

# 莫拉克颱風後曾文水庫集水區 山坡地保育治理成效評估

何幸娟\* 林伯勳\*\* 張玉堯\*\*\* 冀樹勇\*\*\*\* 簡以達\*\*\*\*\*  
蔡明發\*\*\*\*\* 費立沅\*\*\*\*\*

## 摘 要

本文採用多元尺度土砂監測技術，並調查集水區依時性監測數據及多時期遙測資訊，分析推演莫拉克颱風後曾文水庫集水區境內重要治理分區及整體土砂生產環境變化趨勢，包含「土砂生產量」、「土砂防治量」、「土砂入庫量」等，以實測數據推估莫拉克颱風災後投入保育治理措施對於曾文水庫集水區山坡地範圍環境復育影響程度以及土砂防治成效，供以後續保育治理措施規劃設計參考依據，輔以進行集水區健康檢查與管理。

關鍵字：土砂監測、莫拉克颱風、曾文水庫、土砂防治

## 一、前 言

民國 98 年莫拉克颱風於 5 日內測得曾文水庫集水區降下 3,005mm 累積雨量（阿里山站），且 72 小時累積雨量為台灣歷年之冠（水保局，2010）；高強度與長延時降雨型態，誘使集水區內發生大規模土砂災害，該場事件造成水庫土砂淤積量新增 9,108 萬立方公尺，遠大於曾文水庫原設計年淤砂量 561 萬立方公尺。為使水庫長久經營，解決嚴重之水質惡化與水庫淤砂問題，並確保南部地區民眾供水正常化、保育上游集水區生態環境及保全集水區上游聚落與居民，立法院業於民國 99 年 4 月 20 日三讀通過「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水特別條例」，且於民國 99 年 5 月 12 日經總統公告實施，計畫

執行期間為民國 99 年至 104 年，辦理重點整治區域治理成效及相關措施俾利集水區土砂安定，藉以降低缺水風險。

水庫集水區內土砂淤積係屬無法避免之自然現象，故積極調查土砂生產區域以及防砂對策擬定極為重要。張石角（1972）指出，曾文水庫集水區其土砂生產屬於「豪雨型」，且土砂來源主要分為崩塌地以及溪流沖蝕兩類。莫拉克颱風過後，曾文水庫集水區入庫砂源除主河道長期堆積沉積物外，產砂來源另可分為伴隨降雨隨機產出之土壤沖蝕量，以及因降雨或地震等擾動產生之坡面崩塌量等兩種（水保局，2011<sup>a</sup>）。土壤沖蝕量及坡面崩塌量會因豪雨誘發及地表逕流帶入河道，或經其他介質流入下游或進入水庫內，為直接造成水庫濁度及淤積量升高與影響水庫供水能

\* 中興工程顧問社防災科技研究中心助理研究員  
\*\* 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長  
\*\*\* 中興工程顧問社防災科技研究中心副經理  
\*\*\*\* 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  
\*\*\*\*\* 行政院農業委員會水土保持局水庫治理科副工程司  
\*\*\*\*\* 行政院農業委員會水土保持局水庫治理科科長  
\*\*\*\*\* 經濟部中央地質調查所環境與工程地質組組長

力及水庫容量之重要因素。鑑此，本文為瞭解莫拉克颱風後曾文水庫集水區保育治理計畫成效是否有達預期整治標的，利用環境變異監測技術，調查集水區依時性監測數據及多時期遙測資訊，建置集水區整治前、後地形高程，並分就重要治理區域及整體土砂生產環境進行個別評估；最後，再綜整重要治理區域成效評估經驗及相關成果，配合廣域集水區遙測資訊，用以回饋推演莫拉克颱風後曾文水庫集水區整體土砂生產環境變化趨勢，包含「土砂生產量」、「土砂防治量」、「土砂入庫量」等，進而量化莫拉克颱風災後投入曾文水庫集水區山坡地範圍保育治理工程於環境復育及土砂防治實質效果。

## 二、環境概述

### (一) 水文、地文與交通資訊

曾文水庫集水區隸屬曾文溪流域，其地理位置跨越嘉義縣阿里山鄉、番路鄉、大埔鄉以及高雄市之那瑪夏區等，集水區面積約為 481km<sup>2</sup>；境內共分為樂野、里佳、新美、草山、大埔、草蘭、長谷川、中坑、伊斯基安那、茶山、塔庫布央及達邦等十二治理分區（水保局，2011<sup>b</sup>）。曾文水庫集水區水系發源於阿里山脈水山（標高 2,609m），上游段蜿蜒於山谷中，由後大埔溪往下游接長谷川溪，與伊斯基安那溪匯流成曾文溪，往下游與烏奇哈、達娜伊谷、陀亞奇伊及二寮等溪匯流流進曾文水庫。境內氣溫受到地形海拔較高影響，下游與上游年平均溫度差距較大，於平原地區年平均溫度約 24℃，上游年平均溫度約 11℃。全流域年平均蒸發量約 1,000mm，平均相對濕度約 80%。透過阿里山、樂野、里佳、表湖等氣象站監測資料，進行年降雨量分析，顯示流域內年平均雨量約 2,350mm，雨量分布由平地往高山增大，且多集中於 5 月至 9 月，約佔全年總雨量之 80% 以上。

集水區狀似斜長四邊形，地勢由西南向東北方向逐漸升高，海拔高程介於 100m 至 2,700m 間。境內坡度以六級坡為主，約佔集水區 40%；五級坡與七級坡次之。針對坡向部分，集水區內

主要坡向以西向與西南向為主，西北向、南向、東南向次之。曾文水庫集水區地層屬於第三紀中新世上部至第四紀更新世下部之地層，年代順序為北寮頁岩、竹頭崎層、茅埔頁岩、隘寮腳層、鹽水坑頁岩、糖恩山砂岩、長枝坑層、紅花子層及三民頁岩等。岩性以灰色泥質頁岩與泥質砂岩為主，因其含泥質成分偏高，使抗風化能力偏弱。斷層方面，主要有旗山斷層通過曾文水庫集水區之嘉義縣阿里山鄉及高雄市那瑪夏區，而集水區西側有觸口、大尖山斷層分布，東側有達邦斷層。茶山斷層於集水區內成南北向延展；瀨頭斷層貫穿集水區東南部至西北部，斷層走向為北北西方向（地調所，2009）。土地利用情形以天然林面積最大，佔 49.25%；其次為人工林，佔 29.52%；農作則佔第三，佔 13.06%。集水區主要聯絡道路以台 18 線（亦通稱阿里山公路）、台 3 線及嘉 169 線為主，另有超過 50 條以上農路分布其中。

