣地區，遙測不僅能在空間上提供較全面的森林監測，更能相較於每五至十年的森林資源調查，提供規律常態且高時間解析，以及國有林區外的的碳匯資訊。

森林生長分析

1. 如同 MODIS 資料在森林碳吸存的應用，由於 MODIS 中尺度空間解析力的特性，配合其規律常態性的全島定量監測，在地形地貌複雜度較高的台灣地區，較適合提供大範圍區域概觀的森林生長資訊。
2. 森林生長著重於蓄積量的變化，故與碳吸存的估算更具相關，故建議在森林生長的研究上，結合 MODIS 初級生產力及葉面積指數的分析，以更符合傳統森林生長研究中所關注的議題。

森林健康評估

1. 雲霧覆蓋為植生異常分析最主要的不確定性來源，遙測資料律定及植生異常的判釋仍需進一步測試研究。
2. 藉由 MODIS 常態且長期的森林觀測，以及植生異常指標的演算，雖能對變異

程度及範圍提供定量的描述，但實際的變異原因，仍有賴其他參考資料的綜合分析，以輔助並佐證 MODIS 偵測出的異常情形。

六、參考文獻

1 森林碳吸存估算

Baldocchi, D., Valentini, R., Running, S., Oechel, W., Dahlman, R., 1996. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems. Global Change Biology, 2: 159-168.

Butcher, S. S., and Charlson, R. J. (Eds.), 1992. Global biogeochemical cycles, academic press. CA: Academic Press.

Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E. M., Elbers, J. A., Erhard, M., Grunwald, T., Kowalski, A. S., Rannik, U., Sprinz, D., 2003. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. Ecosystems, 6(2): 168-184.

Curtis, P. S., Hanson, P. J., Bolstad, P., Barford, C., Randolph, J. C., Schmid, H. P., Wilson, K. B., 2002. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. Agricultural and Forest Meteorology, 113:3-19.

Etheridge, D. M., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., Francey, R. J., 1998. Historical CO_2 records from the Law Dome DE08, DE08-2, and DSS ice cores. Retrieved from Carbon Dioxide Information Analysis Center Web site: http:// cdiac.ornl.gov /trends /co2 /lawdome.html.

Fluxnet, 2003. Fluxnet integrating worldwide CO_2 flux measurements. Retrieved from: http://www.daac.ornl.gov/ FLUXNET/fluxnet.html.

Gurevitch, J., Scheiner, S.M., Fox, G.A., 2002. The ecology of plants. Massachusetts: Sinauer Associates.

Heinsh, F. A., Reeves, M., Votava, P., Kang, S., Mllesl, C., Zhao, M., Glassy, J., Jolly, W. M., Loehman, R., Bowker, C. F., Kimball, J. S., Nemanl, R. R., Running, S. W., 2003. User's guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm. Retrieved from : http://www.ntsg.umt.edu/modis/MOD17UsersGuide.pdf.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003. Climate change 2001: the scientific

basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate. Cambridge: Cambridge University Press.

Keeling, C. D., and Whorf, T. P.,2004. Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. Retrieved from Carbon Dioxide Information Analysis Center Web site: http://cdiac.esd.ornl.gov/trends /co2/sio-mlo.htm

Monteith, J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 9: 747-766.

Monteith, J., 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B., 300: 277-294.

National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System (NFCMARS), 2009. Forest carbon accounting. Retrieved from Natural Resources Canada Web site: http://carbon.cfs.nrcan.gc.ca/ForestCarbonAccount_e.html.

National Carbon Accounting System (NCAS), 2010. National carbon accounting system. Retrieved from Department of Climate Change and Energy Efficiency Web site: http://www.climatechange.gov.au/government/initiatives/national-carbon-accounting.aspx.

Reich, P. B., Turner, D. P., Bolstad, P. ,1999. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products. Remote Sensing of Environment, 70: 69-81.

Running, S., Nemani, R., Glassy, J., Thornton, P., 1999. MODIS daily photosynthesis and annual net primary production product –algorithm theoretical basis document. NASA MODIS land algorithm. Retrieved from: http://www.ntsg.umt.edu/modis/MOD17 UsersGuide.pdf.

Schimel, D., Melillo, J., Tian, H., McGuire, A. D., Kicklighter, D., Kittel, T., Rosenbloom, N., Running, S., Thorton, P., Ojima, D., Parton, W., Kelly, R., Sykes, M., Neilson, R., Rizzo, B., 2000. Contribution of increasing CO_2 and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. Science, 287(5460): 2004-2006.

Turner, D., Ritts, W., Cohen, W., Maeirsperger, T., Gower, S., Kirschbaum, A., Running, S.,

Zhao, M., Wofsy, S., Dunn, A., Law, B., Campbell, J., Oechel, W., Kwon, H., Merers., T., Small, E., Kurc., S., Gamon, J., 2005. Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. Global Change Biology, 11: 666-684.

Valentini, R. , Matteucci, G., Dolman, A. J., Schulze, E. D., Rebmann, C., Moors, E. J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N. O., Pilegaard, K., 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature, 404: 861-865.

Walker, H., Keim, B., Arndt, M. B., 2001. Natural and anthropogenic factors affecting global and regional climate. Retrieved from National Health and Environmental Effects Research Laboratory Web site: http://www.necci.sr.unh.edu/necci-report/ 2001-Foundation-PDF/ Chapter3.pdf.

王立志，1996。氣候變遷對台灣林業的衝擊與適應。氣候變遷評估衝擊與因應策略建議研討會論文集: 215-229。

王亞男，2009。平地造林樹種對二氧化碳通量監測、分析之研究。行政院農業委員會林務局。

王義仲，2003。林木對碳吸存效益評估。華岡農科學報，10: 53-68。

林俊成，2007。台灣森林碳量估算及不確定性來源探討。碳循環在台灣研討會。

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儲存量之研究。台大實驗林研究報告，16(2):71-79。

林務局，1995。第三次台灣森林資源及土地利用調查。行政院農業委員會林務局，台北。

邱祈榮、王瑞閔、梁玉琦，2006。台灣森林碳量估算面面觀。2006 森林碳吸存研討會論文集: 79-97。

邱祈榮、林俊成、陳莉坪，2010，植林碳匯專案管理，台北。

夏禹九，2008。二氧化碳通量儀器運轉維護及資料分析專案工作計畫期末報告。行政院環境保護署，台北。

陳朝圳、陳建璋、魏浚紘，2011。建立台灣主要造林樹種之碳儲存推估系統。台灣林業，37(2):10-15。

莊振義，2010。Investigating the flux patterns within forest sub-canopy over a hilly terrain。莊振義中央大學水文所演講簡報 2010/12/21。

楊榮啟、馮豐隆、黃俊雄，1998。林業對溫室氣體減量策略規劃及衝擊評估(二)期末報告。行政院環境保護署，台北。

2 森林生長分析

Gholz, H. L., 1982. Environmental limits on aboveground net primaryproduction, leaf area, and biomass in vegetation zones of the PacificNorthwest. Ecology, 63: 469-481.

Norman, J. M., and Campbell, G. S., 1989. The description and measurement of plant community structure. In: Russell, G., Marshall, B. , Jarvis, P.G. (eds.)Plant canopies: their growth, form, and function. Society for Experimental Biology, 31: 1–19.

Maass, J. M., Vose, J. M., Swank, W. T., Martínez-Yrízar, A., 1995. Seasonal changes of leaf areaindex (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. Forest Ecology Management, 74(1):171-80.

Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Zhang, Y., Tian, Y., Wang, Y., Lotsch, A., Privette, J. L., Morisette, J. T., Running, S. W., Nemani, R., Glassy, J., Votava, P., 1999. MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) algorithm theoretical basis document. Retrieved from Web site: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf.

Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Glassy, J., Votava, P., Shabanov, N., 2003. User's guide: FPAR, LAI (MOD15A2) 8-day composite NASA MODIS land algorithm. Retrieved from：http://cybele.bu.edu/modismisr/products/modis/userguide.pdf.

LI-COR, 1992. LAI-2000 plant canopy analyser operating manual. Retrieved from LI-COR Web site：http://www.csafrica.co.za/AllDocs/LI-COR/LAI-2000/Manual/ LAI-2000 _Manual.pdf.

呂福原、歐辰雄、呂金城，1997。台灣樹木解說。行政院農業委員會。

邱祈榮、黃愷茹、潘孝隆，2006。臺灣地區柳杉生長模式研究之回顧。中華林學會 95 年度學術論文發表會：733-744。

陳朝圳，1985。大雪山地區紅檜人工幼齡林生長模式之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。

3 森林健康研究

Eidenshink, J. C. , and Faundeen, J. L., 1994. The 1km AVHRR global land data set: first stages in implementation. International Journal of Remote Sensing, 15(17): 3443-3462.

Goward, D. G., Turner, S., Dye, D. G., Liang, J., 1994. University of Maryland improved Global Vegetation Index. Internaitonal Journal of Remote Sensing, 15(17): 3365-3395.

Green, E. P., Mymby, P. J., Edwards, A. J., Clark, C. D., Ellis, A. C., 1997. Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. Aquatic Botany, 58: 11-19.

Huete, A., Justice, C., Leeuwen, W. V., 1999. MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document. Retrieved from Web site: http://modis. gsfc.nasa.gov /data/atbd/atbd_mod13.pdf.

Moore, B., and Allard, G. ,2008. Climate change impacts on forest health. Forest Resources Development Service Working Paper FBS/34E. FAO, Rome, Italy.

Pontius, J., Hallett, R., Martin, M., 2005. Using AVIRIS to assess hemlock abundance and early decline in the Catskills, New York. Remote Sensing of Environment 97: 163-173.

Price, J. C. , and Bausch, W. C., 1995. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. Remote Sensing of Environment, 52(1): 55-65.

Smith, W. B. , 2002. Forest inventory and analysis: a national inventory and monitoring program. Environmental Pollution, 116: 233-242.

Stone, C., Chisholm, L., Coops, N., 2001. Spectral reflectance characteristics of eucalypt foliage damaged by insects. Australian Journal of Botany 49: 687-698.

Solberg, S., Næsset, E., Lange, H., Bollandsås, O. M., 2004. Remote sensing and spatial information sciences. Remote Sensing and Spatial Science, 35: 161-166.

USDA Forest Service, 2005. Forest inventory and analysis. National Core Field Guide, version 3.0: 203.

Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Mohammed, G. H., Nol, T. L., Sampson, P. H., 2002. Vegetation stress detection through chlorophyll a and b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. Journal of Environmental Quality, 31:1433-1441.

王兆桓、陳子英，2002。 林木健康指標評估方法之建立-以棲蘭地區老熟檜木為例。

行政院農業委員會林務局保育研究系列第 91-6 號。

肖文發、韓景軍、馬娟，2001。美國國家森林健康監測與評價計畫及對我國的啟示。世界林業研究 14(3): 67-74。

肖興威、姚昌恬、陳雪峰、宋常青、曾偉生、張鐵平，2005。美國森林資源清查的基本作法與啟示。林業資源管理，2: 27-33。

陳朝圳，2005。利用遙測與地理資訊系統監測土地利用與生態系變遷。國家公園生物多樣性與環境監測研討會論文集: 7-20。

陳朝圳、鍾玉龍、吳守從、陳建璋，2007。第四次全國森林資源調查技術研習訓練班訓練計畫。行政院農業委員會林務局委辦計畫。

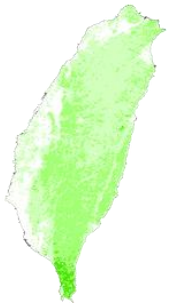
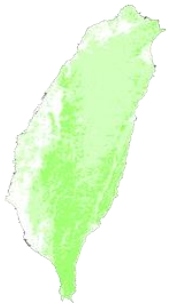
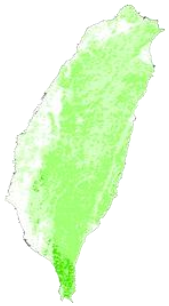
焦國模，1997。植生指標在林木測定上應用之研究。航遙測與地理資訊系統於森林資源經營上之應用研討會論文集: 1-16。

謝漢欽，1998。SPOT 綠度與森林生育地因子於台灣杉材積推估之探討。台灣林業科學，13(3):175-188。

羅時凡、陳淯婷、沙學均、陳朝圳，2008。林木健康指標之建立與效度評估。林業研究季刊，30(3):41-52。

羅時凡、魏浚紘、李崇誠、陳朝圳，2009。遙測技術應用於溪頭地區柳杉人工林之森林健康調查。林業研究季刊，31(1):37-54。

表 A-1 2003 年 10 月至 2004 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2003			2004		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

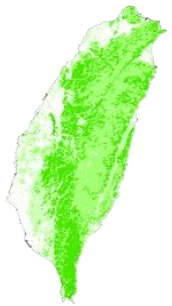
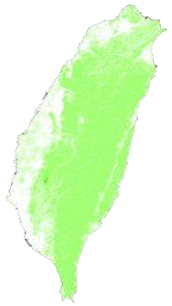
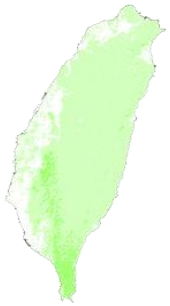
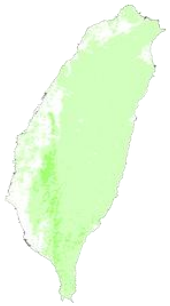
年度	2004					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-2 2003 年 10 月至 2004 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2003			2004		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

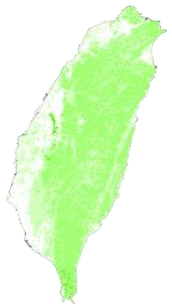
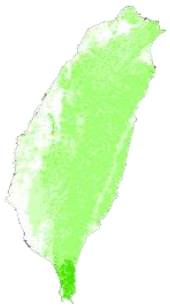
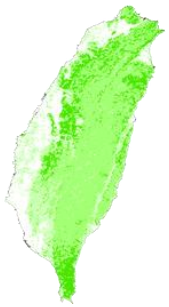
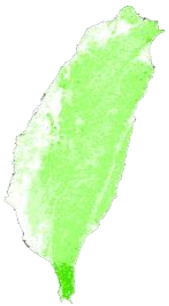
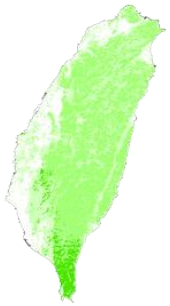
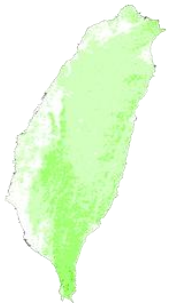
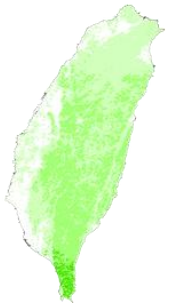
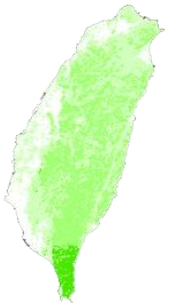
年度	2004					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-3 2004 年 10 月至 2005 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2004			2005		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/29-10/06） 281（10/07-10/14） 289（10/15-10/22） 297（10/23-10/30）	305（10/31-11/07） 313（11/08-11/15） 321（11/16-11/23） 329（11/24-12/01）	337（12/02-12/09） 345（12/10-12/17） 353（12/18-12/25） 361（12/26-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/06-03/13） 073（03/14-03/21） 081（03/22-03/29）
GPP 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

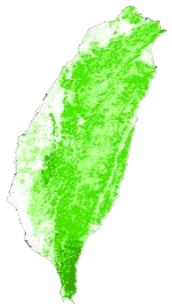
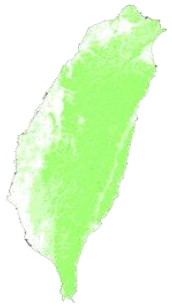
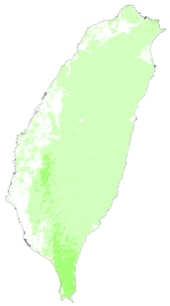
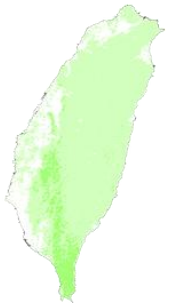
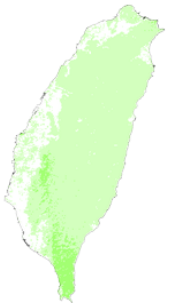
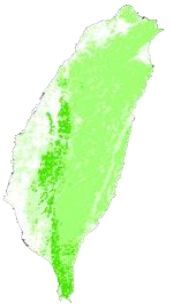
年度	2005					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/30-04/06） 097（04/07-04/14） 105（04/15-04/22） 113（04/23-04/30）	121（05/01-05/08） 129（05/09-05/16） 137（05/17-05/24） 145（05/25-06/01）	153（06/02-06/09） 161（06/10-06/17） 169（06/18-06/25）	185（07/04-07/11） 193（07/12-07/19） 201（07/20-07/27）	217（08/05-08/12） 225（08/13-08/20） 233（08/21-08/28）	249（09/06-09/13） 257（09/14-09/21） 265（09/22-09/29）
GPP 套色影像						
圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-4 2004 年 10 月至 2005 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2004			2005		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/29-10/06） 281（10/07-10/14） 289（10/15-10/22） 297（10/23-10/30）	305（10/31-11/07） 313（11/08-11/15） 321（11/16-11/23） 329（11/24-12/01）	337（12/02-12/09） 345（12/10-12/17） 353（12/18-12/25） 361（12/26-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/06-03/13） 073（03/14-03/21） 081（03/22-03/29）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

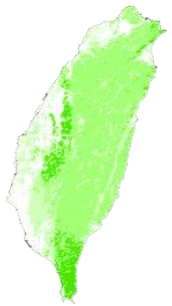
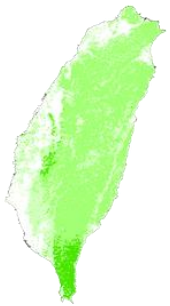
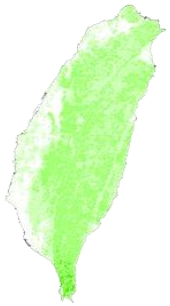
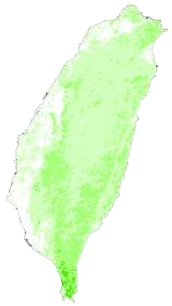
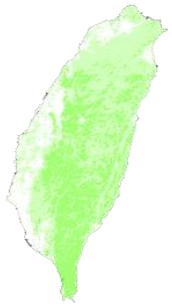
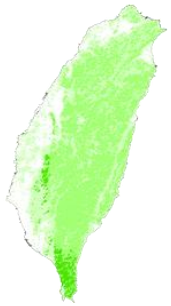
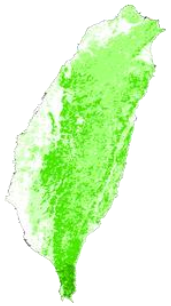
年度	2005					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/30-04/06） 097（04/07-04/14） 105（04/15-04/22） 113（04/23-04/30）	121（05/01-05/08） 129（05/09-05/16） 137（05/17-05/24） 145（05/25-06/01）	153（06/02-06/09） 161（06/10-06/17） 169（06/18-06/25）	185（07/04-07/11） 193（07/12-07/19） 201（07/20-07/27）	217（08/05-08/12） 225（08/13-08/20） 233（08/21-08/28）	249（09/06-09/13） 257（09/14-09/21） 265（09/22-09/29）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-5 2005 年 10 月至 2006 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2005			2006		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

