

壹、前言

台灣森林面積占有全島土地 58.5% 比例，除林木本身的經濟價值外，對於國土保安、水源涵養、育樂遊憩以及生物多樣性的維護，均扮演重要角色，因此森林資源的調查與掌握為世界各國所重視。嘉義林區管理處下共有阿里山、大埔、玉山及玉井四個事業區，依據第 3 次森林資源調查結果，嘉義林區林木蓄積共 790 萬 2 千立方公尺，包含針、闊葉樹及竹林。

98 年 8 月莫拉克颱風帶來強風豪雨重創台灣，尤其是高雄、屏東、台東及嘉義地區海岸及山坡地。阿里山鄉、梅山鄉的太和村、瑞峰村和瑞里村，以及竹崎鄉奮起湖等地區亦遭受重創，對外橋樑、道路中斷，阿里山高山鐵路亦受創嚴重。

台灣地區地形險峻且交通不便使得現場調查困難，且不易到達無法進行調查之處，利用航照或衛星影像資料結合地理資訊系統，配合數值地形模型可以建立一個經濟且有效率之調查方法。

崩塌潛勢之有效劃分為治山防洪管理時之重要議題。藉由崩塌潛勢之計算產生之崩塌潛勢圖可用來解釋過去發生崩塌之原因，也可作為未來再發生崩塌之預測。影響崩塌發生的原因分為環境因子與誘發因子，前者包括現場海拔高、坡度、土地利用狀況、土壤深度、岩性、地質狀況、順向坡與否、離道路或水系距離等，誘發因子多為地震規模與降雨強度所造成。

一、計畫目標

本計畫以嘉義林區管理處阿里山事業區及大埔事業區面積約 72,244 公頃作為研究範圍，利用遙測技術測繪 99 年 8 月 8 日侵襲台灣的莫拉克颱風所造成的崩塌地區域，以及繪製崩塌地現場數值高程模型 (DEM)，使用變遷分析方法，計算莫拉克風災前後森林資源的變遷狀況，比對分析林木資源的損失量。依據繪製完成的崩塌地 DEM 資料以及環境因子特徵資料，計算林地的崩塌潛勢，以提供國有林事業區森林經營或集水區治理之參考。主要計畫目標如下：

1. 建立莫拉克颱風災害後的森林資源分佈圖。
2. 建立災害前後的森林資源變異量。
3. 建立新增崩塌潛勢區域圖。

二、重要工作項目

本委託計畫執行期間由 99 年 4 月 21 日至 99 年 12 月 20 日止，主要工作項目如下：

1. 颱風災害崩塌地萃取及位置圖製作。
2. 崩塌區域地形圖的測繪。
3. 變遷分析萃取森林資源耗損量。
4. 崩塌潛勢分析。

表 1：重要工作項目及預定進度表

重要工作項目	預 定 進 度		
	3-6 月	7-9 月	10-12 月
崩塌地萃取及位置圖製作	影像資料取得及崩塌災區萃取	災區土地利用型圖繪製	--
崩塌區森林資源損失量分析	災後航照影像資料收集及處理	災區林木資源遙測資訊調查分析	崩塌區材積損失量估計
崩塌區域位置地形圖測繪	風災前期高程資料收集與處理	災後地形圖測繪與 DEM 輸出	--
崩塌潛勢分析	研究區域環境因子資料收集	圖層資料處理	崩塌潛勢分析與製圖

三、執行程序

航空照片的收集對於評估莫拉克颱風造成的崩塌災害損失之評估極為重要，本研究擬以林管處提供之航空照片資料，建置較詳盡之數值地形模型資料，作為評估災區地形特徵的依據，總結本計畫之重要工作項目執行程序為：

1. 颱風災害崩塌地萃取及位置圖製作。
2. 崩塌區域地形圖繪製。
3. 風災造成林木資源蓄積量與損失量分析。
4. 林地崩塌潛勢分析。

四、預期效益

1. 建立莫拉克颱風災害森林資源耗損量。
2. 建立區域內的崩塌潛勢圖，供森林經營施政之參考。

貳、研究區域與材料

一、研究區域概述

嘉義林區管理處所轄事業區共包含阿里山、玉山、大埔與玉井事業區，本研究以阿里山與大埔事業區為研究區域（圖 1）。依據第三次森林資源調查結果，阿里山事業區總計面積 19691.9 公頃，含 213 個林班，其中 1-60 林班以及 130-222 林班屬於嘉義林區管理處所轄，其餘屬於南投林區管理處所轄；大埔事業區總面積 42,191 公頃，由 233 個林班地組成，均為嘉義林區管理處管轄。光達試驗之樣區範圍 4 個長寬各為 25 公尺正方形

樣區，於樣區內進行地面調查，使用 Garmin 公司生產之 GPS 進行衛星定位，使用 TWD97 座標系統。

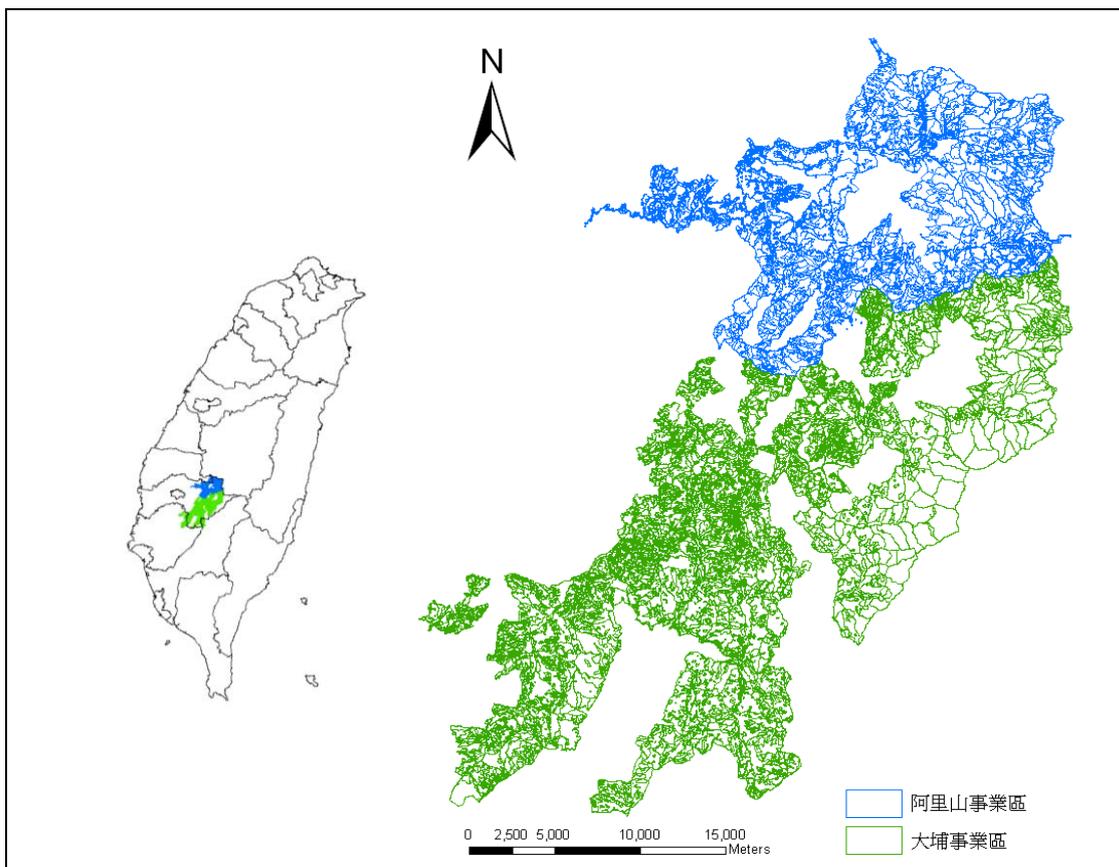


圖 1：阿里山與大埔事業區地理位置圖

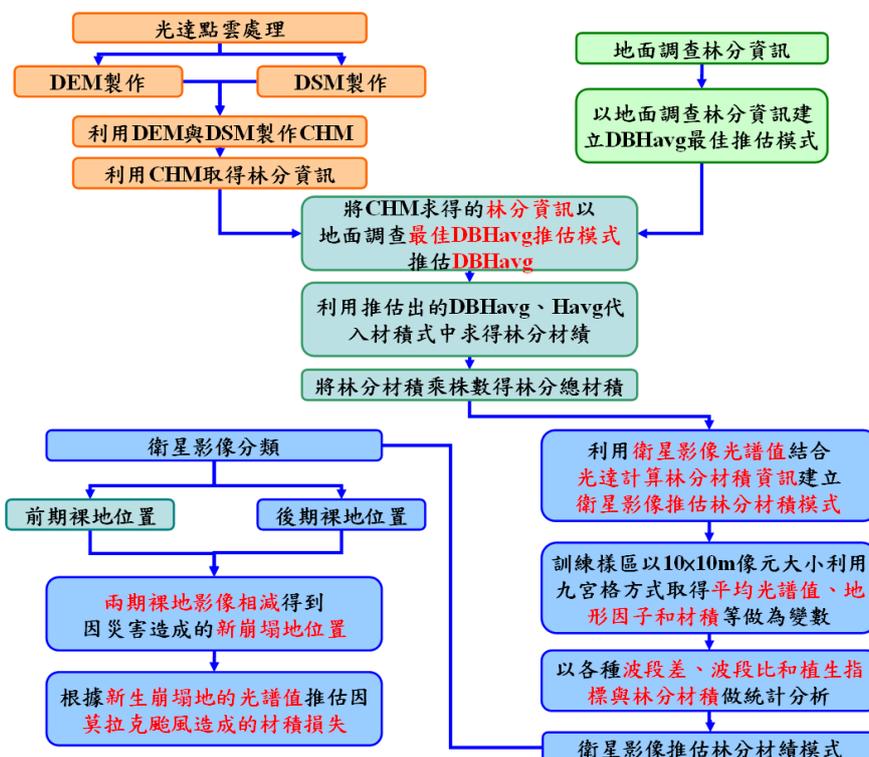


圖 2：森林資源損失量研究流程

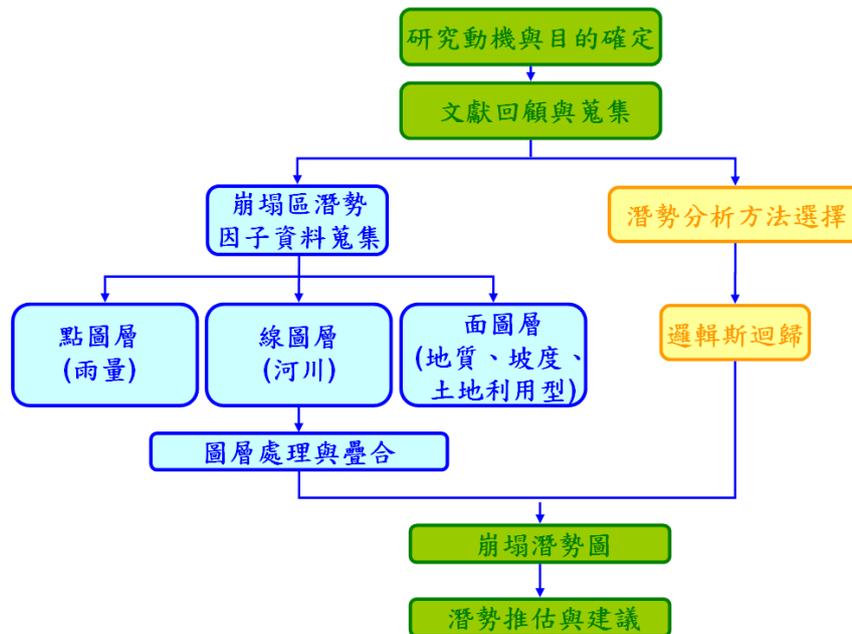


圖 3：崩塌潛勢研究流程圖

二、衛星影像資料取得

本次研究目的在於調查莫拉克颱風對於阿里山及大埔事業區內森林資源災害之影響評估，利用風災前、後期之 Landsat 衛星影像作為崩塌地萃取之材料，為美國太空總署(NASA)之地球觀測衛星，隨年代改變其空間解析度並由 80 公尺提升至 15 公尺，全球共有 233 個軌道。該衛星影像由國立中央大學太空遙測中心購置，波段資料包含綠光段（波段 1）、紅光段（波段 2）、近紅外光段（波段 3），屬於 TWD_97D 座標系統，每個 pixel 涵蓋範圍 30 平方公尺。

三、空載光達 (LiDAR) 資料取得

光達點雲資料來源為工研院能資所 2007 年於林務局阿里山事業區規劃 11 條航線，長 3 公里、寬 1.75 公里，面積約 5.25km² 範圍，飛航時間為 2007 年 4 月 19 日、20 日上午，經過工研院能資所飛航參數設定後提供本研究使用。Leica ALS50 空載光達最高操作海拔高度 6000m、精確度在 40 度時，僅含 10cm GPS 誤差、發射波頻率 83kHz，最多回波數量 4 個、以及最大視野 75 度 (Leica, 2007)。工研院能資所(2007)在阿里山試驗區上空所進行的空載光達資料是以德安航空飛航器「BN-2」性能配合阿里山區當地地形氣候為基礎所設定的掃描頻率與脈衝率，來獲得單位面積內分布適當數量的點雲密度。

四、材積式與生物量轉換模式

材積通常利用胸高直徑與樹高之關係推估，而這兩種參數可以藉由形數與二項式兩種常用函數來表現材積(楊榮啟、林文亮，2003)。本研究於闊葉樹與針葉樹分別尋找出多種因樹種、地區與氣候分布不同所擁有的材

積計算公式，找出最適材積推公式，主要以闊葉樹、針葉樹公式中，找出最大材積計算公式、最小材積計算公式和平均材積計算公式，以便於計算材積推估量的大小範圍。

針葉樹部份，公式 1 為針葉樹平均材積計算公式，公式 2 為最小材積材積計算公式，公式 3 為最大材積計算公式。

$$V = 0.00005253 \cdot 66 \times DBH^{1.874} \times H^{0.997}$$

(阿里山柳杉 - 林金樹， 2006) (1)

$$\log V = -4.193148 + 0.933828 \log(DBH^2 \times H)$$

(柳杉台大實驗林 - 楊榮啟， 1972) (2)

$$V = 0.00005979 \cdot 663 \times DBH^{1.8753322} \times H^{0.974034}$$

(柳杉全省 - 羅紹麟 馮豐隆， 1985) (3)

闊葉樹部份，公式 4 為闊葉樹平均材積計算公式，公式 5 為最小材積材積計算公式，公式 6 為最大材積計算公式。

$$V = 0.00004898 \cdot 23 \times DBH^{1.6045} \times H^{1.25502}$$

(樟樹全省 - 羅紹麟 馮豐隆， 1986) (4)

$$V = 0.3257 - 0.0222 \times DBH + 0.00072 \times DBH^2$$

(楮櫟類 溫帶高價 - 楊寶霖、石子材， 1963) (5)

$$V = 0.0000464 \times DBH^{1.53578} \times H^{1.50657}$$

(其他闊葉樹 全省 - 劉慎孝、林子玉， 1968) (6)

$$SV = V \times N$$

V：材積

SV：林分材積

N：株數

五、崩塌潛勢資料取得

參考國內崩塌潛勢分析之相關研究報告，影響坡地發生崩塌之因子主要分為環境因子與誘發因子兩類，前者指的是發生崩塌區域當地之地文因子，例如坡度、坡向、海拔高度、地質、土壤厚度、土地利用型、距離道路、水系、斷層帶、人為干擾區之距離等，後者為地震以及降雨強度。本次研究使用之崩塌潛勢因子包含地質、坡度、土地利用型、距河川距離以

及雨量共計五個因子，另外由 Landsat 衛星影像分析出災害後之裸露地分佈圖，以及事業區圖與林班圖等。以下就以上述五個崩塌潛勢因子的選擇與對崩塌發生之影響原因分別說明。

(一) 地質因子

不同的地質材料往往在強度及特性上有相當程度的不同，洪如江(2000)在進行 921 地震所引發的山崩統計時顯示，有超過 90% 的坡地破壞位於沉積岩及亞變質岩，但因破壞地點的分佈與地表最大加速度等直線分布有一致的趨勢，因此認為地質並非顯著的因素。

廖軒吾(2000)針對 921 地震山崩的研究則認為，以年代最輕的頭嵙山層最容易發生山崩，其次為錦水頁岩，而在年代較老的地層上，達見頁岩也有較高的山崩比。許煜煌(2002)所做的 921 地震山崩研究顯示，三峽群及頭嵙山層最不安定性，瑞芳群及乾溝層次之，而沖積岩、台地等較小。

(二) 坡度因子

坡度為最直接影響邊坡力學的地形條件，坡度愈陡，愈容易發生崩塌，從力學的觀點來看，坡度愈陡造成土層或是岩層往下移動的作用例更大，然而岩層的強度愈高才能存在於陡峻的坡面，因此產生崩塌的機率較低。Keifer(2000)對 1989 於美國加州發生的地震進行研究也發現，坡度愈高發生山崩的機率愈大。洪如江等(2000)研究 921 地震所引發山崩的統計時顯示，有 90% 的山崩發生於坡度大於 45 度的坡面。陳有蘭溪流域中，以坡度介於 39 至 45 度以上邊坡發生崩塌的情況最多(張子瑩,2002)。

(三) 土地利用型

邊坡發生崩塌與否，地上物覆蓋的種類與狀況也影響甚大，其主要扮演降低降雨沖蝕地表及穩定邊坡土體的角色，以樹木生長茂密之森林邊坡與植生稀疏者相比較，前者由於覆蓋度大，有效降低雨水直接與地表接觸機會，因此發生崩塌機率自然低於植生稀疏者。再者，地上物的種類亦有影響，深根系的木本植物與淺根系的灌木與果樹比較，自然對於穩定地表的效果來得好，發生崩塌之機會較低。崩塌地區當地的土地利用型態間接反映出土地覆蓋、植被覆蓋以及人為開發的情形，亦影響邊坡之穩定性(陳蕙華,2005)

(四) 距溪流距離

由於河流會對地表進行切割，特別是台灣山地坡陡流急，河流的下切作用愈加明顯，且河流在轉向處面對水流的坡面亦會因水流方向快速改變而受到沖蝕，對邊坡的穩定性造成不良影響。許煜煌(2002)針對 921 地震引發之山崩研究顯示，水系兩側 200 至 400 公尺之範圍最容易發生崩塌的情況。

(五) 降雨量

降雨對邊坡崩塌之影響，可以分為降雨量對邊坡崩塌之影響與降雨型態之影響。在降雨量造成的影響上，陳紫娥（2000）研究花蓮溪及秀姑巒溪流域河谷沖積扇的土砂災害性質，結果發現在日雨量超過年雨量 1/7 或 300 公釐的降雨條件時，土砂災害發生率分別為 94%與 88%；另外，當三日累積雨量達平均日雨量的 24 至 30 倍時，致災機率分別為 62%與 80%。張瑞津等（2001）也認為發生崩塌的誘因除了地震以外，人為因素與降雨規模等對於不同坡地敏感區的地貌變動也很重要，例如陳有蘭溪之局部支流，只要累積降雨量達到 200 公釐以上，就會引發崩塌或者是土石流災情。各因子之圖資取得來源與規格如表 2 所示。

表 2：崩塌潛勢圖資來源

資料項目	資料來源	比例尺	資料型態
事業區圖	嘉義林區管理處 (第三次森林資源調查)	1/250,000	向量式
林班圖	嘉義林區管理處 (第三次森林資源調查)	1/250,000	向量式
崩塌區域圖	國立中央大學 Landsat 衛星影像	解析力 10×10m	網格式
地質圖	中央地質調查所	1/500,000	向量式
坡度級圖	嘉義林區管理處 (第三次森林資源調查)	1/250,000	向量式
潛勢溪流圖	水土保持局	1/250,000	向量式
土地利用現況圖	嘉義林區管理處 (第三次森林資源調查)	1/250,000	向量式
雨量圖	中央氣象局嘉義氣象站	1/250,000	向量式

阿里山事業區總計面積 19,691 公頃，含 213 個林班，大埔事業區總面積 42,191 公頃，由 233 個林班地組成（圖 4）。

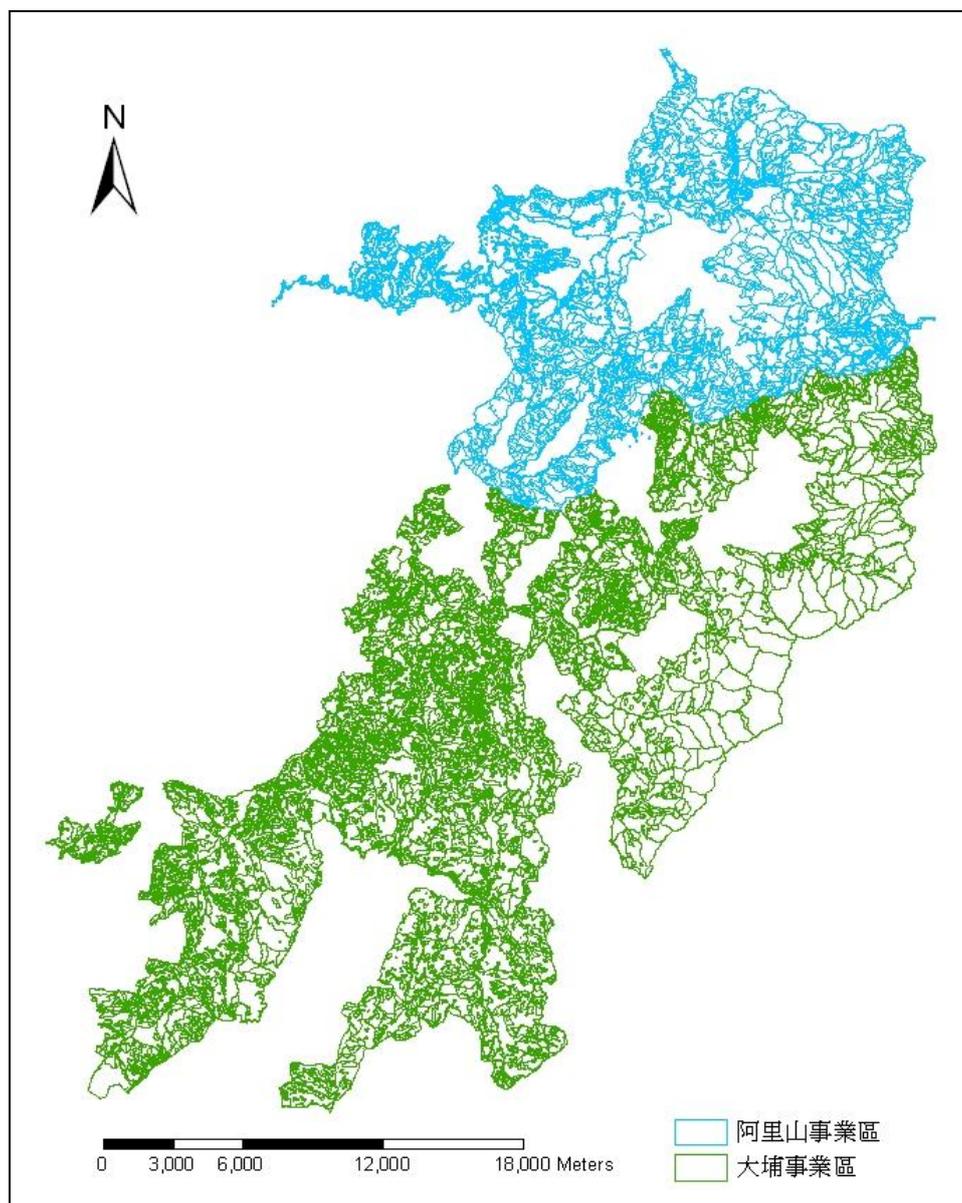


圖 4：阿里山與大埔事業區林班圖

98年8月侵襲台灣之莫拉克颱風，造成阿里山與大埔事業區內多處崩塌，透過遙測分析軟體ENVI將風災前後期之Landsat衛星影像進行分類，將影像分為裸地與非裸地兩類，新生裸露地之分佈狀況如圖5所示。