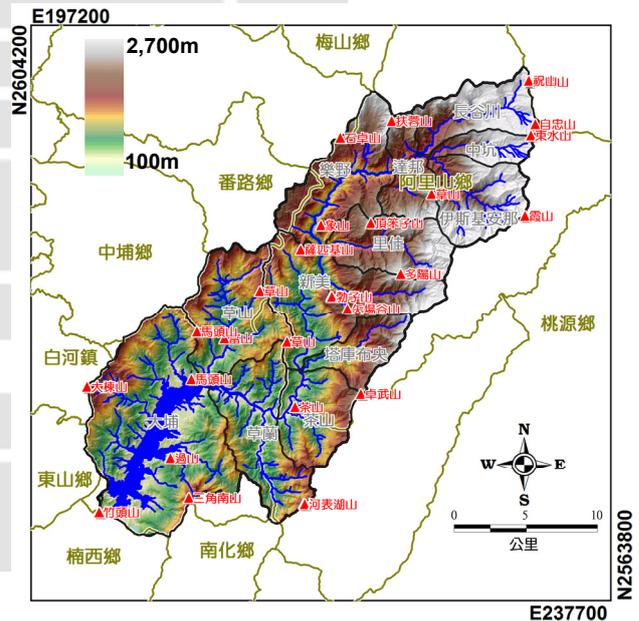


圖 1 曾文水庫集水區地理位置、地形、水系及治理分區分布圖

### (二) 水庫庫容淤積趨勢

圖 2 為曾文水庫庫容歷年淤積量與颱風事件變化趨勢圖。由圖可知，自水庫竣工以來，歷年水庫淤積量有逐漸升高趨勢。截至民國 97 年為

止，水庫有效容量為 57,166 萬立方公尺，為原興建當年有效容量之 89.81%，年平均淤積量為 476 萬立方公尺，仍低於預期年計畫淤積量 561 萬立方公尺；然莫拉克颱風為曾文水庫帶進約 9,108 萬立方公尺之淤積量，佔水庫容量的 12%之多，故統計至民國 98 年底為止，水庫剩餘容量為 49,059 萬立方公尺，總淤積量為 25,781 萬立方公尺，僅存容量佔竣工時庫容之 66%，民國 98 年莫拉克颱風後歷年平均淤積量增為 706 萬立方公尺，已遠大於曾文水庫之年計畫淤積量之 126%，嚴重威脅水庫壽命，對南部地區供水影響甚鉅。

根據水利署（2009）「98 年度曾文水庫淤積測量工作」成果報告，可知民國 94 年至 98 年間，曾文水庫庫容總蓄水量減少 11,193 萬立方公尺，而平均淤積高度為 6.32 公尺，可見民國 98 年度與 94 年之淤積測量全區大多呈淤積情形，且淤積情況頗為嚴重。該計畫並利用地形變化色階圖，概略判讀水庫的淤積及冲刷的趨勢變化、區域分布、淤積冲刷情形，判讀結果詳曾文水庫庫底地形侵淤變化色階圖（圖 3），圖中顯示多處淤積嚴重，且集中在下游庫區及上游處，淤積高度達 17 公尺以上區域不在少數，推估應為民國 98 年 8 月襲台之強颱莫拉克所挾帶龐大降雨，導致上游挾帶大量土石泥砂至下游，促使水庫淤積量暴增。

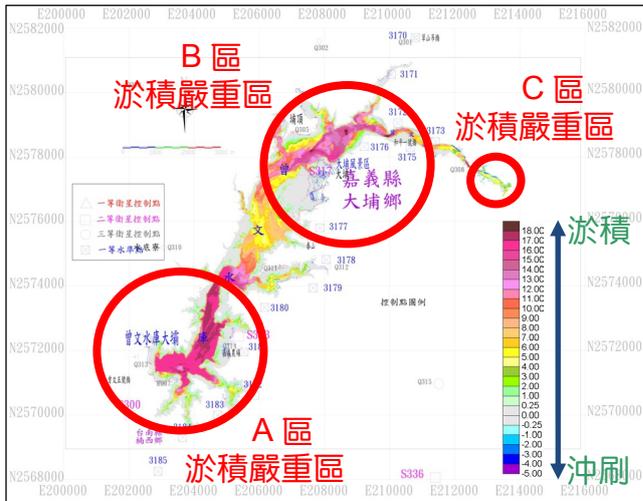


圖 3 曾文水庫民國 94 年至 98 年地形侵淤變化圖  
（摘自水利署，2009）

### 三、治理成效評估方法

集水區保育治理成效評估，可運用多元環境監測及調查，建置各階段基礎資料及基準地形，利於與其他單位進行資料整合及比較等工作，並可評估整治工程施作後對於「土砂生產」及「土砂流出」之控制體積量，實質彰顯各階段不同時間之整治成效（林伯勳等人，2012）。鑑此，本文針對河道與坡面土砂產量及災害影響等區域，評估「河道冲刷或下切深度」、「崩塌發生面積規模」、「土砂體積變化量」等三種物理量，再以產砂量直接入庫之龍蛟溪野溪集水區重要治理區域為案例，逐次研析區域及推演整體保育治理工作對於崩塌復育、土壤沖蝕抑制、土砂控制量、植生覆蓋及河相變遷等課題。保育治理成效分析重點與方法說明如次。

#### （一）深度法：土壤沖蝕抑制百分比與流心線比較

1. 土壤沖蝕抑制百分比：根據蒐集之現地沖蝕針量測成果，具體量化「整治邊坡」及「未整治邊坡」等兩區土壤沖蝕抑制量之相互比例，並呈現經治理後植生加速復育邊坡之土壤沖蝕量抑制百分比（如式 1），藉以瞭解相關治理措施對於坡面土壤沖蝕抑制成效。若土壤沖蝕抑制百分比越高，則代表相對工程控制效果越好。