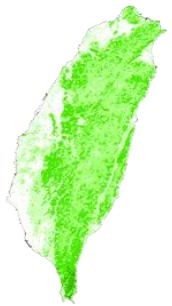
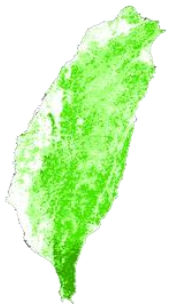
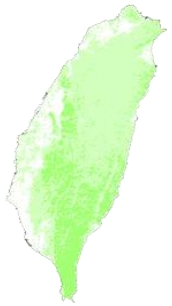
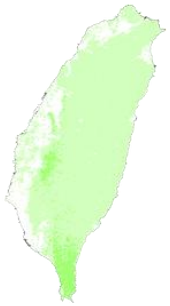
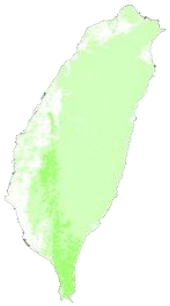
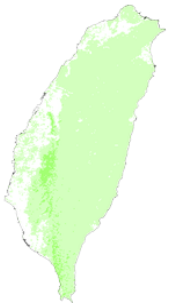
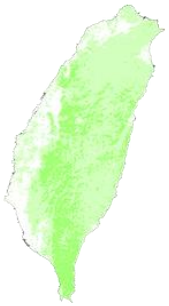
年度	2006					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-6 2005 年 10 月至 2006 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2005			2006		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

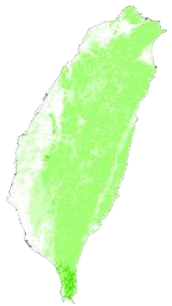
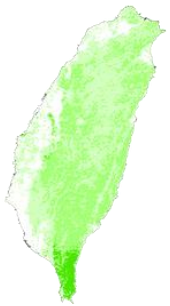
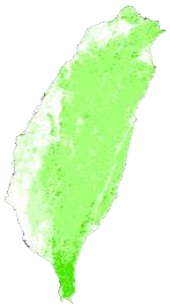
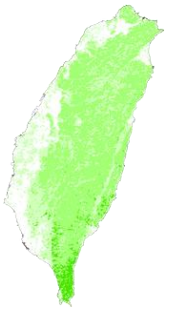
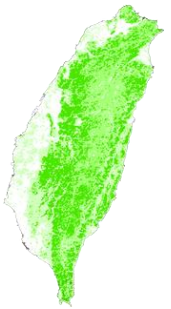
年度	2006					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-7 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 GPP 套色影像表

年度	2010			2011		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

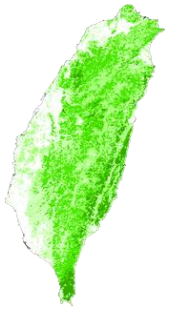
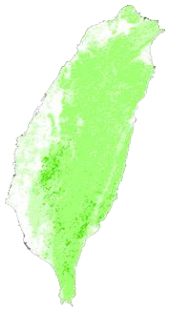
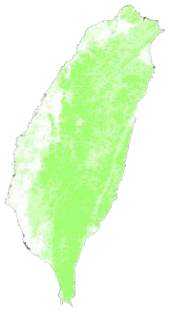
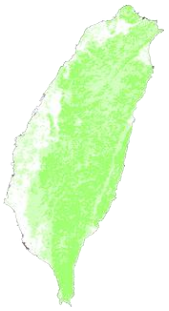
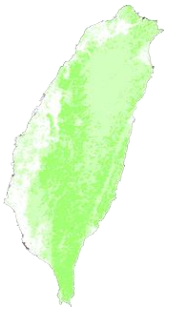
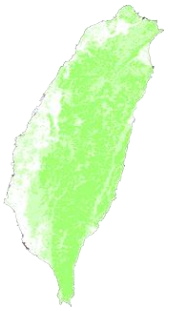
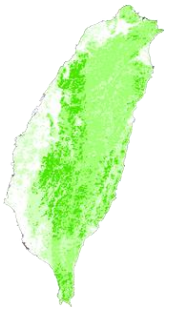
年度	2011					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
GPP 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-8 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD17 衛星產品各月份 PSN 套色影像表

年度	2010			2011		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

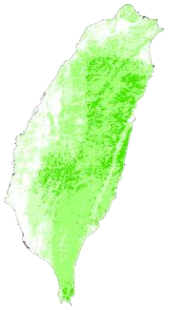
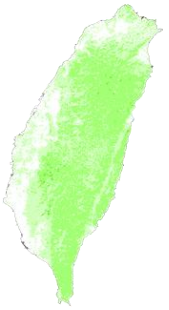
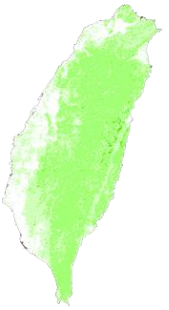
年度	2011					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
PSN 套色影像 圖例（單位：t-C/ha） 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 以上						

表 A-9 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD15 衛星產品各月份 LAI 套色影像表

年度	2010			2011		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/07） 281（10/08-10/15） 289（10/16-10/23） 297（10/24-10/31）	305（11/01-11/08） 313（11/09-11/16） 321（11/17-11/24） 329（11/25-12/02）	337（12/03-12/10） 345（12/11-12/18） 353（12/19-12/26） 361（12/27-12/31）	001（01/01-01/08） 009（01/09-01/16） 017（01/17-01/24） 025（01/25-02/01）	033（02/02-02/09） 041（02/10-02/17） 049（02/18-02/25）	065（03/05-03/12） 073（03/13-03/20） 081（03/21-03/28）
LAI 套色影像						
圖例 0.0 - 1.6 1.6 - 3.2 3.2 - 4.8 4.8 - 6.4 6.4 - 8.0						

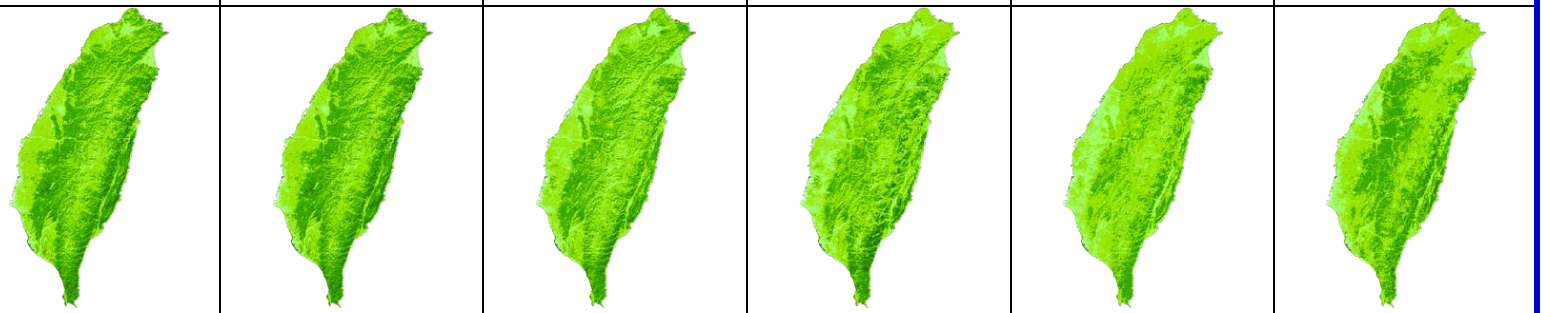
年度	2011					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	089（03/29-04/05） 097（04/06-04/13） 105（04/14-04/21） 113（04/22-04/29）	121（04/30-05/07） 129（05/08-05/15） 137（05/16-05/23） 145（05/24-05/31）	153（06/01-06/08） 161（06/09-06/16） 169（06/17-06/24）	185（07/03-07/10） 193（07/11-07/18） 201（07/19-07/26）	217（08/04-08/11） 225（08/12-08/19） 233（08/20-08/27）	249（09/05-09/12） 257（09/13-09/20） 265（09/21-09/28）
LAI 套色影像						
圖例 0.0 - 1.6 1.6 - 3.2 3.2 - 4.8 4.8 - 6.4 6.4 - 8.0						

表 A-10 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 NDVI 套色影像表

年度	2010			2011		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/15） 289（10/16-10/31）	305（11/01-11/16） 321（11/17-12/02）	337（12/03-12/18） 353（12/19-12/31）	001（01/01-01/16） 017（01/17-02/01）	033（02/02/02/17） 049（02/18-03/05）	065（03/06-03/21） 081（03/22-04/06）
Max NDVI 套色影像						
圖例 -1.00 - 0.00 0.00 - 0.08 0.08 - 0.18 0.18 - 0.28 0.28 - 0.35 0.35 - 0.45 0.45 - 1.00						

年度	2011					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	097 （04/07-04/22）	129 （05/09-05/24）	161 （06/10-06/25）	177（06/26-07/11） 193（07/12-07/27）	209（07/28-08/12） 225（08/13-08/28）	241（08/29-09/13） 257（09/14-09/29）
Max NDVI 套色影像						
圖例 -1.00 - 0.00 0.00 - 0.08 0.08 - 0.18 0.18 - 0.28 0.28 - 0.35 0.35 - 0.45 0.45 - 1.00						

表 A-11 2010 年 10 月至 2011 年 09 月 Terra/Aqua-MODIS MOD13 衛星產品各月份 EVI 套色影像表

年度	2010			2011		
月份	10	11	12	01	02	03
期別	273（09/30-10/15） 289（10/16-10/31）	305（11/01-11/16） 321（11/17-12/02）	337（12/03-12/18） 353（12/19-12/31）	001（01/01-01/16） 017（01/17-02/01）	033（02/02/02/17） 049（02/18-03/05）	065（03/06-03/21） 081（03/22-04/06）
EVI 套色影像						
圖例 0.0 - 0.2 0.2 - 0.4 0.4 - 0.6 0.6 - 0.8 0.8 - 1.0						

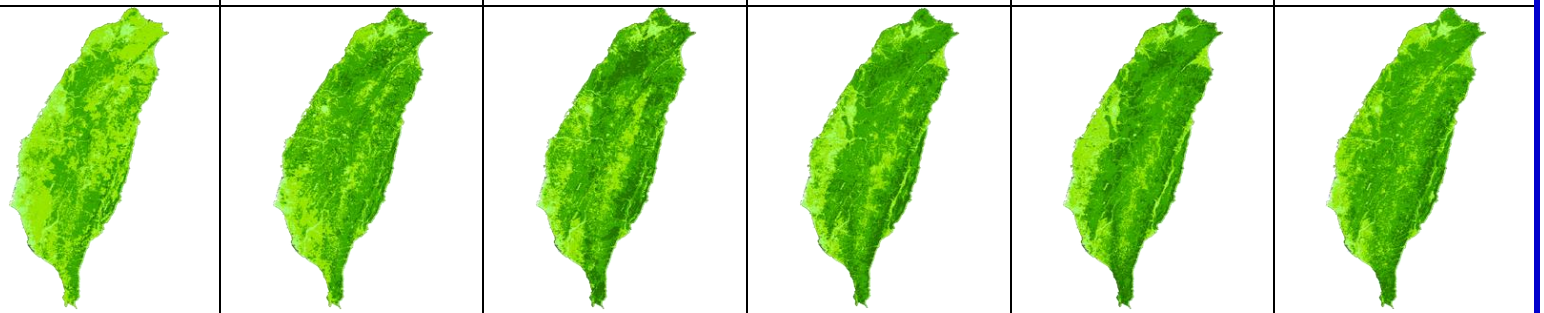
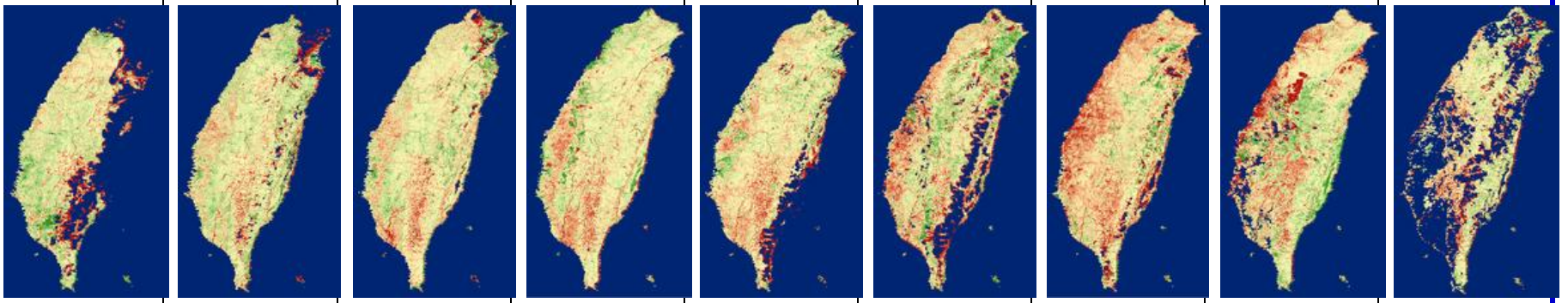
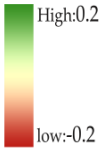
年度	2011					
月份	04	05	06	07	08	09
期別	097　（04/07-04/22）	129　（05/09-05/24）	161　（06/10-06/25）	177（06/26-07/11） 193（07/12-07/27）	209（07/28-08/12） 225（08/13-08/28）	241（08/29-09/13） 257（09/14-09/29）
EVI 套色影像						
圖例 0.0 - 0.2 0.2 - 0.4 0.4 - 0.6 0.6 - 0.8 0.8 - 1.0						

表 A-12 2011 年 001 至 257 期植生異常指標套色影像表

年度	2011								
期別/日期	001 (01/01-01/16)	017 (01/17-02/01)	033 (02/02-02/17)	049 (02/18-03/05)	065 (03/06-03/21)	081 (03/22-04/06)	097 (04/07-04/22)	113 (04/23-05/08)	129 (05/09-05/24)
NDVI 差異值套色影像									
圖例									

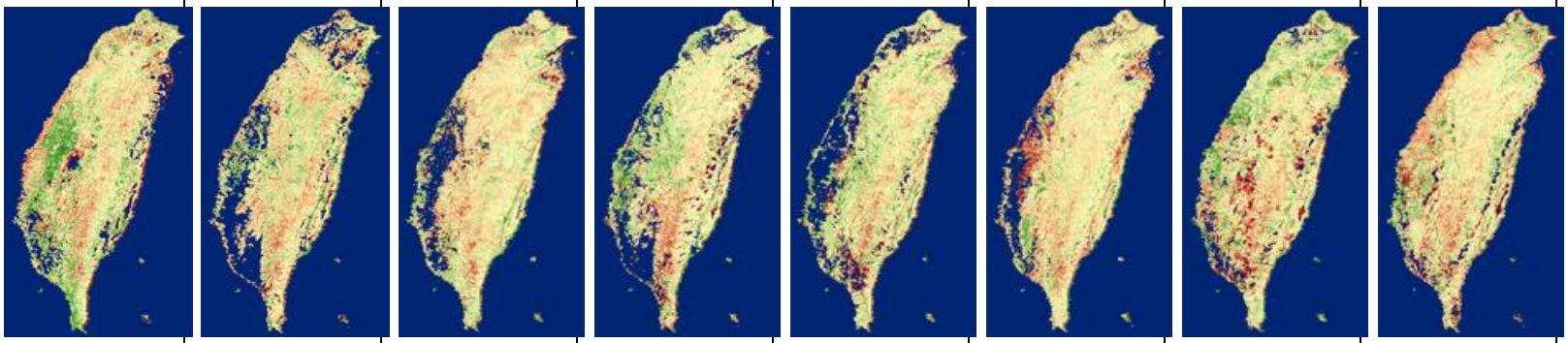
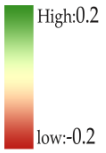
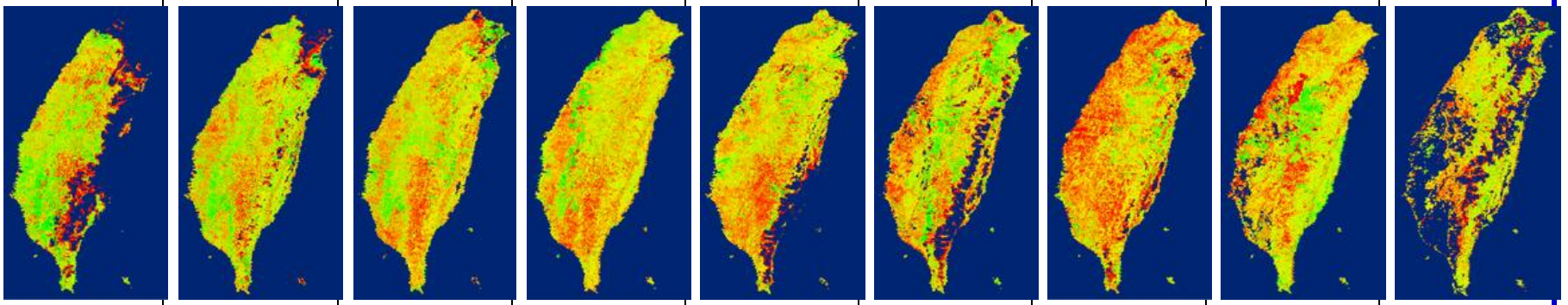
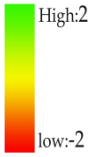
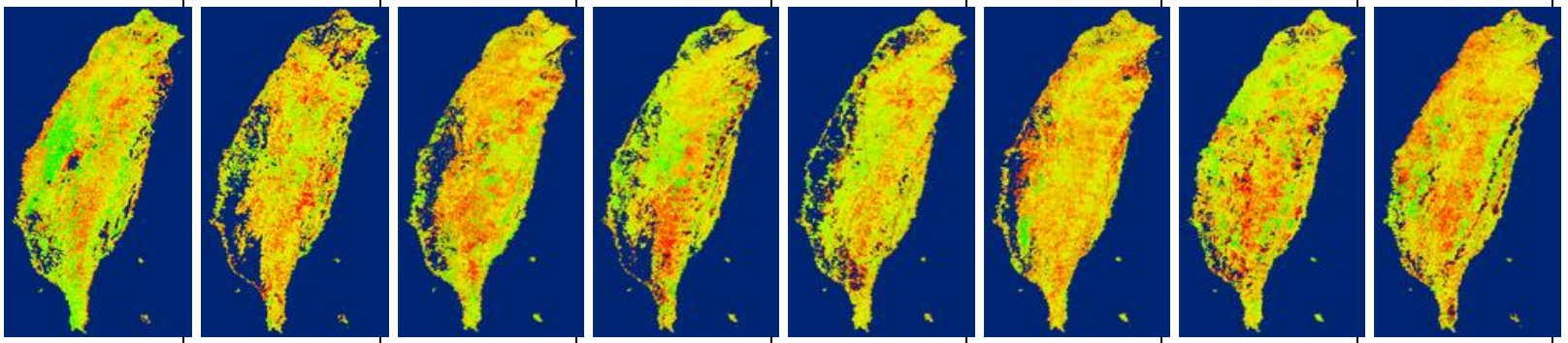
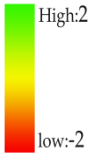
年度	2011							
期別/日期	145 (05/25-06/09)	161 (06/10-06/25)	177 (06/26-07/11)	193 (07/12-07/27)	209 (07/28-08/12)	225 (08/13-08/28)	241 (08/29-09/13)	257 (09/14-09/29)
NDVI 差異值套色影像								
圖例								

