

地工技術

技術短文

石門水庫集水區土砂監測與治理成效評估

Sediment Monitoring and Evaluation of Management Efficiency for Shih-men Watershed

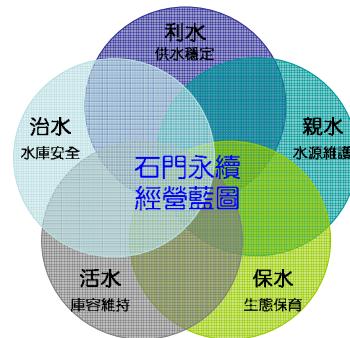
林伯勳* 梁惠儀* 蕭震洋* 冀樹勇* 王晉倫** 鐘啟榮* 邱世宜**

一、前言

93年艾利颱風4日內平均降下967mm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，造成石門水庫水庫土砂淤積量新增2,788萬 m^3 ，導致原水濁度瞬間飆昇，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95年至100年，共計6年，為求加速執行水庫治理速度，降低缺水風險。目前各項工作已逾完成階段。近期水利署更提出以「五水」構置「石門永續經營藍圖」，如圖一所示。圖中顯示五大目標包含(1)利水：供水穩定；(2)治水：水庫安全；(3)活水：庫容維持；(4)保水：生態保育；(5)親水：水源維護。此藍圖譜繪出石門水庫永續發展施政方針、經營理念模式、未來發展策略。

石門集水區土砂生產來源主要由兩種構成，一種為伴隨降雨隨機產出之土壤沖蝕量，另一種為因降雨或地震等擾動產生之坡面崩塌量。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力及水庫容量之重要因素。為瞭解石門水庫集水區保育治理計畫成效是否有達預期之整治標的，本文利用多元尺度監測技術並配合現地監測，建立具時效性背景資料，以境內重要治理區域為案例，分就「河道」、「坡面」及「整體集水區」等三種空間尺度區域，以多元化

評估方法及分析角度，據以評估保育措施治理前後土砂控制變化(亦即抑制土壤沖蝕、減少崩塌產量)、環境植生復育情形，供以作為未來土砂災害追蹤及整治成效評估依據。



圖一 石門水庫集水區永續經營藍圖暫定架構

二、集水區治理成效評估重點

石門水庫集水區治理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，歷經各方積極整治並提出多目標之治理方案，確保減少砂源入庫量，以使防汛期間能不間斷供水，以使水庫永續。為達上述目的，應針對石門水庫集水區目前重要問題及衍生癥結，從中個別深入討論及加以釐清評析，再藉可行之土砂監測手段，於整治工程進駐前、中、後，辦理各式監測工作，建立時效性背景資訊，以具體反應相關整治措施對於集水區土砂安定之貢獻程度及治理效益。有關集水區治理評估重點，說明如后。