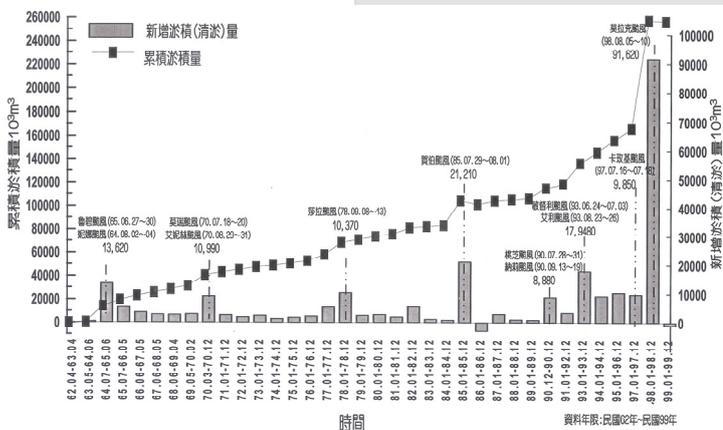


圖 2 曾文水庫歷年淤積量與颱風事件變化趨勢圖

$$\text{土壤沖蝕抑制百分比} = \frac{\text{未整治邊坡土壤沖蝕厚度} - \text{整治邊坡土壤沖蝕厚度}}{\text{未整治邊坡土壤沖蝕厚度}} \times 100\%$$

(式 1)

2. 流心線比較：考量野溪集水區於颱風豪雨期間，上游土砂隨溪水暴漲往下游運移，易造成溪床下刷及側淘，致使改變流心，造成更多土砂流失，而透過護岸、固床工以及防砂壩等保育治理措施能減少溪床下刷或側淘現象發生，故流心線穩定情況可用於評估保育治理成效。

### (二) 體積法：土砂產量

土砂產量估算可分為數值地形相減法，以及經驗公式推估法兩類，相關說明如次。

1. 數值地形相減法：係利用治理前後兩期數值地形相減計算，量化該期間之土砂生產量，以及估算抑制土砂直接入主河道之比例（即為土砂攔阻率），評估保育治理成效。若治理後攔阻率較治理前高，代表治理成效良好；有關攔阻率計算公式，如式 2 所示。

$$\text{攔阻率} = \text{土砂殘留量} / \text{土砂生產量} \quad (\text{式 2})$$

2. 經驗公式推估法：利用經驗公式推估集水區整治工程土砂防治量 ( $V_D$ ) (張三郎, 1996)，以及單場暴雨引致新增土砂量 ( $V_{ht}$ )；若整治工程土砂防治量大於單場暴雨可能產生新增土砂量 (如式 3)，表示治理工程規模可防治新增土砂量，顯見工程有其治理成效。採用公式條列如下：

$$V_D \geq V_{ht} \quad (\text{式 3})$$

$$V_{ht} = V_{ls} \times SDR + V_e \quad (\text{式 4})$$

式中  $V_{ht}$  為單場降雨事件子集水區整體土砂產量； $V_{ls}$  為坡面崩塌土砂生產量； $SDR$  為遞移率； $V_e$  為坡面土壤沖蝕量。

$$V_D = \text{防砂壩} (\text{壩高} \times \text{壩長} \times 10 \text{ 倍壩高} \times 3) + \text{崩場地處理} (\text{面積} \times 2) + \text{護岸} (\text{有效高} \times 2 \times \text{長度}) + \text{蝕溝控制} (\text{溝長} \times \text{溝寬} \times \text{溝深}) \quad (\text{式 5})$$

### (三) 面積法：歷年崩場地及植生覆蓋率演變

1. 歷年崩場地演變：針對集水區崩場地面積、事件後之新增崩場地面積、事件前之崩塌復育地面積及對應其集水區面積之崩壞比、新增崩壞比、崩塌復育比進行統計估算，透過討論各期事件崩場地分布及增減趨勢，瞭解近年集水區保育治理成效。若於治理工程進駐後，崩場地與新增崩場地面積有逐年降低趨勢，且崩塌復育地逐年攀升，表示治理成效良好。
2. 植生覆蓋率面積演變：係指植生面積佔集水區面積之程度，其植生覆蓋率愈高，表示坡面植被茂密程度愈好，以及棲地環境自然度愈佳，有利於植生復育，減緩地表沖蝕行為，坡面土砂處於穩定。

## 四、龍蛟溪集水區治理案例評估

為完整有效呈現水土保持措施進駐後集水區保育治理成效，本文於考量集水區基礎資料、環境變異監測數據及遙測資訊度等分析資料完整度後，以曾文水庫集水區大埔治理分區內，災害嚴重且保全對象多，並且土砂產量直接入庫之龍蛟溪集水區為例，提出區域案例評估成果。

龍蛟溪集水區位於曾文水庫庫區上游，溪流下游流經大埔村市區（位於溪流左岸）以及神斧橋、自強橋等重要保全對象；行政區域隸屬嘉義縣大埔鄉，整體地勢平均高程約為 537m。集水區境內計有 1 條土石流潛勢溪流（嘉縣 DF054），屬於高潛勢之溪流型土石流。透過多期正射影像圖資可見（如圖 4），龍蛟溪集水區於民國 92 年時並未有重大土砂災害跡象，溪流河寬約為 7m（如圖 4a）；民國 98 年莫拉克颱風（如圖 4b），造成龍蛟溪集水區發生大規模土砂災害，經現場觀察可見土石流堵塞及溢流現象，莫拉克後新增崩場地約為 15.6ha，溪流河寬擴增為 52m。經整治過後，於民國 99 年凡那比颱風後溪流河寬已控制於 43m 內（如圖 4c），溪流河寬無明顯變動。本集水區自民國 98 年整治計畫執行以來，截至目前為止已辦理 7 項工程（詳

見圖 5)；執行工程分為清疏工程、崩場地處理工程及野溪整治等三項，其中，又以野溪整治工程為最多共計有 4 件。

### (一) 深度法

1. 土壤沖蝕抑制百分比：根據蒐集之現地沖蝕針量測成果可知，龍蛟溪集水區整治邊坡累積沖蝕厚度平均值為 7.25mm (如圖 6)；裸露邊坡累積沖蝕厚度平均值為 18.70mm；透過 (式 1) 進行量化計算，結果如下：

$$\begin{aligned} & \text{土壤沖蝕抑制百分比} \\ & = (18.70 - 7.25 / 18.70) \times 100 = 61.2(\%) \end{aligned}$$