表 A-13 2011 年 001 至 257 期植生異常指標套色影像表

年度	2011								
期別/日期	001 (01/01-01/16)	017 (01/17-02/01)	033 (02/02-02/17)	049 (02/18-03/05)	065 (03/06-03/21)	081 (03/22-04/06)	097 (04/07-04/22)	113 (04/23-05/08)	129 (05/09-05/24)
植生差異指標套色影像									
圖例									

年度	2011							
期別/日期	145 (05/25-06/09)	161 (06/10-06/25)	177 (06/26-07/11)	193 (07/12-07/27)	209 (07/28-08/12)	225 (08/13-08/28)	241 (08/29-09/13)	257 (09/14-09/29)
植生差異指標套色影像								
圖例								

附錄 B、碳吸存推估及植生異常指標分析理論

B.1 遙測碳吸存研究方法

B.1.1 研究理論基礎-以植生吸收輻射推估植生生產量

植物淨初級生產力(NPP)及光合作用有效吸收輻射(APAR)之關係由 Monteith(1972, 1977)所提出，其光能利用效率(RUE)說明在充分養份及水分灌溉下的生長作物，其淨初級生產力(NPP)與光合作用有效吸收輻射(APAR)呈現線性關係，其中光合作用有效吸收輻射受到日照時數、潛勢入射輻射以及植物的葉面幾合呈現方式(geometry of displayed leaf material)影響，而地理空間區位、季節及雲層覆蓋等因素則影響潛勢入射輻射量。此光能利用效率提供另一途徑估算植生生產力，考量空間區位上有效日照輻射及植物本身輻射吸收的限制，排除探討碳循環及養分平衡等複雜的植生生長機制(Heinsch *et al.*, 2003)。

Monteith(1972, 1977)的光能利用效率(RUE)針對在充分養份及水分灌溉下的生長作物進行研究，在實際應用於生態系統初級生產量的估算時，需考量植物種類及所處環境的約制條件。Monteith 研究著重於一年生草本作物，其維持機能所需的自營性呼吸較低，相對地，多年生木本植物由於木質邊材(sapwood)比例較大，其維持性呼吸成本(maintenance respiration cost)較高，導致淨初級生產力(NPP)較低，由於植物在不同年齡及樹種的情況條件下，其維持機能所需的自營性呼吸差異極大，造成光能利用效率變異，進而影響光合作用有效吸收輻射(APAR)與淨初級生產力(NPP)的相關性，研究顯示若排除植物維持性呼吸的因素，光合作用有效吸收輻射(APAR)與總初級生產力(GPP)呈現出較佳的相關性，亦即光能利用效率更能反映 APAR 與 GPP 間的關係(Running *et al.*, 1999)。

光能利用效率另一變異來自於非極適天候情況，並以溫度及溼度為植生生長的主要制約因素，當氣溫低於冰點溫度或蒸氣壓力差(vapor pressure deficit, VPD)過大，將導致植物氣孔關閉，限制光合作用的進行，進而造成光能利用效率的降低，故 Monteith 理論在實際應用於非極適氣候情況時，尚需考量約制因素所造成的影響。

表 B-1 植生碳吸存估算相關名詞表

中文全名/英文全名	簡稱	單位	說明
總初級生產力 Gross Primary Productivity	GPP	t C/ha/month g C/m²/day	在生態系統中初級生產者的總碳吸存量
淨光合作用量 Net Photosynthesis	PSNnet	t C/ha/month g C/m²/day	植生為維持生理機能，亦進行呼吸作用，進而造成碳的排放。淨初級生產力為總初級生產量與植生細根及葉面維持性呼吸的差值；以每日或每 8 日表示
淨初級生產力 Net Primary Productivity	NPP	t C/ha/year Kg C/m²/year	總初級生產量扣除葉面及細根維持性呼吸、成長性呼吸、以及 live wood 維持性呼吸，為植生碳吸存；以年表示(GPP-Ra)
淨生態系統生產力 Net Ecosystem Productivity	NEP	g C/m²/year	生態系統中總初級生產量扣除自營性及異營性呼吸（GPP-Ra-Rh），為生態系統碳吸存
淨生態系統二氧化碳交換 Net Ecosystem Exchange	NEE	g CO_2/ m²/sec	生態系統中的二氧化碳淨流通量
入射光合作用有效輻射 Incident Photosynthetically Active Radiation	IPAR	MJ/m²/day	太陽光電磁波長約介於 400-700nm 的光譜波段，為植物進行光合作用所仰賴的太陽光能
光合作用有效輻射分量 Fraction of Incident PAR Absorbed by the Surface	FPAR	ratio	光合作用有效輻射中實際為植被層吸收的比率
光合作用有效吸收輻射 Absorbed Incident PAR	APAR	MJ/m²/day	植被層實際吸收的光合作用有效輻射量，為前兩者乘積（IPAR*FPAR）
光能利用效率 Radiation Use Efficiency	ε	Kg C/MJ	綠色植生在單位輻射能量下所產生的碳吸存量

B.1.2 MODIS 總初級生產力演算式

MODIS 初級生產量推估(MOD17 GPP)主要參酌 Monteith(1972, 1977)研究，藉由有效吸收輻射(APAR)及光能利用效率(RUE)推估總初級生產量(GPP)(式 B1) (圖 B1)，其中光能利用效率考量溫度及蒸氣壓力差兩項約制因素(式 B2)；光合作用有效吸收輻射(APAR)則藉由入射有效輻射(IPAR)及有效輻射分量(FPAR)計算而得(式 B3)(Heinsch *et al.*, 2003)：

$$GPP = \varepsilon * APAR \quad \text{(式 B1)}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} * TMIN_{scalar} * VPD_{scalar} \quad \text{(式 B2)}$$

$$APAR = IPAR * FPAR \quad \text{(式 B3)}$$

ε_{max}：最大光能利用效率(kgC/MJ)

VPD_{scalar}：蒸氣壓力差約制乘數

$TMIN_{scalar}$：最低溫約制乘數

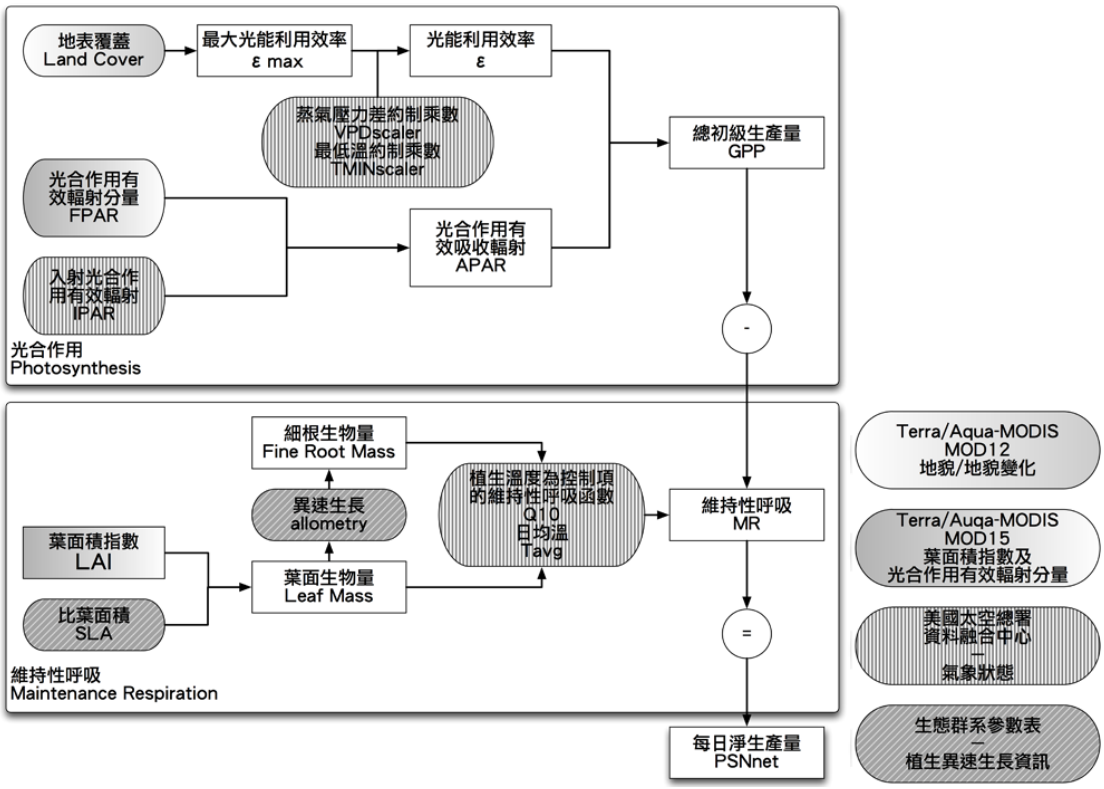


圖 B-1 MOD17 資料處理流程 (資料來源: MOD17 ATBD)

在光能利用效率的推估上，MOD17 研究團隊採用 BIOME-BGC 模型，針對全球主要植生型態進行總初級生產量(GPP)及光合作用有效吸收輻射(APAR)的模擬估算，

計算出各生態植群最大光能利用效率(ε_{max})，由於溫度及蒸氣壓力差對植物光合作用產生約制效應，降低光能利用效率，MOD17 演算式採用一簡單線性關係，表示日低溫及蒸氣壓力差對最大光能利用效率產生的衰減作用(圖 B2)。圖中 $TMIN_{max}$(℃)、$TMIN_{min}$(℃)、VPD_{max}(Pa)、VPD_{min}(Pa)分別為當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日低溫(在極適蒸氣壓情況下)、當 $\varepsilon=0$ 之日低溫(在任何蒸氣壓情況下)、當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日間平均蒸氣壓力差(在極適日低溫情況下)以及當 $\varepsilon=0$ 之日之平均蒸氣壓力差(在任何日低溫情況下)。藉由廣泛先期研究，全球主要植生型態的 ε、$TMIN_{min}$、$TMIN_{max}$、VPD_{min}、VPD_{max} 以表列形式呈現於生態群系參數對照表(Biome Parameter Look-Up Table, BPLUT) (表 B1)；配合此 BPLUT，以及 MOD12 產品的地貌分類資訊、資料融合中心(DAO)提供的每日最低溫及蒸氣壓差等氣象資料，可據以推估光能利用效率。

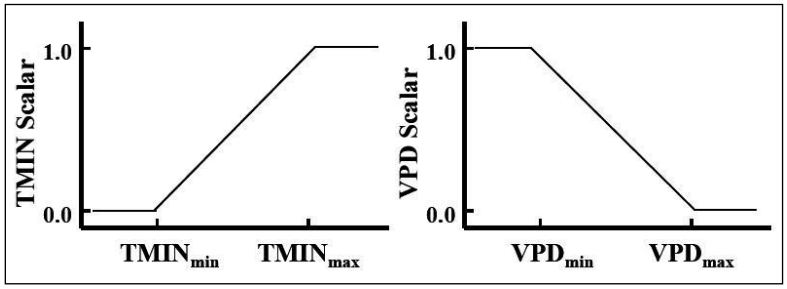


圖 B-2 BPLUT 低溫及蒸氣壓力差對最大光能利用效率之線性衰減 (資料來源: MOD17 ATBD)

表 B-2 生態群系參數對照表 (資料來源: MOD17 ATBD)

參數 Parameter	生態群系分類					
	常綠針葉林（ENF）	常綠闊葉林（EBF）	落葉針葉林（DNF）	落葉闊葉林（DBF）	混合林（MF）	草生地（WL）
最大光能利用效率 ε_{max}	0.001008	0.001159	0.001103	0.001044	0.001116	0.000800
每日						
當 $\varepsilon=\varepsilon_{max}$ 之日低溫 $TMIN_{max}$（℃）	8.31	9.09	10.44	7.94	8.50	11.39
當 $\varepsilon=0$ 之日低溫 $TMIN_{min}$（℃）	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00

當 ε=ε_{max} 之日間平均蒸氣壓力差 VPD_{max}（Pa）	2,500.00	3,900.00	3,100.00	2,500.00	2,500.00	3,100.00
當 ε=0 之日平均蒸氣壓力差 VPD_{min}（Pa）	650.00	1,100.00	650.00	650.00	650.00	930.00
比葉面積 SLA（projected leaf area m^2/kg leaf C）	21.10	23.30	31.00	26.20	21.50	33.80
以植生溫度為控制項的維持性呼吸函數 $Q10_{MR}$（unitless）	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

光合作用有效吸收輻射(APAR)需由入射有效輻射(IPAR)及有效輻射分量(FPAR)進行計算，其中入射有效輻射(IPAR)由美國太空總署(NASA)資料同化中心(Data Assimilation Office, DAO)提供 1°*1.25°解析度的入射短波輻射量資料(incident shortwave radiation)，以進行光合作用有效輻射估算（式 B4），光合作用有效輻射分量(FPAR)則為 MOD15 產品，主要藉由地表反射率(MOD09 Reflectance)與地貌覆蓋(MOD12 Land Cover)進行推估演算，其流程圖如圖 B3 所示。

$$IPAR = 0.45 * SW_{rad} \quad \text{.....(式 B4)}$$

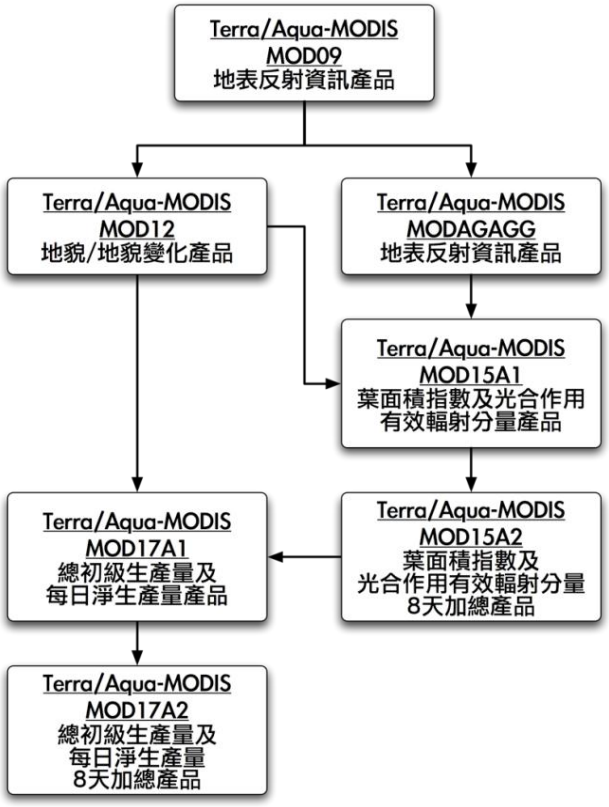


圖 B-3 MODIS 總初級生產量及淨初級生產量產品鏈結(資料來源: MOD17 ATBD)

B.1.3 MODIS 淨光合作用量演算式

植物藉由光合作用將大氣中的碳吸存，轉化為本身生物量，但為維持生理機能，亦進行呼吸作用，進而將碳釋放出來；總初級生產力與維持性呼吸所產生碳排放的差值，即為淨光合作用量，在 MODIS 演算式針對每日 GPP 及 PSNnet 的演算中，此碳排放主要包含植物葉面及細根(fine root)的維持性呼吸(maintenance respiration)(式 B5)，藉由各別生物量及維持性呼吸比率演算而得，其中生物量以植物葉面積(leaf area index)(MOD15 產品)進行推估(式 B7、B9)，而維持性呼吸比率則藉由 DAO 提供的氣溫資料進行律定(式 B6、B8)；各生態群系參數(SLA、leaf_mr_base、Q10、froot_leaf_ratio)則為廣泛先期研究的成果，詳列於 BPLUT 供對照演算。

$$PSNnet = GPP\text{-}Leaf_{MR}\text{-}Froot_{MR} \quad \text{(式 B5)}$$

$$Leaf_{MR} = Leaf_{Mass} * Leaf_{MR\_base} * Q10_{MR}^{\left[T_{avg}\text{-}20.0 \ /10.0\right]} \quad \text{(式 B6)}$$

$$Leaf_{Mass} = LAI \ / \ SLA \quad \text{(式 B7)}$$

$$Froot_{MR} = Froot_{Mass} * Froot_{MR\_base} * Q10_{MR}^{\left[T_{avg}-20.0 \ /10.0 \right]} \text{.....(式 B8)}$$

$$Froot_{Mass} = Leaf_{Mass} * ratio_{Froot\_Leaf} \text{.....(式 B9)}$$

PSNnet:淨光合作用量(kg C day^{-1}),

$Leaf_{MR}$, $Froot_{MR}$: 葉面及細根維持性呼吸 (kg C day^{-1})

$Leaf_{Mass}$, $Froot_{Mass}$: 葉面及細根質量(kg C)

$Leaf_{MR\_base}$, $Froot_{MR\_base}$: 於 20°C 情況下的葉面及細根維持性呼吸比例基底(kg C kg C^{-1} day^{-1})

$Q10_{MR}$: 以植生溫度為控制項的維持性呼吸函數(指數型式)

T_{avg}: 日均溫(°C)

LAI: 葉面積指數(m^2 leaf m^{-2} ground area)

SLA: 比葉面績(m^2 kg C^{-1})