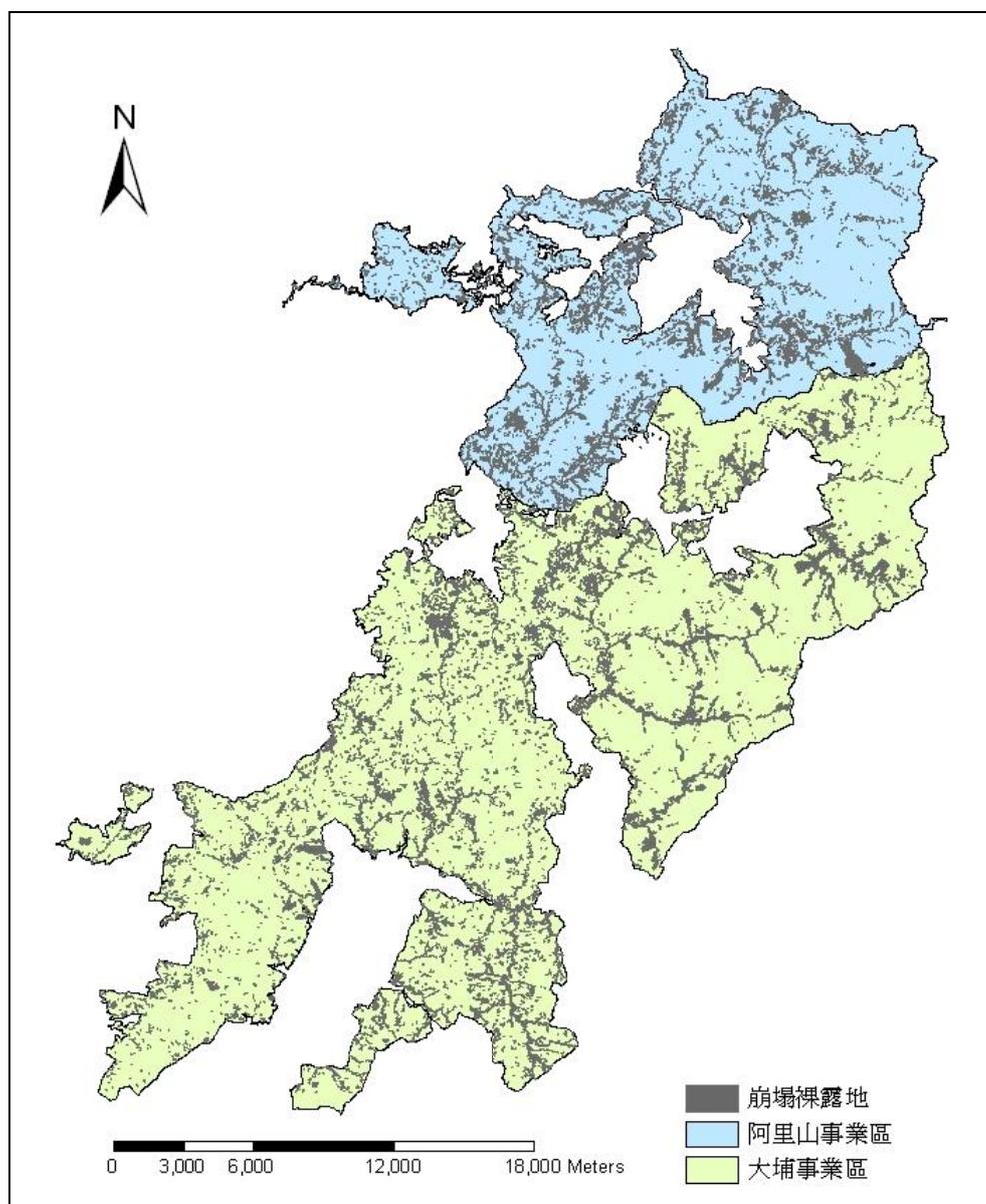


圖5：莫拉克颱風後阿里山與大埔事業區崩塌裸地位置圖

圖 6 顯示阿里山與大埔事業區內地質狀況以桂竹林層與南莊層分佈最廣，接著為卓蘭層、錦水頁岩及其相當地層。

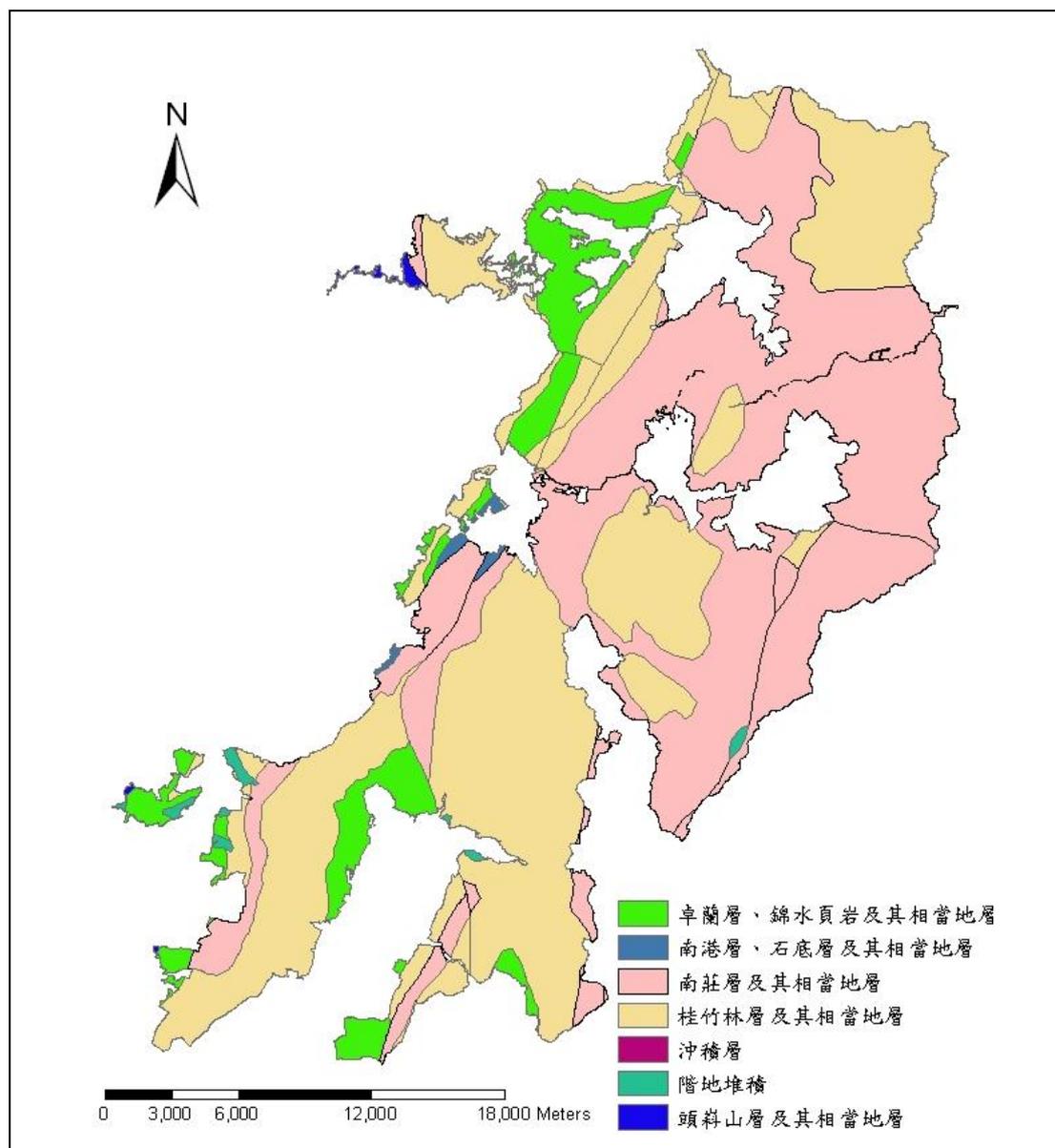


圖 6：阿里山與大埔事業區內地質圖

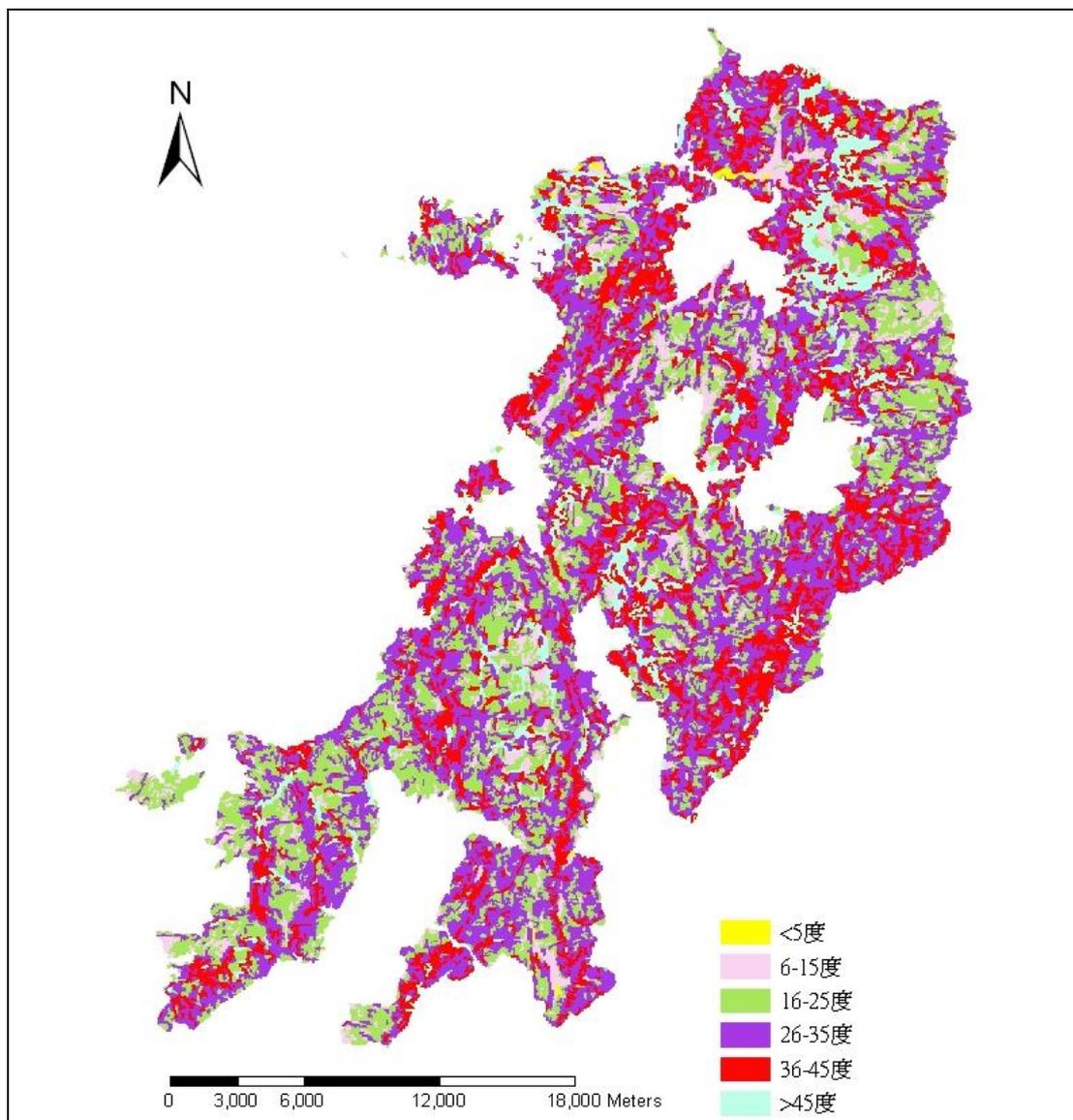
表 3：阿里山與大埔事業區內各地質層分佈面積

地層名稱	面積(ha)
卓蘭層、錦水頁岩及其相當地層	6,124.98
南港層、石底層及其相當地層	293.88
南莊層及其相當地層	31,865.43
桂竹林層及其相當地層	33,406.67
沖積層	7.31
階地堆積	382.01
頭嵙山層及其相當地層	163.72
Total	72,244.00

依林務局第三次森林資源及土地利用調查林地分級調查報告內容中，坡度之決定係利用DTM資料以電腦處理製圖，繪製成五萬分之一的坡度級圖（圖7）。坡度的分級結果共分為六級（表4）。

表4：阿里山與大埔事業區內坡度基準分級表

坡度級	傾斜度		面積 (ha)	備註
	角度	百分比%		
1	<5 度	<10%	146.21	平坦地
2	6~15 度	10~25%	4,431.13	小起伏
3	16~25 度	25~45%	18,260.40	丘陵地
4	26~35 度	45~70%	28,914.25	山坡地
5	36~45 度	71~100%	15,558.56	山地
6	>45 度	>100%	4,933.45	陡峭



阿里山與大埔事業區內共 31 條溪流，分佈於雲林、嘉義與台南境內，分別為八掌溪支流、三重溪、大庭、中寮、心鴻橋野溪、北寮、生毛樹溪、石雅、石雅野溪、光興橋野溪、竹篙水溪、里佳野溪、和平橋溪、阿里山溪支流、南投埤、南靖溪、後湖溪、科尾寮溪、乾坑溪、崩山野溪、清水溪支流、湖華尾溪、鹿窟寮野溪、無名野溪、蛟龍坑、賀老寮、腦寮溪、達德安溪、龍蛟溪、豐山溪、關子嶺（圖 8）。

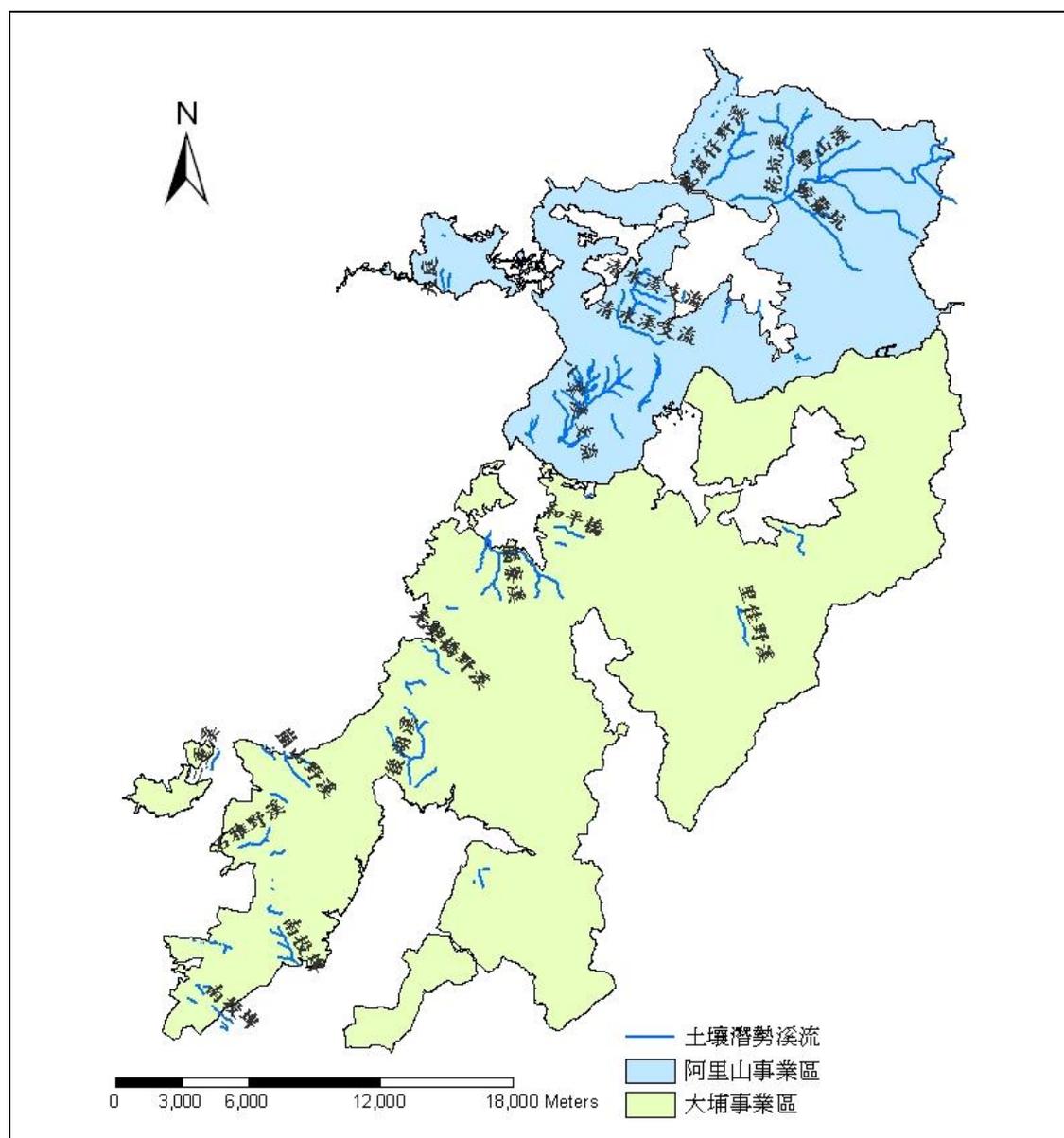


圖 8：阿里山與大埔事業區內溪流圖

林務局第三次森林資源及土地利用調查中，將國有林事業區內之土地利用分為 74 類（表 6），下圖乃是將國有林地的區分整理為針葉樹林、闊葉樹林、混生林、竹林、紅檜純林、柳杉純林、作物與其他使用等八項（圖 9），詳細如表 5 所示。其中，混交林包含針闊混交林、針竹混交林、闊竹混交林、針闊竹混交林，因此分佈面積最廣。

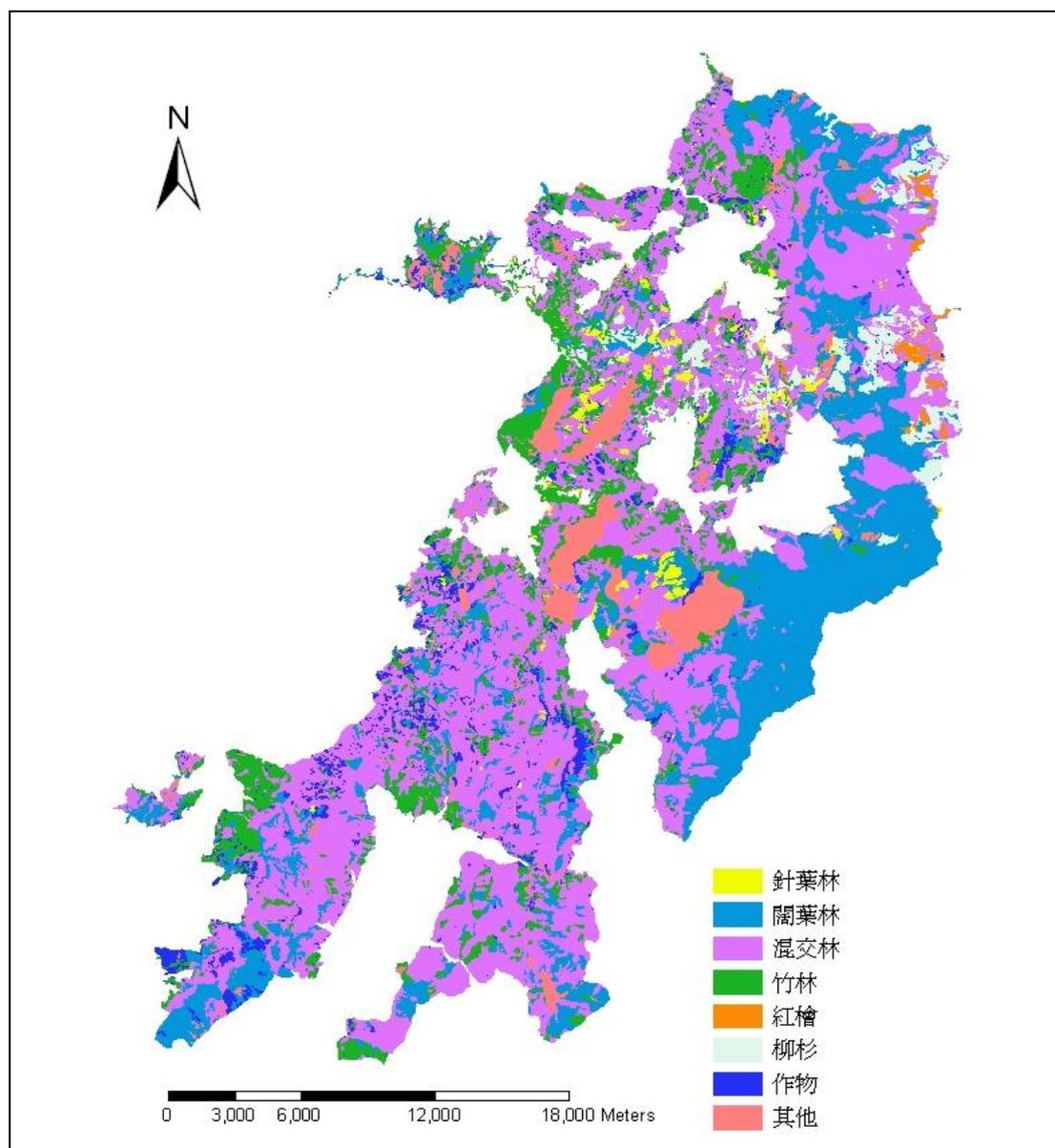


圖 9：阿里山與大埔事業區內土地利用型圖

表 5：阿里山與大埔事業區內各土地利用型涵蓋面積

土地利用型	面積(ha)	土地利用型	面積(ha)
針葉林	1,052.63	紅檜	404.46
闊葉林	17,164.75	柳杉	2,505.86
混交林	33,690.75	作物	2,995.97
竹林	9,563.53	其他	4,866.06