由此可知，經人為治理後邊坡相較於裸露邊坡沖蝕厚度低，且約能抑制 61.2% 土壤細顆粒材料流失，確實有其治理成效。

2. 流心線變動：透過水保局工程管考系統可知 (如圖 5)，「龍蛟溪野溪整治二期工程」於民國 99 年 10 月開工，施工內容包含固床工 11 座，護岸 1123.7m 等，目前已逾竣工。比較龍蛟溪集水區於「龍蛟溪野溪整治二期工程」治理前後流心線變化圖，如圖 7 所示。圖中以民國 97 年數值高程模型求得之流心線代表治理前，民國 99 年及 100 年 6 月流心線代表治理後；由圖可見，治理後流心線皆流動於前述保育治理設施範圍內，由此顯見治理後之溪流流心趨於穩定，顯見治理工程已有成效。

### (二) 體積法

1. 數值地形相減法：圖 8 為龍蛟溪集水區治理前後集水區土砂流失量及攔阻率，圖中，治理前為民國 97 年至 99 年 12 月期間；治理後為民國 99 年 12 月至 100 年 6 月期間。由圖 8 顯示治理前後集水區土砂攔阻率由 2.2% 抬升至 37.8%，顯示防砂設施已有抑制土砂流出。
2. 經驗公式推估法：透過 (式 3) 至 (式 5) 進行評估可知現階段龍蛟溪集水區內編列之治理工程土砂防治量約計為 27.8135 萬  $m^3$ ；該集水區於 50 年及 200 年重現週期單場暴雨引致

之新增土砂量體分別為 2.6467 萬  $m^3$  以及 4.5943 萬  $m^3$ ，代表現階段龍蛟溪集水區之整治工程規模應可防治至少 200 年重現週期之單場暴雨引致之新增土砂量體，降低土砂災害發生規模，進而減少直接入庫土砂量並延續水庫使用壽命。

### (三) 面積法

1. 歷年崩場地演變：蒐集龍蛟溪集水區自民國 90 年桃芝颱風至 100 年南瑪都颱風後之衛星影像圖資，並完成崩場地變異點研究，共計 14 期。由分析成果可以發現，自水土保持措施投入後，於民國 99 年凡那比颱風後之新增崩場地面積已降低至 4.4ha (如圖 9a)，顯見整治工程確實發揮效益，並可承受風災考驗；民國 100 年 3 月南瑪都颱風後龍蛟溪集水區內之崩場地總面積已縮減至 5.4ha (如圖 9b)，暫無災害擴大之虞。另由圖 9c 龍蛟溪集水區崩塌復育地面積與崩塌復育比顯示，於民國 98 年 8 月至 99 年 3 月期間，集水區崩塌復育比約為 2.6%；於民國 99 年 11 月至 100 年 3 月期間整治工程陸續竣工後，集水區崩塌復育比約為 1.2%；整體而言，於保育治理措施投入並陸續竣工後，其崩塌復育比可維持於 1.2% 以上，且較整治前高。
2. 植生覆蓋率面積演變：續就前 14 期圖資進行植生覆蓋率歷程分析，如圖 10 與 11 所示。由龍蛟溪集水區山坡地範圍植生覆蓋率歷程圖可見，於治理前龍蛟溪集水區內山坡地植生覆蓋率以莫拉克颱風後為歷年最低，植生覆蓋率約 78.19%，顯見莫拉克颱風後集水區內有多處裸露區域存在。迄整治工程投入後植生覆蓋率逐漸攀升，期間歷經凡那比颱風影響植生覆蓋率仍未見減少情況。至民國 100 年度南瑪都颱風後 (民國 100 年 9 月)，山坡地範圍植生覆蓋率已逐漸恢復，達 85.48%，雖未接近工程整治前最佳之植生覆蓋率程度 (聖帕颱風後，植生覆蓋率 86.39%)，但已優於莫拉克颱風後植生覆蓋率。