$ratio_{Froot\_Leaf}$: 細根與葉面的碳質量比例

B.2 渦流協變性系統觀測原理及森林碳收支

生態圈與大氣圈間的能量及物質交換主要發生在交會的近地層，受到地表摩擦、熱傳導對流、蒸發散作用以及地形效應的影響，造成近地層溫濕度、風速、與物質濃度具有較大的垂直梯度；在近地層的大氣運動中，大致可分為平均風及紊流運動，平均風在水平方向的物質及能量傳輸扮演支配作用，紊流運動則關係著垂直方向的傳輸運動，紊流的產生則主要由於當空氣通過平坦表面，受地面摩擦力及空氣黏滯力的影響，不同層空氣分子無法保持平行移動(Laminar flow)，逐漸發展成不規則旋轉的渦流(eddy)，呈現隨機與混亂的分子運動與紊流(turbulence)，並造成垂直方向上的能量及物質傳送(夏禹九，2008)；為描述此混亂的紊流運動，雷諾分解法(Reynolds decomposition)將大氣中某一瞬時及位置的物理量拆解為平均項與擾動項，透過此定量的分析方式，描述平均項為平均風運動，象徵較大時空尺度的天氣現象，而擾動項則由紊流運動所貢獻:

$$x = \overline{x} + x' \ , \ \overline{x'} = 0 \text{.....(式 B10)}$$

通量為某物質在單位時間及單位區域面積的變化量，描述近地層某物質的垂直通量，可藉由其濃度與垂直風速的乘積來表示，此兩物理量皆可透過雷諾分解法區分為

平均項及擾動項，由於紊流具有隨機與不規則的特性，瞬時通量觀測不具有實質的意義，藉由考慮某單位時間的平均通量，垂直通量可表示為:

$$F = \overline{wc} = \overline{(\bar{w}+w')(\bar{c}+c')} = \overline{(\bar{w}\bar{c}+\bar{w}c'+w'\bar{c}+w'c')} = \overline{wc}+\overline{w'c'} \quad \text{....(式 B11)}$$

式中 w 為垂直風速(m/s)，c 為所觀測物質的濃度，$\overline{wc}$ 可依此解釋為平流通量，意即平均風所造成的通量，而 $\overline{w'c'}$ 則為紊流運動所貢獻的通量，在水平均質的地形表面及一般大氣條件下，當空氣具非壓縮性，平均垂直風速可假定為零，亦即垂直方向的物質或能量傳輸主要透過紊流運動的輸送，故上式可簡化為:

$$F = \overline{wc}+\overline{w'c'} = \overline{w'c'} \quad \text{.....(式 B12)}$$

此 $\overline{w'c'}$ 為所求物質濃度與垂直方向風速共同擾動的平均協變量，也是渦流協變性系統觀測理論及命名的基礎依據；依據所觀測的物理量，代換 c 為二氧化碳濃度 ρ_c、比濕(specific humidity, q)、或位溫(potential temperature,θ)，則二氧化碳通量 F_c、潛熱通量(latent heat flux, F_q)、可感熱通量(sensible heat flux, F_θ)可分別計算如下：

$$\begin{aligned} F_c &= \overline{w'\rho_c'}, \\ F_q &= L_v\overline{\rho w'q'}, \\ F_\theta &= c_p\overline{\rho w'\theta'} \end{aligned} \quad \text{.....(式 B13)}$$

式中 ρ 為溼空氣密度，C_p 為空氣熱容(J/kg K)，L_v 為蒸發潛熱(J/kg)

渦流協變系統的觀測理論，假定通量的垂直輸送以紊流運動為主，如欲取得小型氣旋垂直風速與觀測物質濃度的瞬時變量，須使用高速反應的感測儀器，此儀器通常架設於高台上，以 10Hz 或 20Hz 的觀測頻率量測三維風速及音波溫度(如超音波風速計)，並同步觀測二氧化碳、水氣、溫度或其他微量氣體隨渦流輸送的變化(如開放式或封閉式的紅外線二氧化碳、水氣分析儀)。

以二氧化碳而言，所關注為一生態系統中的淨生態系統交換(NEE)，除了垂直方向的通量，尚須考量水平方向的貢獻及系統內的暫存效應(莊振義，2010)；透過物質守恆的觀點，若假定生態系統為一可控制的容積，並以儀器架設高度視為此容積的上邊界，則 NEE 可表示為

$$NEE = \overline{w'\rho_c'}(h_r) + \int_0^{h_r} \frac{\partial \overline{\rho_c}}{\partial t} dz + \int_0^{h_r} (\bar{u}(z)\frac{\partial \overline{\rho_c}(z)}{\partial x} + \bar{v}(z)\frac{\partial \overline{\rho_c}(z)}{\partial y})dz + \int_0^{h_r} \bar{\omega}(z)\frac{\partial \overline{\rho_c}(z)}{\partial z} dz$$

I　　II　　III　　IV….(式 B14)

式中 h_r 為儀器架設高度，$u(z)$、$v(z)$為風速在 z 高度水平方向的分量，I 為儀器高度所量測的二氧化碳渦流通量，II 為地表至儀器高度間的暫存量，III 為水平方向的平流通量，IV 為垂直方向的平流通量；在理想的環境條件下，當近地層滿足以下假定條件，則 NEE 的演算可進一步簡化：

1. 當紊流發展良好，二氧化碳被紊流運動所混合，保持相當小的湧動現象，地表至儀器高度間的二氧化碳濃度無明顯差異時，暫存項 II 可予以忽略。
2. 當量測所在地的下墊面植被為水平均質，水平方向的二氧化碳濃度梯度變化相當小，則水平方向的平流通量可視為零。
3. 當量測所在地無特殊地形效應或受到地區性環流的垂直風場，在理想大氣條件下，平均垂直風速應為零，垂直平流通量可忽略不計。

綜合以上的簡化假設，式 B14 可簡化為

$$NEE = \overline{w'\rho_c'} \quad \text{.....(式 B15)}$$

由此可知，渦流協變系統觀測立基於理想的大氣及地形條件，假定透過架設於樹冠層上的單點觀測儀器，量測大氣與下墊面生態系間的渦流通量，能代表所觀測林分尺度的二氧化碳通量；但實際儀器架設場址常存在於非理想的地形條件及受到複雜風場的影響，當觀測的時間尺度擴大，也必然遭遇特殊的天候狀況，而無法完全滿足理想的假定條件，以下列舉幾項渦流協變系統的觀測考量：

1. 當水平風場較弱，大氣相對穩定，導致無明顯的渦流發展及紊流運動，此時地被植物與土壤呼吸作用所釋放的二氧化碳無法有效傳輸至冠層上的架設儀器高度，而持續的累積於冠層底層，此儲存效應將造成量測通量無法有效代表生態系的二氧化碳交換；在夜間，輻射冷卻造成較微弱的空氣對流，冠層下的溫度分層現象較為明顯，將造成二氧化碳的暫存效應並影響渦流觀測的資料代表性；故針對森林氣象的渦流協變系統觀測，常在冠層下各高度剖面架設觀測儀器，透過垂直輪廓線的二氧化碳觀測，量測各分層在不同時點的通量及儲存量，以有效解釋樹冠

層下暫存效應的影響。

2.受到複雜地形或非均質植被、樹冠間隙的影響，促使重力泄流(drainage flow)或二氧化碳在水平方向碳源與碳匯分布的不均勻，此平流通量將造成通量觀測的不確定性，並影響生態系統內的二氧化碳交換；由於平流通量在發生機制及時間變化上具有高複雜性，造成平流通量不論在理論及實測上皆具有困難性，故在傳統通量量測上多藉由假定理想的觀測環境將其忽略，或僅針對特定的平流運動進行探討；在台灣地區，受到平地環境高度利用的影響，森林多位於地勢起伏的山地區域，要尋覓地勢平坦及地覆均質的通量觀測點位具有相當的困難性，若架設點位地勢複雜，則須謹慎考量平流通量的影響。

3.垂直平流通量除了受到複雜地形的影響，即使在平坦均質的環境下，亦可能受到熱對流或地區性環流的影響，造成冠層上下風場的退耦現象(decoupling)，或平均垂直風速不等於零，故簡化架設將造成生態系統交換的錯誤解釋；近年來，垂直平流通量為複雜地形或非理想大氣條件下通量觀測的重要研究課題,前人研究中，藉由垂直溫度與二氧化碳濃度的剖面量測，或透過水平風速的剖面量測以進行垂直平流項的估測。

森林生態系中存在複雜的碳循環機制，IPCC 建立的土地利用、土地利用改變和林業(Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF)亦明確界定森林碳匯分布於地上部生物量(Above-ground Biomass)、地下部生物量(Below-ground Biomass)、枯死木(Dead wood)、枯枝落葉(Litter)以及土壤有機土(Soil organic matter)等五大碳庫，前述的渦流協變系統透過近地層微氣象的觀點，將下墊面的生態體系視為一黑箱，排除探討觀測儀器下方複雜的碳循環及碳收支情形，僅探討此黑箱對外及對內的二氧化碳通量變化，故在森林生態學的解釋應用上亦具有侷限性；若從生態機制的角度出發，森林碳匯功能可透過碳收支及物質守恆來進行解釋：

$$NEP = GPP - R_a - R_h + F_{leach} \quad \text{.....(式 B16)}$$

式中 R_a 為植物呼吸作用所產生的二氧化碳排放，包含維持性呼吸及成長性呼吸，R_h 為土壤微生物及其他異營性生物呼吸作用造成的排放，F_{leach} 則為土壤淋洗作用所產生的淨貢獻項，透過森林中各組成分子碳匯與碳源機制的探討，常為生態系碳循環模型的

理論基礎，而此模型的建構，亦提供不同觀測技術(通量觀測、實地量測、生態模型、遙感)一有效的整合及交互比對平台，透過多尺度而有相互獨立的碳存量及碳通量觀測，分別從生態學與森林氣象的觀點出發，才能對複雜的森林碳匯結構及功能進行概觀性的分析。

B.3 植生異常指標分析

MODIS NDVI 以 16 日為資料週期，每年有 23 期觀測資料，並從 2000 年開始觀測，至今有約 10 年的資料產品，除了提供空間上二維維度的地表資訊，在時間軸上，也包含季節性橫向、以及年度間縱向的連續資料，故在時間維度上亦可以二維矩陣來表示(圖 B4)。

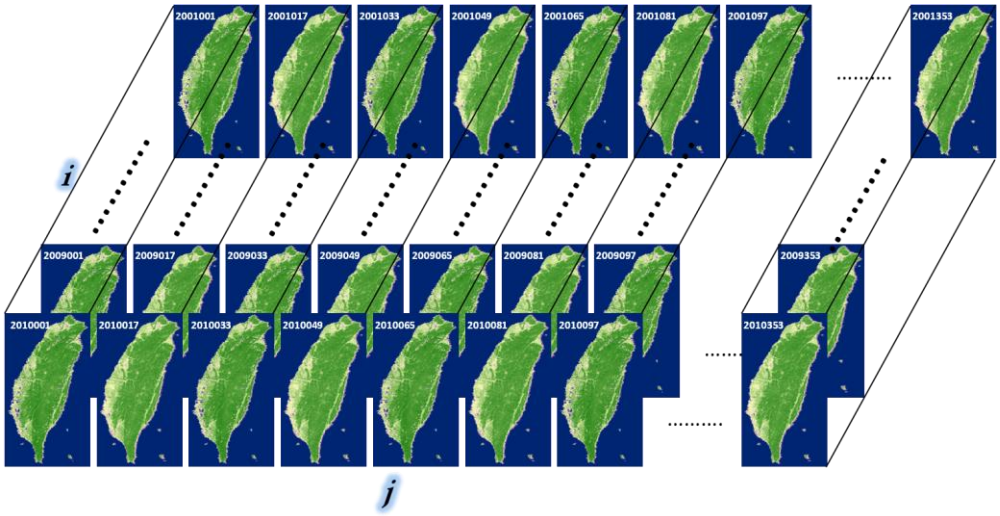


圖 B-4 MODIS NDVI-時間維度的二維矩陣

雲層覆蓋影響光學遙測的觀測，降低 NDVI 數值，在資料前處理中雖以利用 pixel reliability 進行雲區的剃除，但雲區周圍的薄雲及氣膠仍經常存在，有必要將其去除；由於薄雲氣膠在時間及空間分佈上皆為隨積出現，並造成 NDVI 的明顯降低，在 NDVI 時序資料上呈現短期距間的突然降低及上升，故利用 NDVI 在時間上的變化率，並設定 $NDVI_j'$ 及 $NDVI_{j-1}'$ 的門檻值，能有效將薄雲及氣膠影響的區域移除(式 B17)(圖 B5)。

$$NDVI_j' = 100 \times \frac{NDVI_{j+1} - NDVI_j}{t_{j+1} - t_j} \quad \text{.....(式 B17)}$$

t_j:第 j 資料週期中的觀測日期(Julian day)

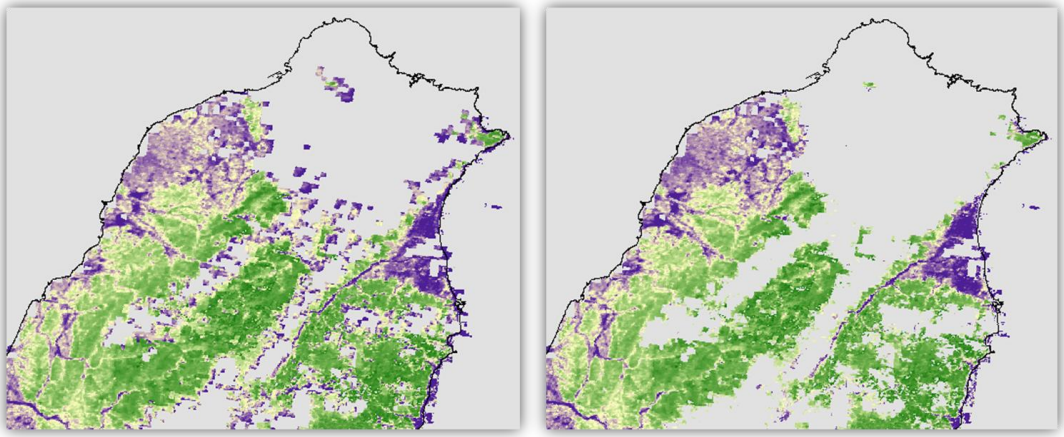


圖 B-5 MODIS NDVI 雲區移除

透過歷年同期植生指標資料的分析，能建立一植生狀態的參考基準(式 B18)，並界定歷年間的變異範圍(式 B19)，而所謂的植生異常，即意指相較於此參考基準，植生狀態有明顯的變化，而此變化是否顯著，則除了與參考基準的差值，亦需顧及歷年間的變動範圍，故植生異常指標(Vegetation Anomaly Index)為一常態化後的數值，亦即訊雜比，代表統計意義上植生狀態相較於基準值的離散程度(式 B20)。

$$NDVI\_mean_j = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} NDVI_{i,j} \quad \text{.....(式 B18)}$$

$$NDVI\_std_j = \frac{1}{N-1}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(NDVI_{i,j} - NDVI\_mean_j)^2} \quad \text{.....(式 B19)}$$

$NDVI_{ij}$: 第 i 年中第 j 期的 NDVI

$$VAI_{i,j} = \frac{NDVI_{i,j} - NDVI\_mean_j}{NDVI\_std_j} \quad \text{.....(式 B20)}$$

植生異常指標主要藉由影像相減法，比較即期及基期的 NDVI 觀測值，並將此差異數值進行常態化，使其具有統計上的意義，建立一簡易標準數值供森林健康評估；但實際而言，指標無法判定此異常的主要來源為何，可能為乾旱、火災、崩塌、或僅為大氣雲層干擾所引發，故除了指標必須進行律定，實際是否為森林健康受到影響，尚需藉由時續性的資料分析或輔助資訊以進行確認。

附錄 C、嘉義及大雪山外業調查成果匯整

C.1 蘭潭水庫集水區保安林地（嘉義大學蘭潭校區後山）

C.1.1 樣區描述

a. 樣區中心座標：經度：120.4939° ；緯度：23.4758°

b. 海拔高度：84-125 公尺

c. 土壤構造：壤土

d. 林相：相思樹、血桐、麻竹、桃花心木、台灣欒

C.1.2 實驗規劃

a. 於均質地貌測區規劃 6 個 10m×10m 樣方，樣區選擇包含地形坡度、坡向、植生指標(透過衛星影像分析)以及光照環境等地理生態因子。

b. 每 10m×10m 樣方劃分為 A、B、C、D 4 象限(如圖 C1 所示)，分別進行地上部生物量量測、葉面積指數量測以及現地拍攝。

i. 地上部生物量量測：包含樹種辨識、植株分佈記錄、以及 B、C 象限每木植株的樹高、胸徑量測，藉此推算單株及 B、C 樣區生物量。

ii. 葉面積指數量測：分別於 10m×10m 樣方 4 象限中心點，以背對中心點，LAI-2000 儀器高度離地約 1m 進行量測，並以 4 筆資料平均值及標準差作為該樣區的量測數值；葉面積指數約以每月一次頻率進行觀測。

