

# 運用多波段及多時期衛星影像評估 石門水庫集水區植生復育演變

陳俊愷\* 林伯勳\*\* 冀樹勇\*\*\*

## 摘要

本文旨在運用多波段 ( Multispectral ) 及多時期衛星影像，據以評估經水保局 6 年整治後石門水庫集水區植生復育演變，由大尺度至小尺度空間，以多層次方式評估境內艾利颱風引致崩場地經治理後植生復育成效及環境綠化狀態，用以瞭解經治理後集水區植生覆蓋率改變，更細部觀察重大崩場地植生復育速率，量化說明保育治理投入後對於周遭環境實質效應；經分析顯示透過人為加速植生方式，除降低崩塌發生潛勢，並確實改善石門水庫集水區植生復育狀況，逐漸恢復至艾利颱風災前之植生樣貌。

關鍵字：多波段影像、石門水庫、崩塌潛勢、植生復育

## 一、前言

民國 93 年艾利颱風 4 日內平均降下 973mm 超大雨量 ( 水庫年平均雨量約為 2,467mm )，巨量泥砂沖入水庫之結果，造成石門水庫土砂淤積量新增 2,788 萬立方公尺，導致原水濁度瞬間飆升，遂影響民生供水問題。為解決桃園地區缺水問題和確保石門水庫營運功能、上游集水區水域環境之保育、穩定水庫供水能力及保障民眾用水權益，立法院業於民國 95 年 1 月 13 日三讀通過「石門水庫及其集水區整治特別條例」，計畫執行期間為民國 95 年至 100 年，共計 6 年。依據「石門水庫及其集水區整治特別條例」第一條，計畫主要目的為確保石門水庫營運功能、上游集水區水域環境之保育及有效提升其供水能力，保障民眾用水權益，集水區整治計畫治理成效分析架構如圖 1 ( 水保局，2011 )。考量治理權責及

工作範圍，水保局以辦理「保育集水區水域環境」為主要功能目標，而最終目標則為達成原水濁度降低，以及水庫延壽等。另有關「石門水庫及其集水區整治計畫」執行時程及實施階段，共分成 2 階段進行，第 1 階段 ( 民國 95 年至 98 年 ) 執行工程以崩塌裸露地治理及設置防砂設施為主，目的為防治 1,050 萬 m<sup>3</sup> 土砂量，提升整體集水區整治率達 54%；第 2 階段 ( 民國 98 年至 100 年 ) 執行以植生復育為主，預期防治 828 萬 m<sup>3</sup> 土砂量，提升集水區整治率達 62%。

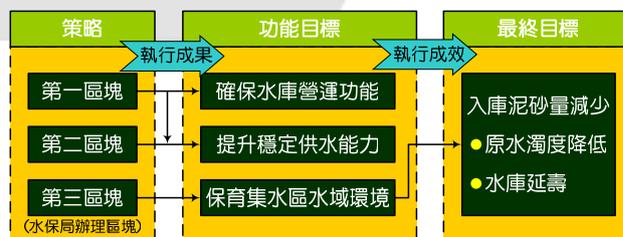


圖 1 石門水庫整治計畫執行架構圖

\* 中興工程顧問社防災科技研究中心副研究員  
\*\* 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長  
\*\*\* 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心經理



施之施作不良，亦是造成崩塌的原因。國家災害防救科技中心（2004）曾針對集水區與土地利用關係進行研究，以釐清各種土地利用與集水區內崩塌地的相關性。以民國 87 年與 93 年艾利颱風災前、及災後崩塌圖進行套疊分析，藉此瞭解 6 年之間各土地分區崩塌面積變化。研究指出這 6 年間崩塌面積皆有增加，且由面積比例分布可明顯發現，原住民保留地內崩塌面積佔各期崩塌總量之比例，與國有林地之比例相近，如圖 4。此現象顯示石門水庫內道路使用與人類活動等擾動，對於集水區內崩塌具一定程度影響。林務局（2006）依據取 17 塊主要崩塌地，於民國 65、75、81、87 及 94 年間監測其崩塌復育情況；經統計結果發現崩塌地年平均復育率與崩塌面積規模、海拔、林相密切關聯，如表 1 所示，故如何面對大區域範圍有效劃分治理分工，以加速植生復育，儼然成為影響治理成效優劣關鍵之一。

表 1 崩塌地自然復育率統計表  
(整理自林務局, 2006)

分類	面積	年平均復育率範圍(%)	
		年平均復育率範圍(%)	年平均復育率(%)
面積	小	270m <sup>2</sup> ~17,000m <sup>2</sup>	10.24~16.67
	中	17,000m <sup>2</sup> ~34,000m <sup>2</sup>	2.91~8.48
	大	34,000m <sup>2</sup> ~518,514m <sup>2</sup>	5.52~11.71
海拔	低	900m~1,700m	2.91~16.67
	中	1,700m~2,400m	10.30~16.67
	高	2,400m~3,200m	12.93~16.67
林相	天然針葉林		10.30~16.67
	天然闊葉林		2.91~11.90
	天然針闊混合林		4.18~16.67

(三) 治理分工

為解決前述所面臨的問題，針對石門水庫集水區保育治理實施計畫，經濟部明訂各水庫管理機關辦理推動集水區治理工作時，有關主管機關應依業務權責及專長分工治理及監督，並依據「水庫集水區治理權責分工暨有關事項處理原則」劃分各權屬機關整治界點（如圖 5），經由擬定石門水庫集水區河川治理界點，再按治理、管理以及道路系統維護管理等權責，劃定集水區治理範圍，如圖 5 所示；由圖可知，石門水庫集水區治理單位權責由下游至上游之責任分屬水利署、水土保持局、林務局、公路局、原民會以及鄉鎮市政府等單位，歷經 6 年各方積極整治並提出多目標之保育治理方案，以協力完成並確保減少砂源入庫量，以使防汛期間能不間斷供水，延續水庫永續利用。