表 6：林務局土地利用型整合表

代號	類型	新類型	代號	類型	新類型
011	冷杉天針	1 針葉林	119	其他針造林	1 針葉林
012	鐵杉天針	1 針葉林	120	人針混	3 混生林
013	檜木天針	5 紅檜	130	人針闊混	3 混生林
014	松類天針	1 針葉林	141	相思樹造林	2 闊葉林
015	雲杉天針	1 針葉林	142	楓香造林	2 闊葉林
019	其他天針	1 針葉林	143	樟樹造林	2 闊葉林
030	天針闊混	3 混生林	144	光臘樹造林	2 闊葉林
040	天闊純	2 闊葉林	145	台灣檫造林	2 闊葉林
050	天闊混	2 闊葉林	146	桐類造林	2 闊葉林
061	桂竹林	4 竹林	149	其他闊造林	2 闊葉林
062	孟宗竹林	4 竹林	150	人闊混	3 混生林
063	麻竹林	4 竹林	161	桂竹造林	4 竹林
064	刺竹林	4 竹林	162	孟宗竹造林	4 竹林
065	綠竹林	4 竹林	163	麻竹造林	4 竹林
069	其他竹類	4 竹林	164	刺竹造林	4 竹林
070	天竹針混	3 混生林	165	綠竹造林	4 竹林
080	天竹闊混	3 混生林	169	其他竹林	4 竹林
090	天竹針闊混	3 混生林	170	人竹針混	3 混生林
111	檜木造林	5 紅檜	639	其他果園	7 作物
112	松類造林	1 針葉林	640	其他墾地	7 作物
113	杉木類造林	1 針葉林	650	伐木跡地	8 其他
180	人竹闊混	3 混生林	700	道路	8 其他
190	人竹闊針混	3 混生林	710	建築用地	8 其他
600	灌木林	2 闊葉林	720	苗圃用地	8 其他
611	天然草生地	8 其他	730	水田	7 作物
612	箭竹地	7 作物	740	防火線	7 其他
613	牧草地	7 作物	750	工礦用地	7 其他
620	茶園	7 作物	760	土廠用地	7 其他
621	甘蔗地	7 作物	770	墓地	7 其他
622	蔬菜地	7 作物	780	鹽田	7 其他
629	其他旱作地	7 作物	790	漁塭	7 其他
631	香蕉園	7 作物	634	桃李梅園	7 作物
632	鳳梨園	7 作物	635	蘋果. 梨. 水蜜桃園	7 作物
633	柑橘園	7 作物	636	檳榔園	7 作物
114	台灣杉造林	1 針葉林	800	其他	7 其他
115	柳杉造林	6 柳杉林	900	裸露地	7 其他
116	肖楠造林	1 針葉林	930	水面	8 其他

地面測站雨量資料共有 61 筆(圖 10),分佈嘉義縣、雲林縣、南投縣、高雄縣與台南縣等地,資料來源為中央氣象局嘉義氣象站,均為文字檔格式,經過整理後將 dbf 檔案輸入 ArcGIS 軟體,經過 Kriging 內差分析法製成阿里山與大埔事業區之雨量空間分佈圖。

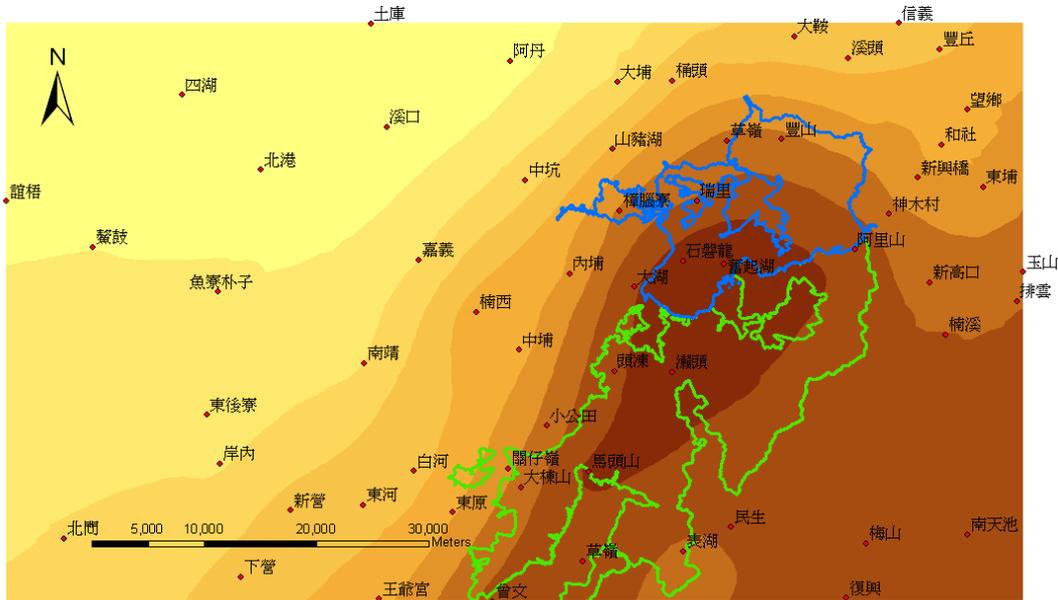


圖 10：阿里山與大埔事業區 8 月 7-8 日累積雨量空間分佈圖

參、研究方法

一、光達資料處理

(一) 設置訓練樣區

根據災前與災後衛星影像,分類出阿里山地區因莫拉克風災造成的新崩塌地,利用 ArcGIS 軟體將衛星影像資訊與航照影像、光達資料結合,發現在光達資料的範圍裡,有許多新崩塌地產生,本研究主要以阿里山國有森林遊樂園區為光達試驗地區,進而推估全阿里山地區生物量損失。由衛星影像分類結果,發現阿里山二萬坪火車站前有大片的崩地產生,因而在此崩塌地上進行光達影像處理。主要處理有:(a) 崩塌地 DEM 製作、(b) 崩塌地 DSM 製作、(c) 15 個光達樣區設置、(d) CHM 製作。

(二) 光達點雲分類

利用光達高密度測點、穿透性及多重反射特性,能有效取得地表及地面高度。光達發射波最多回波數量 4 個為 only echo、first echo、second echo 和 last echo,首先要將 4 種回波對應到相關的資料位置。

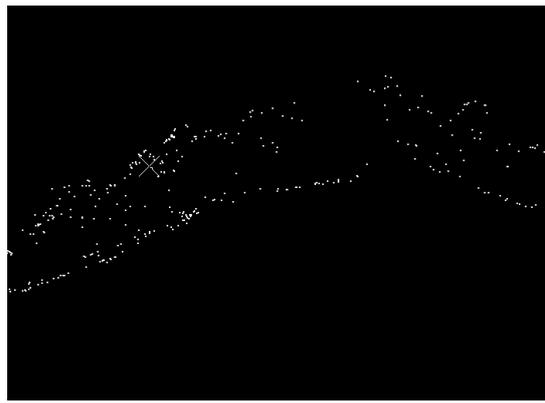


圖11：光達原始點雲剖面圖（1m）



圖12：4種回波特性分類結果

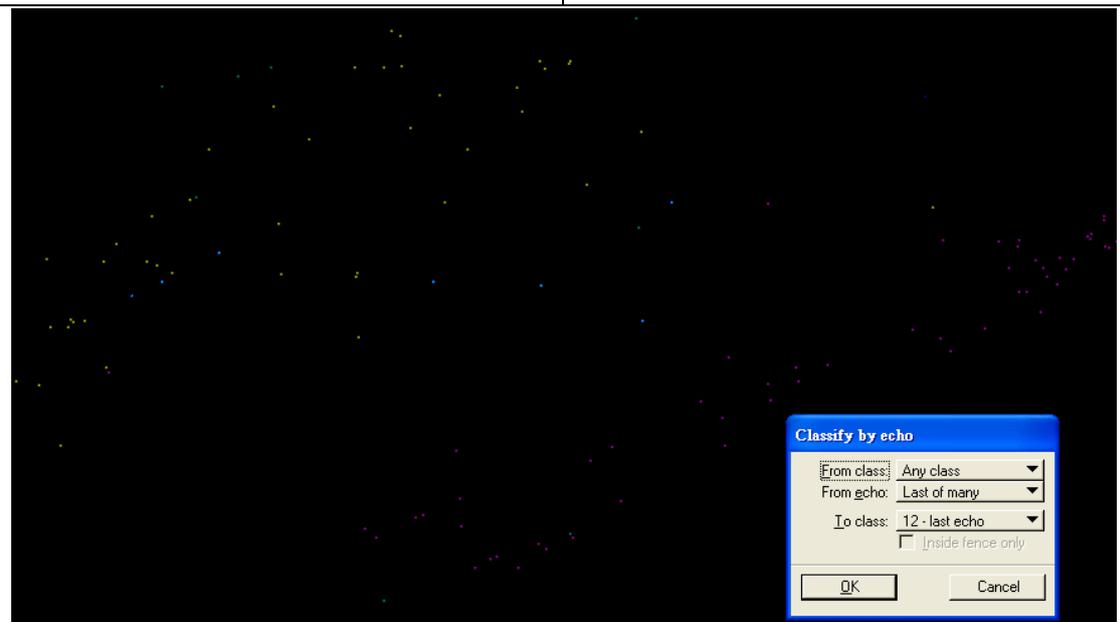


圖13：光達點雲剖面放大圖。綠點為only echo、黃點為first echo、藍點為second echo、紫點為last echo。

（三）DSM與DEM製作

空載光達具有多重反射的特性，通常地物表面的反射特性為only和first echo，因為當地物在垂直空間上分佈最高時，通常沒有遮蔽物掩蓋，如果地物下方沒有任何東西時，回波只有一次為only echo，而假如地物下方還有物體存在時，雷射掃描儀器發射波會持續穿透下去，這時候地物表面最高處的反射特性為first echo，所以我們將only echo與first echo為DSM分類依據；而DEM為數位海拔高模型，顧名思義為地表的高度而非地表上地物表面的高度，通常裸露地的反射特性為only echo，為只有地面存在，下方沒有任何可穿透之物體。而森林植被覆蓋物下的地面，在雷射掃描儀器發射波中，反射特性通常最後才回傳到接收器，所以為last echo。我們將only echo和last echo分類成一類輸出製作為DEM。

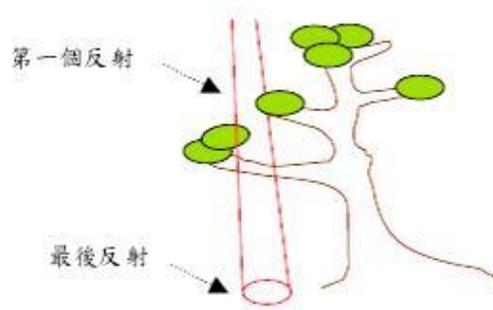


圖14：雷射多重反射示意圖（周富晨，2004）

（四）分類與過濾地面點

空載光達所有的點雲資料都需要使用點資料編輯軟體「TerraScan」將點雲進行分類與過濾，將地表點與地面點分類。此法操作原理為1999年 Peter Axelsson提出的地面點過濾原則，且在2000年時提出修改後之演算法，Axellson學者採用adaptive TIN組成的演算法判斷地面測點，首先判斷出地面參考點的種子觀測量，組成三角面，每增加一測點，判斷該點與三角面垂距與角度是否小於門檻值，漸近增加地面測點，直到所有點判斷完成。Raber等（2002）指出adaptive TIN組成的過濾方法，門檻值應隨著不同土地覆蓋而調適門檻值。

本研究之分類地面點方法為半自動分類（何心瑜等，2008），利用TerraScan軟體以Axelsson提出的地面點過濾原則，參考adaptive TIN分類方法，進行初步的自動分類，而後加入人工編修地面點，提高地面點分類的精準度。

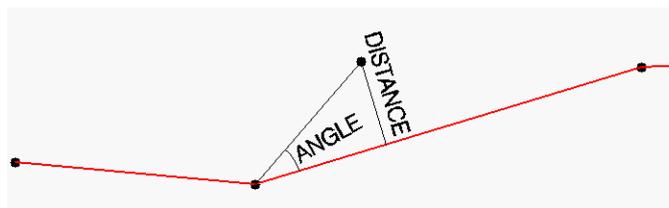


圖15：地面點萃取原理（TerraSolid, 2005）

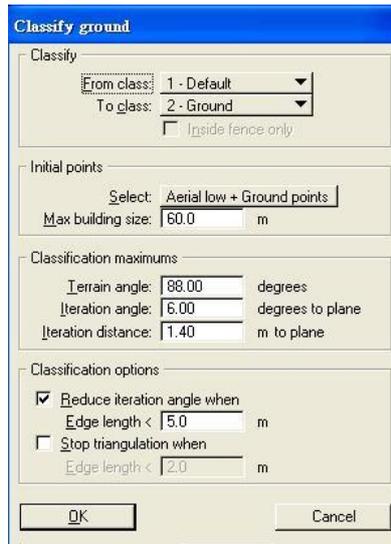


圖16：TerraScan分類介面

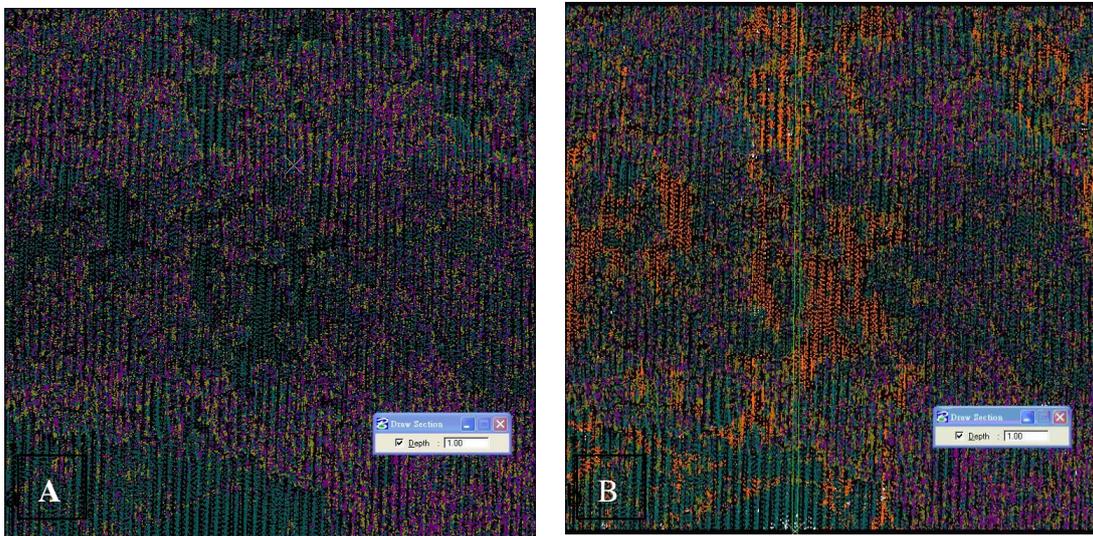


圖17：回波分類分佈狀況圖。A為4種回波分類狀況，綠點為only、黃點為first、藍點為second、紫點為last echo；B為地面點分類完成圖，橘色點為地面點



圖18：以1公尺為大小的剖面圖



圖19：地面點分離表示圖

(五) CHM製作

地面點分類出來後輸出製作成DEM，再將only echo和first echo分類成同一類輸出製作成DSM，根據所製作完成的DSM與DEM進行相減，即可得到地物表面高程，而我們的研究主要探討森林植被復蓋之損失，得到的地物高程為植被覆蓋高度，即為CHM。地表DEM生產出來之後，使用TerraScan內的工具製作鏡射的負DEM，再執行負差轉換讓DEM高程值互相抵銷成為0m的水平地表，此時得出純CHM及地表物高度，再將only echo、first echo和ground point點雲轉存為向量格式，最後進行地面點與光達點之匯整，比較兩者高程差以及針對光達點雲做樹冠幅模型之探討。

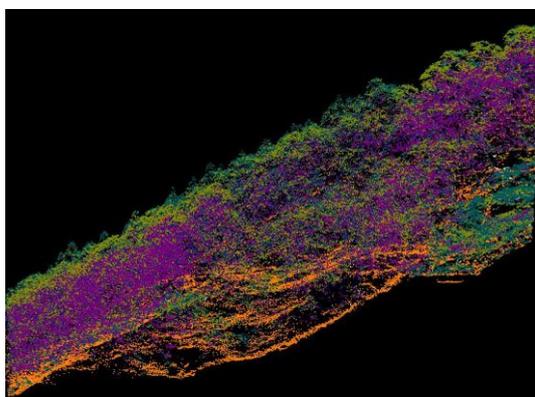


圖20：地面點分類完成圖

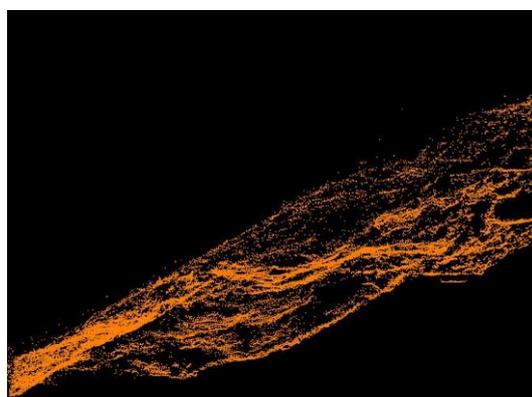


圖21：地面點萃取保留圖

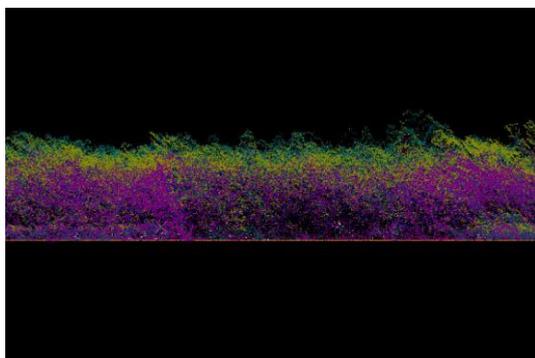


圖22：地面點正高化

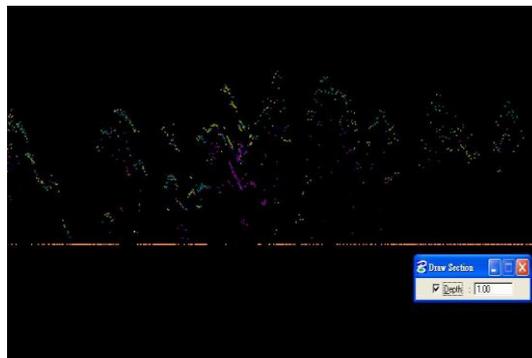
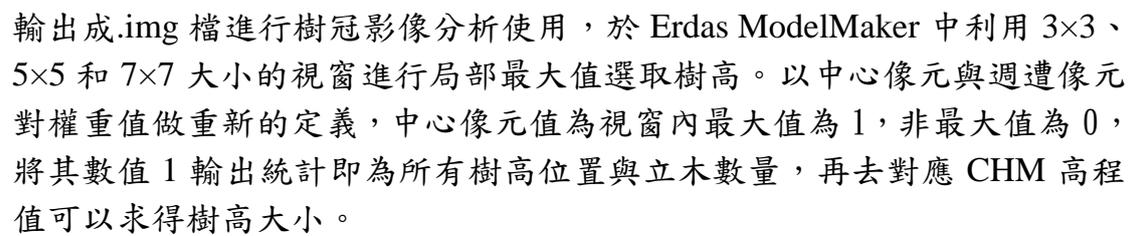


圖23：正高化後剖面放大圖

二、樹高選取

由於光達點雲為不連續性的資料，其製程是以許多點內插而成的資料，雖然點雲密集的地方內插後可以得到與原貌相當的結果，但是如果點之間距離，較設定內插距離大時，往往會有孔隙的現象發生，這會使我們樹冠特徵變得破碎。利用 $n \times n$ 大小的視窗過濾每一像元，依據視窗中設定的權重值決定中心像元的資料值，可以去除一些小孔隙，得到較為完整的樹冠特徵，但是過度大小的視窗會模糊掉樹冠界線。當 CHM 內插完成後，

輸出成檔進行樹冠影像分析使用，於 Erdas ModelMaker 中利用 3×3、5×5 和 7×7 大小的視窗進行局部最大值選取樹高。以中心像元與週遭像元對權重值做重新的定義，中心像元值為視窗內最大值為 1，非最大值為 0，將其數值 1 輸出統計即為所有樹高位置與立木數量，再去對應 CHM 高程值可以求得樹高大小。

三、林分胸徑與其他參數關係之評估

根據前人研究，在計算材積時，胸徑、樹高和年齡為重要參數因子，對於材積有很大的正相關，其中胸徑值為最重要且最容易準確取得的資料。然而從一般遙測影像無法直接取得樹木的胸徑值，只能利用遙測影像中可取得的樹冠直徑、樹高、樹冠幅、林分鬱閉度與林分胸徑作檢定，許多文獻與報告上提到樹冠幅直徑大小與胸高直徑有很強的相關與解釋能力，代表樹木擁有的樹冠幅即有相對應大小的胸高直徑，所以通常我們利用航照影像去進行判斷樹冠幅大小再利用地面調查中冠幅與胸徑迴歸關係去推估胸徑，本研究另外使用其他林分參數因子以線性、乘幕迴歸方式對於林分胸徑關係做評估，建立最佳 *DBHavg* 的推估模式。

四、衛星影像處理

(一) 影像前處理

在影像分類之前，要對原始影像進行修正或補償，因為衛星接收器的損壞、大氣的干擾或者影像的地理位置的偏移等等所造成影像失真，所以要利用衛星影像做分析前，我們要先做初步的處理。通常地面接收站會進行初級處理，依構圖處理需求等級不同，在價格上會有差距，以下是常用的處理方法。

1. 儀器校正：

儀器校正就是儀器在接收過程中，可能儀器受損，接收器失靈，導致所接收到的衛星影像DN值，很有規律的每隔幾列的值都是0，使原始影像出現一條等間距的黑橫線，稱為列值空置，這會損失許多重要的研究目標特徵，使地面資料無法判釋。通常地面接收站都會進行前處理，再提供給買家。

2. 過濾雜訊：

所謂雜訊是指DN值中出現一些沒有規律、異常的數值，通常可能是數據在傳回的過程中，受到大氣層的干擾。遇到這種情況，要利用相關軟體（如ENVI、Erdas等）進行過濾雜訊的動作，首先假想一個空核網來過濾每

一個DN值，空核網的格數必須是奇數，比如每邊3格、5格或7格等。進行過濾時，要將空篩子的核心擺在每一個要處理的像元上，然後從左至右、從上到下，一個像元一個像元處理。