iii. 樣區拍攝：分別針對 10m×10m 樣方 4 象限的樹冠鬱閉(仰式拍攝)、樹種以及中心點的環景進行拍攝。

c. 冠層上光照背景值量測以鄰近的開闊地量測作為代表。

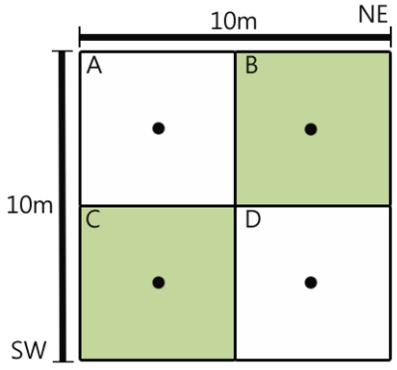


圖 C-1 10m×10m 樣方規劃

C.1.3 樣區位置及分佈點位

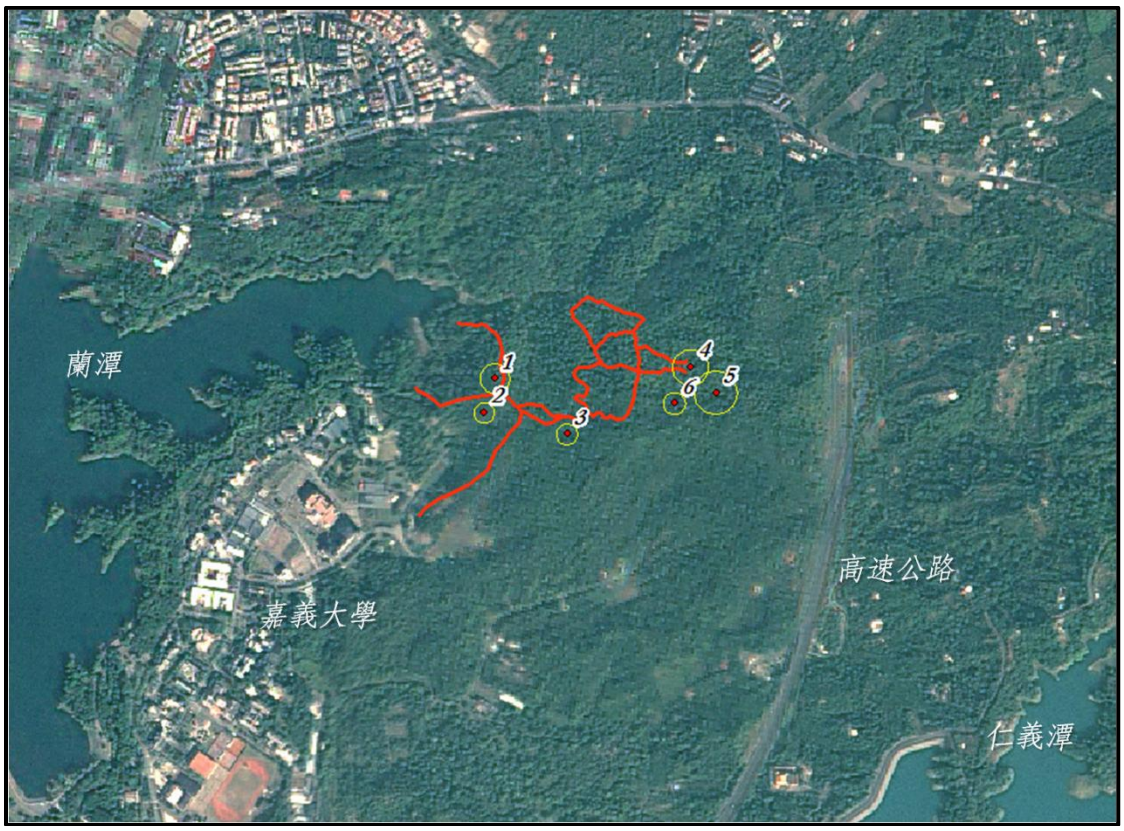


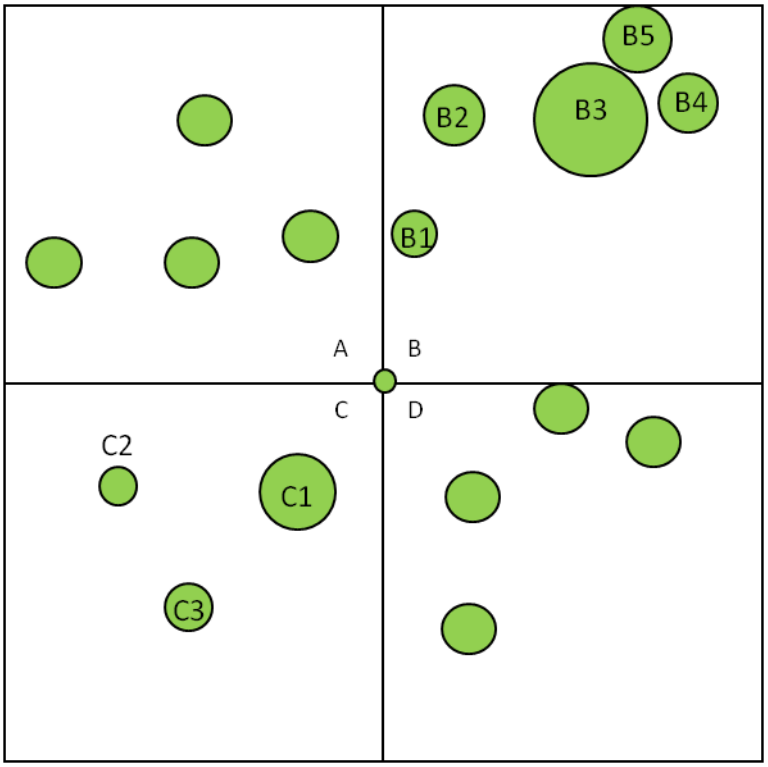
圖 C-2 嘉義蘭潭樣區位置及分佈點位

C.1.4 樣區屬性資料及 LAI、材積量測成果匯整

蘭潭水庫集水區保安林地葉面積指數量測　樣區 1					
樣區中心座標	X：197197		空曠地座標	X：197088	
	Y：2597221			Y：2597104	
高度(m)	109	坡向	西北方	坡度(°)	10.14

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			27.3	觀測面積(m^2)		2334.6
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
2.31	0.15	2	2011/03/23	07：55	陰	
2.88	0.14	4	2011/04/20	14：33	陰	
3.07	0.12	4	2011/05/18	14：50	陰	
3.61	0.13	4	2011/06/22	14：14	陰	
4.19	0.14	4	2011/07/28	14：30	陰	
5.43	0.40	4	2011/09/21	14：22	陰	
5.15	0.29	4	2011/10/19	15：16	晴	

蘭潭水庫集水區保安林地每木調查 樣區 1

調查日期	2011/03/23
植株分佈	

樹種組成	大葉桃花心木*8、鐵刀木*1
平均樹高(m)	9.3
總材積(m^3)	0.47

樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	大葉桃花心木	9.24	9.92	0.0301
B2	大葉桃花心木	10.32	9.66	0.0366
B3	鐵刀木	27.23	6.90	0.1819
B4	大葉桃花心木	9.52	9.55	0.0308
B5	大葉桃花心木	10.67	5.77	0.0234
C1	大葉桃花心木	12.90	17.07	0.101
C1	大葉桃花心木	9.04	7.82	0.0227
C3	大葉桃花心木	10.06	9.36	0.0337
中心	大葉桃花心木	6.59	7.98	0.0123

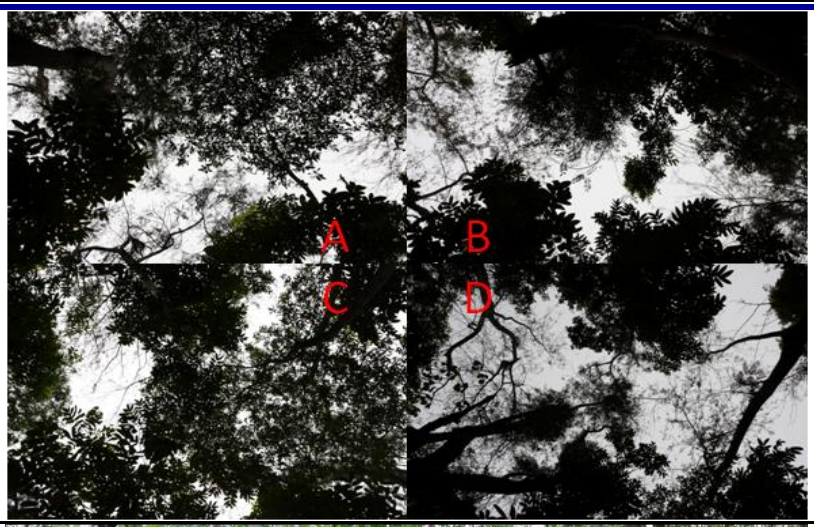
註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

大葉桃花心木(a：0.00003556；b：2.000000；c：1.000000)

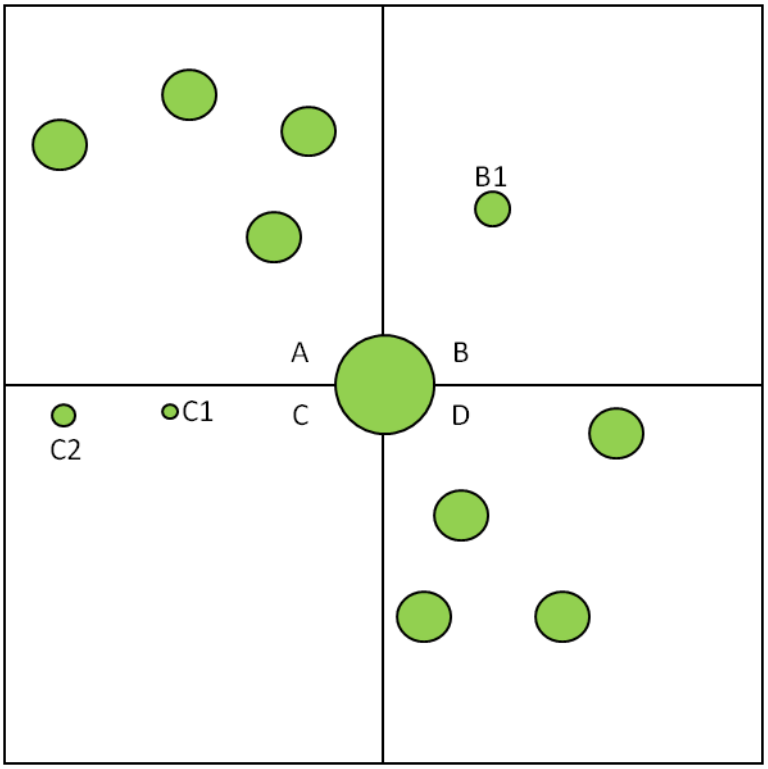
鐵刀木(*Cassia siamea* Lamarck.)(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)

樣點樹冠層照片	
環景照	

蘭潭水庫集水區保安林地葉面積指數量測 樣區 2					
樣區 中心座標	X：197169 Y：2597133		空曠地座標	X：197088 Y：2597104	
高度(m)	96	坡向	南方	坡度(°)	19.53

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			20.7	觀測面積(m^2)		134.16
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
3.43	0.07	4	2011/03/23	10：22	陰	
3.30	0.18	4	2011/04/20	14：48	陰	
3.68	0.26	4	2011/05/18	15：02	陰	
4.15	0.07	4	2011/06/22	14：33	陰	
4.14	0.05	4	2011/07/28	14：45	陰	
4.54	0.09	4	2011/09/21	14：37	陰	
4.56	0.27	4	2011/10/19	15：37	晴	

蘭潭水庫集水區保安林地每木調查 樣區 2

現地調查日期	2011/03/23
植株分佈	

樹種組成		大葉桃花心木*3、欖仁樹*1		
平均樹高(m)		7.3		
總材積(m^3)		0.22		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	大葉桃花心木	7.96	8.82	0.037554
C1	大葉桃花心木	4.62	5.94	0.010909
C2	大葉桃花心木	7.58	4.30	0.004982
中心	欖仁樹	22.90	10.20	0.233035

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

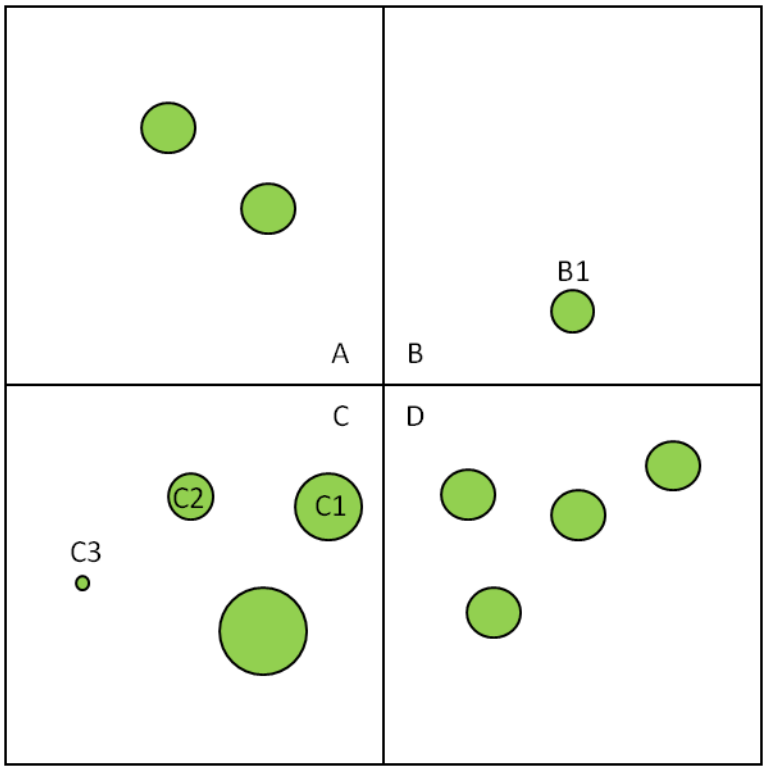
大葉桃花心木(a：0.00003556；b：2.000000；c：1.000000)

欖仁樹(*Terminalia catappa* L.)(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)

樣點樹冠層照片	
環景照	

蘭潭水庫集水區保安林地葉面積指數量測 樣區 3					
樣區座標	X：197383		空曠地座標	X：197088	
	Y：2597077			Y：2597104	
高度(m)	107	坡向	東北方	坡度(°)	12.55

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			11.6	觀測面積(m^2)		422.5
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
2.76	0.03	4	2011/03/23	11：54	陰	
2.92	0.13	4	2011/04/20	15：04	陰	
2.61	0.16	4	2011/05/18	15：14	陰	
3.49	0.39	4	2011/06/22	14：42	陰	
4.43	0.63	4	2011/07/28	14：56	陰	
4.40	0.37	4	2011/09/21	14：46	陰	
4.77	0.16	4	2011/10/19	15：45	晴	

蘭潭水庫集水區保安林地每木調查 樣區 3	
現地調查日期	2011/03/23
植株分佈	

樹種組成		血桐*4、芒果*1		
平均樹高(m)		4.5		
總材積(m^3)		0.24		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	芒果	8.28	3.2	0.0078
C1	血桐	20.70	7.12	0.1085
C2	血桐	15.61	3.10	0.0269
C3	血桐	6.05	2.2	0.0029
C4	血桐	19.75	7.12	0.0987

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

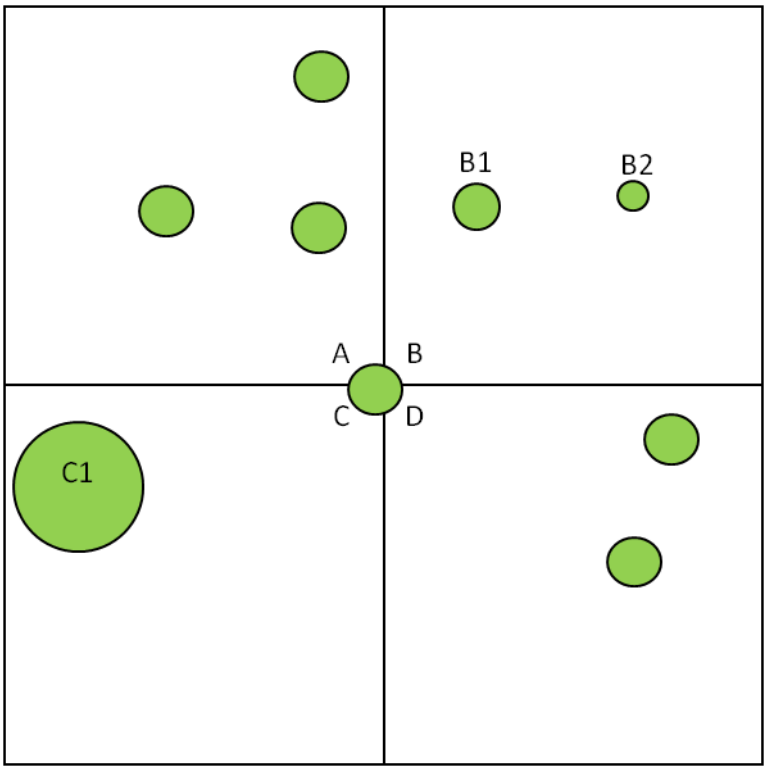
V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

血桐、芒果(*Mangifera indica* L.)(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)

樣點樹冠層照片	
環景照	

蘭潭水庫集水區保安林地葉面積指數量測　樣區 4					
樣區座標	X：197703		空曠地座標	X：197647	
	Y：2597250			Y：2597186	
高度(m)	75	坡向	--	坡度(°)	0

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			41.3	觀測面積(m^2)		5351.6
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
1.55	0.12	4	2011/03/23	13：56	陰	
0.68	0.13	4	2011/04/20	15：52	陰	
1.78	0.06	4	2011/05/18	16：04	陰	
2.36	0.14	4	2011/06/22	15：36	陰	
2.96	0.13	4	2011/07/28	15：43	陰	
2.11	0.18	4	2011/09/21	15：30	陰	
2.37	0.14	4	2011/10/19	16：17	晴	

蘭潭水庫集水區保安林地每木調查 樣區 4	
現地調查日期	2011/03/23
植株分佈	

樹種組成		大葉桃花心木*3、榕樹*1		
平均樹高(m)		13.6		
總材積(m^3)		1.58		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	大葉桃花心木	8.22	7	0.0168
B2	大葉桃花心木	10.83	6.72	0.028
C1	榕樹	35.54	16.98	0.7625
中心	榕樹	30.25	23.77	0.7732

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

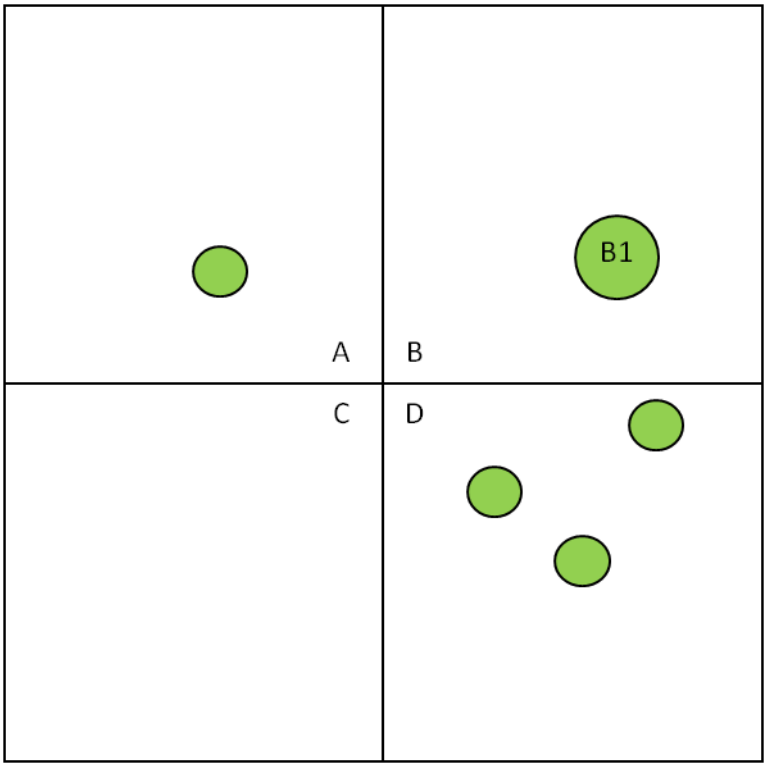
V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

大葉桃花心木、榕樹(a：0.00003556；b：2.000000；c：1.000000)

樣點樹冠層照片	
環景照	

蘭潭水庫集水區保安林地葉面積指數量測 樣區 5					
樣區座標	X：197768		空曠地座標	X：197647	
	Y：2597185			Y：2597186	
高度(m)	82	坡向	西北方	坡度(°)	3

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			55.5	觀測面積(m^2)		9667.7
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
3.12	0.12	2	2011/03/23	14：41	陰	
2.29	0.19	4	2011/04/20	16：08	陰	
3.77	0.19	4	2011/05/18	16：22	陰	
2.09	0.24	4	2011/06/22	16：01	陰	
3.05	0.30	4	2011/07/28	15：57	陰	
2.62	0.49	4	2011/09/21	15：56	陰	
2.72	0.29	4	2011/10/19	16：33	晴	