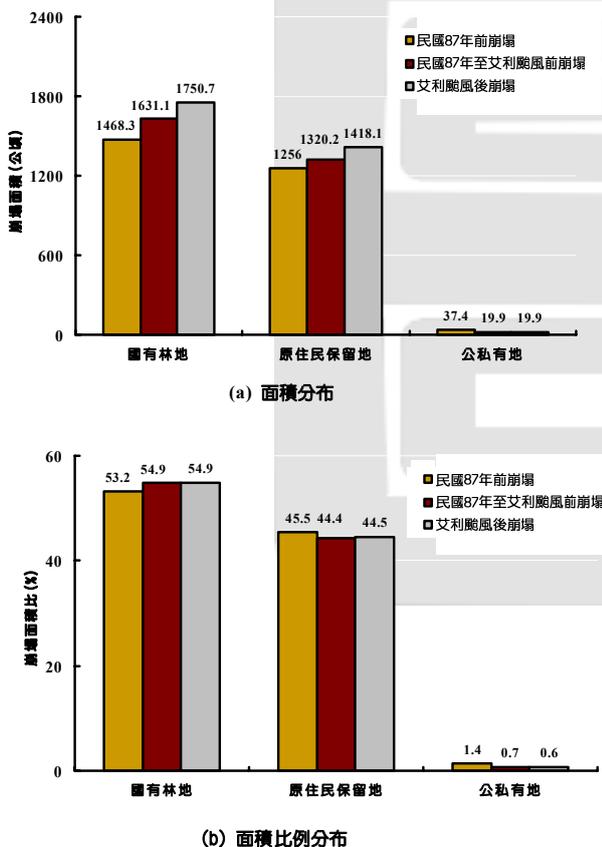


圖 4 艾利颱風發生前後集水區內依土地分區與各年度崩塌面積關係 (重繪自國家災害防救科技中心, 2004)

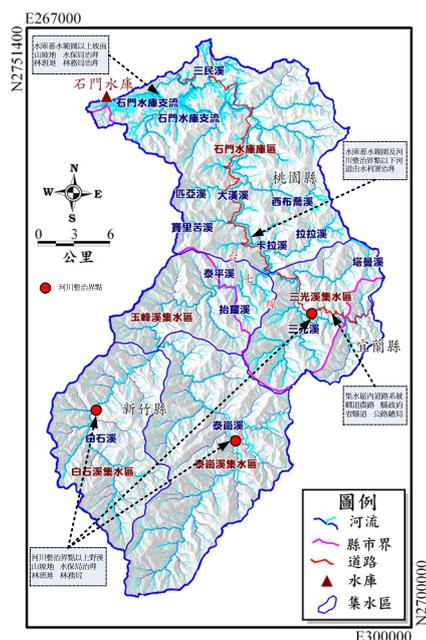


圖 5 石門水庫集水區治理分工圖 (摘自水保局, 2011)

綜整上述，為進一步探究石門水庫集水區於治理工程進駐後植生復育成效及環境綠化狀態。本文蒐整水庫集水區範圍歷史重大災害衛星影像，並以水保局治理區塊為分析範圍，探討治理時間前後受不同空間尺度之植生演變，據以量化說明治理成效；詳細資料蒐集來源、評估流程及檢核方法，以及評估結果，分述於以下各節。

### 三、歷年重大災害事件衛星影像蒐集

為有效掌握石門水庫集水區歷年崩塌歷程之變化，故蒐集民國 85 年賀伯颱風至 100 年南瑪都颱風共 30 期歷史災害事件衛星影像，如表 2 所示，其影像選用原則以雲量較少及解像力較高之衛星影像為優先。目前國內常用各式衛星發射過程及其所能拍攝影像解析度，簡述如下：

1. SPOT5 衛星 (SP5) 為法國於 2002 年 5 月 4 日發射升空，全色影像 (PAN) 與彩色多波段影像 (綠光/紅光/近紅外光) 解析度分別為 2.5m 與 5 m。
2. 福衛二號 (FS2) 為我國於民國 93 年 5 月 21 日發射升空。全色影像 (PAN) 與彩色多波段影像 (藍光段、綠光段、紅光段及近紅外光段) 解析度分別為 2m 與 8m。

表 2 本文蒐集衛星影像列表

項次	災害事件 (災害期間)	相關事件與拍攝日期	載具種類	空間解析度
1	艾利颱風 (2004/08/23~08/26)	艾利颱風前拍攝(2004/02/10)	SP5	2.5m
		艾利颱風後拍攝(2004/11/02)	SP5	2.5m
2	莫拉克颱風 (2009/08/05~08/10)	莫拉克颱風前拍攝(2009/05/08)	SP5	2.5m
		莫拉克颱風後拍攝(2009/08/20)	SP5	2.5m
3	芭瑪颱風 (2009/10/03~10/06)	芭瑪颱風前拍攝(2009/08/20)	SP5	2.5m
		芭瑪颱風後拍攝(2009/10/21)	SP5	2.5m
4	凡那比颱風 (2010/09/17~09/20)	凡那比颱風前拍攝(2010/04/01)	SP5	2.5m
		凡那比颱風後拍攝(2010/09/22)	FS2	2m
5	梅姬颱風 (2010/10/21~10/23)	梅姬颱風後拍攝(2010/11/01)	FS2	2m
6	米雷颱風 (2011/06/23~06/25)	米雷颱風前拍攝(2010/04/19)	FS2	2m
		米雷颱風前拍攝(2010/04/20)	FS2	2m
		米雷颱風後拍攝(2011/07/08)	FS2	2m
		米雷颱風後拍攝(2011/07/28)	FS2	2m
7	南瑪都颱風 (2011/08/27~08/31)	南瑪都颱風後拍攝(2011/09/04)	FS2	2m
		南瑪都颱風後拍攝(2011/09/17)	FS2	2m
		南瑪都颱風後拍攝(2011/09/26)	FS2	2m