3. 大氣校正：

衛星感測器所接收之輻射值，往往代表地面物體反射之特性，然而可能受地形效應、太陽照射等外在因素，導致感測器接受之輻射值有所差異，又衛星影像因為載台高程遠，受到大氣散射與當時狀態等因素影響比航空照片明顯，而且大氣中許多氣體如：水蒸氣、氧氣、臭氧、一氧化碳、二氧化碳、和甲烷都會產生散射現象，造成不正確光譜反射強度，並導致影像分類上的誤差，而波長越短，越容易受到大氣中氣溶膠所散射。為減少分類上之誤差，通常在多光譜影像分析前須先做大氣校正。經過影像前期大氣校正處理，使影像真實表現出正確地表物的光譜資訊，回復地表反射特性、增加影像灰度值範圍和對比效果，使影像或影像間容易判別。大氣散射能力強度，可依照大氣中分子的直徑而異，主要可歸納為雷氏散射、米氏散射及無選擇散射作用。

(1) 雷氏散射：

散射粒子直徑遠小於輻射能之波長時，輻射能即會與大氣粒子產生雷氏散射作用，且波長較短者散射力較強（約 $0.4 - 0.7 \mu\text{m}$ ），如紫外線與藍光段，大約發生於距地面2至8公里間之區域，此也是為何在晴朗之白天，天空會呈藍色的主要原因（Jensen, 2005）。

(2) 米氏散射：

發生米氏散射時，大氣粒子的直徑幾乎相等於交互作用輻射能波長，主要因子為水蒸氣和塵埃等，影響波長以紅光及近紅外光較明顯，發生於距地面4.5公里內。

(3) 無選擇散射：

當大氣粒子直徑為交互作用的輻射能波長數倍時，無選擇散射即會發生效應，對各種波長之輻射能均會造成影響，發生於大氣中懸浮微粒含量高時，因大氣中的水滴波長介於 $5-100 \mu\text{m}$ 間，經此作用散射等量的藍、綠

及紅光，使大氣中的雲和霧呈現白色 (Jensen, 2005)。

4. 幾何校正：

在衛星影像取得的時候，常會發生影像上的樣區與地面調查利用GPS得到的座標值不相同，可能有些偏差和位移，這時候要選定兩者中都容易判釋的同一地物作為控制點，挑選控制點須以位置的準確性佳、與週遭的差異性顯著、且應選擇範圍小的點為準則，如道路的岔口、獨立木、明顯的裸地等影像特徵較明顯的地方作為控制點。以控制點提供的兩組座標值，用回歸方法建立兩個座標系統之間的轉換係數，並確定轉換系統矩陣。

(二) 地物光譜反射特性

1. 植物：

綠光波段 (0.50-0.59 μm)：受葉綠素吸收較少，有利於綠色植物的辨別。但分類時容易與其他土地利用產生混淆。因此影像處理研究皆不採用第一波段。

紅光波段 (0.61-0.69 μm)：葉綠素對其吸收強烈，故植物有較低的反射，對非植物性地物反射較高。

近紅外光波段 (0.7-0.9 μm)：不被葉綠素吸收，故植物的反射值很高。對植物的背景有很大的辨識力。

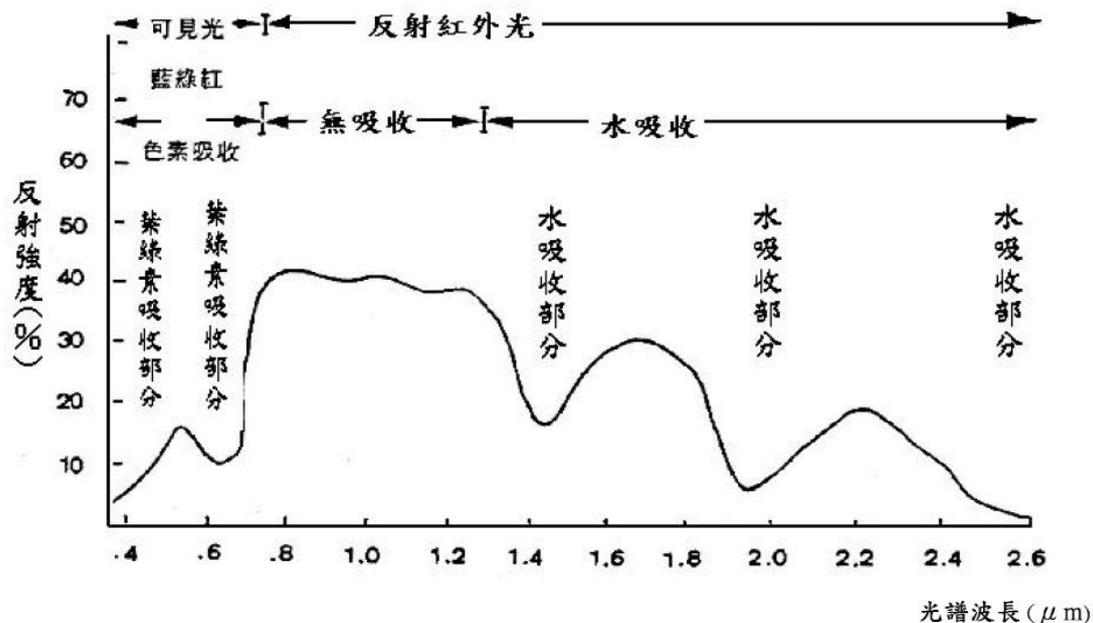


圖 24：植物反射光譜曲線

2. 土壤及建築物：

土壤之反射強度與土壤類型、表面崎嶇度，太陽照射角度及土壤含水

量等有關。一般而言：

在可見光區域：土壤之反射強度 > 植物。

在近紅外光則相反：土壤之反射強度 < 植物。

建築物的反射強度與土壤相類似。

(三) 影像分類

影像分類根據前人研究方面，大抵上可分為三種：1. 監督分類法 (Supervised method)、非監督分類法 (Unsupervised method) 和混合分類法 (Hybrid method) 三種。

1. 監督分類法

根據地面實值，監選影像上呈現均值的地區做為訓練樣區，將此特定組類之樣區用來訓練分類演算之方法。簡單說利用地面調查已知明確的地物為訓練區，讓電腦學習，再由電腦找出各個不同訓練區的統計特徵參數，利用這些參數做為分類的依據，將影像中所有的像元一個一個分類至適當的類別中。常用的判別規則有最小距離判別規則 (Minimum Distance Decision Rule) 和最大概似法 (Maximum Likelihood Decision Rule) (潘國樑，2006)。

2. 非監督分類法

當我們無法得知訓練區中地物類別時，依據影像本身的數據，由電腦自動運算處理，將各種地物的統計值之分佈，按照相似分割及概率統計理論，分類成不同的空間集群，並且總結出集群參數，進而逐一對各像元作集群歸類，故又稱為集群分析。此方法不需要訓練區，而是直接利用各像元的DN值之統計特性結構進行類別劃分。其主要依據係認為同一類地物由於具有相似的波普特性，所以應該群集於多維空間的某一區域內，反之，不同類別的地物因為具有不同波譜特性，所以應該群集於這多維空間的不同區域內。利用此原理將每個集群的界線、分佈狀態計算出來，整理成電腦可以讀取的數學算式，就可以進行自動分類 (潘國樑，2006)。

3. 混合分類法

顧名思義即為監督分類法與非監督分類法之混合使用，主要目的在以聚集分析之方式選取純質之光譜組類做為訓練樣區，以最大概似法則進行全區之分類。

(四) 影響衛星影像光譜值的效應

衛星感測器所接受的輻射成分除了太陽的直接光外，還有許多非直接反射輻射的效應，如地形陰影、像元週遭的植生造成的散射，在考慮地位的反射率時，還要考慮到穿透率因子與輻射路徑的光程、大氣之溫度、溼度、壓力、氣溶膠粒子密度與數量等非常複雜的條件因子有關(林金樹，

1999)。衛星感測器所接收的輻射成分包含太陽反射輻射、路徑輻射、天空漫射輻射反射、及鄰近地形散射輻射等(鄭祈全等, 1998; Schieh, 1992), 本研究主要討論為植生物體的直接太陽反射輻射在於林分材積上的關係進而利用衛星影像推估材積, 對於其他部分的效應應該給予去除。

(五) 樣區光譜資料選取與植生指標的利用

當植生量越豐富時, 林分所擁有的材積與生物量也越豐富, 擁有較高的植生指標。本研究利用光達推估出的材積結合SPOT5衛星影像進行樣區的選取, 以3×3個像元點的資料平均值做為該樣區的代表值來減少對位誤差的影響, 將其平均光譜值用來求算各種植生指標, 探討各植生指標與材積之間的關係, 所使用的植生指標比有單波段光譜值(G、R、NIR、SWIR)、波段差(NIR-R、NIR-G)、波段比(NIR/R)和NDVI外, 還有坡度、坡向和地形陰影等地形因子。

1. 樣區材積的取樣方法

樹的材積計算以胸高直徑、樹高和形數為主, 又以胸高直徑和樹高值用來探討主題最多。本研究材積的取得以光達製做出的CHM像元體積(voxel)作為應用, 理論為當光達測量一定大小的林分材積越高時, 其對應的CHM高度會有較高的數值呈現, 代表此林有較高的林分高度, 以致平均林分材積有較多的結果呈現。本研究以各個大小林分像元體積和與林分材積進行簡單直線回歸分析, 來驗證上述的使用理論。

像元體積計算方式為:

$$\text{voxel} = \text{pixel size} \times \text{raster image value}$$

2. 衛星影像樣區選擇與影響光譜值的因子

由於考慮到太陽光照射影響, 本研究在不同坡向(NE、NW、SW、SE)各選取10-15左右的訓練樣區作為觀察不同方位林分材積量與單波段值、波段差、波段比植生指標與地形因子之間的關係。

五、崩塌潛勢分析

崩塌潛勢分析首先需利用衛星影像進行分類, 區分出新生之裸露地區以及分佈位置, 並決定潛勢因子, 決定的方式參考相關研究報告, 並比較研究區內可能取得資料, 最後決定以地質、坡度、距溪流距離、土地利用型以及雨量作為本次研究之潛勢分析因子。接著將取得資料進行轉換為統一格式, 包括影像格式、座標格式、網格尺寸、像素大小等, 最後再將轉

換後的影像於遙測分析軟體中進行套疊，並利用邏輯斯迴歸產生崩塌潛勢圖。

(一) 雨量分析

本研究所需之雨量資料是向中央氣象局嘉義氣象站購買地面測站資料，共計 61 筆資料，分佈於嘉義縣、雲林縣、南投縣、台南縣與高雄縣境內。雨量計算採 8 月 7 日與 8 月 8 日之累積雨量。首先須將文字檔建成可以輸入 ArcGIS 格式之檔案，並於 ArcGIS 中產生點圖層。接著透過 ArcGIS 中地理分析工具中的 Kriging 法進行雨量站之間的內差計算，所產生的檔案再經過格式轉換為區塊圖層。雨量測站資料如表 7、8 所示：

表 7：中央氣象局地面測站雨量資料

測站名稱	X 座標	Y 座標	8/7 雨量 (mm)	8/8 雨量 (mm)	2 日累積雨量 (mm)
嘉義	191216	2599523	50.5	243.0	293.5
阿里山	230086	2600495	420.0	1161.5	1581.5
玉山	245063	2598452	506.7	697.6	1204.3
神木村	233125	2603660	170.0	717.5	887.5
草嶺	218702	2610266	533.0	643.0	1176.0
四湖	170132	2614389	17.5	83.0	100.5
誼梧	154480	2604823	28.0	152.5	180.5
大埔	208908	2615551	72.5	148.5	221.0
馬頭山	206395	2580490	486.5	1206.0	1692.5
奮起湖	218452	2599224	557.5	1187.0	1744.5
曾文	197775	2568828	423.5	974.5	1398.0
新營	179817	2577024	96.0	508.5	604.5
表湖	214815	2573331	202.0	803.0	1005.0
關仔嶺	199238	2580790	184.5	776.0	960.5
望鄉	240080	2613066	440.5	482.5	923.0
和社	237838	2609900	141.0	437.5	578.5
信義	233966	2620855	95.0	329.0	424.0
溪頭	229514	2617722	167.5	270.0	437.5
大鞍	224672	2619637	153.5	238.5	392.0
桶頭	213840	2615661	117.5	491.5	609.0
豐丘	237647	2618482	233.5	344.5	578.0
新興橋	235680	2606949	126.5	612.0	738.5
東埔	241493	2606083	283.5	402.0	685.5
阿丹	199364	2617427	19.5	124.0	143.5
土庫	186939	2620829	9.0	90.0	99.0

表 8：中央氣象局地面測站雨量資料（續）

測站名稱	X 座標	Y 座標	8/7 雨量 (mm)	8/8 雨量 (mm)	2 日累積雨量 (mm)
北港	177184	2607646	5.5	129.0	134.5
山豬湖	208466	2609523	124.5	486.0	610.5
瀨頭	213803	2589483	466.0	980.5	1446.5
草嶺	205832	2572432	285.0	861.5	1146.5
新高口	236749	2597533	255.0	833.0	1088.0
中坑	200745	2606717	56.5	273.0	329.5
溪口	188373	2611501	10.5	90.5	101.0
鰲鼓	162198	2600714	32.0	183.5	215.5
樟腦寮	209103	2603984	612.5	527.0	1139.5
內埔	204661	2598337	126.5	452.5	579.0
瑞里	215997	2604889	352.0	661.0	1013.0
豐山	223550	2610411	422.5	613.0	1035.5
王爺宮	187683	2569052	92.5	549.0	641.5
大棟山	200311	2579063	342.0	595.0	937.0
楠西	196396	2594865	249.5	703.5	953.0
民生	219026	2575506	277.5	924.5	1202.0
排雲	244523	2595807	628.0	476.5	1104.5
南天池	240139	2574831	261.5	1050.5	1312.0
梅山	231101	2574070	184.5	941.5	1126.0
復興	229304	2569120	214.5	1051.0	1265.5
楠溪	238193	2592796	413.0	743.0	1156.0
岸內	173531	2581208	37.5	217.5	255.0
白河	190771	2580544	96.0	391.0	487.0
東原	194280	2576839	119.0	555.0	674.0
東河	186298	2577487	73.5	460.0	533.5
下營	175383	2571047	56.5	447.0	503.5
北門	159598	2574457	60.0	284.5	344.5

（二）溪流區塊資料建立

崩塌潛勢溪流資料來源為水土保持局提供，為線段資料，必須於 ArcGIS 軟體中進行環域分析，於溪流兩岸各設 10 層，每層為 30 公尺距離，溪流左右兩側共計產生 300 公尺之區塊資料。

（三）崩塌區域圖產生

本研究利用風災前、後期之 Landsat 衛星影像資料進行分類，將兩個時期產生的裸地範圍進行差分，得到莫拉克颱風造成之新生裸露地圖。

(四) 資料格式轉換與座標系統格式統一

最初取得之崩塌潛勢分析因子圖層資料均為向量圖層，而進行潛勢分析計算所需的資料格式為網格資料，因此必須於 ArcGIS 中進行資料格式之轉換，由*.shp 資料格式轉換為*.img 格式，在轉換過程中網格大小設定為 10 × 10 公尺。

由於崩塌潛勢因子資料分別由嘉義林區管理處、嘉義氣象站、水土保持局、中央地質調查所、中央大學太空遙測中心取得，因此座標系統須透過 ERDAS 軟體進行整合統一，座標系統統一為 TWD97 座標系、像素大小為 10 × 10 公尺。

最後所有分析因子之圖層必須於 IDRISI 軟體下進行分析，因此必須再將所有*.img 資料格式轉換為 IDRISI 允許的資料格式。最後啟動邏輯斯迴歸工具，以崩塌圖為依變數、自變數依序套入地質圖、坡度圖、溪流距離圖、土地利用型圖、雨量圖。

肆、結果與討論

一、森林資源損失量

(一) 樣區林分情況與林分胸徑之推估

調查資料有株數、面積、林分胸徑、林分高度及林分冠幅等資料。根據造林資料顯示二萬坪車站旁柳杉人工林為阿里山事業區第 7 與第 8 林班，林齡為 50 年左右，由於阿里山上氣候潮濕、日夜溫差大，適存樹種不多、林相單純、造林已久，使得其林分鬱閉度高，林下常為柔軟的腐植質或是矮竹植被。

根據地面調查資料分析結果(圖 25-27)，林分樹冠幅與林分胸徑之間迴歸關係的 R^2 為 0.6705，林分樹高與林分胸徑之間迴歸的 R^2 為 0.6387，林分密度與林分胸徑之間迴歸關係的 R^2 為 0.9692。以結果來看，林分冠幅與林分胸徑之間關係只有 67% 的解釋能力，代表本實驗柳杉樣區如果使用林分冠幅對於林分胸徑進行推估的話會有 33% 無法解釋的情況發生。而利用林分密度對於林分胸徑進行推估有 9 成以上的解釋能力，代表本研究柳杉樣區的栽植密度對於林分胸徑生長有很大的影響，利用林分密度進行林分胸徑推估對於本研究會有較佳的結果表現。

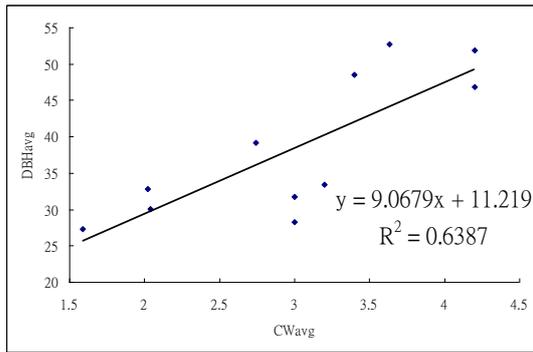


圖25：林分冠幅與林分胸徑之關係圖

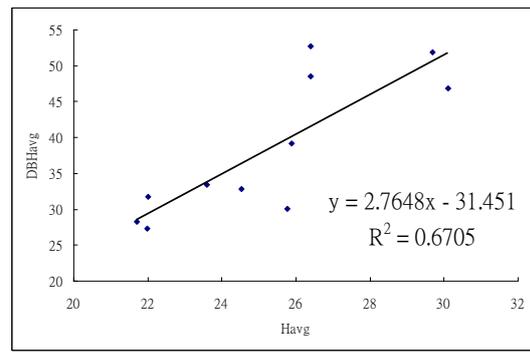


圖26：林分高度與林分胸徑之關係圖

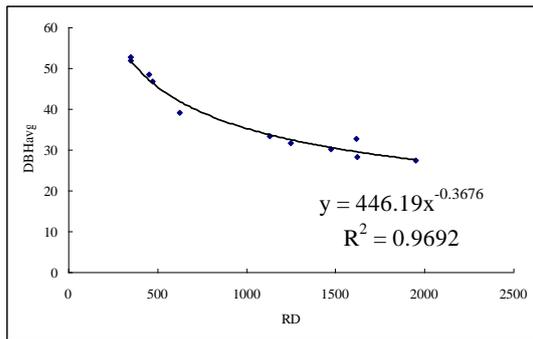


圖27：林分密度與林分胸徑之關係圖

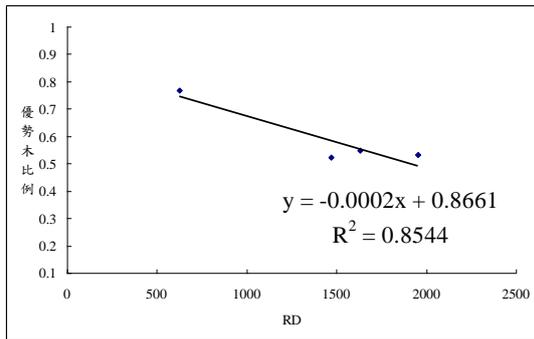


圖28：林分密度與優勢木比例關係

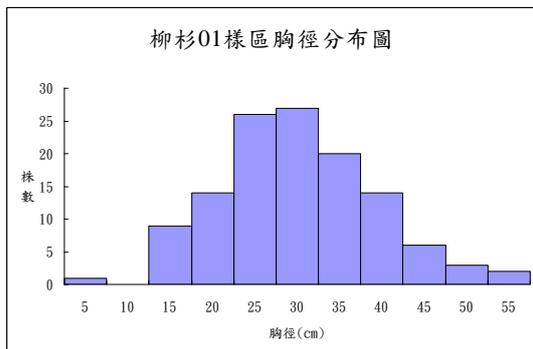


圖29：柳杉01樣區胸徑分布圖

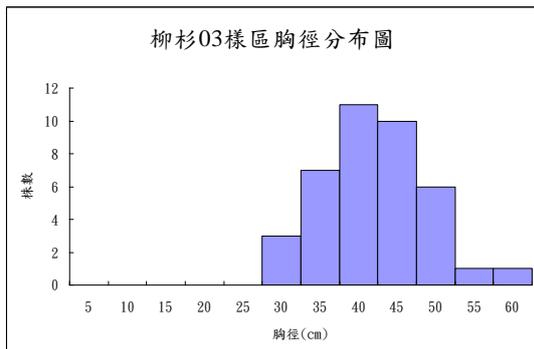


圖30：柳杉03樣區胸徑分布圖

由此可知，在柳杉人工林中，雖然林分冠幅對於林木胸徑的關係可以至6成解釋能力以上，但在鬱閉環境下，林分密度反而影響樹木胸徑生長最大，當栽植密度過高會導致林木間產生資源競爭，對於陽光和生長空間的需求更高，導致樹高與胸徑持續生長但是冠幅卻因為週遭樹木擠壓，生長表現不明顯，這種現象導致該林分的枝下高高度較林分密度低的林分高，產生自然修枝或自然疏伐的現象，其胸徑分布呈現鐘形的常態表現，大部分的林木胸徑集中在中間值，樣區內只有少數極端的優勢木與被壓木存在。當林分密度較低時，林分內優勢木所佔的比例較高(圖28)，因為彼此之間對於資源的競爭低，所以有足夠的空間讓冠幅與胸徑生長，使得胸徑值呈現偏右的鐘型分布。

(二) CHM 與林分高度關係

TerraScan軟體以Axelsson提出的地面點過濾原則作業，加入人工編修地面點，提高分類的精準度，利用完成的DSM與DEM進行相減，得到CHM。根據文獻報告，光達過濾於平地、林相單純無地被物的地區有良好的表現結果，但樣區位於山區、地形起伏較大、林相為針闊混合，雖然柳杉造林地地勢平緩，但林下地被覆蓋物生長茂密，嚴重影響光達的穿透能力，使回波無法到達真實的地面，而在地被覆蓋物表面上就行反射，導致點雲過濾時，常常連同真實地面與地被覆蓋物表面一同歸類於地面點中，造成部份樹高低估。利用製作完成的CHM高度與地面調查高度進行簡單迴歸分析(圖31)，其 R^2 為0.9289，代表光達製作出來的CHM可以用來解釋林分高度的推估，最小誤差為0.0012m，最大誤差為2.2340m。