蘭潭水庫集水區保安林地每木調查 樣區 5	
現地調查日期	2011/03/23
植株分佈	

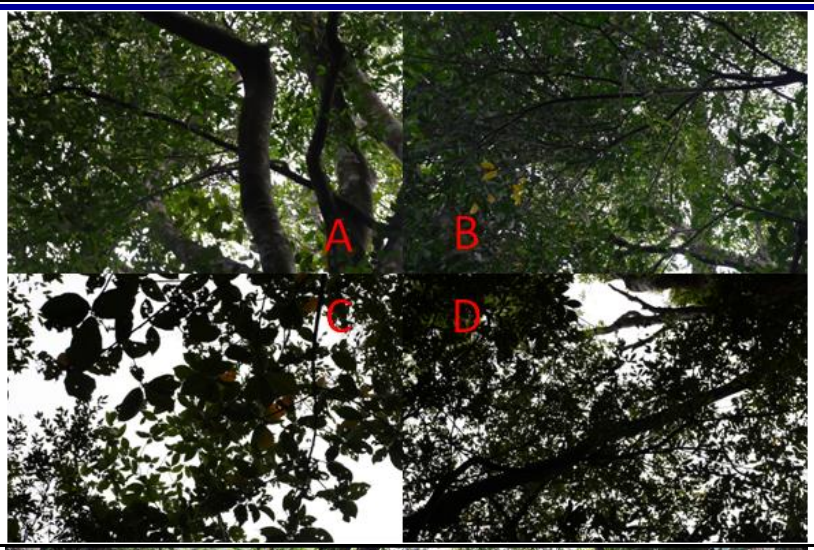
樹種組成		稜果榕*1		
平均樹高(m)		18.0		
總材積(m^3)		0.4862		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	稜果榕	29.62	15.59	0.339654

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

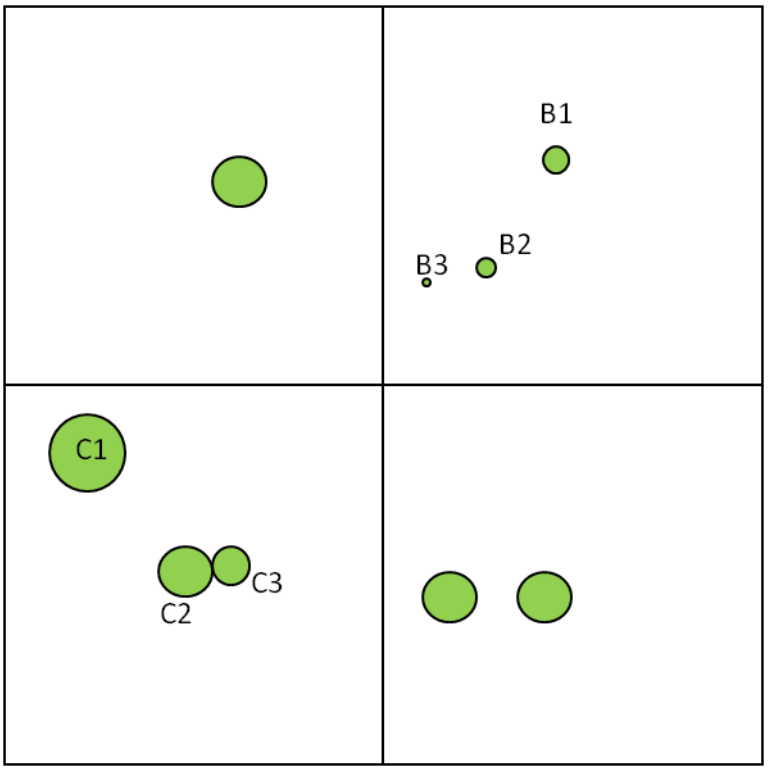
V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

稜果榕(*Ficus septica* Burm.)(a：0.00003556；b：2.000000；c：1.000000)

樣點樹冠層照片	
環景照	

蘭潭水庫集水區保安林地葉面積指數量測 樣區 6					
樣區座標	X：197661		空曠地座標	X：197647	
	Y：2597157			Y：2597186	
高度(m)	89	坡向	--	坡度(°)	0

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			17.1	觀測面積(m^2)		915.5
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
3.47	--	2	2011/03/23	15：26	陰	
2.99	0.15	4	2011/04/20	16：19	陰	
3.19	0.18	4	2011/05/18	16：48	陰	
3.55	0.17	4	2011/06/22	15：52	陰	
4.05	0.25	4	2011/07/28	15：51	陰	
3.15	0.21	4	2011/09/21	15：46	陰	
3.21	0.13	4	2011/10/19	16：24	晴	

蘭潭水庫集水區保安林地每木調查 樣區 6	
現地調查日期	2011/03/23
植株分佈	

樹種組成		竹柏、稜果榕*5		
平均樹高(m)		6.2		
總材積(m^3)		0.12		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	竹柏	7.07	4.22	0.045
B2	稜果榕	4.46	4.3	0.003
B3	稜果榕	2.23	2	0.0004
C1	稜果榕	27.90	16.48	0.0029
C2	稜果榕	16.72	5.159191	0.0513
C3	稜果榕	10.76	5.159191	0.0212

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

稜果榕(a：0.00003556；b：2.000000；c：1.000000)

竹柏(*Nageia nagi* (Thunb.) de Laub.)(a：0.00006251；b：1.779240；c：1.058660)

樣點樹冠層照片	
環景照	

C.2 東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地

C.2.1 樣區描述

a. 樣區中心座標：經度：120.9698° ；緯度：24.2256°

b. 海拔高度：1680-1886 公尺

c. 林相：以人工針葉混淆林(台灣杉、香杉)及人工針闊混淆林(肖楠、台灣杉、台灣櫸)為主。

d. 造林年份：人工針葉混淆林於 1985 年，人工針闊混淆林於 2003 年。

C.2.2 實驗規劃

a. 於均質地貌測區規劃 4 個 10m×10m 樣方，樣區選擇包含造林年份、植株密度、植株種類、坡向、以及植生指標(透過衛星影像分析)等生態因子。

b. 每 10m×10m 樣方劃分為 A、B、C、D 4 象限(如圖 C1 所示)，分別進行地上部生物量量測、葉面積指數量測以及現地拍攝。

   i. 地上部生物量量測：包含樹種辨識、植株分佈記錄、以及 B、C 象限每木植株的樹高、胸徑量測，藉此推算單株及 B、C 樣區生物量。

   ii. 葉面積指數量測：分別於 10m×10m 樣方 4 象限中心點，以背對中心點，LAI-2000 儀器高度離地約 1m 進行量測，並以 4 筆資料平均值及標準差作為該樣區的量測數值；葉面積指數約以每月一次頻率進行觀測。

   iii. 樣區拍攝：分別針對 10m×10m 樣方 4 象限的樹冠鬱閉(仰式拍攝)、樹種以及中心點的環景進行拍攝。

c. 冠層上光照背景值量測以鄰近的開闊地量測作為代表。

C.2.3 樣區位置及分佈點位

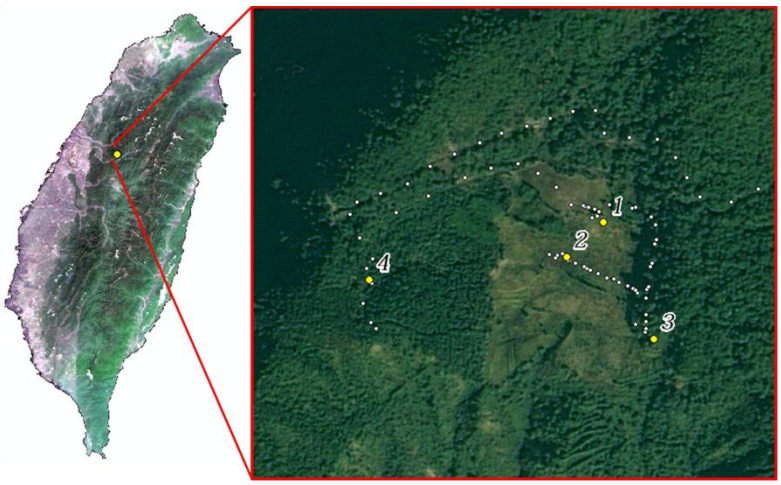
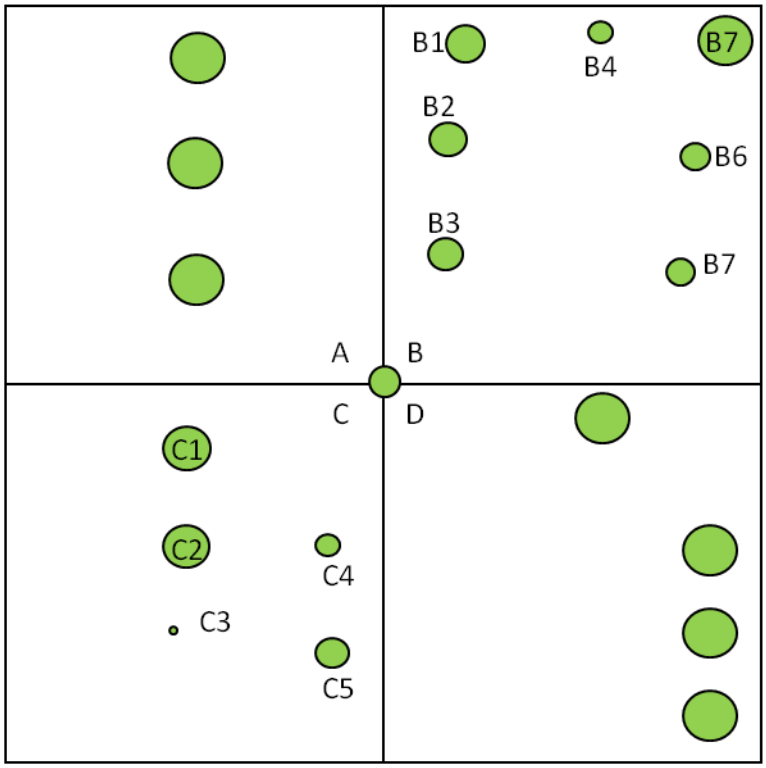


圖 C-3 八仙山事業區大雪山樣區位置及分佈點位

A.2.4 樣區屬性資料及 LAI、材積量測成果匯整

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地葉面積指數量測 樣區 1					
樣區座標	X：246071		空曠地座標	X：246050	
	Y：2680279			Y：2680312	
高度(m)	1886	坡向	南方	坡度(°)	13.54

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			11.9	觀測面積(m^2)		441.3
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
0.90	0.13	4	2011/04/20	06：22	晴	
0.70	0.04	4	2011/05/18	06：33	晴	
1.16	0.14	4	2011/06/22	06：11	晴	
1.03	0.08	4	2011/07/28	08：41	晴	
1.04	0.12	4	2011/09/21	07：17	晴	
0.81	0.07	3	2011/10/19	07：06	晴	

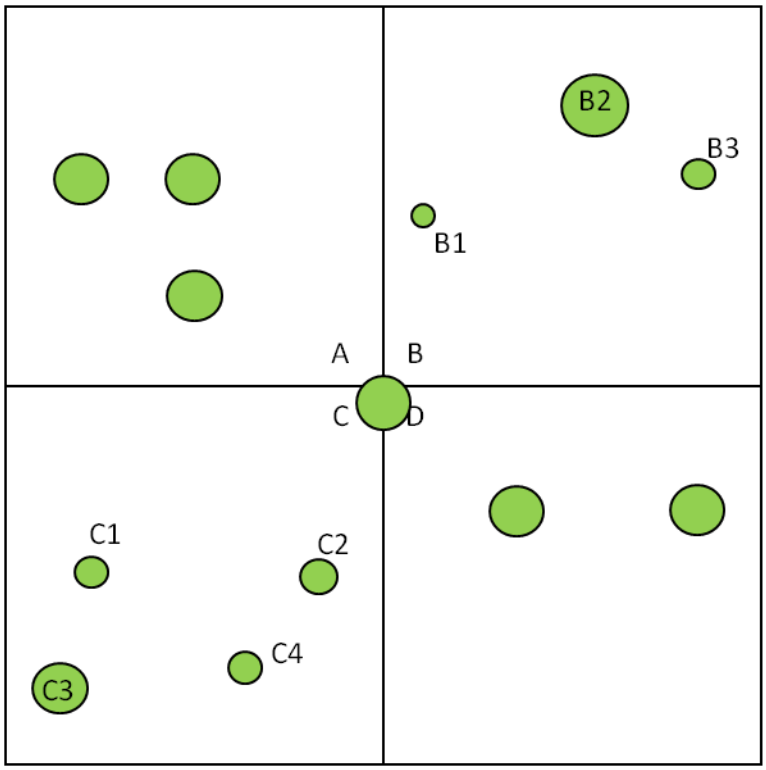
東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地每木調查 樣區 1				
現地調查日期	2011/04/19			
植株分佈				
樹種組成	台灣杉*6、肖楠*1、台灣櫸*5			
平均樹高(m)	4.6			
總材積(m^3)	0.12			
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	台灣杉	8.12	3.8	0.0089
B2	台灣杉	7.8	4.2	0.0091
B3	台灣杉	7.48	4	0.008
B4	肖楠	4.46	2.4	0.0017
B5	台灣櫸	11.78	5.7	0.0281
B6	台灣櫸	5.57	5.5	0.0061
B7	台灣櫸	5.89	5.4	0.0067
C1	台灣櫸	9.39	5.4	0.0169
C2	台灣櫸	9.24	4.3	0.0131
C3	台灣櫸	1.08	7	0.0003
C4	台灣杉	4.68	3.1	0.0024
C5	台灣杉	6.21	4.2	0.0058
中心	台灣杉	7.01	5.1	0.0089
註：每木調查為 B、C 象限				
材積式 $V= aD^bH^c$				

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：
台灣杉、肖楠(a：0.00009440；b：1.994741；c：0.659691)
台灣櫸(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)

樣點樹冠層照片	
環景照	

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地葉面積指數量測 樣區 2					
樣區座標	X：245988		空曠地座標	X：245961	
	Y：2680197			Y：2680194	
高度(m)	1860	坡向	西南方	坡度(°)	12.94

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			10.2	觀測面積(m^2)		326.9
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
0.36	0.11	4	2011/04/20	06：35	晴	
0.64	0.10	4	2011/05/18	08：29	晴	
0.36	0.11	4	2011/06/22	06：32	晴	
1.19	0.12	4	2011/07/28	09：06	晴	
1.00	0.09	4	2011/09/21	07：47	晴	
0.85	0.09	4	2011/10/19	07：26	晴	

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地每木調查 樣區 2	
現地調查日期	2011/04/19
植株分佈	

樹種組成		台灣杉*3、肖楠*1、台灣櫸*4		
平均樹高(m)		4.1		
總材積(m^3)		0.08		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	台灣櫸	4.17	3.2	0.002
B2	台灣杉	13.38	5.25	0.0334
B3	肖楠	5.73	3.4	0.004
C1	台灣杉	5.25	3.2	0.0031
C2	台灣櫸	5.41	3.5	0.0036
C3	台灣杉	8.92	3.4	0.0096
C4	台灣櫸	5.92	5.2	0.0065
中心	台灣櫸	8.12	5.8	0.0136

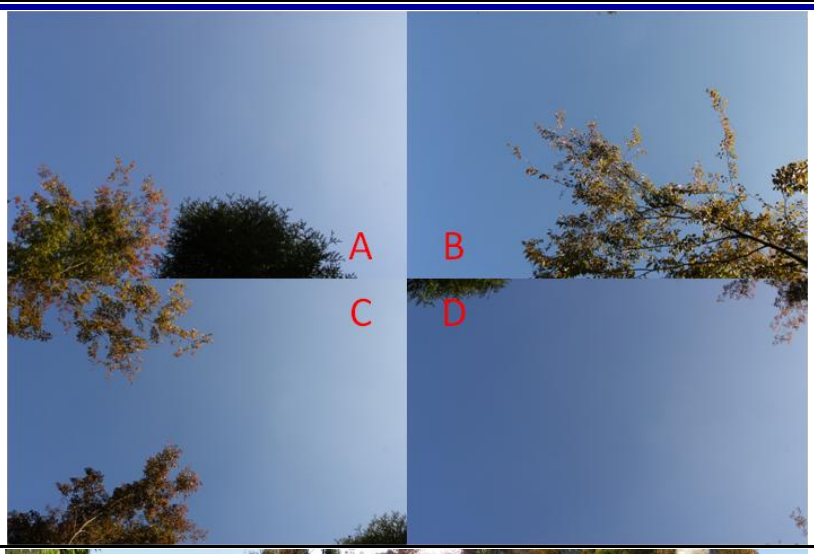
註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

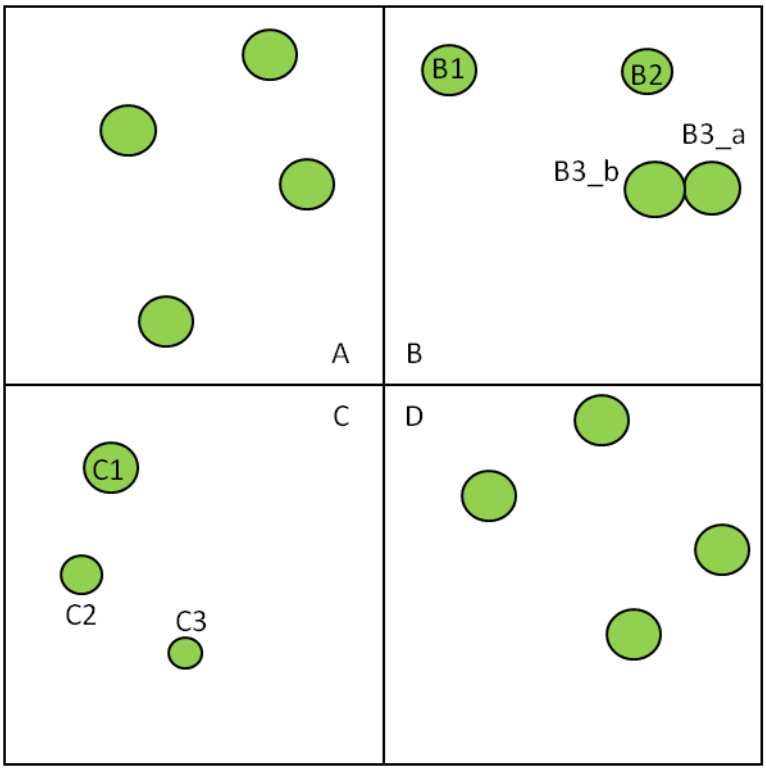
台灣杉、肖楠(a：0.00009440；b：1.994741；c：0.659691)

台灣櫸(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)

樣點樹冠層照片	
環景照	

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地葉面積指數量測 樣區 3					
樣區座標	X：246186 Y：2680011		空曠地座標	X：246157 Y：2680036	
高度(m)	1851	坡向	西南方	坡度(°)	16.04