註：衛星影像編號摘自中央大學太空及遙測中心網站公布資訊 (<http://www.csr.ncu.edu.tw>)

## 四、植生復育評估

### (一) 方法回顧

透過蒐集及建置各期颱風豪雨事件前後之衛星影像進行植生覆蓋率評估，以掌握與探討石門水庫集水區裸露地復育狀況，供以評估集水區保育治理成效；故此，蒐集及購置各期颱風豪雨事件前後之多波段衛星影像進行植生復育評估，藉由植生覆蓋率分析，瞭解整體植生復育覆蓋變化。

植生覆蓋率為水土保持技術規範中，作為評估地表植生綠化程度指標；其值越高，顯示該區環境較為穩定，且植生復育情形佳，能提供的水土保持效益亦最高。本文根據蒐集歷年與本年度購置之衛星影像，採常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，進行地表植生覆蓋分析，並配合植生覆蓋率之計算，藉此評估集水區植生復育情形。因植物有吸收藍光、紅光及強烈反射近紅外光的特性 (Townshend *et al.*, 1986)，故應用多波段態資訊於植物資源之探測。判別植生反射量之多寡，多使用可見光與近紅外光之比值或差值，即所謂的植生指標，NDVI 為目前評估植生覆蓋情形中常用方法之一，適用於監測植生變化。隨技術成熟已廣泛應用於植生覆蓋分類與辨識。SPOT 與福衛二號的多波段感測器皆具有紅光與近紅外光波段，可供植生指標推估，根據萃取所得 NDVI 資訊，進行地表植生覆蓋率計算，評估上游集水區治理後植生復育情況。NDVI 計算式如下式 1，式中 NIR 為近紅外光反射值，R 為紅外光反射值。

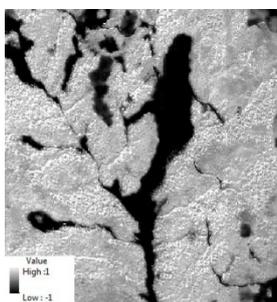
$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

NDVI 之值介於 -1 至 +1 之間，因綠色植物生長愈旺盛，其吸收之紅光愈多，紅外光反射亦愈強，期間之差距也愈大。小於 0 的像元值，通常屬於非植生之雲層、水域、道路及建築物等像元，故指標值愈大時，代表綠色生物量愈增加。圖 6 為衛星影像及利用 NDVI 植生覆蓋分類成果

圖；上圖為福衛二號衛星影像，下圖為 NDVI 分類結果，圖中之 NDVI 值越亮為植生機率越高，反之則越低。



(a) 衛星影像



(b) NDVI 值

圖 6 福衛二號衛星影像及 NDVI 計算分類結果

1. 資料蒐集：除蒐集光譜彩色衛星影像，同時亦納入歷史航照以及全台綠資源調查成果（林務局，2008）；其中多波段彩色衛星影像計算 NDVI 值；航照影像為地真資料，供以輔助比對判釋結果是否有錯誤；而全台綠資源調查成果，供作標準樣區設置及門檻值界定，如圖 8 所示。