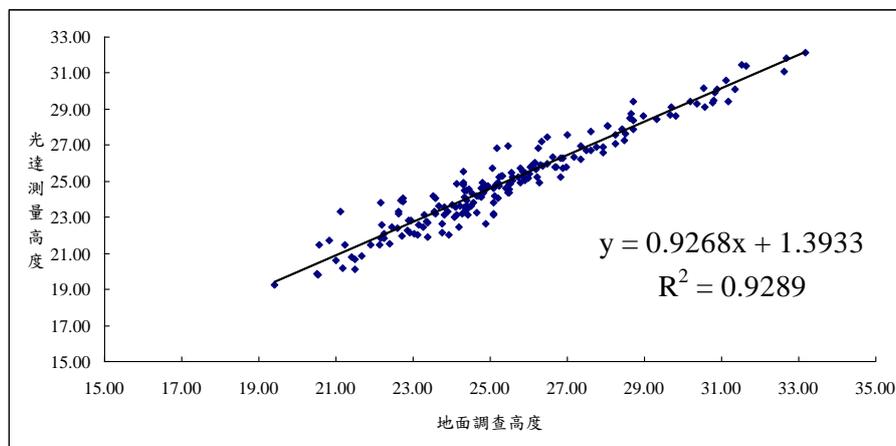


圖31：光達測量高度與地面調查高度之回歸關係

(三) CHM 選取樹高頂點

以局部最大值選取樹高位置時，不同的視窗大小會影響到最高點的判斷，一般而言，當樹冠幅為一定大小、運算視窗越小時所能找到的最高點較多，反之則少，且當光達資料品質與處理結果有許多孔隙或是條帶狀的斷層時，往往會將完整的樹冠給破碎化，以至於在使用小運算視窗時，在一個冠幅範圍內運算視窗會誤判成許多樹高頂點，影響立木株數的判斷；較大的運算視窗雖然可以在冠幅破碎化情況下找尋到樹冠幅範圍內最高頂點，但是在冠幅之間的小冠幅則會因為運算視窗過大而將其遺失掉。

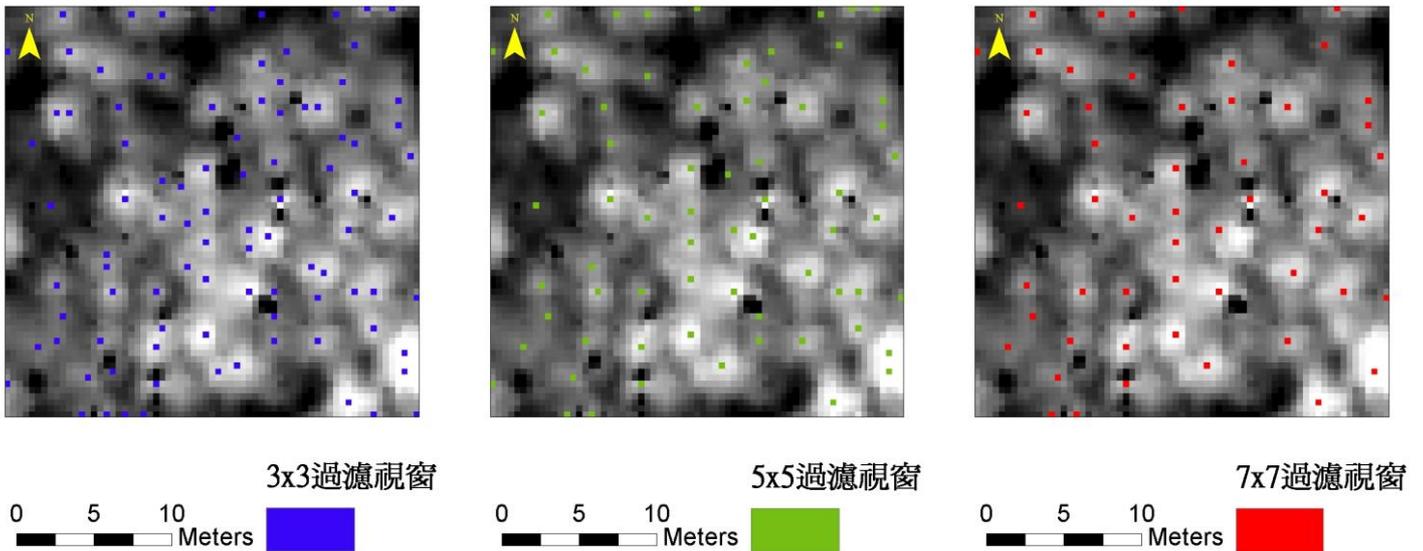


圖 32：不同運算視窗下所偵測到的樹頂位置圖

由圖 32 左至右為 3×3、5×5 和 7×7 不同大小的過濾結果，簡單以目視判斷 3×3 大小所偵測到的樹頂數量明顯比 5×5、7×7 來的多，有些冠幅內有 2-3 個頂點，其原因可能是因為光達點雲做內插時，因本身資料有條列狀的缺失，導致冠幅形狀中間部分有所凹陷，又因為運算視窗小於破裂後的冠幅面積，造成多個頂點的判斷，其二原因有可能樹木生長時所突出的側枝，突出於冠幅外，使得誤判為另一樹冠頂點。

(四) 材積與生物量

本研究以林分密度進行推估林分胸徑，以柳杉樣區為例，局部最大值進行樹頂偵測的結果(表 7)，以 3×3 大小最為不佳，最大差 87 株之多，5×5、7×7 株數差距不多，以 7×7 大小為最佳。將 7×7 大小所偵測到的株數換算成林分密度，以林分密度與林分胸徑的迴歸關係推估胸徑，林分高度則以 CHM 求得的高度作為代表，將其林分胸徑、林分樹高資料代入柳杉材積式計算立木材積，而後乘上株數即為林分材積，再以生物量轉換模式進行生物量換算。通常以遙測影像探討樹冠特徵時，常以地面調查的優勢木作為比較，其原因為影像所能觀察到的部份僅有植被的表面，而林下部份通常儀器無法取得，所以在討論影像所偵測到的樹冠特徵，常以地面調查的優勢木做為真值比較。優勢木為林分中生長良好，冠幅無任何物體覆蓋，雖然與週遭冠幅競爭，但是整體冠幅呈現於植被表面。以全區資料、優勢木和光達結果來討論，全區林分樹高為 24.54m，而光達林分高度 26.54m，光達林分樹高高估於真實林分樹高，與文獻結果不同，但若以光達高度與優勢木林分高度 26.72m 作為比較後，發現光達結果為低估的現象，其原因為以全區資料進行分析後，林分內被壓木的樹高較優勢木低，其整體高度會被拉低，以至產生高估現象。以優勢木做為真值與光達資訊作為比較，較有統一性。

表 7：樣區地面調查資料推估材積與生物量表

樣區	樣區面積 (m ²)	地面調查 (N)	RDall (N/ha)	RHall (m)	RDBHall (cm)	RSVall (m ³ /plot)	Biomass (ton/plot)
cj1	625	122	1952	21.98	27.37	82.58	52.53
cj2	625	102	1632	24.53	32.79	97.92	62.29
cj3	625	39	624	25.88	39.17	52.64	33.49
cj4	625	92	1472	25.77	30.12	83.10	52.86
總和	2500	355	5680	98.16	129.45	316.25	201.17
平均	625	88.75	1420	24.54	32.3625	79.06	50.29

表 8：地面調查各樣區優勢木資料推估材積與生物量結果表

樣區	樣區面積 (m ²)	優勢木 (Ndom)	RDdom (N/ha)	RHdom (m)	RDBHdom (cm)	RSVdom (m ³ /plot)	Biomass (ton/plot)
cj1	625	65	666	25.24	33.38	64.23	40.85
cj2	625	56	896	26.63	37.40	71.21	45.30
cj3	625	30	480	26.71	41.22	45.21	28.76
cj4	625	48	768	28.3	35.66	60.98	38.79
總和	2500.00	199.00	2809.69	106.88	147.66	241.63	153.70
平均	625.00	49.75	702.42	26.72	36.92	60.41	38.43

表 9：以 7×7 大小運算視窗求得林分資訊推估材積表

樣區	樣區面積 (m ²)	光達 (LNdom)	LD (N/ha)	LHavg (m)	LDBHavg (cm)	LSV (m ³ /plot)	Biomass (ton/plot)
cj1	625	58	928	24.99	36.20	62.86	39.75
cj2	625	55	880	25.66	36.91	63.48	40.15
cj3	625	25	400	26.39	49.32	51.08	32.30
cj4	625	43	688	29.11	40.40	66.68	42.17
總和	2500	181	2896	106.15	162.83	244.11	154.37
平均	625	45.25	724	26.54	40.71	61.03	38.59

表 10：地面調查與光達估測林分優勢木材積與生物量的比較表

	LSV(m ³ /plot)	Biomass(ton/plot)	LSV(m ³ /ha)	Biomass(ton/ha)
地面調查	60.41	38.43	966.56	614.88
光達結果	61.03	38.59	976.48	617.44

表 11：闊葉樹地面調查資料

樣區	樣區面積 (m ²)	地面調查 (N)	RDall (N/ha)	RHall (m)	RDBHall (cm)	RSVall (m ³ /plot)	Biomass (ton/plot)
ns1	625	58	928	8.760	16.159	31.162	20.879
ns2	625	44	704	13.463	24.857	33.621	22.526
ns3	625	136	2176	8.675	14.434	36.028	24.139
ns4	625	65	1040	8.798	15.777	23.273	15.597
ns5	625	49	784	15.028	29.092	38.004	25.463
ns6	625	86	1376	9.167	16.407	33.634	22.535
ns7	625	31	496	9.223	26.523	31.184	20.893
ns8	625	32	512	10.387	24.847	14.995	10.047
總和	5000	501	8016	83.502	168.095	241.901	162.074
平均	625	62.625	1002	10.438	21.012	30.238	20.259

表 12：闊葉樹優勢木調查資料

樣區	樣區面積 (m ²)	地面調查 (N)	RDdom (N/ha)	RHdom (m)	RDBHdom (cm)	RSVdom (m ³ /plot)	Biomass (ton/plot)
ns1	625	13	208	19.831	46.300	28.127	18.845
ns2	625	11	176	22.818	47.955	23.084	15.466
ns3	625	19	304	19.030	48.332	31.185	20.894
ns4	625	15	240	34.167	15.777	21.285	14.261
ns5	625	21	336	19.213	42.633	32.250	21.607
ns6	625	17	272	19.469	48.035	30.423	20.384
ns7	625	9	144	17.419	67.467	28.970	19.410
ns8	625	13	208	10.003	30.208	6.195	4.157
總和	5000	118	236	161.949	346.706	201.518	135.017
平均	625	14.75	236	20.2437	43.338	25.190	16.877

(五) 材積量與像元體積的關係

根據光達的結果，本研究另外挑選5個針葉樹區塊、8個闊葉樹區塊，進行林分材積與區塊CHM的像元體積(voxel)進行簡單直線回歸分析。結果發現無論闊葉樹樣區或是針葉樹樣區，其林分材積與CHM像元體積皆呈正相關係。其闊葉樹或是針葉樹的材積與像元體積關係解釋能力皆達9成，代表CHM影像的像元體積能透過轉換模式換算成林分材積，在一定林分像元體積時，可以擁有相對應數量的林分材積，呈現正相關關係。

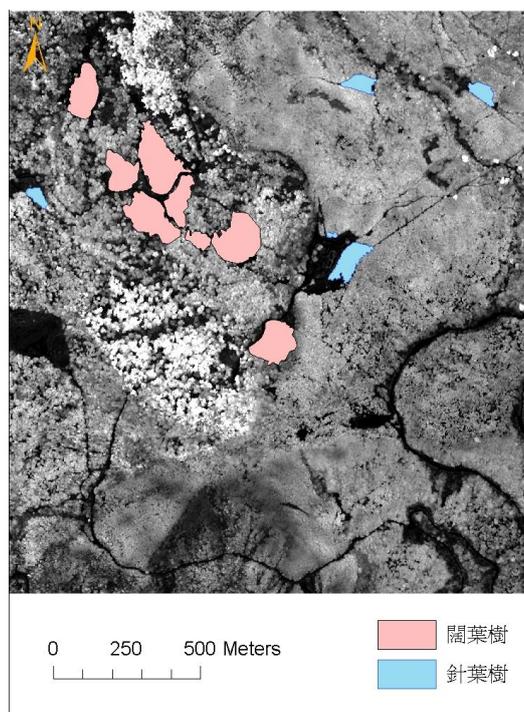


圖33：voxel訓練樣區

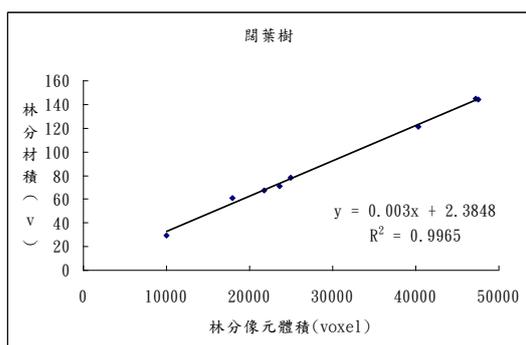


圖34：闊葉樹材積與像元體積關係圖

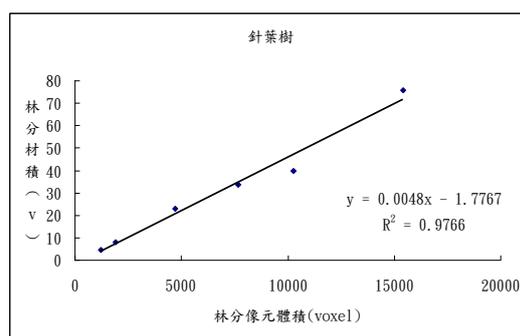


圖35：針葉樹材積與像元體積關係圖

(六) 影像前處理：

首先對衛星影像進行大氣校正處理，使影像真實表現出正確地表物的光譜資訊，回復地表反射特性、增加影像灰度值範圍和對比效果，使影像或影像間容易判別。所利用的軟體為ERDAS ATCOR進行大氣校正。而本研究使用的SPOT5衛星前期影像座標系統為TWD67橫麥卡托二度分帶投影，而後期影像為TWD97座標系統，所以要先進行幾何校正，將前期影像TWD67系統更改為TWD97座標系統。

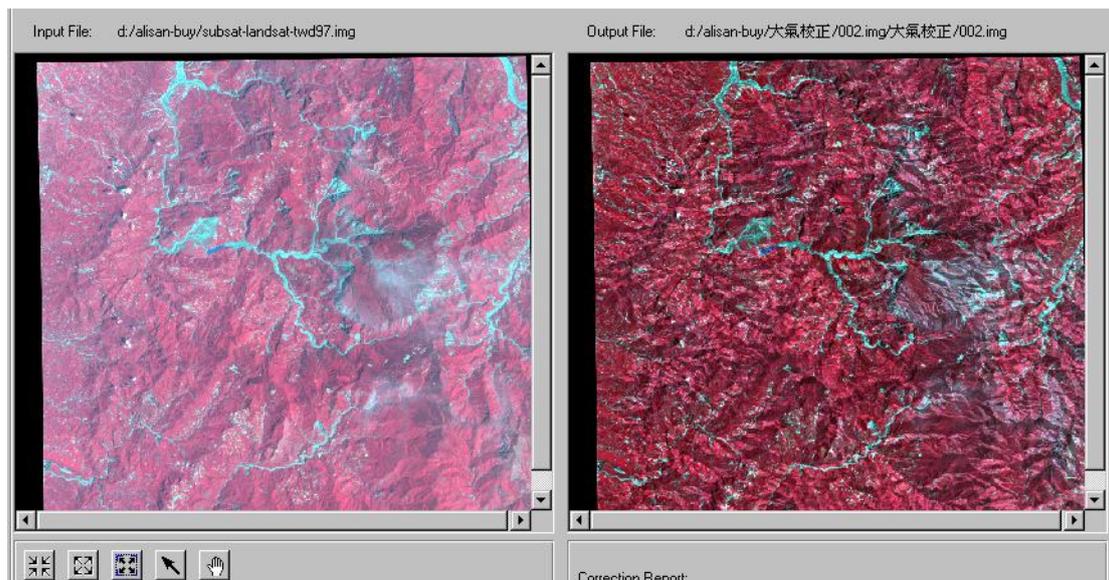


圖36：大氣校正視窗，左為未大氣校正，右為去除霾氣霧氣的衛星影像

(七) 影像分類

本研究主要想得知不同時期嘉義阿里山和大埔地區的崩塌地位置，利用風災前後期衛星影像，用監督式分類方法以裸露地為訓練樣區，單純分類出裸露地，將分類好的圖資重新編碼，裸露地值為1，非裸露地值為2，以災前分類結果與災後分類結果相減，如果災前與災後沒有變化的區塊數值相減後為0；原本為裸露地，後來有植生生長的區塊相減後為-1；原本非裸露地變成裸露地相減後為1。根據分類出來的結果，判斷災前災後各個土石流災區的崩塌地範圍大小。

表 13：衛星影像重新編碼表

		災後	
		裸地：1	非裸地：2
災前	裸地：1	0	1
	非裸地：2	-1	0

(八) 衛星影像樣區選擇與影響光譜值的因子

由於考慮太陽光照射影響，本研究在不同坡向(NE、NW、SW、SE)各選取10-15個左右共50個訓練樣區(圖34)作為觀察不同方位林分材積量與單波段值、波段差、波段比植生指標與地形因子之間的關係，並利用pearson相關性檢測與像元體積(voxel)相關性大的因子，再以林分像元與林分材積的關係進行材積的推估。

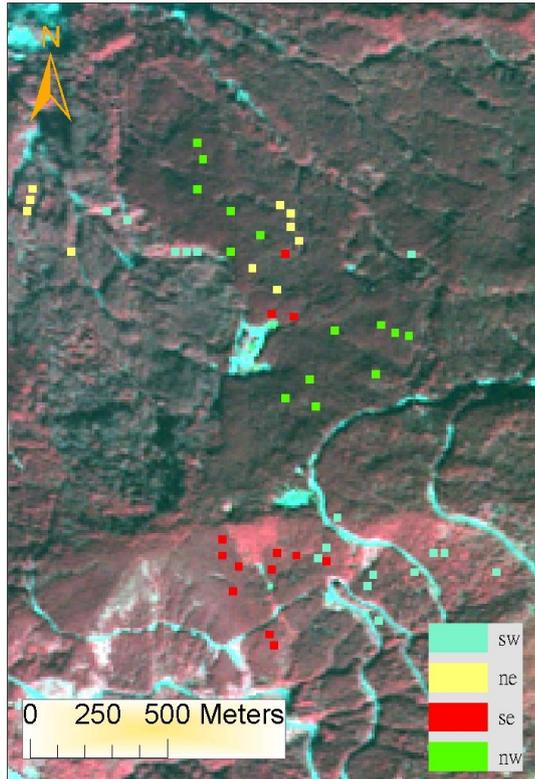


圖37：衛星影像推估材積的訓練樣區圖

表14：植生指標與地形因子pearson相關性檢測結果圖

		相關							
		b3r2	b3r1	b32	ndvi	slope	asp	shadedrelief	voxel
b3r2	Pearson 相關	1	.999**	.950**	.986**	.530**	-.240	.758**	-.304*
	顯著性(雙尾)		.000	.000	.000	.000	.093	.000	.032
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
b3r1	Pearson 相關	.999**	1	.952**	.989**	.519**	-.233	.765**	-.315*
	顯著性(雙尾)	.000		.000	.000	.000	.104	.000	.026
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
b32	Pearson 相關	.950**	.952**	1	.982**	.354*	-.233	.791**	-.282*
	顯著性(雙尾)	.000	.000		.000	.012	.103	.000	.047
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
ndvi	Pearson 相關	.986**	.989**	.982**	1	.440**	-.245	.806**	-.323*
	顯著性(雙尾)	.000	.000	.000		.001	.087	.000	.022
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
slope	Pearson 相關	.530**	.519**	.50*	.440**	1	-.137	.108	.019
	顯著性(雙尾)	.000	.000	.012	.001		.342	.455	.894
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
asp	Pearson 相關	-.240	-.233	-.233	-.245	-.137	1	-.329*	.115
	顯著性(雙尾)	.093	.104	.103	.087	.342		.020	.426
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
shadedrelief	Pearson 相關	.758**	.765**	.791**	.806**	.108	-.329*	1	-.622**
	顯著性(雙尾)	.000	.000	.000	.000	.455	.020		.000
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50
voxel	Pearson 相關	-.304*	-.315*	-.282*	-.323*	.019	.115	-.622**	1
	顯著性(雙尾)	.032	.026	.047	.022	.894	.426	.000	
	個數	50	50	50	50	50	50	50	50

** 在顯著水準為0.01時(雙尾)，相關顯著。

* 在顯著水準為0.05時(雙尾)，相關顯著。

當植生指標越高時，其林分生產力也亦豐富，但是於本研究中各個植生指標對於voxel值卻僅只有達到顯著，表示若是單純以植生指標去推估林分材積時，其相關性不大、解釋能力不足，根據前人研究，衛星感測器所接收的輻射成分包含太陽反射輻射、路徑輻射、天空漫射輻射反射、及鄰近地形散射輻射等(林金樹，1999；鄭祈全等，1998；Schieh, 1992)，本研究主要討論為植生物體的直接太陽反射輻射在於林分材積上的關係進而利用衛星影像推估材積，對於其他部分的效應應該給予去除。

觀察各個植生指標與坡度、坡向和地形陰影時，發現坡度影響波段差、波段比常態性差異植生指標(NDVI)有顯著關係，但是在voxel值則無影響；而坡向僅止於影響地形陰影，代表不同坡向有不同的太陽光照射量，影響地形陰影的產生；最後地形陰影的相關性結果在於波段差、波段比和NDVI有相關顯著，代表著像元週遭事物、地形會影響光譜值反射的表現，如當樣區位於向陽面時，若無較高的地物遮蔽，則太陽光直接反射量大，於光譜值的呈現數據也相當的提升許多；但如果樣區位於背陽面或是週遭有較高的地物所遮蔽太陽光時，則太陽光直接反射量小導致光譜值反射數據也跟著降低。此外，我們單獨以地形陰影與NDVI以乘幕的方式進行簡單直線迴歸分析(圖38)，得到 R^2 為0.6978表示擁有近7成的解釋能力，而兩者之間的關係為正相關，地形陰影確實會影響NDVI值的表現。