2.1 濁度飆昇

石門水庫於85年賀伯颱風，原水濁度飆增至

* 財團法人中興工程顧問社

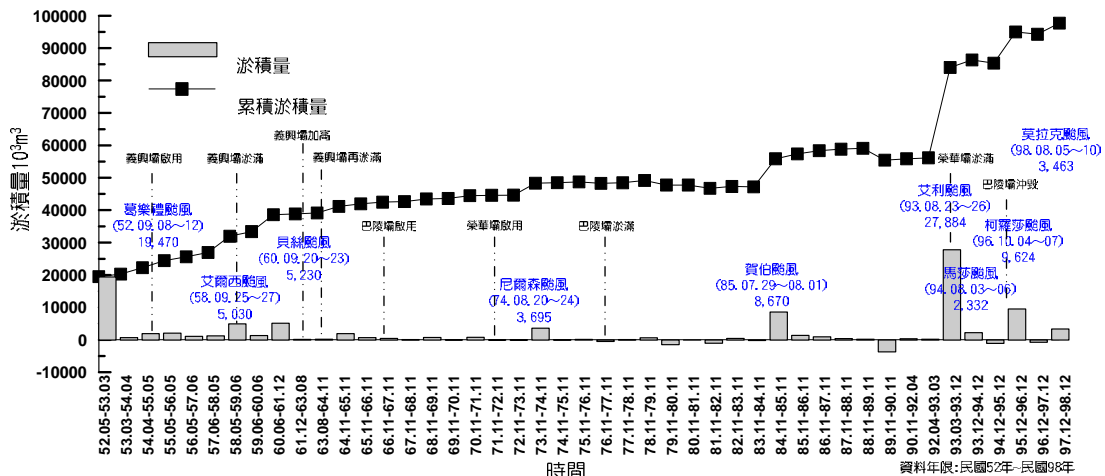
** 農業委員會水土保持局

1萬NTU(濁度單位：Nephelometric turbidity unit, NTU)，造成桃園地區停水9天，隨後，每逢颱風豪雨事件，上游常發生土砂災害使得水庫原水濁度提昇，屢屢造成重大停水事件。93年艾利颱風挾帶豪雨，累積降雨高達1,600mm，造成原水濁度飆高至7~12萬NTU，停水高達兩週，使得水庫土砂淤積量增加2,788萬 m^3 ，造成水庫總蓄水容量減少9%，而庫容僅剩73%。94年石門水庫分別歷經海棠與馬莎颱風，其中馬莎颱風所夾帶之豪雨，造成大量土砂淤積量，再次提高水庫原水濁度值，使淨水廠抽水站無法處理供水。97年辛樂克颱風侵襲全台，並於排砂道測得其原水濁度，最高達至1萬2千多NTU，水利署啟動緊急供水系統進行表面取水達至不分區供水之目的。圖二及圖三分別為石門水庫歷年淤積量變化趨勢及歷年主要颱風累積雨量與停水事件關係圖，顯見每逢颱風或豪雨造成原水濁度飆昇、水

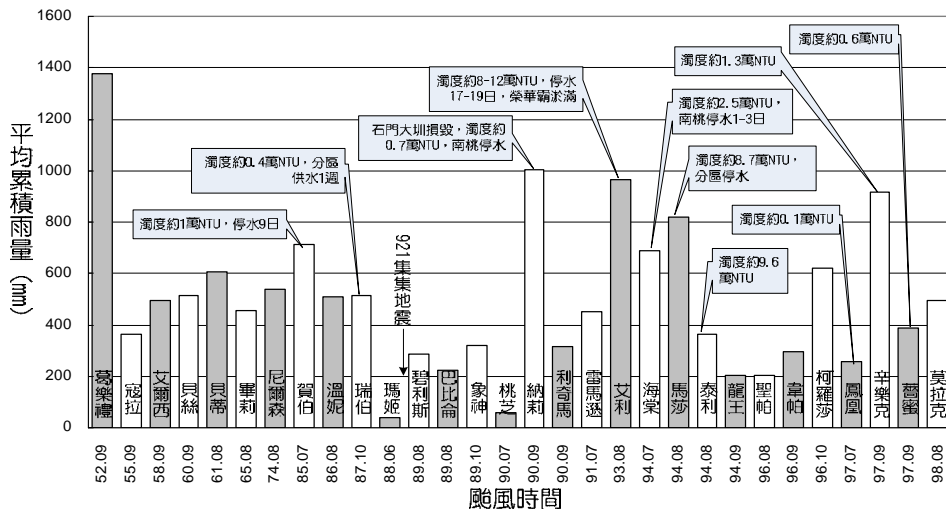
庫淤積量遽增，遂導致停水議題。此外，再比較近十年石門水庫集水區內之降雨有明顯增強之趨勢。尤以93年艾利颱風後，其年平均降雨更明顯大於台灣年平均降雨量，且約為世界平均值973mm之2.47倍。顯見近年氣候變遷所引致極端水文事件，易造成高濁度現象發生。遂此，自95年石門水庫集水區保育治理計畫啟動以來，颱風期間原水濁度是否控制於供水處理及符合飲用水質範圍內，實為集水區治理成效評估重點之一。