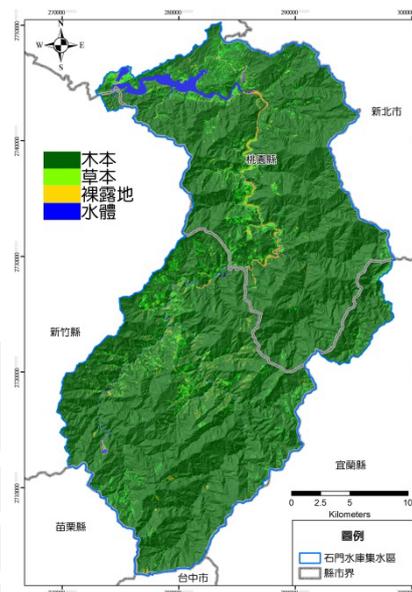


圖 8 石門水庫集水區綠資源調查成果圖

(二) 評估流程

本文植生復育評估流程（如圖 7），共計四大步驟，依序說明如后。

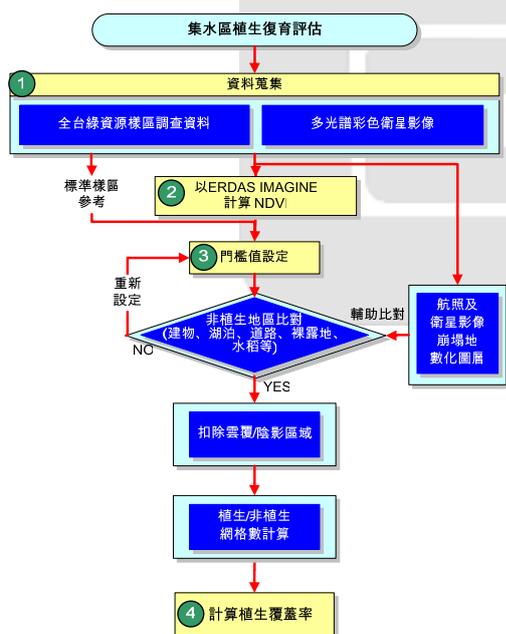


圖 7 集水區植生覆蓋率評估流程圖

2. NDVI 計算：以 ERDAS IMAGINE 遙測影像軟體進行 NDVI 計算，其既有程式模組示意圖，如圖 9 所示。

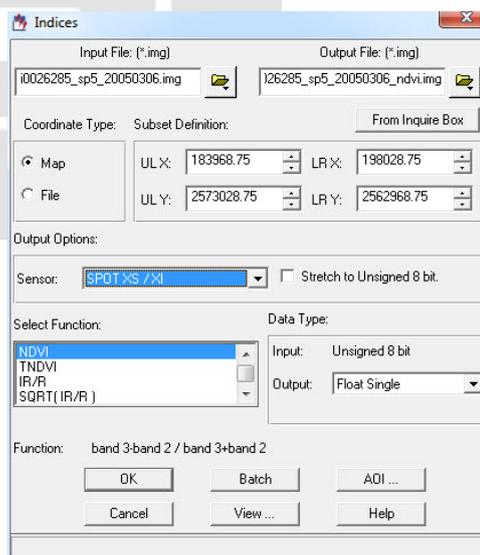


圖 9 以 ERDAS IMAGINE 計算遙測影像 NDVI

3. 門檻值設定：植生與非植生區域之判定，可藉由 NDVI 門檻值加以設定區分，但如何設定植生與非植生之合理門檻值為分析關鍵，相關研究可參考尹孝元等人（2008）。由於門檻值並非單一特定之定值，隨分析範圍、植生種類、衛星影像取像角度、拍攝時間、大氣環境狀況等不同原因而有所影響。

鑑此，利用林務局（2008）全島綠資源調查成果作為標準樣區，以樣區內同時期影像光譜反應特性，作為該期影像值域分析參考，並訂定該影像合理之門檻值，採用監督式分類，監督式分類主要分為兩個主要步驟：（1）挑選訓練樣區作為樣本；（2）以訓練樣區為主，挑選適合的分類器來轉換影像之像元值至適當的分類，以五千分之一圖幅涵蓋石門水庫集水區範圍內，從上游至下游位於山區共挑選 12 幅，並於每幅設置 1km×1km 標準樣區，其空間分布如圖 10 所示，藉由以上樣區訓練所獲得門檻值，加總計算其平均值，與蒐集航照影像交叉比對；若與航照影像明顯不符時，則重新設定，直至確定其分類正確度達至九成以上。

4. 植生覆蓋率計算：依上述樣區訓練所獲得合理門檻值，則可針對彩色衛星影像進行非植生與植生區分類，如圖 11，若該期有雲覆、陰影之影像，以前期、同區域之植生狀況取代之，進而計算植生覆蓋率，其計算公式如下：

$$\text{植生覆蓋率}(\%) = \frac{\text{集水區植生覆蓋網格面積}}{\text{集水區網格面積}} \times 100\% \quad (2)$$

圖 11 設定 NDVI 門檻值區分非植生與植生示意圖

### 五、集水區植生復育演變評估

水保局自民國 95 年開始即針對石門水庫集水區境內庫區集水區（義興溪、匹亞溪、寶里苦溪、蘇樂溪、卡拉溪）、玉峰集水區（砂崙仔溪、泰平溪、下文光溪、抬耀 2 號野溪、下田埔野溪）、三光集水區（萱源溪、把加灣山溪、新興溪）、白石集水區（秀錦溪、延老溪）以及泰崗集水區（泰崗 1 號溪、泰崗 2 號溪、葛樂喜溪）等 18 處重點治理集水區辦理保育治理、災害治理、水土保持監測與管理、山坡地與生態環境資源保育等多項工作，業於民國 100 年執行完成。本節以水保局重點治理區為分析範圍，並按照前述評估方法，利用 NDVI 針對民國 93 年艾利颱風前至民國 100 年南瑪都颱風後等 7 場歷史事件、共 11 期影像，進行植生復育評估，以瞭解集水區治理前後之成效變遷。亦先將各期植生與非植生區判釋成果與石門水庫及其集水區工程點位相互套疊，以瞭解工程進駐後對於整體植生復育狀況，分析範圍如圖 12 所示。

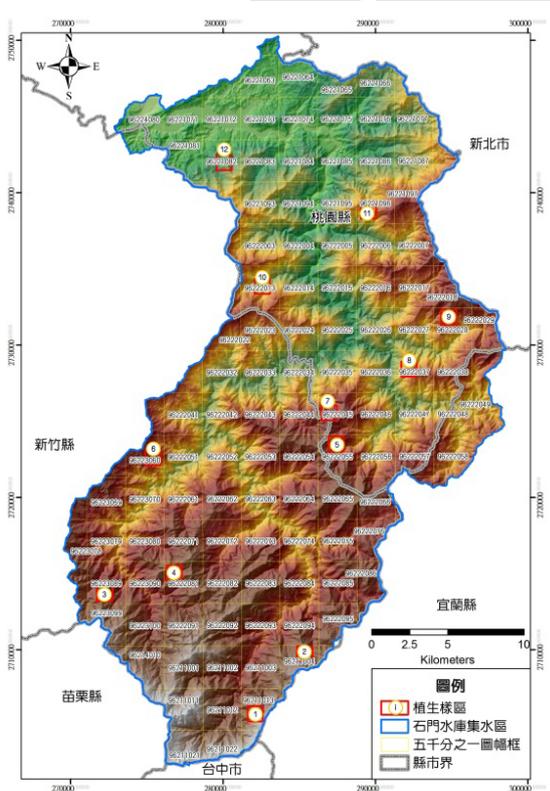


圖 10 石門水庫集水區植生覆蓋樣區分布圖

另外，為有效釐清石門水庫集水區整治前後之植育程度，茲分成兩個時期進行評估，如下：

a. 集水區整治前

探討民國 93 年艾利颱風前後等 2 期衛星影像，計算並比較各期所代表植生覆蓋率，以說明石門水庫集水區整治前，民國 93 年艾利颱風事件對於石門水庫環境衝擊及土砂生產區域之影響範圍。