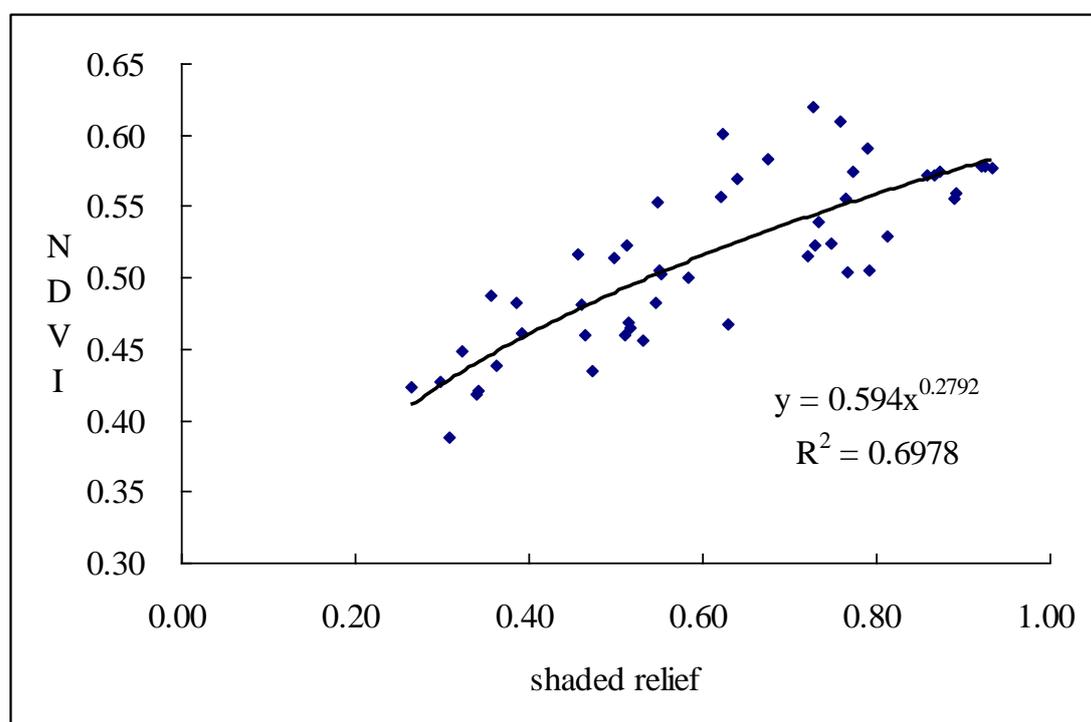


圖38：NDVI與地形陰影的關係圖

(九) 地形陰影修正植生指標(NDVI)

前人研究提到為了消除地形效應對衛星影像的影響，許多學者利用波段比的關係或是迴歸關係式修正法還有超圓方向餘弦轉換法(hyperspherical direction cosine transformation, HSDC)(鄭祈全等，1998；Schieh, 1992；張榮欽，1994)等方法來進行地形效應的去除處理。

本研究利用地形陰影與NDVI的關係，進行對於NDVI的補償與修正。公式如下：

$$C = \sqrt{(X_{SR})^2 + (X_{NDVI})^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$T = [X_{NDVI} \times (1 + (1 - R))] \dots\dots\dots (2)$$

X_{SR} : 某像元的地形陰影

X_{NDVI} : 某像元的常態差異植生指標

C=某像元由地形陰影和NDVI所調整的修正係數

T=某像元的NDVI修正模式

以各個訓練樣區進行像元的轉換補償與修正，將陰影處的光譜值進行補償、過度光照處進行修正，圖39、40為未修正與修正之後的比較， R^2 由0.06提升至0.62代表能有效的改善地形陰影所造成的光譜值的誤差。

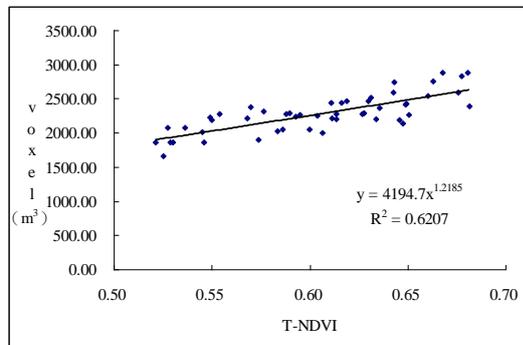
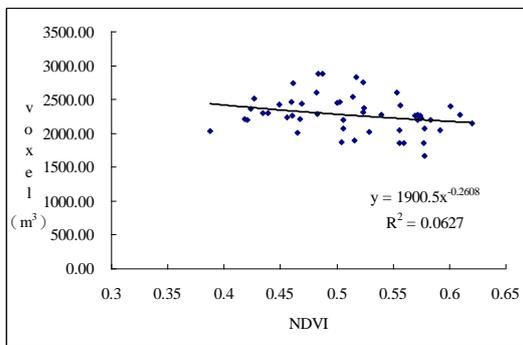


圖39: 修正前NDVI與voxel之關係圖 圖40: 修正後NDVI與voxel之關係圖

利用修正過後的NDVI值與voxel的關係，可以證明說去除掉地形陰影效應影響的植生指標，可以用來代表為林分生產力優劣的評估。當植生指標高時，即有較高的voxel值，亦可以前述的材積與voxel關係表示較高的voxel擁有相對多的材積量，表示較高的NDVI有較多的林分材積量。

(十) 衛星影像計算材積

以上述的方法，利用衛星影像對於阿里山事業區與大埔事業區進行莫

拉克風災材積(非竹材)損失的計算，首先分類出新生崩塌地位置，再由崩塌地位置切割影像，然後以 Erdas Imagine 軟體進行植生指標與材積量的計算。分別計算針葉樹與闊葉樹之平均、最小和最大值方式，對於光達訓練樣區內進行材積的換算，再以所對應的 voxel 進行簡單迴歸分析，得到 6 種 voxel 對應材積的方式(圖 41-46)，於影像光譜反射植生指標內計算擁有 voxel 大小所對應的材積，進行阿里山事業區與大埔事業區因莫拉克颱風所造成的材積損失。

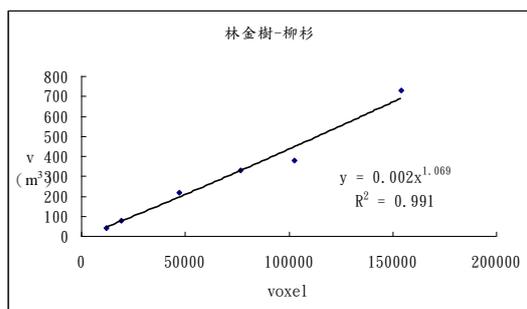


圖41：針葉樹平均材積與NDVI關係圖

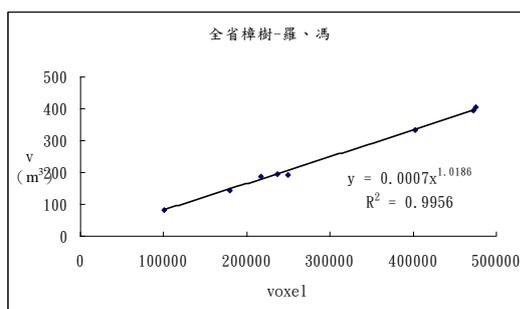


圖42：闊葉樹平均材積與NDVI關係圖

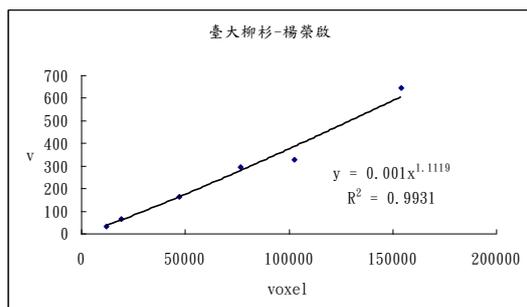


圖43：針葉樹最小材積與NDVI關係圖

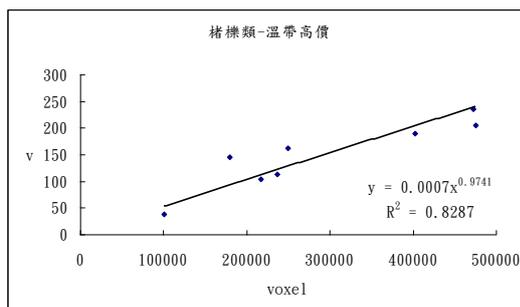


圖44：闊葉樹最小材積與NDVI關係圖

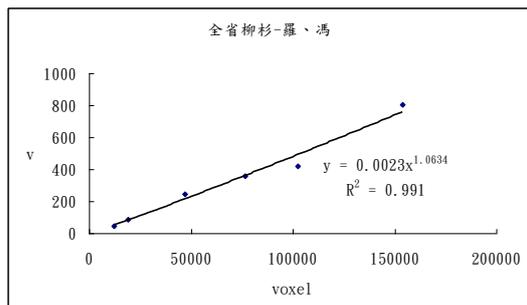


圖45：針葉樹最大材積與NDVI關係圖

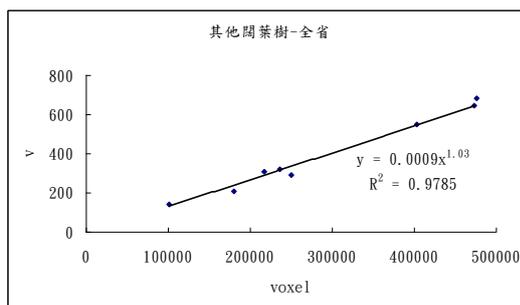


圖46：闊葉樹最大材積與NDVI關係圖

如表15所示，阿里山事業區針葉樹崩塌面積為152.5864 ha，最大針葉樹損失材積量為140,926.25 m³，最小損失材積量為893,38.25 m³，平均材積損失為128,250.75 m³，平均單位損失量最大為923.58 m³/ha，最小為585.49 m³/ha；而闊葉樹崩塌地面積為292.006 ha，最大闊葉樹損失材積量為82,213.75 m³，最小損失材積量為41,486.28m³，平均材積損失為58,549.85 m³，平均單位損失量最大為281.55 m³/ha，最小為142.07 m³/ha，阿里山事

業區最小估測總損失為130,824.53 m³，最大估測總損失為223,140.00 m³，平均估測總損失為186,800.60 m³。

大埔事業區針葉樹崩塌面積為229.8851 ha，最大針葉樹損失材積量為224,834.04 m³，最小損失材積量為142,812.72 m³，平均材積損失為204,210.36 m³，平均單位損失量最大為978.03 m³/ha，最小為621.23 m³/ha；而闊葉樹崩塌地面積為613.8639 ha，最大闊葉樹損失材積量為178,595.64 m³，最小損失材積量為89,974.12 m³，平均材積損失為127,130.98 m³，平均單位損失量最大為290.94 m³/ha，最小為146.57 m³/ha，大埔事業區最小估測總損失為232,786.84 m³，最大估測總損失為403,429.68 m³，平均估測總損失為331,341.34 m³。

兩區最小估測總損失總合約為 363,611.37 m³，最大估測總損失總合約為 626569.68 m³，平均估測總損失總合約為 518,141.94 m³；此外，本研究對於曾文水庫集水區進行材積損失的估算(表 16)，最大針葉樹損失材積量為 188,428.41 m³，最小損失材積量為 119,721.06 m³；最大闊葉樹損失材積量為 142,971.30 m³，最小損失材積量為 71,991.27 m³。

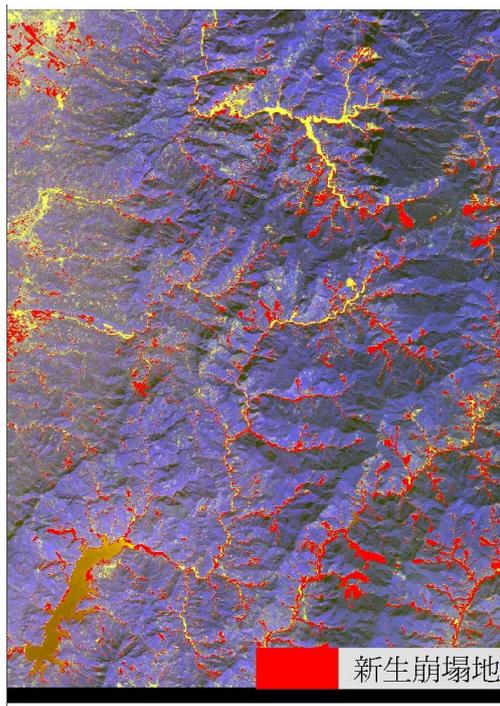


圖47：崩塌地分類

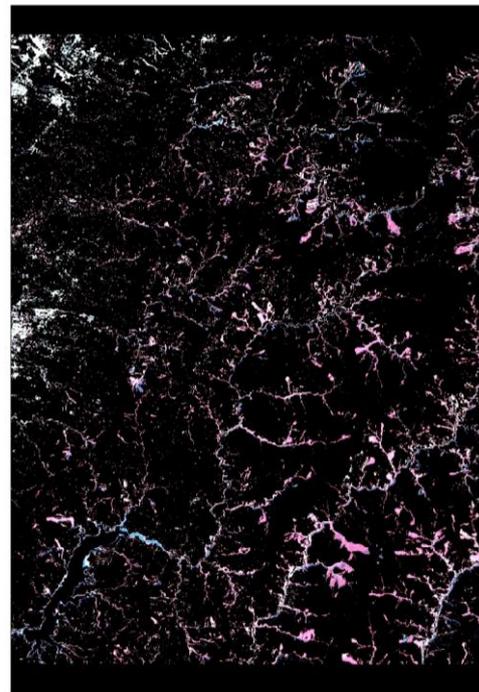


圖48：切割後的衛星影像

表15：阿里山與大埔事業區針葉樹與闊葉樹材積損失量表(非竹材)

組別	阿里山事業區		大埔事業區	
	針葉樹	闊葉樹	針葉樹	闊葉樹
面積(ha)	152.59	292.01	229.89	613.86
最小估測量(m ³)	89,338.25	41,486.28	142812.72	89,974.12
平均估測量(m ³)	128,250.75	58,549.85	204210.36	127,130.98
最大估測量(m ³)	140,926.25	82,213.75	224834.04	178,595.64
單位最小損失(m ³ /ha)	585.49	142.07	621.23	146.57
單位平均損失(m ³ /ha)	840.51	200.51	888.31	207.10
單位最大損失(m ³ /ha)	923.58	281.55	978.03	290.94

表16：阿里山與大埔事業區材積總損失量表(非竹材)

	阿里山事業區	大埔事業區	兩區總損失量
最小估測總量(m ³)	130,824.53	232,786.84	363,611.37
平均估測總量(m ³)	186,800.60	331,341.34	518,141.94
最大估測總量(m ³)	223,140.00	403,429.68	626,569.68

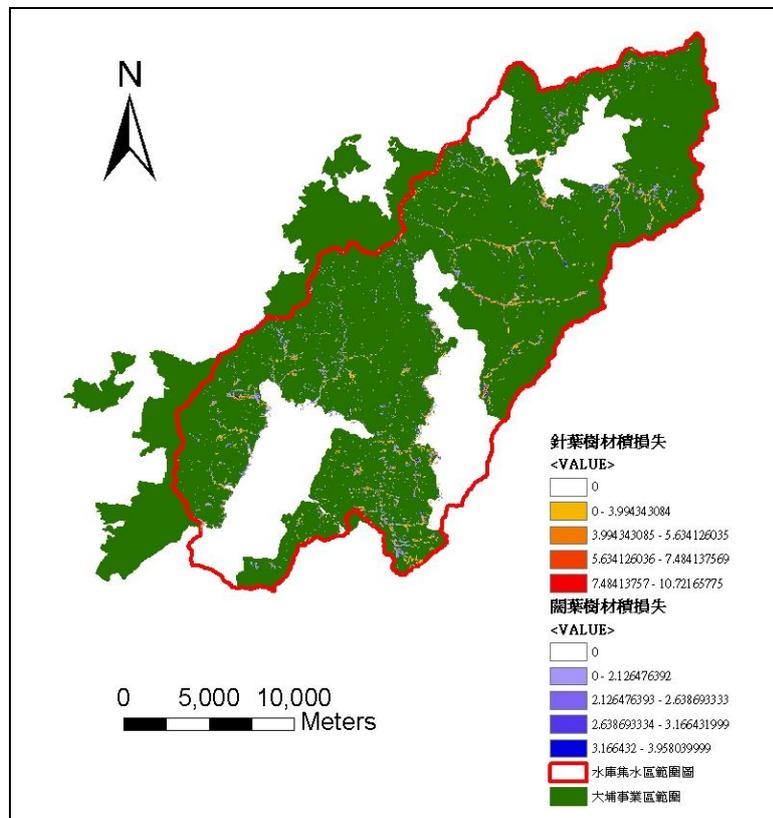


圖49：曾文水庫集水區材積損失表示圖

表17：曾文水庫集水區森林資源損失狀況

單位	針葉樹	闊葉樹
max(m ³)	188428.41	142971.30
mean(m ³)	171172.98	101758.64
min(m ³)	119721.06	71991.27