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			12.6	觀測面積(m^2)		495
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
1.28	0.07	4	2011/04/20	06：45	晴	
1.23	0.19	4	2011/05/18	06：49	晴	
1.34	0.25	4	2011/06/22	06：45	晴	
1.32	0.22	4	2011/07/28	09：23	晴	
1.40	0.20	4	2011/09/21	08：03	晴	
1.33	0.13	4	2011/10/19	07：40	晴	

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地每木調查 樣區 3	
現地調查日期	2011/04/19
植株分佈	

樹種組成		肖楠*2、台灣櫸*5		
平均樹高(m)		4.8		
總材積(m^3)		0.12		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	肖楠	7.32	3.7	0.007
B2	台灣櫸	7.1	5.2	0.0093
B3_a	台灣櫸	12.8	5.8	0.0338
B3_b	台灣櫸	13.54	6.2	0.0404
C1	台灣櫸	9.71	5.3	0.0178
C2	台灣櫸	5.25	5	0.0049
C3	肖楠	4.33	4.3	0.0029
中心	台灣櫸	6.27	3.2	0.0045

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

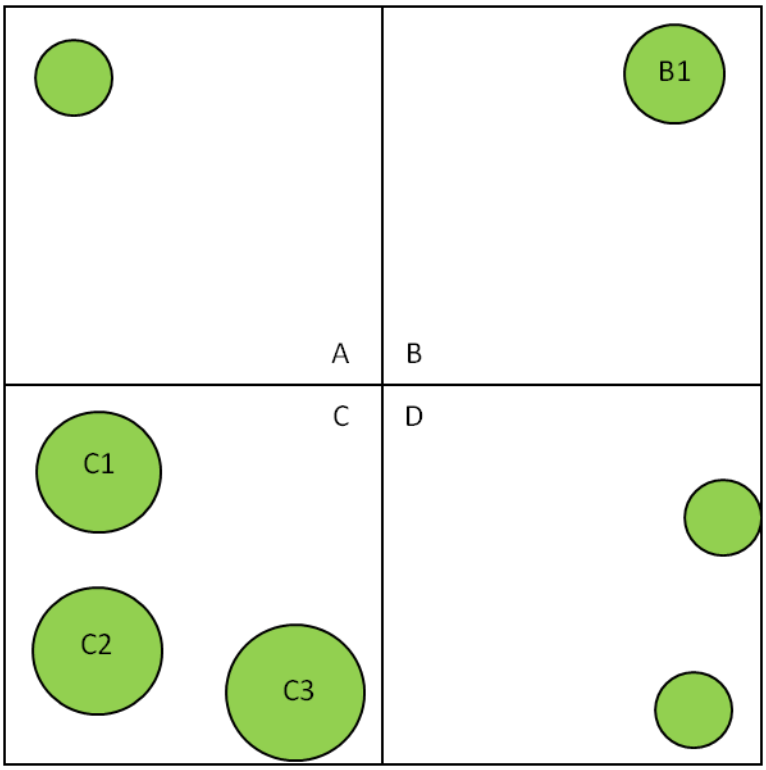
台灣杉、肖楠(a：0.00009440；b：1.994741；c：0.659691)

台灣櫸(a：0.00004459；b：1.535730；c：1.506570)

樣點樹冠層照片	
環景照	

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地葉面積指數量測 樣區 4					
樣區座標	X：245536		空曠地座標	X：246050	
	Y：2680145			Y：2680312	
高度(m)	1958	坡向	西方	坡度(°)	27.79

LAI 觀測成果						
LAI_2000 觀測冠幅半徑(m)			21.4	觀測面積(m^2)		14042
LAI Mean	LAI SD	N	日期	時間	天候	備註
2.67	0.09	4	2011/04/20	07：01	晴	
2.47	0.04	4	2011/05/18	08：56	晴	
3.01	0.13	4	2011/06/22	07：02	晴	
2.62	0.20	4	2011/07/28	09：38	晴	
2.99	0.17	4	2011/09/21	08：21	晴	
3.11	0.19	4	2011/10/19	08：13	晴	

東勢林管處八仙山事業區第 38 林班造林地每木調查 樣區 4	
現地調查日期	2011/06/22
植株分佈	

樹種組成		台灣杉*4、香杉*1		
平均樹高(m)		21.4		
總材積(m^3)		4.72		
樹種名稱		胸徑(cm)	樹高(m)	材積(m^3)
B1	台灣杉	29.3	21.9	0.6684
C1	台灣杉	36.3	21.3	0.9983
C2	台灣杉	37.3	22.3	1.1006
C3	香杉	39.8	23	1.2958
中心	台灣杉	31.5	18.7	0.6609

註：每木調查為 B、C 象限

材積式 $V= aD^bH^c$

V：立木材積 ；D：胸高直徑；H：樹高；材積式係數(a,b,c)：

台灣杉 (a：0.00009440；b：1.994741；c：0.659691)

香杉(a：0.00007280；b：1.944924；c：0.800221)

樣點空照	
環景照	

附錄 D、審查會議及工作會議辦理情形

D.1 期初審查會議辦理情形

1. 花蓮大農大富平地森林園區地形平坦，可評估作為通量觀測架設場址。

   花蓮大農大富農場地形平坦，且園區內主要為平地造林區，適宜進行渦流協變系統觀測，但由於考量儀器維護及交通便利性，經由與颱洪中心協調，目前初步規劃於阿里山氣象站進行架設觀測，後續如需在不同林型進行觀測，亦將考量於花蓮大農大富農場設置儀器。

2. LAI 地面單點調查資料透過 SPOT 衛星 NDVI 值推估為空間面狀 LAI 的方法是否合適?

   MODIS LAI 與地面實測資料在空間尺度上有明顯的落差，以地面單點量測直接進行 MODIS 資料驗證，勢必需考量地貌均質性的問題(MODIS 空間解析度 1km×1km)，其一方式為在特定範圍內進行系統性的地面取樣，但需耗費較多的時間及人力成本，較折衷的作法則為利用高解析遙測影像作為間接的橋樑，藉由植生冠層的光譜反應，連結地面實測數據與遙測資料；在前人研究成果中，NDVI 雖具有高植生區飽和的問題，但 NDVI 與 LAI 間仍呈現明顯的正向關係，在本次嘉義測區的成果中，其相關性不如預期，此與遙測影像中的地形陰影影響有關，故另於大雪山測區(地勢較平坦)進行 SPOT NDVI 與地面 LAI 量測成果的分析比對。

3. 森林健康以 NDVI 為主要依據，是否可合併 GPP 資料進行分析?

   當森林健康受到影響，其碳匯功能是否也受到干擾，此為一亟待瞭解的課題，本計畫將針對特定植生異常事件進行 NDVI 及 GPP 的綜合比對分析。

4. 通量塔觀測資料不穩定，與遙測資料應如何進行比對？

   通量資料穩定性與架設場址的地形效應、地貌均質性、以及觀測時期的地區性環流、天候狀況有關；為反應出實際的二氧化碳垂直通量，除了透過前置的實驗場址選定，在資料分析上，須先進行通量資料的律定，包含鏡面汙染、摩擦風速、以及能量收支等判斷條件，以排除受到天候干擾的量測數據，反應出近地層實際的二氧化碳交換。

5. LAI 樣區設置的數量、均質性、由小至大樣區的分佈等均會影響最終成果。目前地面樣區設計的代表性是否充足？如何設置以符合 MODIS 觀測尺度？

LAI 地面實測與 MODIS 的觀測尺度有明顯差異，在地形、地貌複雜的台灣地區，要尋找均質性的測區具有相當的困難性，並受到取樣的空間及時間頻度影響；目前先嘗試藉由高解析衛星影像連結觀測尺度上的落差，再嘗試提升地面樣區的空間代表性，如在不同地貌或林型下進行實測與 MODIS 資料的比對。

6. 第四次森林資源調查目前地面樣區執行進度約 70%，餘 30%樣區位於偏遠山區，預估完成時間較長，此外原始資料進行蓄積量的推估也需作業時間，與本計畫執行時程恐有落差。建議以永久樣區資料進行分析，目前林務局已累積樣區兩次複查(10 年間)成長、枯死等資料，可取得樣區分佈、10 年材積差異等相關資料。

感謝林務局的協助，本計畫將比較分析永久樣區及遙測森林碳匯的資料成果。

7. 簡報中的單位包含 gC 及 gCO_2，使用上是否有何異同?

在通量觀測上，主要量測生態系統的淨二氧化碳交換，並可依分子量比例，推估為碳交換；以 MODIS 光學遙測方式推估，則結合生態系統模型，評估植生系統的碳循環機制，故以碳量表示。

8. 簡報中包含地面生物量量測，其主要目的為何?是否作為遙測碳吸存成果的驗證資料?

森林的固碳能力能由不同觀測方式進行評估，計畫中嘗試藉由地面生物量量測以推求林地的碳存量(Carbon stock)，可輔助 MODIS 淨初級生產力的遙測資料成果(Carbon flux)，共同描述森林的碳匯功能。

9. 目前已有數座通量觀測塔台進行二氧化碳觀測，計畫中的塔臺選址需顧及場址上的代表性，以配合現有塔台資料進行分析比對。

經與國研院颱洪中心協調，本計畫預計於嘉義阿里山氣象站進行二氧化碳觀測，目前正進行公文申請流程；阿里山氣象站海拔 2400 公尺，為現有二氧化碳通量塔台中位處最高者，台灣山地區域範圍廣泛，高海拔常綠針葉林的森林碳匯功能仍有待觀測研究，且氣象站長期的氣象觀測資料，能提供地表模型所需的數據來源。

10. 簡報中提及塔台資料的 NEE 分析，並與遙測資料比對，此為定性比較或定量的驗證?

藉由通量塔台觀測，可分析林分尺度的淨生態系統交換(NEE)，MODIS 遙測資料則結合生態系統模型分析，提供總初級生產力(GPP)及淨初級生產力(PSNnet)，兩

者資料仍有相當的落差，簡報中的資料比對，主要針對其時間趨勢是否相符，並瞭解其相關程度，屬於定性上的比較。

11. 目前森林研究著重於減少毀林及森林退化造成的溫室氣體排放(Reduction in Emission from Deforestation and forest Degradation, REDD)，建議本計畫可結合森林健康及森林碳匯研究加以探討。

本計畫將針對 REDD 進行瞭解，將其概念整合於本計畫的森林健康及森林碳匯研究。

12. LAI 地面調查之用意何在？地面調查與遙測分析之尺度差異勢必會造成誤差。

透過地面調查，可提供遙測 LAI 的驗證資料來源，且植物葉面與光合作用息息相關，透過通量與 LAI 的整合觀測，能對森林碳匯進行更深入的瞭解；地面調查與 MODIS 觀測具有相當的尺度落差，目前嘗試以高解析衛星影像作為中介橋樑，或藉由地面系統性的取樣，以提升地面單點觀測的空間代表性，並進而與 MODIS 資料進行交互比對。

13. 簡報中提及的 NEE，在森林生態研究中似乎較少提及。

通量塔台觀測下墊面的淨二氧化碳交換(NEE)，如在自然生態環境觀測，其所量測的碳通量，則與生態研究中的淨生態系統生產力(Net Ecosystem Productivity, NEP)有關。

14. 三地門 GPP 資料在 DOY 121 下降許多，此處以天然闊葉林地為主，造成驟降的因素為何?

此驟降與光合作用有效輻射的降低有關，可能在此 8 日週期內，受到雲層覆蓋的影響，降低了太陽入射光源。

15. LAI 方面可收集臺灣地面實測資料加以印證，然而後續遙測演算式的校對改進，需進一步研究。

本計畫將先著重於地面資料的收集，評估 MODIS LAI 在台灣森林環境的應用效能及其限制考量，並嘗試探討其可能的誤差原因，而針對演算式的校對改良，仍需後續的分析研究。

16. 永安漁港測站周圍主要為帶狀的防風林區，在觀測點的均質性上是否適用?

通量塔台主要觀測上風區域的氣體交換，永安漁港測站的風向(海風或陸風)影響到所代表的觀測區域，而塔台架設高度及地表邊界層的穩定性則與儀器的觀測範

圍有關。

17. 建議整理各通量觀測站使用情形及有效資料期間以供參考。

本計畫將嘗試蒐集屏東萬隆農場、中興大學北東眼山，以及棲蘭鴛鴦湖測站通量資料，並對其有效資料期間進行查詢瞭解。

D.2 六月份工作會議辦理情形

1. 柳杉、扁柏及二葉松等人工林樣區 GPP 分析可與王兆桓老師針對 12 樹種的地面碳量資料進行比較。

   目前王兆桓老師已提供紅檜、扁柏、肖楠、台灣杉、香杉純林樣區共 227 筆的蓄積量資料，後續將針對資料進行分析比對。

2. 人工林樣區中各林型所佔的分布比例為何?

   簡報中的二葉松樣區位於大甲溪事業區，屬於純林(100%)，柳杉林樣區位於太平山事業區，包含柳杉與其他闊葉樹種，其中柳杉分佈比例為 5%-100%，而扁柏紅檜樣區位於和平事業區，包含扁柏、紅檜、其他針葉樹種，其中扁柏約佔 1-14%，紅檜佔 9-23%。

3. 本次簡報內所提 GPP 與海拔高度的關係，直觀似乎呈現當海拔高度上升，碳量亦隨之上升之趨勢？與過去分析不同植群帶成果-海拔越高,碳吸存量降低之趨勢不一致,單依本圖及標題來看易使人產生誤解。此外,GPP 與高度海拔的相關性，目前僅以單期資料分析，代表性不足。建議加入季節、年度、林相、或區域性等變量進行分析。

   目前僅以單期資料分析，代表性確實不足，後續將針對 GPP 在各氣候分區、林相、以及季節性的變遷進行分析。

4. GPP 時序資料中的紅點代表為何?

   紅點代表無當期實測成果(雲霧影響)，而以前、後期數值內差而得的資料，故在此以紅點表示。

5. 建議 GPP 資料可依季節區分進行分析。

   後續將探討森林碳吸存的季節性變遷。

6. 第四次森林資源調查地面樣區、永久樣區面積與 MODIS 資料空間尺度上具有相當程度的落差，是否適宜直接比對應有所評估。

   森林蓄積量的均質性(MODIS 1km^2 像元面積)確實會影響兩資料的相關性,且地面調查著重於 carbon stock，與 MODIS 所估測的 carbon flux 有所差異，若由永久樣區不同時期的蓄積量成果進行比對，則需考量到樣區前後次的觀測日期，並與 MODIS 相對應期間的碳吸存資料進行加總分析，以比較兩者成果；目前將先針

對兩者資料在空間上的定性趨勢進行比較。

7. 簡報中 NDVI 與 LAI 的相關係數應以 r 表示，而非 r^2 決定係數。

感謝委員的指正。

8. 檳榔園所量測出 LAI 高於柑橘類果園，此與一般認知不符，是否存有誤差?

此次檳榔園 LAI 觀測可能受到周圍地形以及冠層下灌木的影響，造成儀器感測到較低的冠層下入射光源，故量測的 LAI 數值較高，後續在實地觀測上將注意實地地形及地表灌木的影響。

9. 阿里山林火案例當地為草生地，其林火周期約四至六年，另附近象山亦有類似草生地，其林火的引燃與否受到嘉義處的關注，建議將影像時期往前推溯，檢視其地貌林型的變化。

本計畫將藉由 MODIS 資料針對阿里山火災現場的多年植被變化進行比較分析。

10. 大雪山林道附近造林地的分析，建議與局裡的永久樣區資料及王兆桓老師的生長量、蓄積量與碳轉換係數等研究資料進行分析。

目前已取得東勢林區永久樣區的蓄積量資料，後續將再進行資料的整理分析。

11. 簡報中的人工林樣區多為新植區域，在此造林初期，林相尚未鬱閉，植生反應會受到地被草本植物的干擾，無法確切代表柳杉、扁柏及二葉松等林份，建議考量造林年份之影響。

人工林樣區的林齡應為 20-60 年，而非簡報中的標示年份，但後續的樣區選定上會將造林年份的影響納入考量。

12. 由 GPP 與高度海拔剖面的分析來看，山腰、山谷處 GPP 較低，但實際上此處亦可能有紅檜、扁柏等植被生長，與此呈現資料不符。

13. 由於以單期資料單一剖面的成果進行呈現，且無論及剖面所涵蓋的林型地貌，此資料的代表性確實過於偏頗，後續分析將著重於影響 GPP 變化的氣候、林型等因子。

D.3 期中審查會議辦理情形

1. 本計畫執行內容成果豐富，值得肯定。

   感謝委員的肯定。

2. 第 5 頁第 2 行二氧化碳濃度單位為 ppmv，請修正。

   大氣分子含量包含多種描述方式(單位)，例如 ppmv(volume mixing ratio)及 ppmm(mass mixing ratio)，文中二氧化碳含量以 ppmv 表示。

3. 圖 16 之標示與內文說明不一致，應標明扁柏、紅檜，而非僅扁柏。

   感謝委員的指正。

4. 第 36、37 頁圖 22 請補充不同通量測站的海拔高度資訊。

   各塔站高度分別為棲蘭鴛鴦湖(1650m)、屏東平地造林(71m)、惠蓀北東眼山(2000m)、蓮花池(760m)、溪頭(1535m)；期末報告書將加註海拔高度資訊。

5. 有關簡報二氧化碳於時序性變化-通量塔台觀測到的二氧化碳濃度範圍為 500~600ppm，是否有偏高趨勢？請再核對。

   簡報中二氧化碳濃度以質量濃度 mass density 表示(mg/m3)，並非 ppm (parts per million)；各測站觀測到的濃度值差異甚大，與其所處地理區位(都市/林地、海拔高度)有關，在時序上，二氧化碳濃度則呈現明顯的日夜及季節性變化。

6. 報告書中附錄 A.1.4 中應為材積量測成果，而非生物量量測；表 A.2.4 表說錯誤，請修正。

   感謝委員的指正。

7. 報告書中林業相關名詞應注意正確用法，如材積與蓄積兩者有混用的情形，樣點空照應為向天拍攝。

   感謝委員指正，未來在名詞引用上將注意其正確用法。

8. 目前計畫涵蓋範圍甚廣，收集如通量、地面調查、永久樣區等資料，又各種資料尺度差異大，勢必分析上會有落差。預計最終以何項資料與 MODIS 遙測成果進行比對驗證？又由於地面調查與 MODIS 遙測的尺度存有落差，是否應如 LAI 的驗證，透過高解析遙測資料作為間接的橋梁?