2.2 河道堆積

96年韋帕颱風後造成巴陵壩潰壩，致使長年累積於上游大量土砂運往下游且堆積於大漢溪河道，影響石門水庫庫容。97年6月筆者曾至巴陵壩上游玉峰溪及三光溪河道匯流口進行現況勘察(如圖四a)，當時玉峰溪溪水較三光溪混濁，



圖二 石門水庫歷年淤積量變化趨勢



圖三 石門水庫歷年主要颱風累積雨量與停水事件

地工技術

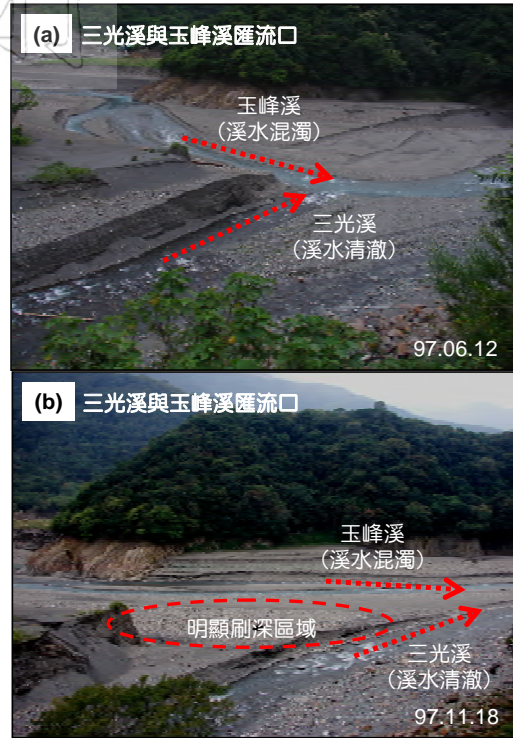
且匯流口有乙處明顯沙洲，沙洲土砂材料存在被沖刷、運移至下游庫區風險。97年11月筆者再訪此處匯流口，沙洲土方明顯刷深(如圖四b)，可見巴陵壩潰壩後，造成河床坡降重新調整，使得上游土砂持續運往下游，沖淤行為仍未達平衡狀態。故防汛期間河床變化能否穩定，後續土砂運移量將扮演重要角色。近年上游集水區水土保持是否能有效輔助支流調整主河道之土砂量達至供應需求，亦需納入集水區治理成效評估項目中。

三、集水區土砂監測

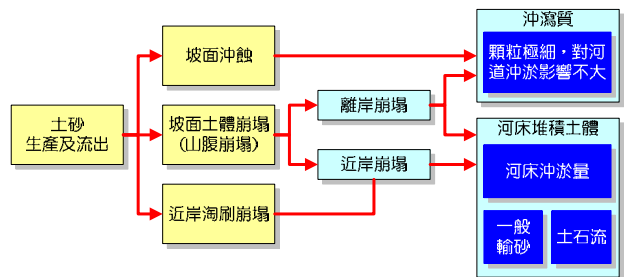
土砂監測應視整體集水區為完整分析單元，再依整治工程進駐前中後時間界點，據此階段性實施各式監測任務。於進行土砂監測工作可依集水區地文特性及水文條件，事前進行通盤性規劃及安排監測時程，以便有效掌握砂源分布及運移特性，建立時效性現地資料，並適切反應集水區保育治理成效。

集水區土砂監測著重於評估整治工程施作後對於「土砂生產」及「土砂流出」之控制體積量影響評估。一般而言，土砂生產係指坡面及河道土砂經各種外力作用而搬離原有位置之總量，係指非點源式土砂-坡面沖蝕(坡面土壤流失量)、點源土砂-崩塌(包含接近河岸及遠離河岸崩塌)及河道輸砂量(含土石流)等，如圖5。前述土壤沖蝕量與崩塌量經由河道沖刷、運移或其它外在營力，最後成為集水區之土砂流出量。