b. 集水區整治後

石門水庫集水區整治後：石門水庫集水區 6 年整治計畫，因大部分崩塌治理及植生復育工程於民國 98 年底至 99 年初始全數竣工；依此，故選取民國 98 年 5 月莫拉克颱風前至民國 100 年南瑪都颱風後（共計 9 期影像），分別計算各期所代表植生覆蓋率，以評估第一階段及第二階段石門水庫集水區環境植生復育速度及綠覆狀態演變。

表 3 18 處重點治理區名稱對照表

五大集水區	編號	重點治理區
庫區集水區	1	義興溪
	2	匹亞溪
	3	寶里苦
	4	蘇樂溪
	5	卡拉溪
玉峰集水區	6	砂崙仔
	7	泰平溪
	8	下文光溪
	9	抬耀 2 號野溪
	10	下田埔野溪
三光集水區	11	萱源溪
	12	把加灣山溪
	13	新興溪
白石集水區	14	秀錦溪
	15	延老溪
泰崗集水區	16	泰崗 1 號溪
	17	泰崗 2 號溪
	18	葛樂喜溪

(一) 重點治理集水區

1. 整治前後植生復育評估

圖 13 分別為石門水庫集水區整治前之植生復育演變圖及境內 18 處子集水區植生覆蓋率評估比較圖。由圖可見，艾利颱風前後，集水區植生覆蓋率以庫區集水區內之寶里苦溪為最高，而以三光集水區內萱源溪最低；若比較艾利颱風前後集水區植生覆蓋率，其中縮減幅度以下文光溪最為明顯。此外，若針對石門水庫集水區全區而言，艾利颱風前植生覆蓋率達至 85.34%；艾利颱風後植生覆蓋率下降至 83.57%，而五大集水區中以玉峰集水區內重要治理區下降趨勢最為明顯，亦為土砂災害最為嚴重區域。

2. 整治後植生復育評估

(1) 第 1 階段整治計畫

本階段於民國 98 年期間適逢莫拉克颱風及芭瑪颱風等兩場事件影響，透過前述程序分析集水區植生覆蓋率變遷狀況，並其繪製如圖 14 所示。由圖可知，18 處子集水區之平均植生覆蓋率除石門水庫集水區上游萱源溪及秀錦溪集水區之平均植生覆蓋率未達 80% 外，其餘大多約介於 80% 至 90% 之間，尤以庫區集水區內之寶里苦

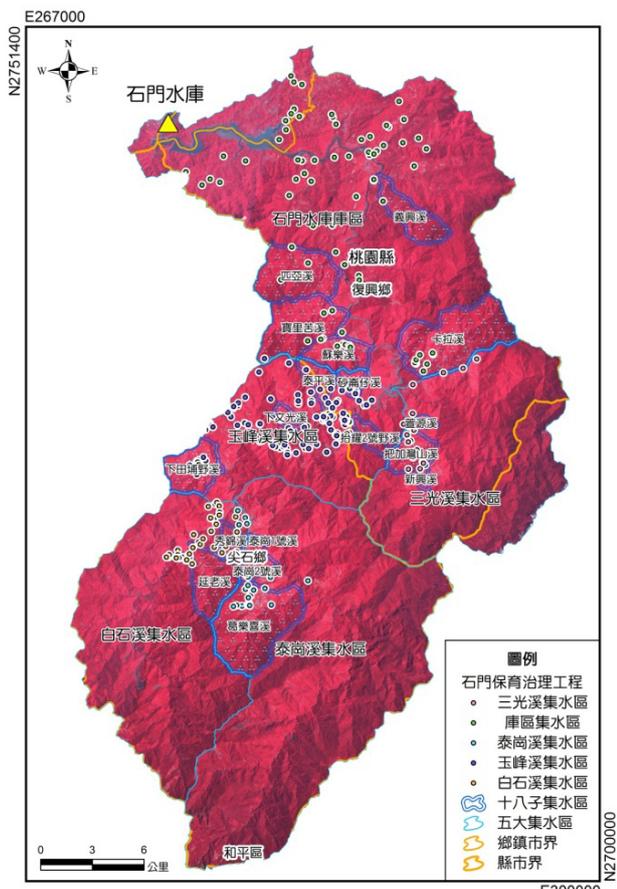


圖 12 石門水庫集水區重點治理區分布圖

溪集水區植生覆蓋率最高，可見植生覆蓋最為茂密且綠化程度較明顯。另就五大集水區而言，植生覆蓋率較高的區域主要集中於中下游，而上游白石及泰崗集水區之植生覆蓋率，相較於中下游為低。

整體而言，第 1 階段整治計畫各子集水區植生復育之狀況均穩定發展，部分子集水區植生覆蓋率甚至接近於 90%，且由重要治理區保育治理成效，經第 1 階段整治計畫土石災害復育及坡面植生工程進駐後，復育情況實屬良好，並已能有效控制崩塌坡面之擴大發展。