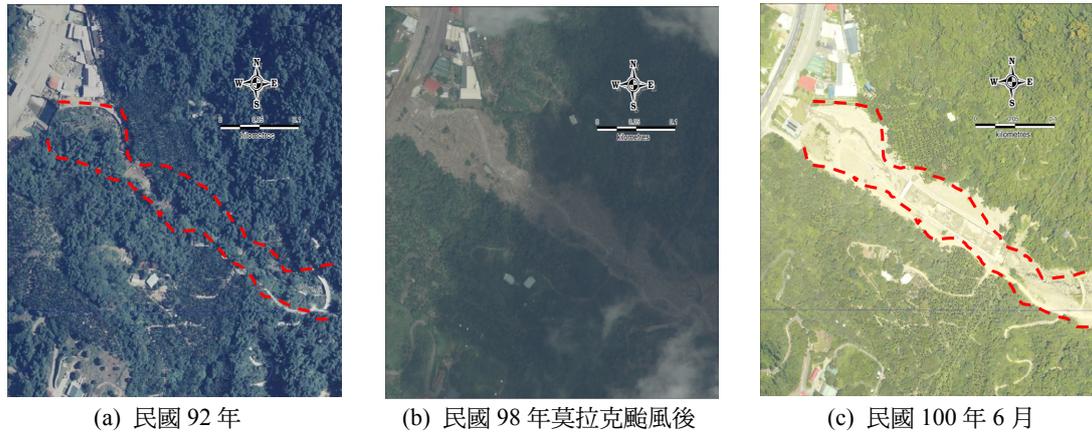


圖 4 龍蛟溪集水區下游河道歷年變遷情況圖

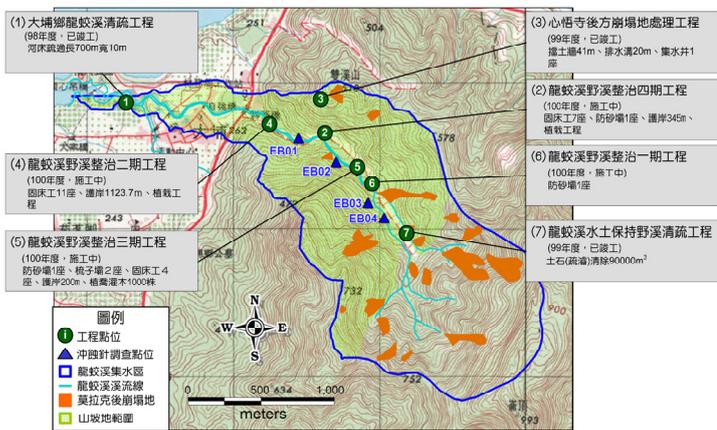


圖 5 龍蛟溪集水區整治工程空間分布圖

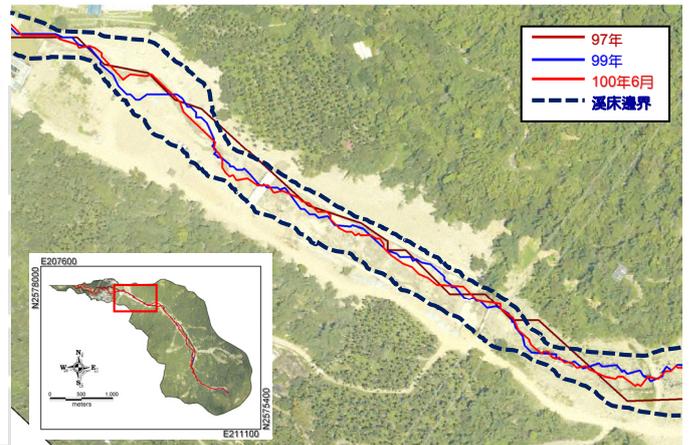


圖 7 龍蛟溪集水區各期流心線變化圖

(底圖拍攝日期為民國 100 年 6 月)

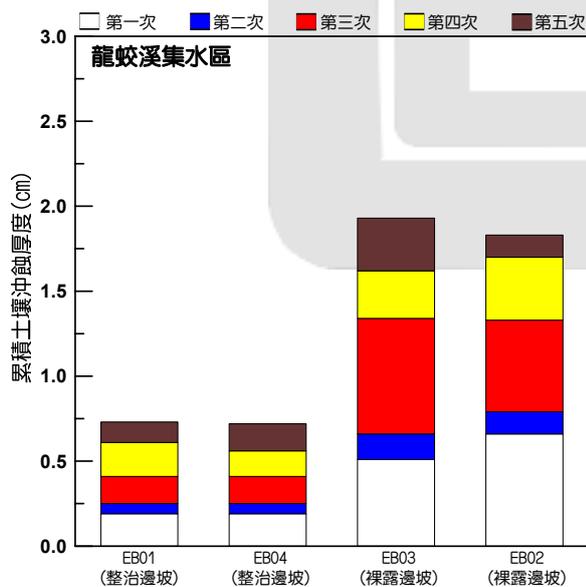


圖 6 龍蛟溪集水區累積沖蝕厚度圖

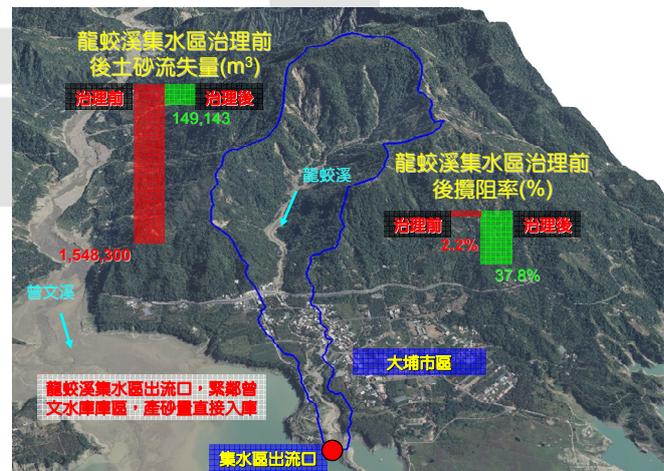
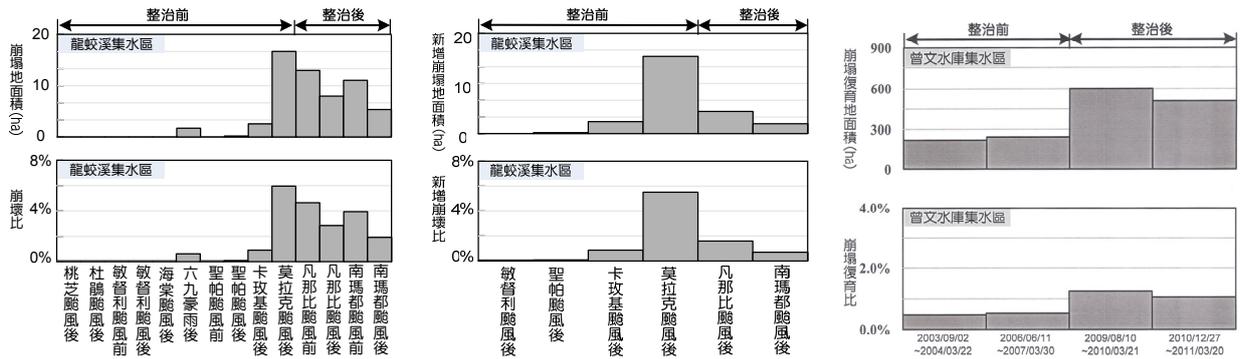