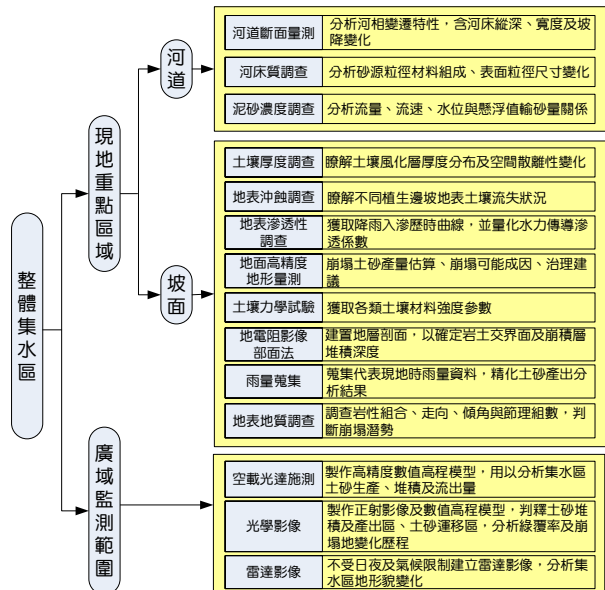
基於上述，吾人可依「河道」及「整體集水區」等不同空間尺度土砂生產區域，探討適用於各式區域之土砂監測方法及應用功能，用以監測土砂運移特性及發生區位，藉此評估整治工程施作前後土砂變化量。圖六為土砂監測方法之應用功能分類圖；其中「坡面」及「河道」等兩區域，係派遣人員進行現地調查或例行採樣，觀測地點受限於人力、時間、預算、交通及生命與財產風險等因素，故無法大範圍作業；但調查結果仍可直接瞭解當地土壤、地質特性及地貌實際情況，甚至可觀測較細微地形變化；而「整體集水區」面積則大於並涵蓋前述兩者區域，應採遙測方式方得以順利完成任務，而優勢在於能定時、定域觀察。此外，資料具時間與空間連續性與保存



圖四 巴陵壩舊址上游玉峰溪及三光溪匯流口照片



圖五 土砂生產與流出示意(重繪自水土保持局，2008)



圖六 土砂監測方法之應用功能分類

性，並可突破野外踏勘所無法達到的限制，如地形崎嶇險峻、山高水深之處等；同時能於短時間內進行全流域重覆性監測及評估某一時期內土砂生產及輸送量(蕭震洋等人, 2009; Avian et al., 2009; Lin, 2010)。

四、集水區治理成效分析

本節根據石門水庫集水區歷年各式土砂環境監測成果(水土保持局, 2011b)，利用多元尺度監測技術並配合現地監測：從坡面至河道，由廣域至局部區域，分就「崩塌面積復育」、「土壤沖蝕抑制」、「河道輸砂變化」等課題進行分析；最後，再以「蘇樂集水區」做為分析案例，逐步深究並具體量化反應集水區治理成效。