(2) 第 2 階段整治計畫

本階段執行期間，曾歷經凡那比颱風、梅姬

颱風、米雷颱風及南瑪都颱風等四場事件之影響，圖 15 分別為石門水庫集水區整治後之植生復育演變圖及境內 18 處子集水區植生覆蓋率評估比較圖。由圖可知，綜觀第 2 階段各子集水區，由凡那比颱風至梅姬颱風侵襲，致使整體植生覆蓋率由 93.52%，略下滑至 89.03%；直至民國 100 年南瑪都颱風後，已恢復至 92.59%。另值得注意的是，除萱源溪、秀錦溪等兩子集水區之平均植生覆蓋率較低未達 86% 外，其餘均接近或超過 90%，尤以寶里苦溪集水區植生覆蓋最為茂密且綠化程度較明顯。整體上，相較於第 1 階段整治計畫，第 2 階段整治計畫著植生復育狀況皆有顯著提升，整體平均約可提高 4% 以上。

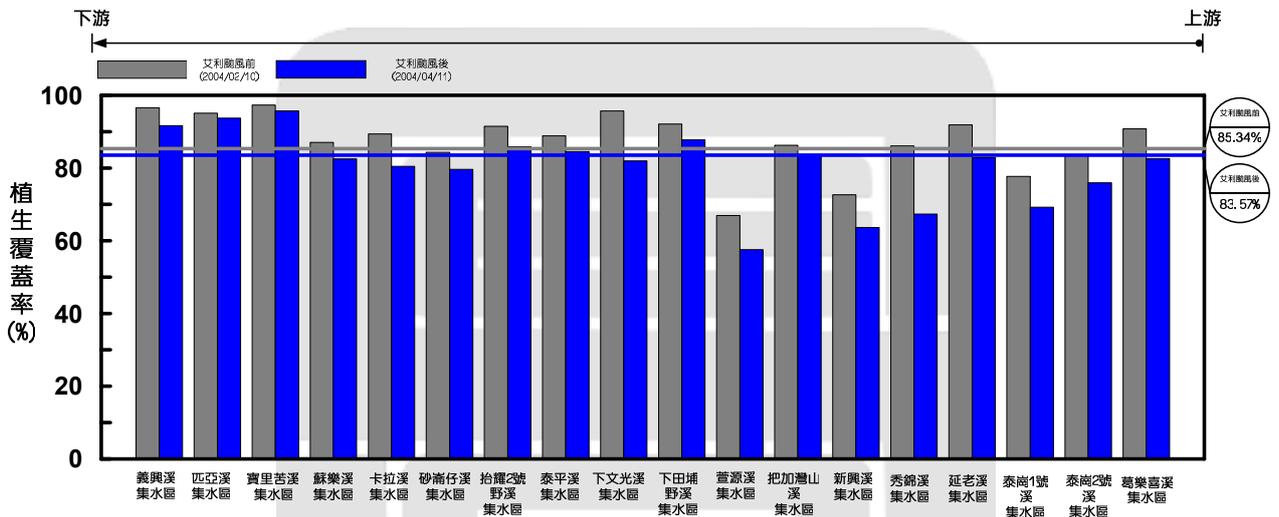


圖 13 石門水庫集水區整治前之境內 18 處子集水區植生覆蓋率評估比較圖

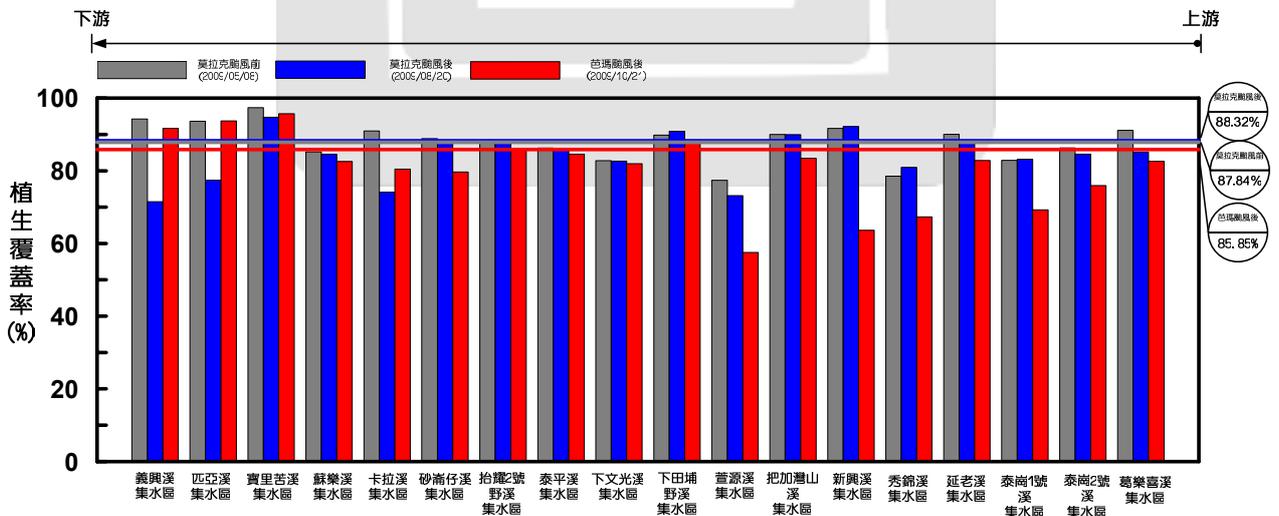


圖 14 石門水庫集水區整治後之境內 18 處子集水區植生覆蓋率評估比較圖 (第 1 階段整治計畫)