圖 8 龍蛟溪集水區治理前後集水區土砂流失量及攔阻率



(a) 新增崩塌地面積與新增崩塌比 (b) 崩塌地面積與崩塌比 (c) 崩塌地面積與崩塌比

圖 9 龍蛟溪集水區崩塌及崩塌復育面積變化量統計

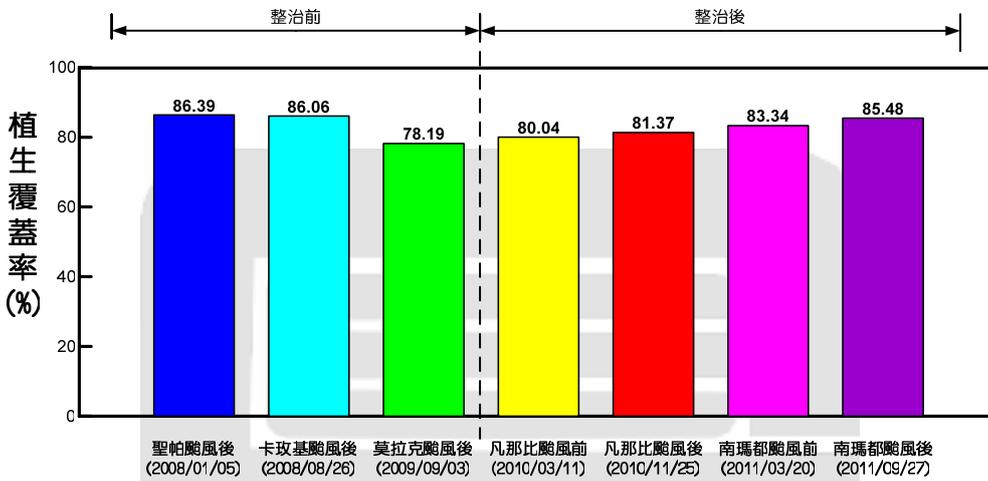


圖 10 龍蛟溪集水區山坡地植生覆蓋率歷程圖

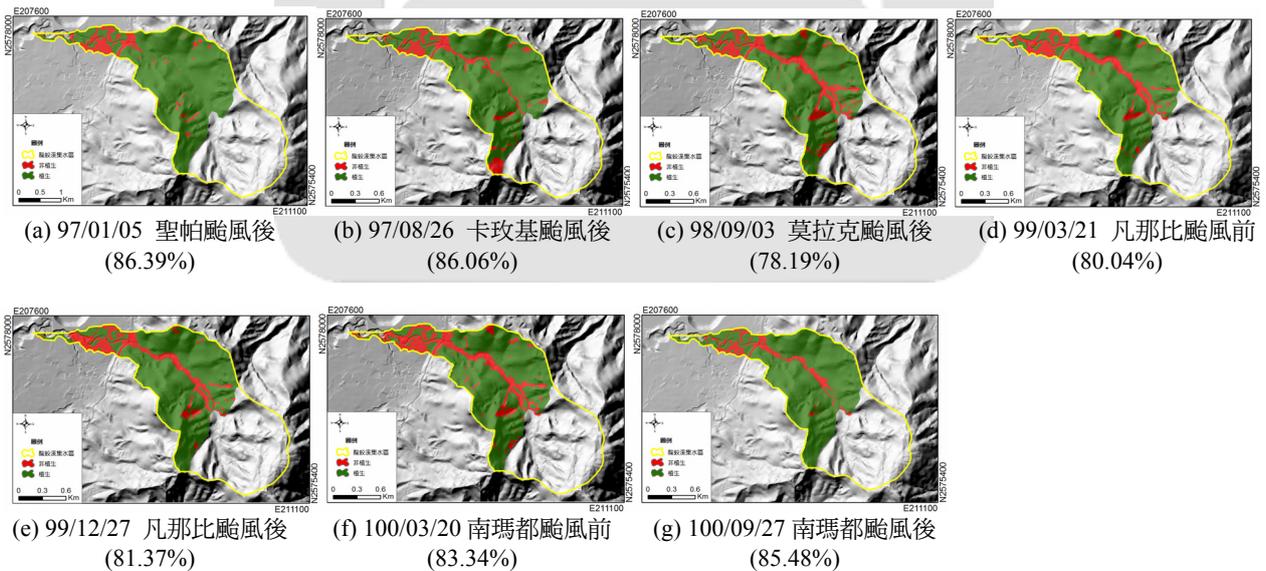


圖 11 歷次降雨事件前後龍蛟溪集水區植生覆蓋率歷程圖

## 五、土砂生產環境及治理成效評析

為評估民國 99 年 5 月「曾文南化烏山頭水庫集水區治理及穩定南部地區供水特別條例」執行計畫啟動迄民國 100 年 12 月（約 2 年），曾文水庫集水區山坡地範圍保育治理工程於環境復育及土砂抑制實質成效。且治理成效估算需以實測監測資料輔助推估，惟因集水區幅員廣闊，故本文係透過不同空間尺度監測手段，以區域監測資料回饋整體治理成效，非著重於利用土砂材料及物理性質變化說明局部工程成效變化，故需對參數簡化或暫時忽略，而改以「治理前、治理後」、「已治理、未治理」之相對值，針對曾文水庫集水區整體土砂生產環境，含土砂生產量、土砂防治量、土砂入庫量等三項課題（水利署，2011；水保局，2011<sup>a</sup>；林務局，2012），分項進行重點研析，並展繪集水區環境變異監測手段評估整體土砂防治成效分析流程，如圖 12 所示。

1. 土砂生產量：評估莫拉克颱風後迄今上游集水區坡面供砂料源產量，追蹤水文活動影響土砂演變趨勢及監測土砂產量變動幅度。
2. 土砂防治量：評估莫拉克颱風災害投入保育治理措施，實質量化「直接治理既有砂源減少量」與「間接影響潛在砂源穩定量」等土砂防治量，據以評估各年所占曾文水庫集水區防砂目標之百分比以及整體治理現況達至土砂防治目標值。
3. 土砂入庫量：透過上述兩者物理量，以「土砂生產量」減去「土砂防治量」推求「土砂入庫量」，說明上游集水區保育治理措施對於曾文水庫庫容減淤成效。

### （一）土砂生產量

本文蒐集水保局（2011<sup>a</sup>）「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」相關現地監測及遙測分析成果，估算曾文水庫集水區山坡地區各年度土砂生產量，計算其公式如下：

$$V_{ht} = V_{ls} \times SDR + V_e \quad (\text{式 } 6)$$

式中  $V_{ht}$  為山坡地區總土砂生產量； $V_{ls}$  為坡面崩塌土砂生產量； $SDR$  為遞移率； $V_e$  為坡面土壤沖蝕量。表 1 為曾文水庫集水區山坡地區總土砂生產量評估表。條列表中重要觀察現象，分述如下。

1. 民國 99 年曾文水庫集水區坡面崩塌土砂生產量為 3,365,870m<sup>3</sup>；坡面土壤沖蝕量為 3,535,804 m<sup>3</sup>；總生產量為 6,245,330 m<sup>3</sup>。
2. 民國 100 年曾文水庫集水區坡面崩塌土砂生產量為 1,575,277m<sup>3</sup>；坡面土壤沖蝕量為 3,486,426m<sup>3</sup>；總生產量為 4,754,523m<sup>3</sup>。
3. 依前二項分析可知，整體上坡面崩塌土砂生產量於莫拉克颱風後迄今，上游集水區於坡面供砂料源產量已有逐年降低趨勢。