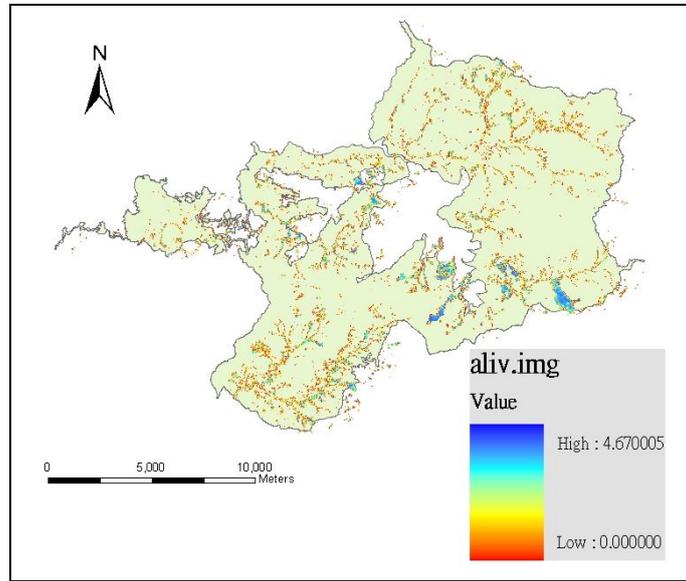


圖50：阿里山事業區材積損失量

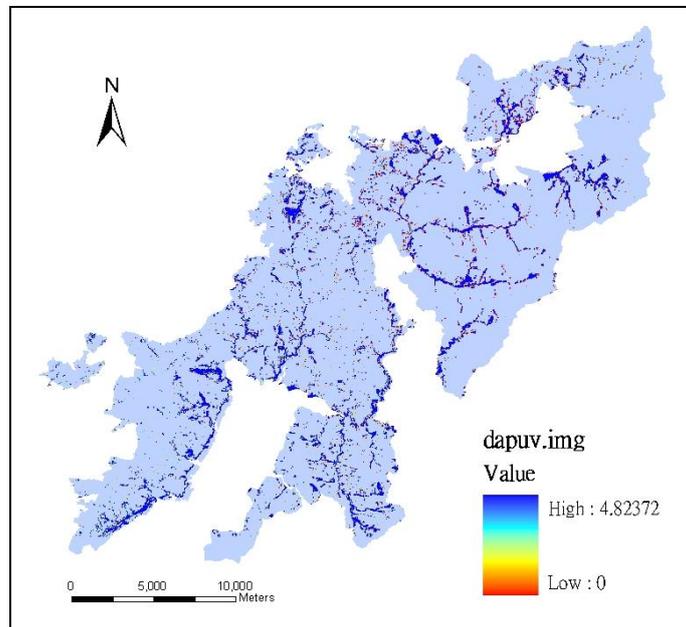


圖51：大埔事業區材積損失量

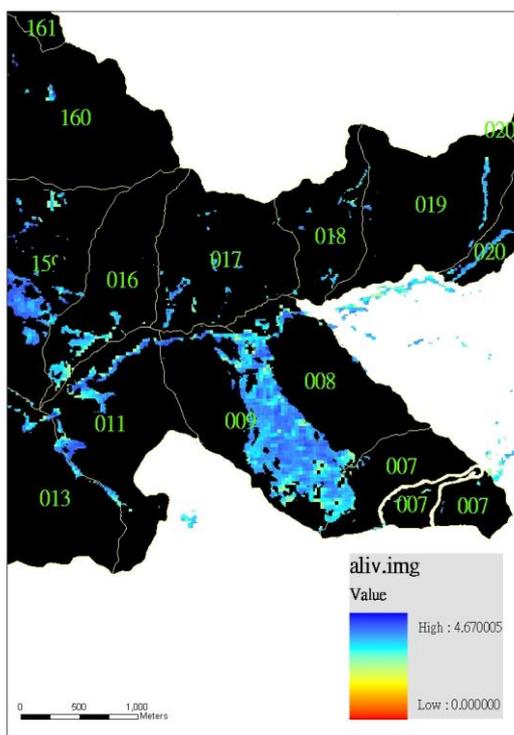


圖52：阿里山事業區8、9號林班地材積損失狀況

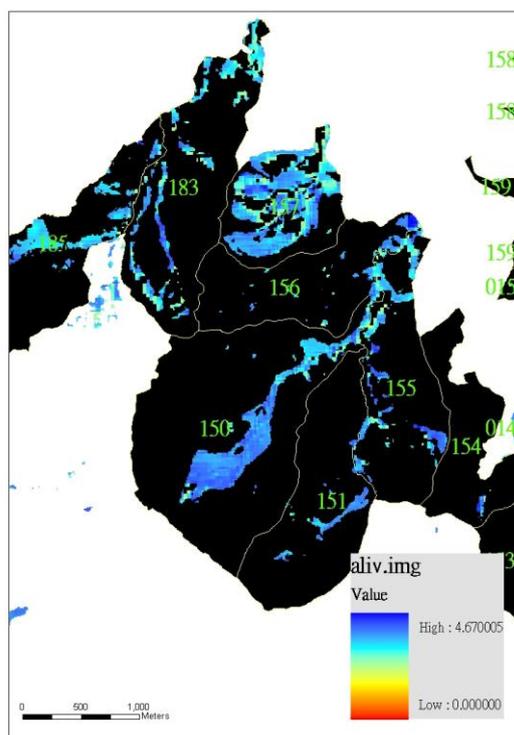


圖53：阿里山事業區150、157號林班地材積損失狀況

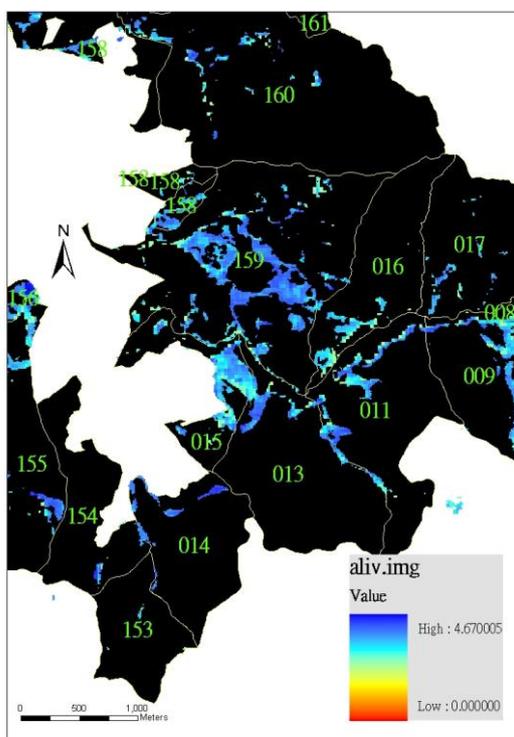


圖54：阿里山事業區15、159號林班地材積損失狀況

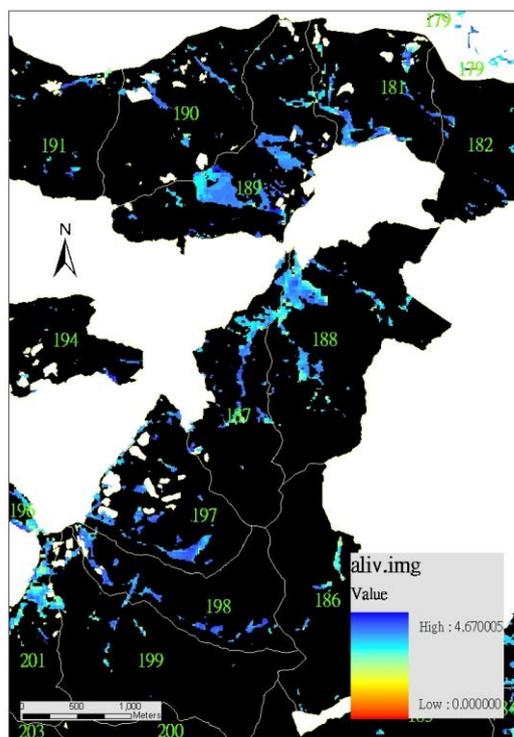


圖55：阿里山事業區188、189號林班地材積損失狀況

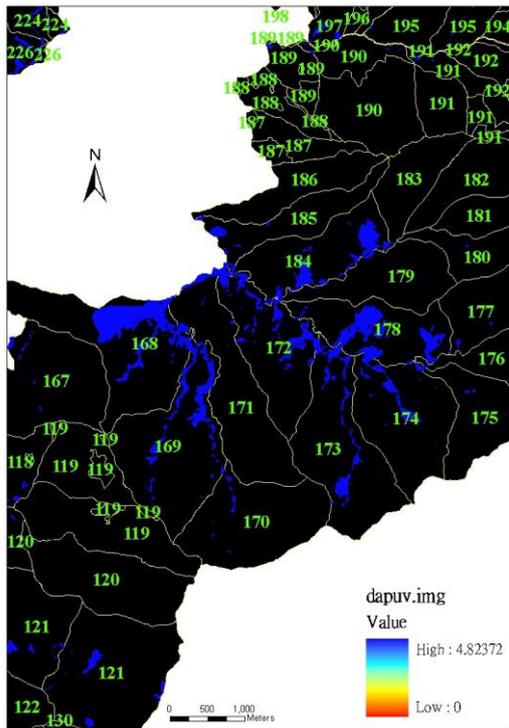


圖56：大埔事業區168、178號林班地材積損失狀況

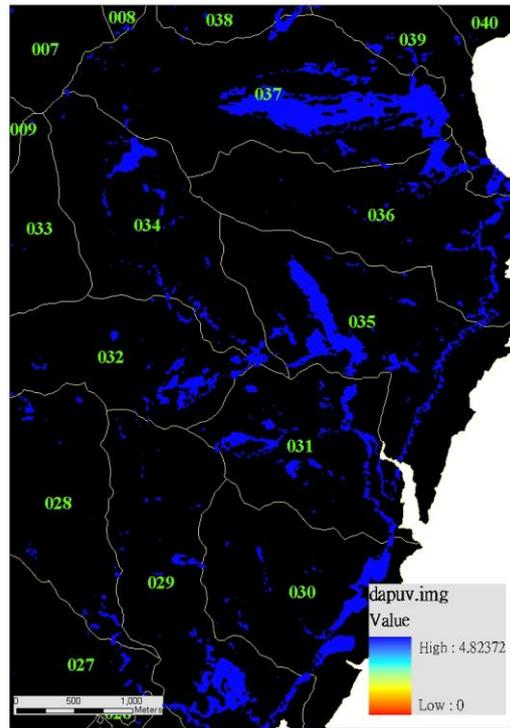


圖57：大埔事業區29、37、35號林班地材積損失狀況

最後計算阿里山與大埔事業區中竹材損失面積，阿里山事業區為386公頃，大埔事業區為832.87公頃，依照林務局土地利用型分類結果，兩個事業區中多以散生之竹類為主。王仁等（2009）曾調查惠蓀林場與石棧地區之孟宗竹林，其結果顯示惠蓀林場中之孟宗竹林分密度為每公頃有 $7,933 \pm 766$ 株，在石棧地區為每公頃 $8,344 \pm 758$ 株。參考王仁等之孟宗竹林分密度調查結果推算阿里山與大埔事業區內竹桿材損失量約介於9,670,327~10,171,336株。

二、土方量損失

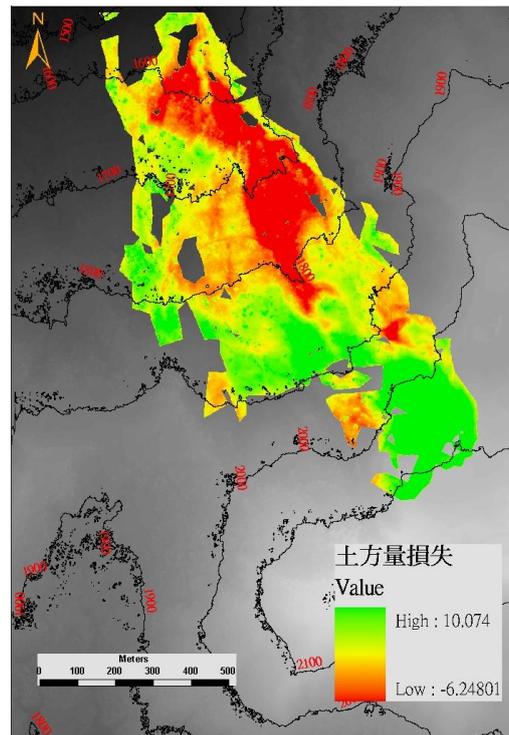


圖58：土方量損失圖

本研究利用災前災後光達資料於二萬坪車站前，以災前DEM減去災後DEM得到土方量損失，以圖58來看當數值越高時，代表土方量損失的越多，單位損失量最多達每pixel有 10.074m^3 ，而數值越接近負值代表該地受上方沖刷土石所掩蓋，以置於造成土方量比原來的還要多。圖中綠色部分為土方量損失嚴重地區，以等高線來觀察，該地位在高地處因莫拉克風災將其土石沖刷至下坡處(圖中紅色區塊)，符合本研究推論結果，證明若利用光達製作DEM影像，可以即時得知災害造成的破壞程度，還有坡度、坡向的改變是否引起另依次的土石崩塌情形，利用土方量變化可以預防下次崩塌的處理。

三、崩塌潛勢估算

(一) 崩塌位置圖

利用衛星影像進行分類，得到兩個事業區內新生崩塌裸地之結果，阿里山事業區為 433.15 公頃，佔全事業區面積之 1.88%，其中在第 9、15、150、157、159、188、189 林班有較大面積之崩塌情況發生；大埔事業區為 1927 公頃，佔該事業區面積的 3.91%，區內多為小面積且分佈零星之崩塌地。

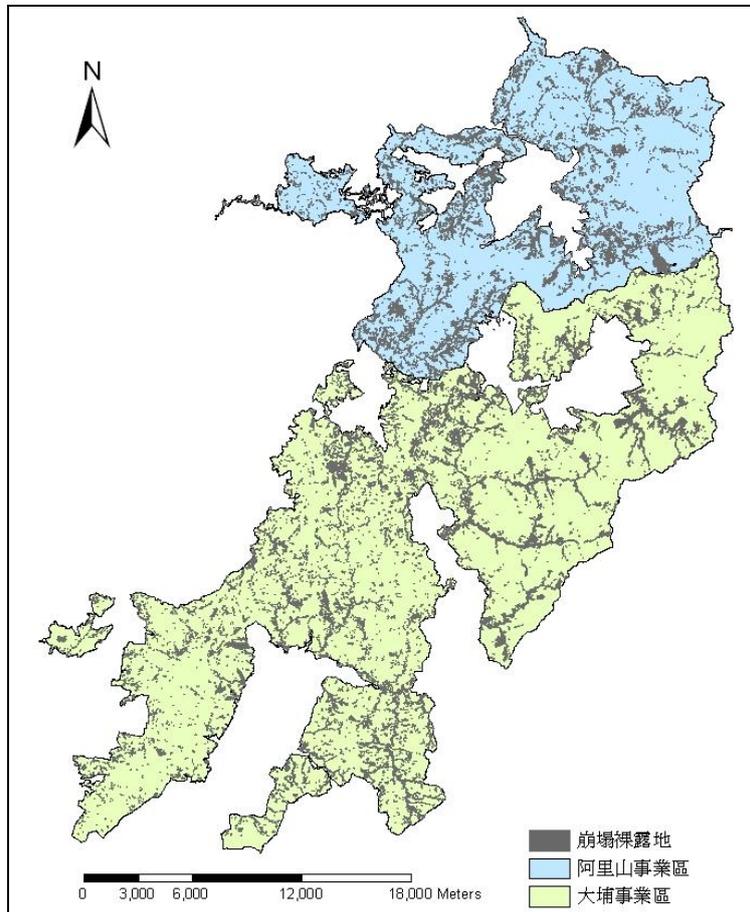


圖 59：阿里山與大埔事業區內崩塌位置圖

在兩個事業區內各地質層之崩塌狀況如圖 60 所示，其中以南莊層與桂竹林層內之崩塌範圍較廣，分別為 1222.77 公頃與 879.24 公頃(表 18)。

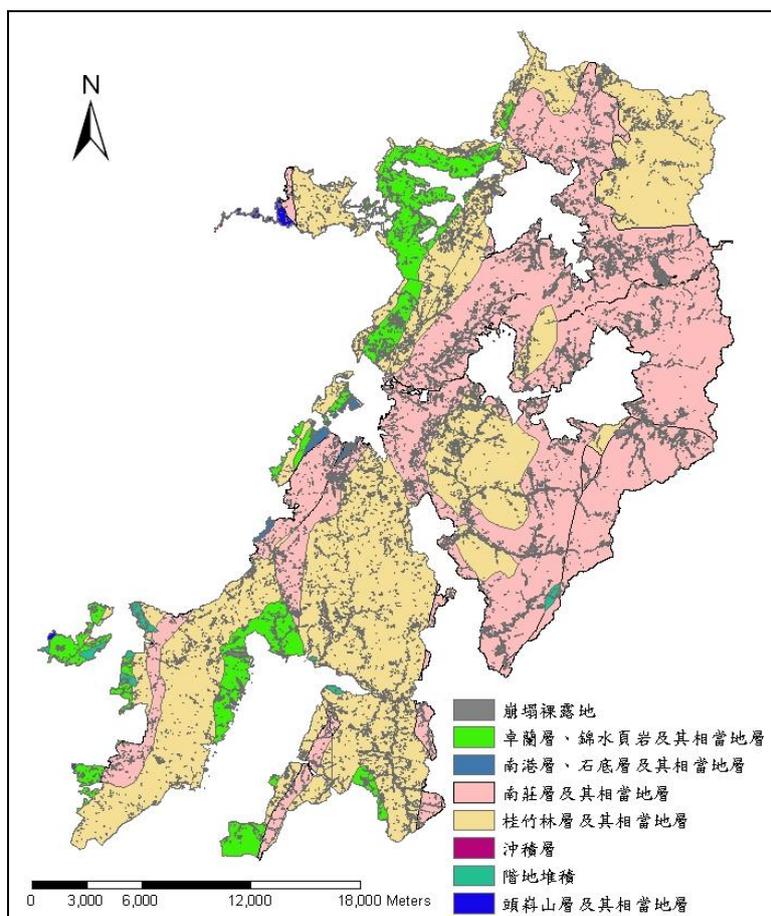


圖 60：阿里山與大埔事業區內地質與崩塌位置關係圖

表 18：事業區內各地質層崩塌面積

地層名稱	全域面積(ha)		崩塌比(%)
	全域面積(ha)	崩塌面積(ha)	
卓蘭層、錦水頁岩及其相當地層	6,124.98	230.75	3.77
	293.88	12.93	
南港層、石底層及其相當地層	31,865.43	1,222.77	3.84
	33,406.67	879.24	
南莊層及其相當地層	7.31	0.02	0.32
	382.01	10.61	
桂竹林層及其相當地層	163.72	3.83	2.34
	382.01	10.61	
沖積層	7.31	0.02	0.32
	382.01	10.61	
階地堆積	163.72	3.83	2.34
	382.01	10.61	
頭嵙山層及其相當地層	7.31	0.02	0.32
	382.01	10.61	

在研究區域中主要的崩塌發生在坡度 16~45 度的坡面，其中以 26~35 度的山坡地發生 953.58 公頃崩塌地（表 19），其次為 36~45 度之丘陵地與 16~45 度之山地。

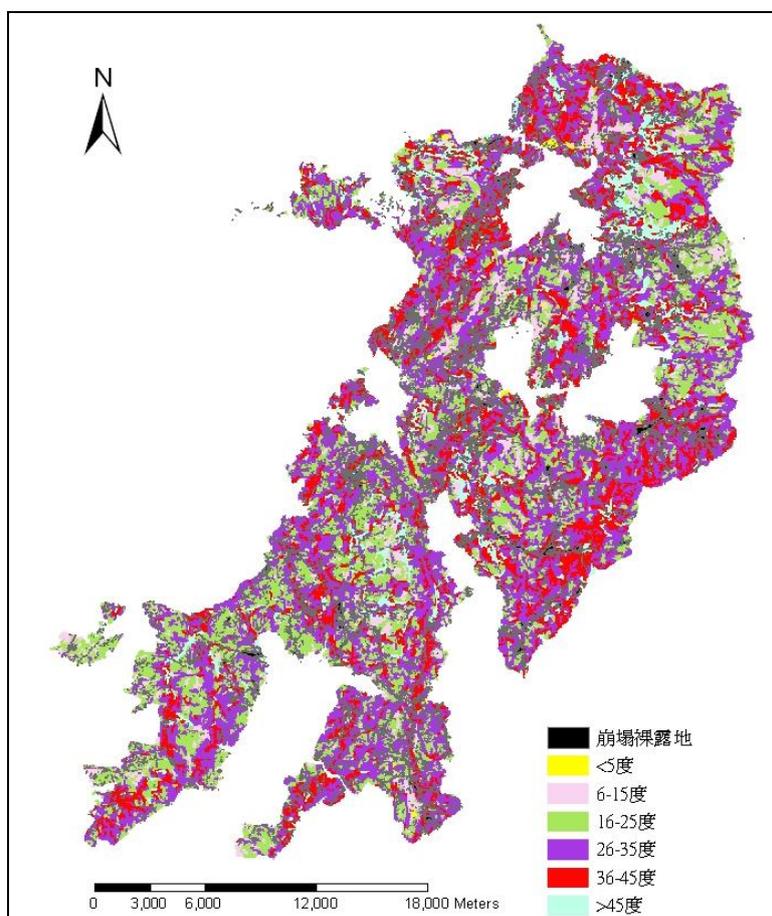


圖 61：阿里山與大埔事業區內坡度與崩塌位置關係圖

表 19：事業區內各坡度級之崩塌面積

坡度	備註	全域面積(ha) 崩塌面積(ha)	崩塌比(%)
<5 度	平坦地	146.21	3.70
		5.41	
6-15 度	小起伏	4,431.13	2.89
		128.26	
16-25 度	丘陵地	18,260.40	2.66
		485.33	
26-35 度	山坡地	28,914.25	3.30
		953.58	
36-45 度	山地	15,558.56	3.82
		597.57	
>45 度	陡峭地	4,933.45	3.91
		192.99	

將溪流兩岸每 30 公尺為一個層級進行環域分析，分析不同距離內崩塌之結果，以距離溪流兩岸 30 公尺之範圍產生的崩塌地最多，有 589.4 公頃，其次為 30~60 公尺區段，離溪流愈遠發生崩塌的情況愈少。

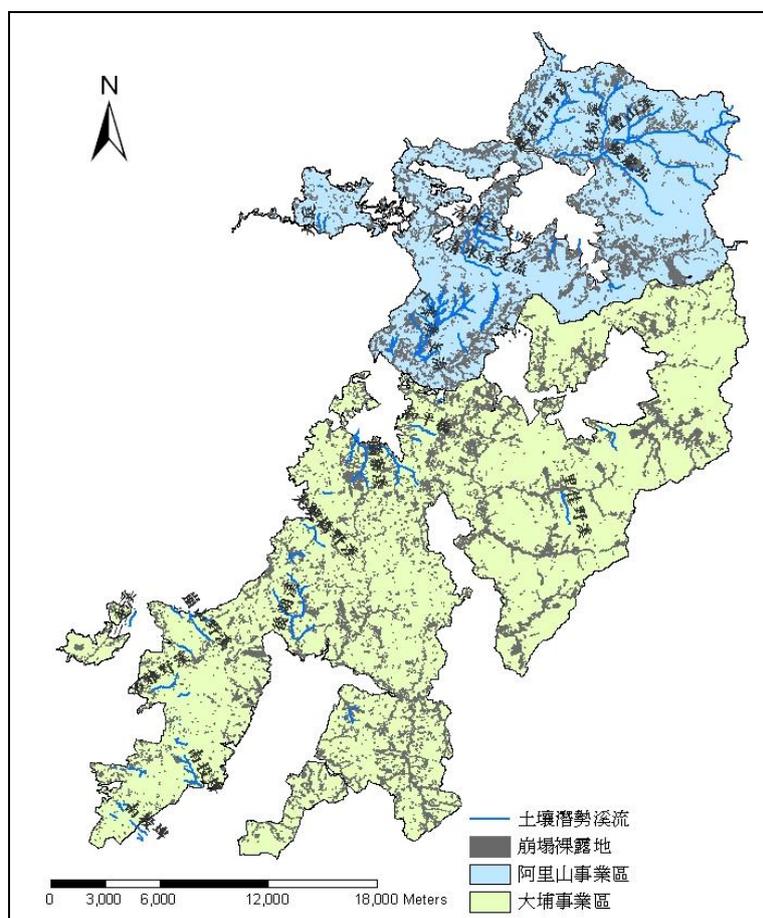


圖 62：阿里山與大埔事業區內溪流與崩塌位置關係圖

表 20：阿里山與大埔事業區內不同溪流距離之崩塌地面積

溪流距離 (公尺)	全域面積(ha)	崩塌比 (%)	溪流距離 (公尺)	全域面積(ha)	崩塌比 (%)
30	7,107.89 589.40	8.29	180	7,250.18 195.32	2.69
60	7,249.86 292.28	4.03	210	7,269.63 187.72	2.58
90	7,273.77 209.24	2.88	240	7,240.23 177.89	2.46
120	7,254.12 198.10	2.73	270	7,191.89 162.19	2.26
150	7,224.04 194.81	2.70	300	7,182.40 153.20	2.13

事業土地利用型中以混交林分佈範圍最廣泛，然新生崩塌地面積亦為所有土地利用型中最高，共 1,072.01 公頃，其次為闊葉樹林與竹林，分別為 568.33 公頃與 309.75 公頃。

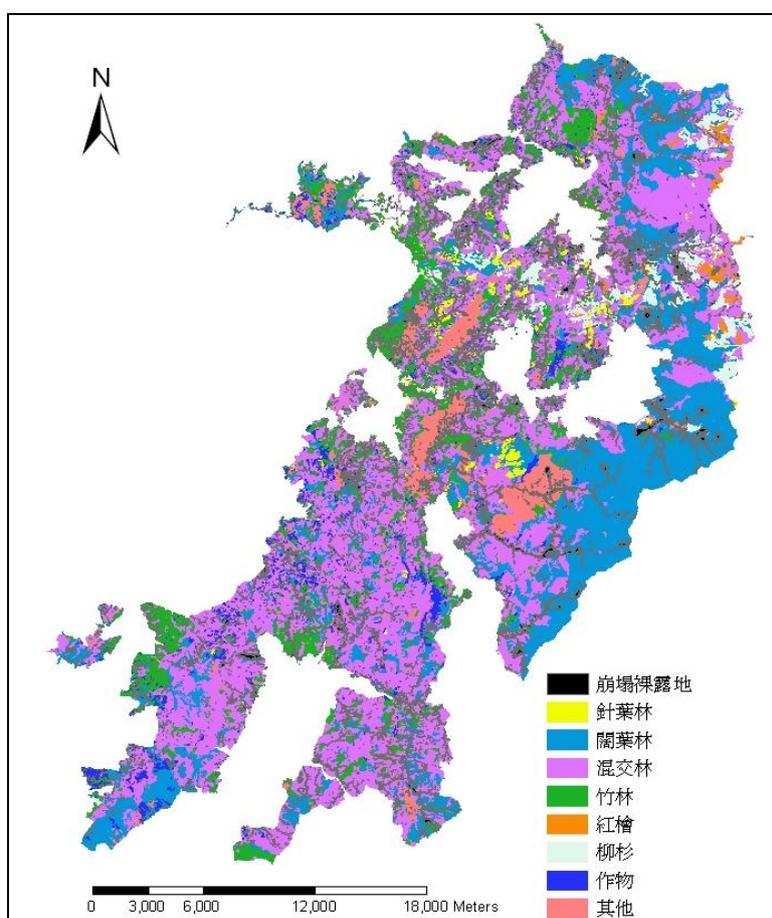


圖 63：阿里山與大埔事業區內土地利用型與崩塌位置關係圖

表 21：阿里山與大埔事業區內各土地利用型崩塌地面積

名稱	全域面積(ha)	崩塌比 崩塌面積(ha)	(%)	名稱	全域面積(ha)	崩塌比 崩塌面積(ha)	(%)
針葉樹林	1,052.63	32.39	3.08	檜木純林	404.46	5.90	1.46
闊葉樹林	17,164.75	568.33	3.31	柳杉純林	2,505.86	77.53	3.09
混合林	33,690.75	1,072.01	3.18	作物	2,995.97	105.31	3.52
竹林	9,563.53	309.75	3.24	其他	4,866.06	188.92	3.88

此次風災帶來強大雨量，事業區當中由 8 月 7 日至 8 日兩日累積雨量介於 750mm 至 1550mm，崩塌情況隨著降雨量而增加，以 1350mm 至 1550mm 區間之降雨地區發生的崩塌狀況最為嚴重，其次為累積雨量 1150mm 至 1350mm 地區。