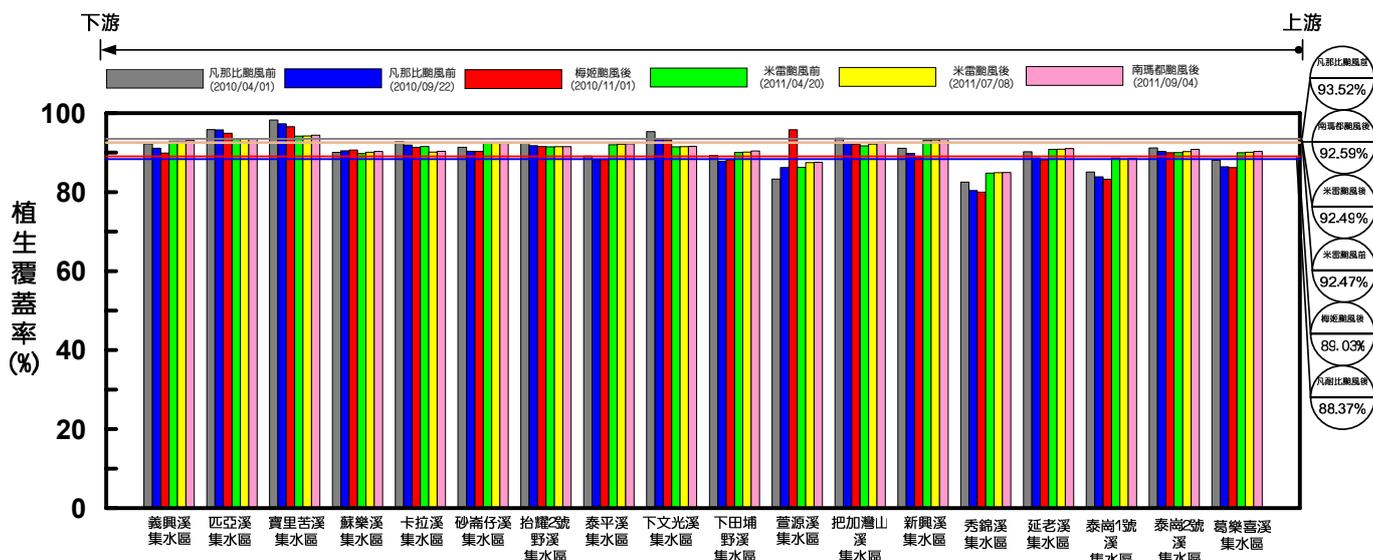


圖 15 石門水庫集水區整治後之境內 18 處子集水區植生覆蓋率評估比較圖(第 2 階段整治計畫)

(二) 具代表大規模崩塌治理區

本節選擇泰平溪集水區境內左岸大型崩塌地為例(如圖 16)，細部探究經人為治理後，對於崩塌坡面復育效果；該溪流曾於艾利颱風侵襲時，造成中游土石崩塌災害，並造成溪流河道嚴重淤積以及鄰近道路與河道兩岸嚴重淘刷，阻礙聯外交通。於艾利颱風後所形成崩塌面積約計 18.82 公頃；同前述分析方式，本文利用多時期遙測影像探討民國 93 年至 99 年期間，共 7 場颱風事件之崩塌坡面植生覆蓋率時空演變歷程，以通盤說明整治工程進駐後對於崩塌治理及植生復育成效，其分析結果如圖 17。

經分析比較後發現，艾利颱風後泰平溪集水區左岸大崩塌地植生覆蓋率由 82.08% 下降至 32.02%；隨之，經民國 94 年珊珊颱風後，略升為 38.77%；民國 95 年石門水庫集水區整治計畫始於實施，第 1 階段整治計畫共三期崩塌治理工程，以及兩期土石災害復育工程，並分年分期治理，全數工程已於民國 98 年 7 月 27 日完竣。第一期崩塌治理工程期間仍遭受颱風豪雨侵襲影響，導致崩塌地植生覆蓋率仍持續下降；直至莫拉克颱風前，已全數完成，其崩塌地植生覆蓋率提升至 58.52%，但莫拉克颱風後又下降至 44.51%；而就第 1 階段整治計畫而言(約於芭瑪颱風後)，其植生覆蓋率 44.89% 相較於艾利颱風

風後，提升約 12.57%；接著，第 2 階段整治計畫執行期間，雖無治理工程進駐，直至民國 100 年南瑪都颱風後，其崩塌地植生覆蓋率逐漸上升至 95.06%，已超越艾利颱風前之植生覆蓋及綠化程度；另透過泰平溪集水區左岸中大型崩塌地衛星影像植生與非植生區域空間分布圖，再比較民國 100 年米雷颱風後航照可以清楚發現，原左岸大崩塌地經整治後(如圖 16)，面積已大幅縮減，崩塌植生狀況持續穩定發育，顯見保育治理工程確實發揮實質復育效果，逐漸恢復至艾利颱風前之植生樣貌。

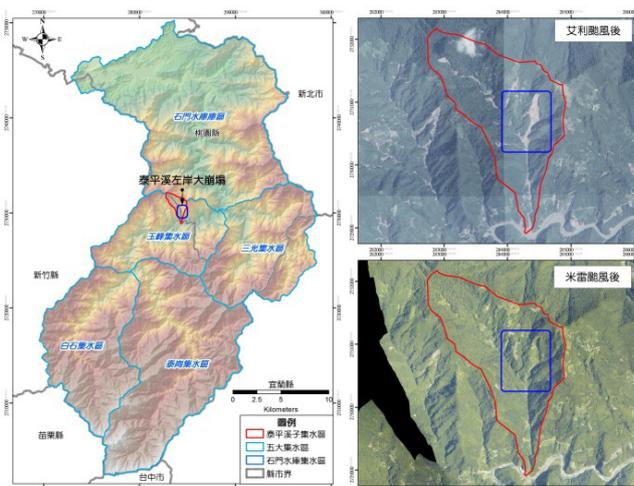


圖 16 泰平溪左岸大崩塌地地理位置圖 (圖右上：艾利颱風後航照；圖右下：米雷颱風後航照)