### （二）土砂防治量

分就曾文水庫集水區「坡面」復育及「河道」殘留等兩區域計算所代表之土砂防治量，推估曾文水庫集水區內山坡地區之總防砂量體，如式 7。其中，「坡面」土砂防治量包含既有崩塌復育與潛在影響土砂量，以及沖蝕抑制量。

$$V_T = V_L + V_r \quad (\text{式 } 7)$$

式中  $V_T$  為山坡地區總防砂量； $V_L$  為坡面土砂防治量； $V_r$  為主河道土砂防治量。

透過前項公式，進行曾文水庫集水區治理後土砂防治評估，如表 2 所示，接著，再與「曾文南化烏山頭水庫集水區治理及穩定南部地區供水特別計畫」實施計畫中曾文水庫集水區保育治理計畫防砂目標 1,380 萬 m<sup>3</sup> 進行比較，以檢視現階段達成集水區計畫防砂目標所佔比例。茲條列以下分析重點：

1. 民國 99 年曾文水庫集水區內山坡地範圍土砂防治量約為 3,464,040 m<sup>3</sup>，土壤沖蝕抑制量約為 32,907 m<sup>3</sup>，溪床淤積量為 143,064m<sup>3</sup>；總防砂量體 3,639,993 m<sup>3</sup>，約達執行計畫曾文水庫集水區防砂目標之 26.38%。

- 民國 100 年曾文水庫集水區內山坡地範圍土砂防治量約為 2,477,850 m<sup>3</sup>，土壤沖蝕抑制量約為 22,812 m<sup>3</sup>，溪床淤積量為 143,064m<sup>3</sup>；總防砂量體 2,643,708 m<sup>3</sup>，約達執行計畫曾文水庫集水區防砂目標之 19.16%。
- 綜以上所述，於民國 99 年至 100 年之 2 年期間，曾文水庫集水區內山坡地範圍總土砂防治量約為 5,941,890 m<sup>3</sup>，總土壤沖蝕抑制量約為 55,719 m<sup>3</sup>，總溪床淤積量為 286,092m<sup>3</sup>；總防砂量體 6,283,701 m<sup>3</sup>，累計達至執行計畫曾文水庫集水區防砂目標之 45.53%。

7,104,000m<sup>3</sup>（水保局，2011<sup>a</sup>）約減少 4,993,185 m<sup>3</sup>，抑制土砂入庫約 70.3%。

- 綜以上所述，於民國 99 年至 100 年等兩年期間，已抑制 9,491,848m<sup>3</sup> 之入庫土砂量；若除以莫拉克後水庫年平均淤積量 7,104,000m<sup>3</sup>（水保局，2011<sup>a</sup>），推估水庫使用壽命可再延長 1.3 年左右；由此可見因「曾文南化烏山頭水庫集水區治理及穩定南部地區供水特別條例」執行計畫啟動，且隨保育治理工程措施陸續竣工後，土砂入庫量已被逐年控制。

### （三）土砂入庫量

藉由上述曾文水庫集水區山坡地區域內「土砂生產量」減去「土砂防治量」計算成果，即可推算「土砂入庫量」，如圖 13 所示，茲條列重點觀察現象如下：

- 民國 99 年度曾文水庫集水區山坡地區域內之入庫土砂量為 2,605,337m<sup>3</sup>，約為年平均淤積量之 36.7%，相較於 98 年莫拉克颱風後年平均淤積量 7,104,000m<sup>3</sup>（水保局，2011<sup>a</sup>）約減少 4,498,663 m<sup>3</sup>，抑制土砂入庫約 63.3%。
- 民國 100 年度曾文水庫集水區山坡地區域內之入庫土砂量為 2,110,815m<sup>3</sup>，約為年平均淤積量之 29.7%，相較於年平均淤積量

表 1 曾文水庫集水區山坡地總土砂生產量評估表

年度	A (ha)	V <sub>ts</sub> (m <sup>3</sup> )	SDR (%)	V <sub>e</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>ht</sub> (m <sup>3</sup> )
	總崩塌地面積	坡面崩塌土砂生產量	遞移率	坡面沖蝕量	總生產量
99	277.7	3,365,870.1	80.5	3,535,804.1	6,245,329.6
100	141.1	1,575,276.6		3,486,425.6	4,754,523.3

註：計算公式定義如下：  
 1. 坡面崩塌土砂生產量  $V_{ts}=A \times \sec\theta \times B$   
 A：總崩塌地面積。其中，民國 99 年係以凡那比颱風後衛星影像崩塌地判釋成果為代表；民國 100 年係以南瑪都颱風後衛星影像崩塌地判釋成果為代表。  
 B：集水區內土壤崩塌厚度值。  
 $\theta$ ：崩塌地平均坡度。  
 2. SDR 遞移率採用 80.5%。  
 3.  $V_e = h_{uc} \times A + h_c \times (A_{ht} - A)$   
 $h_{uc}$ ：非植生邊坡年平均沖蝕厚度採 0.0661m。  
 $h_c$ ：植生邊坡年平均沖蝕厚度採 0.0299m。  
 A：總崩塌地面積。  
 $A_{ht}$ ：曾文水庫山坡地區域總面積。  
 4. 總生產量  $V_{ht} = V_{ts} \times SDR + V_e$

表 2 曾文水庫集水區山坡地區域治理後土砂防治評估表

年度	A (m <sup>2</sup> )	V <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> )	C (m)	V <sub>mp</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>r</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>T</sub> (m <sup>3</sup> )	防砂目標 (m <sup>3</sup> )	達成比例 (%)	
	整體崩塌復育影響面積	土砂防治量	土壤抑制沖蝕厚度	土壤沖蝕抑制量	溪床淤積量	總防砂量體			
99	2,712,059	3,464,040	0.01213	32,907	143,064	3,639,993	13,800,000	26.38%	
100	1,880,046	2,477,850		22,812	143,064	2,643,708			19.16%
總計		5,941,890			55,719	286,092			6,283,701