   在時序資料的比較上,通量塔台的高頻度觀測提供MODIS遙測成果的驗證基礎，但由於在空間上屬於少數離散的點位分佈，故在空間趨勢的比較上，需仰賴永久

樣區約三千筆的地面調查資料；MODIS 觀測著重於全球或國家級尺度的大範圍觀測，與地面觀測具有空間尺度上的落差，故在空間性的資料比較上，所著重的並非點對點的比較，而是以空間趨勢上是否相符為重點，例如在各別的地理氣候區上，不同植群的碳吸存是否呈現出相近的趨勢。

9. REDD 為後京都議定書時期的關注議題，建議在森林健康評估中，植生異常分析可與碳吸存的研究成果進行聯結。

感謝委員建議，後續將針對特定案例，綜合分析森林健康及碳吸存的研究成果。

10. 應用 MODIS 分析阿里山火災之優勢為何？簡報中提及 MODIS 資料可在火災事件中，提供減災及救災的輔助支援，但在實際應用上，此說法是否適當?

在森林健康議題上，本計畫著重於非常態事件(例如火災、風災、乾旱、病蟲害)對森林健康的影響，但在植生指標的分析上，僅能分析出植生異常，卻無法辨別為何種事件所造成，此部分仍需仰賴其他資料以輔助解讀，例如 MOD14 針對火點的偵測，即提供輔助或佐證的資料來源；以遙測監測森林火災，能提供偏遠區域常態性且近即時的監測，彌補傳統仰賴人為通報方式的不足， 在其應用上，USDA forest service 即利用 MODIS 觀測資訊進行廣泛區域的火點偵測及火災追蹤(Active Fire Mapping Program)，以輔助其林火管理。

11. 報告書中提及會以通量塔台資料評估遙測成果，但有部分塔台資料無法取得，此需如何彌補?是否可嘗試透過其他管道獲得屏東平地造林通量資料？

屏東塔台位於台糖平地造林地，在先前林務局計畫(平地造林樹種對二氧化碳通量監測、分析之研究)中，包含針對此新生林地的二氧化碳通量觀測及每木調查資料，適合作為不同平台間碳匯比較(遙測、通量、地面量測)及驗證的基礎資料，本計畫期望能透過林務局協助，取得屏東的觀測資料。

12. 有關總初級生產力(GPP)於地理氣候區及各植群帶之分析是否可考慮使用蘇鴻傑老師的地理氣候區 230 分區，進行後續研究？

蘇鴻傑老師以多重尺度為其分層概念，其中最上層以氣候分區為主軸，本計畫已進行最上層 7 個地理氣候區的初級生產力分析，由分析成果顯示，在時間趨勢上，除了 NE 區外，其他分區並無呈現明顯的差異；依循委員建議，本計畫進行下一階層 41 分區的分析。

13. 報告書第 12 頁中表 2 的專有名詞說明仍欠缺完整，如 PSNnet、NEE 皆無說明。

感謝委員指正，報告書中將再針對未羅列的專有名詞進行說明。

14. 碳吸存分析成果呈現的時間單位不均一，如林區以年呈現，各地理氣候區及植群帶以月呈現，而 PSNnet 又為每日的淨生產量，是否可詳細標示說明。

有關初級生產力在不同空間(m^2、ha)及時間尺度(day、month、year)的表示方法，將羅列在表 1 中進行說明。

15. 針對「遙測成果為 carbon flux，而地面永久樣區資料為 carbon stock，故兩者間較不適宜直接比較」，此說法並不正確，樣區資料透過 5 年為期的重覆觀測，可分析其每年的生長速率，進而與遙測資料進行比對；在資料比對上，由於空間尺度上有顯著差異，故所針對的並非點對點的比較，而應以空間趨勢是否相符為重點，例如在各別地理氣候區中，以永久樣區及遙測資料共同進行分析，是否呈現出相同的定性趨勢。

感謝委員的建議，後續將對遙測及永久樣區資料在空間趨勢是否相符進行分析。

16. 建議各項分析，先確認方法後再逐步以全島資料進行分析。

感謝委員的建議，今年度計畫將著重於 MODIS 遙測資料的地面驗證。

17. 針對阿里山火災，是否能找出其火災週期，或透過影像分析，評估火災發生的肇始原因?

以 10 年 MODIS 觀測資料分析火災周期將較為困難，或許可結合早期如 AVHRR 或 Landsat 長達約 30 年的遙測資料進行火災周期評估；而火災肇始原因由於牽涉到氣候、燃料、人為等因子，可能亦非單一因素所造成，故在火災原因的界定上將更具挑戰性，不過遙測技術在森林火災的應用上，由先前的研究文獻中，能提供包含 fire fuel mapping, foliar moisture stress detection, fire detection, post-fire burned area mapping 等分析應用，可進行火災潛勢分析並提供災前火災管理的參考資訊。

18. 各林區、植群及地理氣候區三者所計算的碳吸存成果是否存有差異?在年份的資料分析上，是否僅有選取較不受雲層影響的月份資料來計算?

不同分區(林區、植群、地理氣候區)的分析皆套用相同的初級生產力圖資(GPP、PSNnet、NPP)，本計畫並無針對特定月份的資料進行篩選。

19. 報告書第 57 頁全台逐月吸存應為 2010/10~2011/3，第 58 頁第三行應為錯別字亦請進行更正。

感謝委辦課指正。

D.4 九月份工作會議辦理情形

1. 簡報第 4 頁通量和遙測資料的交互比對成果，是否能由此推論兩資料之趨勢相符？又如何建立相互之關係式?

   簡報中的資料比對為單一測站成果,且通量觀測也可能受到地形及局部氣候(非極適觀測環境)的影響,遙測與通量觀測兩者間的關係仍需藉由多測站的比對分析以進行說明。

2. 簡報第 5 頁進行入射光合作用有效輻射(IPAR)和淨生態系統生產力(NEP)之相關分析，其主要目的為何?

   主要說明在單一環境(霞雲水文站)下，NEP 明顯受到可用 IPAR 的影響，且兩者間呈現一線性關係，此與 MOD17 初級生產力演算式的假定相符。

3. 簡報第 6 頁利用地理氣候區進行碳吸存分析，但如以生態分區進行，似乎較為適合。

   碳吸存除了以地理氣候區分析，亦進行不同植群帶的分析，以對台灣森林的碳匯能力進行完整的詮釋。

4. 永久樣區資料為何時的數據，其來源為何?

   永久樣區資料為林務局[森林資源碳吸存資料庫管理系統]匯整各林區歷次永久樣區調查的成果。

5. 簡報第 10 頁中探討永久樣區蓄積量的動態變化，以此方式分析地面資料，是否將增加計畫執行上的困難性?

   以淨初級生產力方式推估森林的碳匯能力，所著重的是特定時距內的碳固定量，故如需比較地面永久樣區資料與遙測資料是否相符，須著重於歷次地面調查間的材積增長量(留存木生長量+新增木)，而非淨材積增長量(兩期生立木總材積差)；以此方式演算能反映森林環境實際的固碳能力。

6. 由 MODIS 葉面積指數與實地測量葉面積數據（1 平方公里 16 樣點）的比對，其關係是否相近並可藉此說明遙測推估的準確性?

   由於兩資料在空間尺度上有明顯落差，目前僅針對單一 MODIS 像元進行比對，未來在取樣設計上將著重於比對成果在統計上的代表性，以對 MODIS 葉面積指數資料在台灣森林環境的應用效能有完整的評估。

7. 有關葉面積指數地面取樣與遙測資料的比對，建議實驗設計應考量統計上的代表性。

   感謝委員的建議。

8. 蘇老師針對地理氣候區劃分的後續研究中，將高山植群歸類為另一分帶，建議可針對此新分帶進行分析。

   目前已針對蘇老師地理氣候 41 分區進行分析，如能取得 49 分區圖層(包含高山植群分帶)，將針對此新分帶進行分析。

9. 簡報第 4 頁中藉由線性關係描述通量和遙測資料的相關性，可嘗試以非線性方式來分析，查看是否有更適宜的統計檢測結果。

   感謝委員的建議，將嘗試以非線性方式描述其相關程度。

10. 植生異常指標演算即類似生態研究中常引用的 CV 值概念，可針對其統計意義多加討論。

    感謝委員建議，報告中將針對植生異常指標進行較詳盡的說明。

11. 由於MODIS遙測與永久樣區資料在空間尺度上具有相當的落差,如要進行比對，建議可利用第三次森林資源調查的分類成果，篩選出具有空間代表性的樣本，以與 MODIS 資料進行校驗。

    由於兩者在空間尺度上落差極大(MODIS 單一像元相當於 100ha，地面取樣則為 0.02、0.05、0.1ha)，且地面取樣與環境梯度(植群、坡向、坡度、區域氣候等因素)有關，目前永久樣區與遙測間的比較著重於空間趨勢上是否相符，而非點對點的比對。

12. 在植生異常的研究中，已針對阿里山火災進行分析，是否可針對其他火災案例進行探討?

    除了阿里山火災，今年度計畫也將針對丹大、梨山火災進行植生異常的分析探討。

D.5 期末審查會議辦理情形

1. 請將摘要及結果建議列入報告書目錄中。

   目錄中將增列摘要及結論與建議等項目。

2. 報告書中出現的專有名詞如 NPP、淨碳吸存及碳蓄積量的定義需界定清楚；另新增 NPP 分析的原因為何，可否以 NPP 成果取代 GPP？

   NPP 為淨初級生產力，探討植生光合作用及呼吸作用影響下的固碳效能，亦即碳吸存，碳蓄積量則為由森林蓄積量所推演的碳含量；在 MODIS 資料中，NPP 為年度產品，適合作為不同植群或氣候區間碳匯能力的定量比較，GPP 及 PSNnet 則為 8 日產品，能針對季節性的碳匯趨勢進行詮釋，透過 GPP、PSNnet、NPP 的綜合分析，能在空間及時間尺度上對森林碳匯的分佈有更完整的解析。

3. 與通量塔及永久樣區比對，遙測碳吸存的成果呈現高估，是否有演算上的誤差？遙測與何種方式比對較適宜？

   目前單一測站(霞雲測站) 成果顯示 MODIS GPP 呈現高估趨勢，可能與 MODIS 光合作用有效輻射分量的高估，或假定中恆定的最大光能利用效率有關，但測站資料也可能產生估測誤差，例如日間二氧化碳排放(呼吸作用)主要仰賴夜間溫度與 NEP 的統計分析成果，此部分所產生的誤差仍需進一步研究。

4. 報告書中第 66 頁表 16，全株蓄積量應更改為蓄積量。

   感謝委員的指正。

5. 後京都議定書時期著重於森林退化與碳排放的議題，建議森林健康中的植生異常分析朝此方向進行研究。

   感謝委員的建議，未來針對特定異常事件，將結合森林碳匯及植生指標的分析數據進行探討。

6. 摘要中多為趨勢的描述，請加入量化的數據。

   感謝委員的建議，摘要中將加入定量分析數據。

7. 計畫中以葉面積指數來分析森林生長，但一般林業所關注的森林生長議題，為每

年蓄積量的變化，亦即材積的增長，此與碳吸存估算較相關。

未來在森林生長分析上，將結合初級生產力及葉面積指數兩項參數，共同詮釋森林生長在季節及空間上的特徵。

8. 本計畫進行通量塔與遙測碳吸存的成果比對，但其調查方式與尺度皆不同，是否適宜直接比對？建議可說明其做法，但不一定要直接比對。

感謝委員的建議，通量塔與遙測在作法及假定上皆有所不同，如要進行比對，確實很難釐清差異來源為遙測或塔台觀測誤差所造成，不過由於遙測主要仰賴國外的推估模式，是否適合台灣應用仍有諸多疑慮，透過台灣當地塔台資料的共同分析，仍能對遙測碳匯在量級及時間趨勢上進行初步的評估，此外，本計畫未來將著重於遙測及塔台在碳匯分析上的優勢，共同分析森林碳匯在空間及時間上的效能，而非僅著重於兩者資料是否相符。

9. 森林生長分析中以實測資料進行 MODIS LAI 的比對驗證，最後比對成果是否能提供台灣各植群應用的校正係數？

在植群及地形複雜度較高的台灣山區，要尋求均質性的測區具有相當的困難性，較難對 MODIS LAI 進行全面性的驗證，或提供各植群應用的校正係數；本計畫將著重於遙測資料空間及時間的趨勢上，是否與地面量測成果相符為比較重點。

10. 森林健康分析中以火災作為分析案例，但國際上對於森林健康的評斷，主要以森林老化、活力下降或病蟲害做為考量基準，是否可考慮朝此方向分析？

本計畫植生異常指標提供一相對性的參考基準，但並非對森林健康程度進行評分，僅為對森林冠層進行體檢，挑選出植生光譜反應不同於常態的地方，此與傳統森林健康研究的現地觀測(冠層結構、土壤養分及侵蝕、地被層組成、植生多樣性、燃料負載、動物棲地)及評比方式仍有相當落差；若需結合遙測觀測及傳統森林健康的評估方式，需透過廣泛的外業調查資料，針對單株及林分尺度進行詳細的健康評分及取樣分析，並考量實際遙測資料的空間解析，分析森林健康與遙測森林冠層葉面資訊的相關性，建立植生指標與森林健康評比的迴歸關係式，以適時適地的進行區域性的應用；在台灣森林環境多樣生態組成及 MODIS 空間解析力的前

提考量下，要有效結合健康評比及 MODIS 指標仍有相當的尺度落差，故本計畫著重以 MODIS 影像進行全台尺度的植生異常研究，以輔助林業單位提供國有林區森林健康的參考資訊。

11. 報告書中專有名詞如碳蓄積、碳吸存的定義須界定清楚，且其單位能否統一？英文專有名詞大小寫請統一，且部分圖表可置於附錄，讓瀏覽更流暢。

感謝委員建議，報告書中英文簡寫將大小寫統一，影像成果也將置於附錄中；在遙測碳匯的成果分析中，由於 GPP、PSNnet 著重於逐月趨勢的分析，故以月分累積值表示，而 NPP 則為年度產品，以年度累積值表示，研究中另針對均質樣區進行分析，由於著重於詳細資料的呈現，故以日平均值表示。

12. LAI 實測成果中演算樣區材積，其主要目的為何？

主要目的為進行較完整的樣區描述。

13. 報告書第 33 頁圖 13 中榕楠林帶的 GPP 變化較大，此為何原因造成？

圖 13 資料有誤，已進行修正。

14. 報告書第 105 頁圖 81 針對 2002 年乾旱案例進行分析，請補充說明 10 月份 NDVI 數值下降的原因。

主要受到薄雲或氣膠的影響，造成 10 月份 NDVI 觀測值突然降低。

15. 碳吸存分析中進行各氣候區與植群帶的比較，若氣候區成果無法顯示其差異性，則敘述上能加以簡化。

在各地理氣候區中，SE 及 NE 區相較於其他區域呈現較大差異，就季節而言，冬季時各地理區間呈現較大的碳匯能力落差，文中針對主要的差異原因進行探討。

16. 碳吸存成果中以 SE 區最高，是否與特有植群(如灰背櫟)有關？

SE 區由於日照強度較高，且以低海拔闊葉林為主要林相，呈現出較高的碳匯能力。

17. 報告書第 36、37 頁中，圖 16、17、18 及 19 碳吸存量的單位皆不相同，可否均使用相同的單位？

感謝委員建議，圖 16、17、18 及 19 將使用相同單位。

18. 報告書中第 60 頁提及圖 32b，但未在圖 32 上進行標示。

感謝委員指正，內文中將進行修改。

19. 報告書中進行蒸發散與淨生態系統生產力的分析，建議說明此分析成果在生態上的意義，且在統計分析中，應說明其相關性在統計上是否顯著。

感謝委員建議。植物光合作用及固碳效率不僅受到入射光源強度的影響，在葉面氣孔打開的同時，植生水份亦受到蒸氣壓差的牽引，由植物內部蒸散出來，故植生蒸散及初級生產力的偶合效應也為森林碳吸存能力的探討焦點，可作為植物水勢狀況與碳匯能力的評估依據。

20. 報告書第 63 頁圖 42 中進行 MODIS 與塔台 GPP 的成果比對，分別以一次式及二次式表示其相關性，以何者較為適宜？

一次式及二次式呈現出近似的相關性，圖中將簡化以一次式表示。

21. 報告書第 72 頁的文獻回顧中對 NDVI 持有存疑，但其後仍使用 NDVI 進行分析，是否在表達上可進行調整。

感謝委員的建議。

22. 先前報告中以八八風災作為植生異常的探討案例，但為何未列入期末簡報中。

期末簡報主要僅列舉火災分析的成果，先前八八風災案例則詳述於期末報告中。

23. 以遙測成果來看，阿里山及恆春半島地區為碳吸存之熱點，但由森林資源調查的成果顯示，恆春半島地區的蓄積量卻很低，此為一值得探討的議題。

恆春半島由於充足日照及暖溫的氣候環境，呈現較高的碳匯能力，但由於以小 DBH 植株的密林為主，故相較於其他地區，其蓄積量較低。

24. 一般認為林木在生長初期較為旺盛，老熟林則不再成長，但此實際上為一假定的論述，近年研究指出成熟林仍有淨生長的情形，此與遙測估算的成果是相符的。

感謝委員的說明。

25. 簡報中進行永久樣區蓄積量及碳吸存的分析，其主要目的為何？與計畫架構是否相關？

森林碳匯可分別由蓄積量的變化，或光合作用效能(初級生產力)兩種方式來推估，簡報中進行永久樣區蓄積量及碳吸存的推估，主要希望分析及比較兩者在空間分

佈上是否呈現近似的趨勢。

26. LAI 實測中的每木調查成果是否會納入林務局生態倉儲系統？

LAI 量測以葉面積指數及地形因子為主要的觀測成果。

27. 是否能由 MODIS 資料進行森林火災預測？如無法達成，則建議以其他植生異常案例作為探討重點。

本計畫較著重於森林植生在非常態事件後的光譜異常偵測，包含火災、旱災、風災、崩塌、病蟲害等，皆為造成異常的可能原因，本計畫也將針對其他天然或人為因素所引發的森林劣化進行探討。

28. 是否可將去年度及今年度的成果分別列出。

感謝委員建議，報告書中將分別列出去年度及今年度的分析成果。

附錄 E、教育訓練辦理

本計畫於 2011 年 5 月 27 日(五)在中央大學太空及遙測研究中心舉辦計畫成果教育訓練，針對 MODIS 遙測影像在森林碳吸存、森林生長、森林健康等研究議題的應用、以及 MODIS 影像的實務操作進行說明。

表 E.1 教育訓練課程安排

時程	課程及時程安排	講員
09:30-09:40	開場致詞	
09:40-10:40(60 分鐘)	計畫背景及森林碳吸存	江陽聖研究助理
10:40-11:00	茶敘及休息	
11:00-12:00(60 分鐘)	森林健康及生長	韓詩玫研究助理
12:00-13:30	午休及用餐	
13:30-14:30(60 分鐘)	多平台森林碳匯研究	江陽聖研究助理
14:30-14:50	茶敘及休息	
14:50-16:00(70 分鐘)	MODIS 衛星資料下載 及前處理	朱昶任研究助理
總計教育訓練時數:250 分鐘		

圖 E-1 教育訓練現場照片