## 六、結論與建議

本文運用多波段及多時期衛星影像，藉由全台綠資源調查成果，設置標準樣區訓練合理門檻值，再與航照交叉比對，確保分類可靠度，以評估經水保局民國 95 年至 100 年於石門水庫集水區整體環境復育效果；經分析顯示，透過格網植生、打樁編柵及人工播種等加速植生復育方式，各重點治理區植生覆蓋率已優於艾利颱風後，並逐漸恢復至艾利颱風前之植生狀況，明顯改善石門水庫集水區環境生態條件，減少地表逕流及土壤沖蝕量，進而強化耐災能力並降低崩塌發生機率。

## 誌 謝

感謝行政院農業委員會水土保持局，提供計畫（編號 SWCB 100-102）經費補助，作者謹申謝忱。

## 參考文獻

尹孝元、梁隆鑫、陳錕山、黃珮琦（2010）衛星影像於國土變異監測之應用，航測及遙測學刊，第 15 卷，第 1 期，第 65-78 頁

行政院農業委員會水土保持局（2011）石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估

林伯勳、梁惠儀、蕭震洋、冀樹勇、王晉倫、鍾啟榮、邱世宜（2011）石門水庫集水區土砂監測與治理成效評估，地工技術，第 129 期，第 109-114 頁

行政院農業委員會林務局（2006）白石溪集水區整體治理調查分析與規劃

行政院農業委員會林務局（2008）綠資源 NDVI 調查計畫（VII）

國家災害防救科技中心（2004）石門水庫淤積及上游集水區崩塌分析評估報告

陳樹群、賴益成（2004）水庫集水區土砂評量與整治率評估模式，中華水土保持學報，第 35 卷，第 1 期，第 53-67 頁

游繁結、周天穎、葉昭憲、賴如慧（1999）集水區整治率評估模式之探討，中華水土保持學報，第 30 卷，第 2 期，第 137-147 頁

Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. and Deering D. W. (1974) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS-1 Symposium, NASA SP-351, Washington D.C. NASA, pp. 309-317

Townshend, J. R. G. and Justice, C. O. (1986) Analysis of Dynamics of African Vegetation Using the NDVI, International Journal of Remote Sensing, Vol. 7, pp. 1224-1242

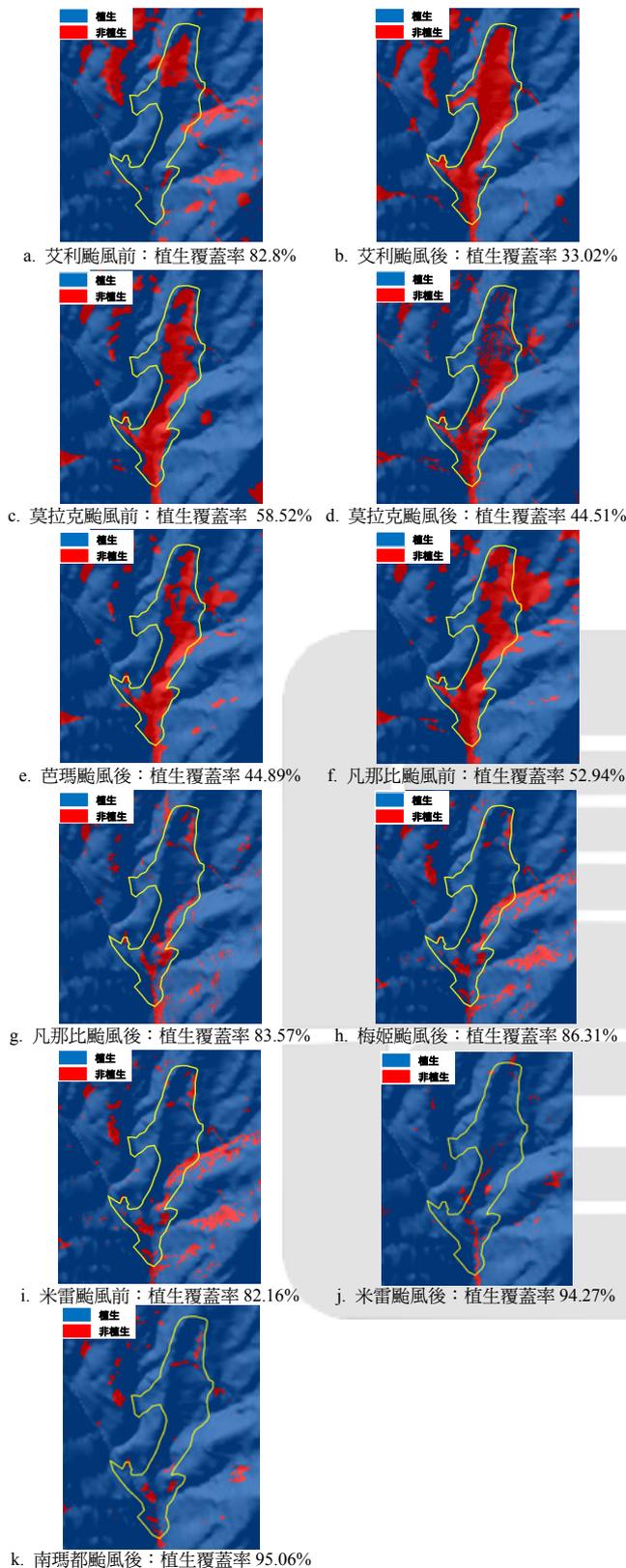


圖 17 泰平溪左岸大崩塌整治前後植生復育時空演變圖（民國 93 年至 100 年）