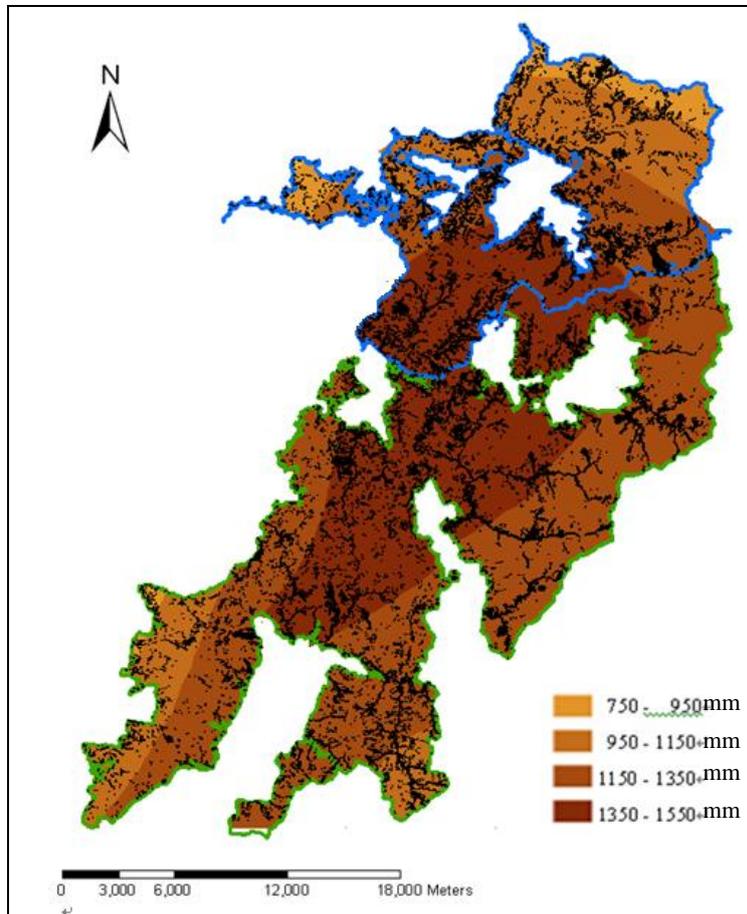


圖 64：阿里山與大埔事業區內雨量分佈與崩塌位置關係圖

(二) 崩塌潛勢圖

本研究將崩塌地、地質、坡度、距溪流距離、土地利用型、雨量等因子套入 IDRISI 遙測分析軟體中，進行阿里山與大埔事業區之崩塌潛勢分析，預測準確度達 54%，發生崩塌之預估迴歸式及阿里山與大埔事業區之崩塌潛勢結果（圖 49）如下。

$$Y = -3.7627 + 0.009242X_1 + 0.000330X_2 - 0.007530X_3 - 0.015901X_4 + 0.00871X_5$$

X_1 為地質、 X_2 為坡度、 X_3 為距溪流距離、 X_4 為土地利用型、 X_5 為雨量

其中崩塌的發生可能與地質、坡度、雨量呈正相關，與距溪流距離、土地利用型為負相關。依崩塌潛勢分析結果趨近於雨量分佈狀況，因此事業區內由於多為南莊層以及桂竹林層等敏感地質，當 2 日累積雨量大於

1350mm，坡度大於 16 度以上，且距離溪流兩岸 30~60 公尺之混交林帶屬於高潛勢的崩塌區域。

在桃芝颱風產生的崩塌地，以地質屬於頭嵙山層及桂竹林層的崩塌面積最多，另外在南投縣國姓鄉的崩塌案例中，主要發生崩塌的地層為頭嵙山層、階地堆積層、桂竹林層等（李錦發等，2002）。而雲林古坑地區發生的崩塌後的研究中也指出，地質年代愈老愈穩定，而在該地區中不宜開發的地質有南莊層、利吉層與頭嵙山層。在本研究中，阿里山與大埔事業區的地質分佈，南莊層與桂竹林層佔了相當高比例的分佈面積，因此與崩塌發生的可能為正相關是合理的，另外雖然頭嵙山層亦屬於容易發生崩塌之地層，但在事業區中所佔範圍較小。

在許多的崩塌案例的研究中均指出，坡度愈陡的地區發生崩塌的可能性愈高。洪如江等人（2000）依據草嶺、九份二山、九九峰以及中橫公路谷關德基段之崩塌案例資料庫分析，認為 90%的破壞發生在坡度大於 45 度以上的地區。廖軒吾等（2000）針對集集發生地震時的崩塌情況研究中則是發現，大部分發生崩塌的區域，其坡度都大於 55 度。此次風災後阿里山與大埔事業區區內發生之崩塌地坡度介於 16~45 度之間。

陳紫娥（2000）研究花蓮溪及秀姑巒溪流流域河谷沖積扇的土砂災害性質，結果發現在日雨量超過年雨量 1/7 或 300 公釐的降雨條件時，土砂災害發生率分別為 94%與 88%；另外，當三日累積雨量達平均日雨量的 24 至 30 倍時，致災機率分別為 62%與 80%。張瑞津等（2001）也認為發生崩塌的誘因除了地震以外，人為因素與降雨規模等對於不同坡地敏感區的地貌變動也很重要，例如陳有蘭溪之局部支流，只要累積降雨量達到 200 公釐以上，就會引發崩塌或者是土石流災情。

地表被覆率影響降雨對於地表直接沖刷的破壞程度，也減少水勢於短時間內滲入土壤造成土石流發生的可能。植物生長情況在影響邊坡發生崩塌與否的可能方面，主要扮演降低雨水沖蝕地表以及穩固邊坡土體的角色，以樹木生長茂密的森林邊坡與植生稀疏的邊坡相比較，前者由於枝葉層茂密且地表具有枯枝落葉層的保護，因此由降雨來到地表的時間就會延長，地表的逕流量增加，滲入土壤的速度就較為緩慢，提供土壤吸收雨水的時間（林季諍，2007）。本研究結果當中主要發生崩塌地區多屬於混交林帶，在觀念上由於混交林根系在土壤中分部之位置較為廣泛，由於不同樹種具有不同深度之根系，因此在於固結土壤之功效上應較為適當，但在兩個事業區當中，此林型多位於溪流兩岸之地區，因此混交林不見得為易發生崩塌之原因，尚須考慮距離河道之位置、坡度等因子之關係決定。

在阿里山與大埔事業區中，溪流兩岸 30~60 公尺距離內發生崩塌之情況較為嚴重，主要是因為長時間對於河道切割造成之結果，加上此次颱風帶來強大的降雨量，更容易造成溪流兩岸坡面之不穩定性，加上雨水是造成坡面土壤鬆動的誘因，因此在溪流兩岸為容易發生崩塌之地區。

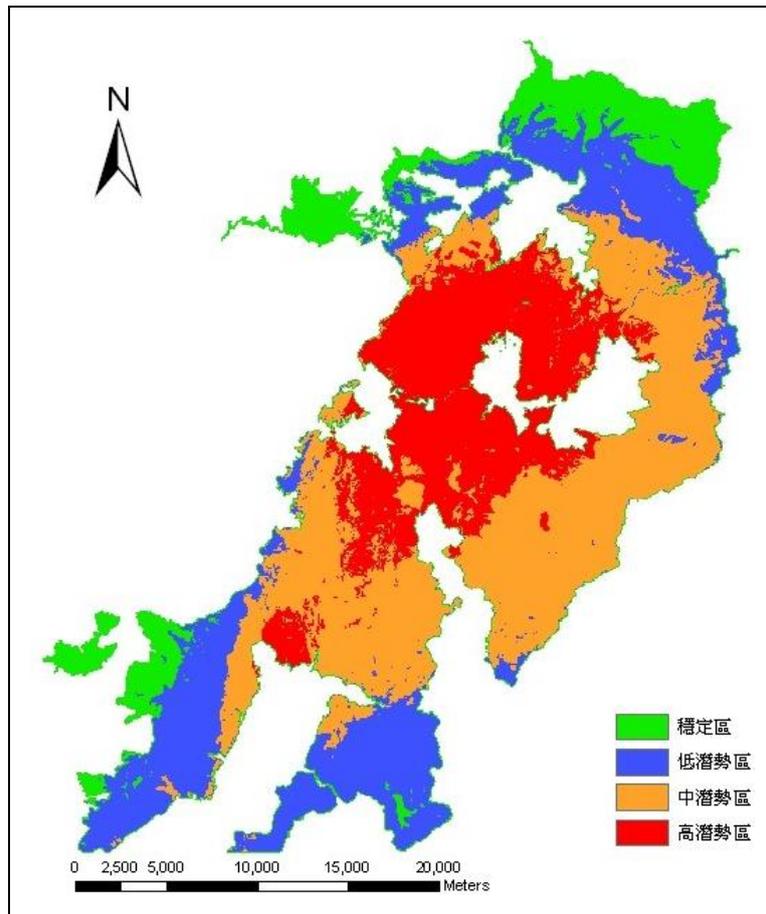


圖 65：阿里山與大埔事業區崩塌潛勢分佈圖

新生崩塌地發生後，坡面之固定為首要之工作，不論發生之原因為地震或是颱風帶來之豪雨所造成，但施工方式以及時間點唯一研究課題。在國姓鄉九份二山地區於 921 地震後進行之坡面整治工程中，在崩塌地發生後 5 年內坡面利用植生進行之固定多以草生植物為主要復育類別，期間階段性植入木本植物，待復育 5 年後始有木本植物成林之跡象（莊智瑋等，2010）。黃士洋（2008）研究石門水庫地區崩塌地復育之優勢樹種研究中推測，九穹、山鹽青之根系對於邊坡之穩定較果大，另外直根系之山芙蓉亦為增加坡面穩定性之適合植物。93 年艾莉颱風過境造成石門水庫集水區內大量之崩塌情況產生，水利署北區水資源局委託中華民國環境綠化協會辦理崩塌地植生工程與應用植物手冊之編製，其中提到崩塌後遺立即進行坡面之穩固工程，但宜以草本植物以條播或灑播方式進行，後期再以木本植物進行坡面之穩固，雖木本植物之根系可穩固土系結構，但因崩塌初期坡面尚未穩固，木本植物生成後本身之重量加上坡面之不穩定性，使得根系成為破壞坡面之因子。

該手冊中提到崩塌地之植生工程首先宜進行坡面之處理與保護，再進行植生之基礎工程，可先以草本植物種子以條播或是灑播方式進行，亦可於其中混入少部分木本植物種子。在坡面處理方面主要再於將崩塌坡面上可能發生崩塌之土壤移至下坡處，並改變坡度低於 35 度，因 35 度以上之坡面種子不易定著，40~50 度以上時入侵困難，而坡度在 35 度以下時，

植物種子容易由周圍自然入侵裸露地。坡面之植生栽植除了以播種方式進行外，亦可利用栽植方式進行，栽植之對象亦包括喬木、灌木、地被以及草花植物，建議植物詳手冊內容，但仍應維持以當地之鄉土植物或是優勢樹種進行選擇。

伍、結論

透過地面調查結果得知，林分密度影響林木胸徑大小，進而影響林分材積估算，以此作為光達推估林分材積之依據。

利用光達資料求得之材積結果，作為衛星影像推估全事業區之依據，並求得阿里山事業區之材積損失量約為 331,341.34m³，大埔事業區約為 518141.94m³。

利用風災前後期之衛星影像分類，可得之新發生之崩塌地位置與範圍，雖然大埔事業區總的崩塌面積較阿里山事業區為多，但多為零星之小面積崩塌，而阿里山事業區內多個林班地中則發生較多大面積之災損。

利用光達資料求得事業區前後期之 DEM 影像，並以此推估二萬坪地區之土方損失量約為 146 萬立方公尺。

透過邏輯斯迴歸法將崩塌區資料與地質、坡度、距溪流距離、土地利用型與雨量等因子推估事業區內發生崩塌之原因，得知區內多屬於容易崩塌之地質，且坡度介於 16 至 45 度之坡面發生較多崩塌，而此次發生崩塌之地區多位於溪流與道路兩旁 60 公尺內之範圍，以混交林發生之損失量為最大，且集中於雨量 1,350 mm 以上之地區。

藉由崩塌潛勢推估結果，給予以下建議：

1. 位於溪流與道路兩旁新生之崩塌區域為再次發生崩塌之敏感地區，宜優先加強坡面之固定與雨水之導流。
2. 急速之降雨為此次崩塌之最大誘因，為避免此次災損產生之新生崩地於未來再次發生崩塌，應於下次雨季來臨之前完成坡面植生之再造。
3. 崩塌地發生初期由於坡面情況尚未穩定，不宜立即大量栽植木本植物成林，宜以草本植物優先進行覆蓋動作，待坡面穩固後再階段性以栽植方式植入木本成林，栽植對象宜以當地鄉土植物或優勢樹種為選擇。

陸、參考文獻

- 丁亞中、陳金河 (2004) 高解析度衛星影像之應用-以陽明山地區為例。中華民國地圖學術會刊 14:133-144。
- 王仁、陳財輝、張華洲、鍾欣芸、李宗宜、劉瓊霏 (2009) 惠蓀林場和石棹孟宗竹林分及地上部生物量合碳儲存量。林業研究季刊。31(4):17-26。
- 王慈憶、陳建璋、陳朝圳 (2006) 以SPOT衛星影像探討淡水河紅樹林自然保留區植生指標之變化。環境與生物資訊期刊 3:229-238。
- 史天元、何心瑜、陳大科 (2007) 空載光達正高化算探討：以高屏地區為例。航測及遙測學刊 12 (1) : 73-82。
- 何心瑜、陳大科、史天元、徐偉城 (2008) 人工編修空載光達資料產製DEM成果之探討。航測及遙測學刊 13 (4) : 231-239。
- 吳守從 (2006) 應用SPOT衛星影像結合植生指標與地景指數評估墾丁國家公園各景點生態環境壓力。觀光研究學報 12 (3) : 207-224。
- 吳佳琪 (2004) 整合遙感探測與地理資訊系統探討墾丁國家公園土地利用變遷。國立屏東科技大學森林系碩士論文 53頁。
- 呂明倫、鍾玉龍 (2007) 以SPOT衛星植生指標推估南仁山次生林之林分結構特徵。台灣林業科學 22 (2) : 183-192。
- 呂明倫、鍾玉龍 (2007) 以光譜混合分析模式推估SPOT衛星影像之森林豐富度。航測及遙測學刊 12 (4) : 479- 488。
- 李錦發、魏正岳、艾克非、邱禎龍、蘇泰維、黃建政 (2002) 台灣山崩調查與危險度評估—91年國姓地區地震山崩調查。經濟部中央地質調查所92年度山崩調查與危險度評估報告。15頁。
- 周富晨 (2004) 適應性點雲過濾演算法於空載光達資料產生數值高程模型之研究。國立成功大學測量及空間資訊學系碩士論文 89 頁。
- 林季諍 (2007) 應用主成分分析法與不安定指數法於河川流域崩塌潛勢影響評估—以陳有蘭溪為例。朝陽科技大學營建工程系碩士論文。85 頁。
- 林金樹 (1994) 光譜指標在環境變遷檢測上功效之研究。航空測量及遙感探測學刊 26: 43-75。
- 林金樹 (1999) 森林植生季節性光譜特性之研究。台灣林業科學 14 (3) : 289-305。
- 林金樹 (2004) GIS 概論與 MajorGIS 快速入門。新文京開發出版股份有限公司 474 頁。

- 林金樹、管立豪 (2002) 利用航測與地理資訊系統技術調查阿里山針闊葉林自然保護區地形與林型分佈之研究。航空及遙測學刊 7 (1) : 32-52。
- 林金樹、劉懿聰 (2003) TIN 三角形截面高程變異容許量對利用等高線重建高精度 DTM 資料的影響之研究。嘉義大學學報 75 : 199-222。
- 林務局 (1995) 第三次台灣森林資源及土地利用調查。林務局 258 頁。
- 邵怡誠、陳良健 (2005) 利用光達資料於 DEM 生產及房屋偵測之研究。航測及遙測學刊 10 (1) : 47-58。
- 洪如江 (2000), 「國內外重大坡地災難之探討分析」, 第二屆 (2000) 全國治山防災研討會論文集, 第 1-10 頁。
- 洪如江、林美聆、陳天健、王國隆 (2000) 921 集集大地震相關的坡地災害、坡地破壞特性、與案例分析。土工技術。81 : 17-32。
- 康若蘭、林登秋、詹進發、黃正良 (2005) 2000 年碧利斯颱風干擾前後福山試驗林 NDVI 變動。台灣林業科學 20 (1) : 73-87。
- 張子瑩 (2002) 降雨與地震對形成崩塌區域之比較研究—以陳有蘭溪為例。國立台灣大學地理環境資源研究所碩士論文。58 頁。
- 張智安、陳良健 (2003) EROS A 衛星影像幾何改正之研究。航測及遙測學刊 8 (3) : 73-94。
- 許立達、陳桂嘉、張愷玲 (2007) 遙測影像林、綠地判釋與鄉鎮發展統計資料相關性之分析。華岡農科學報 20 : 31- 40。
- 許煜煌 (2002) 以不安定指數法進行地震引致坡地破壞模式分析。國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。153 頁。
- 陳建璋、吳守從、陳建文、陳朝圳 (2009) 利用 SPOT 衛星影像探討阿里山事業區林型光譜特徵。環境與生物資訊期刊 6 : 124-133。
- 陳蕙華 (2005) 遙測衛星影像於南清公路崩塌地潛感分析之應用。逢甲大學環境資訊科技研究所碩士論文。63 頁。
- 陳繼藩 (2009) 遙測衛星影像於環境監測之應用。國研科技 23 : 45-52。
- 莊智瑋、林昭遠、錢滄海 (2010) 以馬可夫鏈模式推估九份二山崩塌地植生復育之研究。水土保持學報。42(3) : 329-344。
- 彭炳勳 (2007) 應用空載光達推測林木樹高與葉面積指數。國立屏東科技大學森林系研究所碩士論文 83 頁
- 彭炳勳、陳朝圳 (2008) 應用空載光達資料推測林木樹高與葉面積指數。航測及遙測學刊 13 (2) : 85-100。
- 焦國模、林金樹 (1989) 空載多譜掃描資訊對柳杉生物量測估之研究。台

- 灣大學農學院研究報告 29 (1) : 54-72。
- 黃凱易 (2006) 應用地球空間資訊技術於土石流災害與坡地農墾關係及崩塌地植生恢復之評估。中華水土保持學報 37 (3) : 305-315。
- 楊明德、蘇東青、楊擘芬 (2005) 草嶺地區土石流潛勢調查與評估。中華水土保持學報 36 (3) : 301- 312。
- 詹進發 (2005) 空載雷射掃描資料於推估樹冠高度之應用。航測及遙測學刊 10 (1) : 1-14。
- 詹進發 (2005) 應用空載雷射掃描資料與航空照片獲取林分高度之比較。台灣森林科學期刊 20 (1) : 13-27。
- 詹瑜璋 (2005) 見樹又見地-雷射測距掃描。科學發展 390: 24-29。
- 廖軒吾 (2000) 集集地震誘發之山崩。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。90 頁。
- 趙鍵哲、彭念豪 (2005) 以光達資料之控制直線求解單張像片外方位參數之模式探討與可行性評估。航測及遙測學刊 10 (1) : 89-102。
- 劉守恆、林慶偉 (2004) SPOT衛星影像之崩塌地自動分類研究。航測及遙測學刊 9 (2) : 9-22。
- 劉棠瑞、蘇鴻傑 (1983) 森林植物生態學。台灣商務印書館 台北市 490 頁。
- 潘國樑 (2006) 遙測學大綱。科技圖書有限公司 台北市。292頁。
- 蔡正一 (2006) 應用福衛 2 號多譜影像辨識林區土地利用型之研究。國立嘉義大學森林暨自然資源學系碩士論文 93 頁。
- 衛強 (2006) 以多期遙測衛星影像監測臺大實驗林溪頭營林區三處崩塌地災害。臺大實驗林研究報告 20 (1) : 1-14。
- 鄭祈全、許立達、陳燕章 (1998) 整合地理資訊系統與遙測技術於林分材積估測之研究。台灣林業科學 13 (2) : 155-167。
- 鄭傑中、趙鍵哲 (2007) 以光達點雲資料重建屋頂面模型之實用策略。第二十七屆測量及空間資訊研討會論文集 429-438。
- 謝漢欽 (1996) 應用 SPOT 衛星影像與地理資訊於林地土地利用型綠度分析。台灣林業科學 11 (1) : 77-86。
- 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。
- 謝漢欽、鄭祈全 (1995) 福山地區 SPOT 多期影像植生綠度分析。林業試驗所研究報告季刊 10 (1) : 105-120。

- 鍾玉龍、呂明倫 (2006) SPOT衛星影像於墾丁國家公園銀合歡入侵分布之繪製。台灣林業科學 21 (2) : 167-177。
- 鍾玉龍、陳朝圳、奚珍妮、劉士銘 (2006) MODIS影像應用於台灣乾旱監測指標之建立。航測及遙測學刊 11 (1) : 39-58。
- 魏浚紘 (2007) 應用空載光達推估阿里山地區柳杉人工林林分材積。國立屏東科技大學森林系研究所碩士論文 76頁。
- 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。
- Arai, K. (2001) Early results from the vicarious calibration of TERRA/ASTER/SWIR. *Advanced Space of Remote Sensing* 28: 77-82.
- Axelsson P. (1999) Processing of laser scanner data Algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 138-147.
- Axelsson, P. (2000) DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens* 33: 540-547.
- Birky, A. K. (2001) NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics. *Ecological Modelling* 143: 43-58.
- Bonnor G. M. (1964) A tree volume table for red pine by crown width and height. *The Forestry Chronicle* 40 (3) : 339-346.
- Brown, S. L., P. Schroeder and J. S. Kern (1999) Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. *Forest Ecology and Management* 123: 81-91.
- DeFries, R., M. Hansen and J. Townshend (1995) Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. *Remote Sensing of Environment* 54: 209-222.
- Dolanský T. (2007) Identifying structural characteristics of tree species from LIDAR data. University of J.E.Purkyne, Faculty of the Environment, Department of Informatics and Geoinformatics 5pp.
- Jensen, J. R. (2005) *Introductory digital image processing*. 3rd ed. Pearson Prentice Hall, United States of America 526pp.
- Juan, C. J. M., A. S. José, G. Alan, S. Donald and T. G. William (2006) Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment* 103: 474-487.
- Kato, S. and Y. Yamaguchi (2007) Estimation of storage heat flux in an urban area

- using ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 110: 1-17.
- Keefer, D. K. (1984) Landslides caused by earthquakes, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95:406-421.
- Magnussen, S., P. Eggermont, and V. N. LaRiccia (1999) Recovering tree heights from airborne laser scanner data. *Forest Science* 45: 407-422.
- Muukkonen, P. and J. Heiskanen (2007) Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: a possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment* 107: 617-624.
- Næsset, E. (1997) Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61 (2) : 246-253.
- Næsset, E. (2002) Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80: 88-99.
- Nelson, R. (1997) Modeling forest canopy heights: the effects of canopy shape. *Remote Sensing of Environment* 67: 298-308.
- Popescu, S. C., R. H. Wynne, and R. F. Nelson (2002) Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture* 37: 71-95.
- Raber, G. T., Jensen, J. R., Schill, S. R., and K. Schuckman (2002) Creation of digital terrain models using an adaptive lidar vegetation point removal process. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: 1307-1315.
- Sithole, G. (2001) Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing* 3 (4) : 203-210.
- Vosselman, G. (2000) Slope based filtering of laser altimetry data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing* 33: 958-964.
- Wang, Q. and J. D. Tenhunen (2004) Vegetation mapping with multitemporal NDVI in North Eastern China Transect. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 6: 17-31.
- Xiaol, C. W. and R. Ceulemans (2004) Allometric relationships for below and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management* 203: 177-186.