註：計算公式定義如下：  
 1. 土砂防治量  $V_p = A \times \sec\theta \times B$   
 A：整體崩塌復育影響面積，係為 1.55 倍崩塌復育面積。  
 $\theta$ ：崩塌地平均坡度。  
 B：集水區內土壤崩塌厚度值，可由土壤厚度調查迴歸求得。  
 2. 土壤沖蝕抑制量  $V_{mp} = C \times A$   
 A：整體崩塌復育影響面積，係為 1.55 倍崩塌復育面積。  
 C：集水區抑制沖蝕厚度；藉由沖蝕針調查成果求得。  
 3. 溪床淤積量  $V_r$ ，以民國 100 年溪床斷面調查施測成果搭配工作斷面法估算，並假設民國 99 年度溪床淤積量與民國 100 年相同。  
 4. 總防砂量體  $V_T = V_p + V_{mp} + V_r$

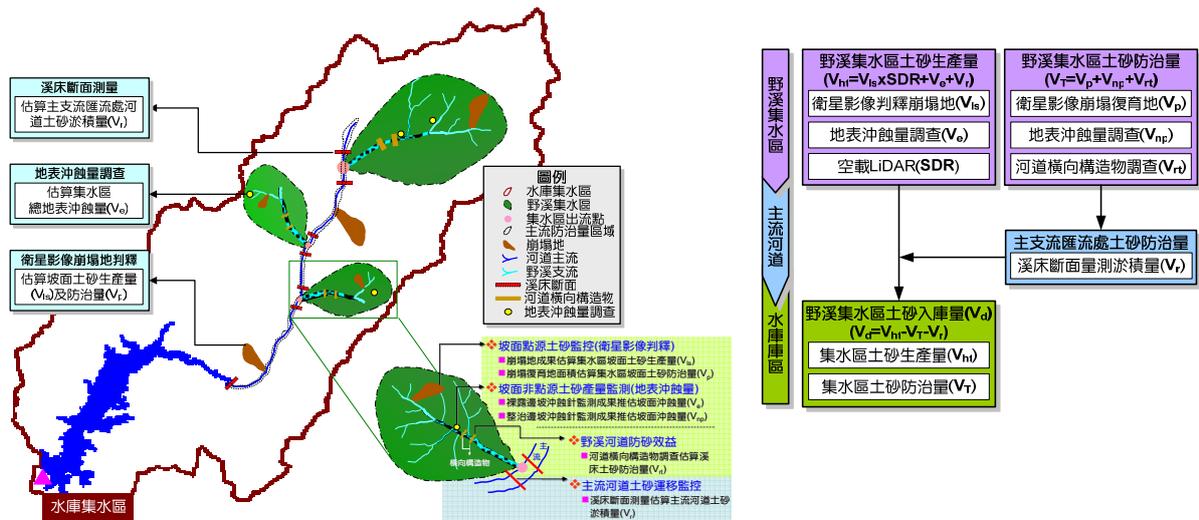


圖 12 集水區環境變異監測手段評估整體土砂防治成效分析流程示意圖(整理自：水保局，2011<sup>a</sup>)

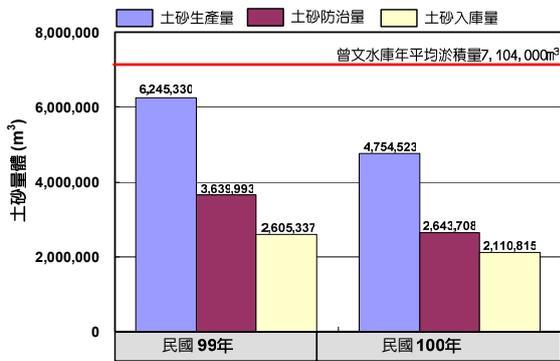


圖 13 曾文水庫集水區山坡地範圍土砂入庫量分析成果圖

## 六、結 論

本文運用多元尺度環境監測及調查，合理實質量化重要治理區域集水區整治成效，以及推估未來土砂演變趨勢，可供以作為工程規劃滾動式檢討方針、土砂抑制條件策略及治理對策評估依據。經由案例分析顯示，龍蛟溪集水區經各階段治理工程後，不僅有效控制坡面土壤沖蝕且抑制坡面崩塌量及穩定溪床，更使植生復育提升；且經評估結果顯示，現階段集水區工程規模至少可防治 200 年重現週期之單場暴雨引致之新增土砂量體，降低土砂災害發生，減少直接入庫泥砂量並延長水庫使用壽命；此外，針對整體土砂生產環境及防治量評估成果可知，曾文水庫集水區內土砂入庫量已被逐年控制，且可延長水庫壽命。

此外，本文建議後續可持續蒐集與建置長期

監測資料，據以回饋訂立集水區之各式土砂防治健康指標，及未發生災害前之土砂流出量起始值，作為下一階段整治計畫實施目標之參考基準值，得以確切系統化達至預期規劃目標，進而活化水庫集水區土地利用價值，減低洪患災害發生可能性。

## 參考文獻

行政院農業委員會水土保持局 (2009) 石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究  
 行政院農業委員會水土保持局 (2010) 曾文水庫 (阿里山鄉以外)、南化及烏山頭水庫集水區保育治理分析與對策  
 行政院農業委員會水土保持局 (2011<sup>a</sup>) 曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估  
 行政院農業委員會水土保持局 (2011<sup>b</sup>) 曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫-水庫集水區保育治理計畫  
 經濟部中央地質調查所 (2009) 台灣地質圖，圖幅第四十五號 (中埔)  
 行政院農業委員會林務局 (2012) 新竹處轄國有林班地上游集水區土砂產量調查與防治成效評估  
 經濟部水利署 (2006) 區域排水整治及環境營造規劃參考手冊  
 經濟部水利署 (2009) 98 年度曾文水庫淤積測量工作  
 經濟部水利署 (2012) 曾文水庫集水區土地變異及土砂災害監測  
 張石角 (1972) 曾文水庫集水區淤砂問題之定量性研究，中華水土保持學報，第 3 卷，第 2 期，第 50-69 頁  
 林伯勳、蕭震洋、許振崑、冀樹勇 (2012) 空載光達高精度掃描技術評估石門水庫集水區整治成效，中興工程，第 114 期，第 23-33 頁  
 張三郎 (1996) 治山防洪計畫之展望，坡地防災研討會論文集