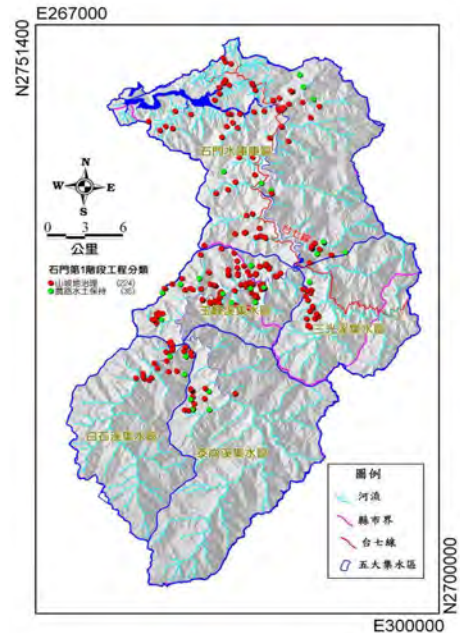
4.1 崩塌面積復育

根據水土保持局(2011)研究報告指出石門水庫集水區第1階段整治工程其主要以山坡地治理及農路水土保持等人為復育方式為主，並針對重點崩場地分期分年分區進行整治，如圖7所示。緣此，為瞭解95年第1階段整治工程進駐後，集水區崩場地「人為」以及「自然」復育時空間性差異程度，乃藉由多時期重大土砂災害之衛星影像判釋崩塌復育地圖層，進行兩者比較，其分析結果如圖八所示。由圖可知，自整治計畫於95年開始實施，皆以人為復育高於自然復育之方式來進行，尤以97年薔蜜颱風後至98年莫拉克颱風前最為明顯，而人為復育平均約大於自然復育1.8倍，據此充份顯示人為治理介入確實加速集水區崩塌植生復育。

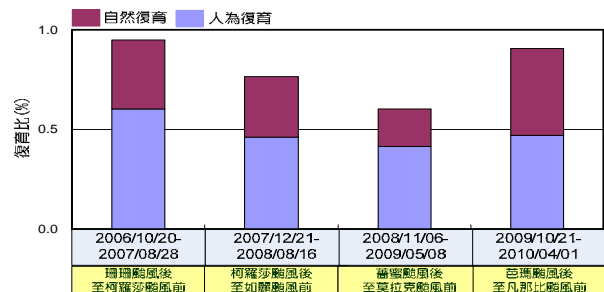
4.2 土壤沖蝕抑制

為探討石門水庫集水區內地表沖蝕深度與累積降雨特性之關係，並釐清保育治理對土壤沖蝕之抑制成效，故蒐集石門水庫集水區境內55處歷年土壤沖蝕量監測資料(水土保持局, 2011b)，藉以評估保育治理對於抑制土壤沖蝕之效益。圖九及圖十分別為五大集水區及各類型邊坡之累積雨量與新增沖蝕量曲線圖。由圖可以發現整治工程密度愈高(如圖六)，相同累積降雨量引致土壤沖蝕深度愈小，以玉峰集水區最為顯著；此外，就各類型邊坡而言，則以整治邊坡最

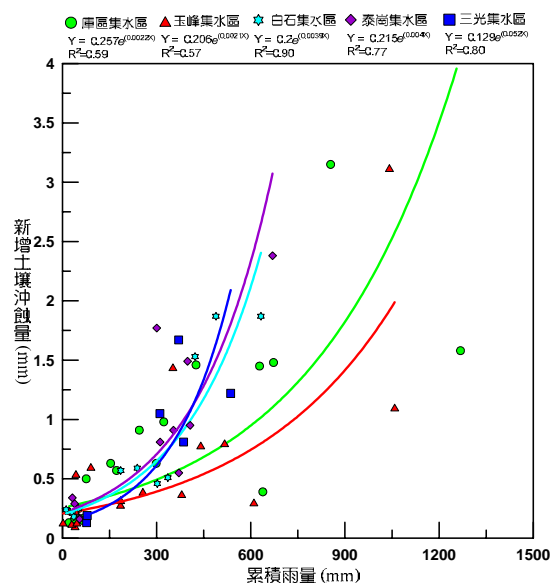
佳，其次為自然邊坡，最後為裸露邊坡；再比較相同累積雨量引致土壤沖蝕量，整治邊坡相較於非整治邊坡，土壤沖蝕最大抑制倍率可達2倍以上，顯示坡面整治後確實能改善土壤流失狀況。



圖七 石門水庫集水區整治工程空間分布



圖八 集水區崩場地人為及自然復育比較



圖九 五大集水區之累積雨量與新增沖蝕深度關係

地工技術

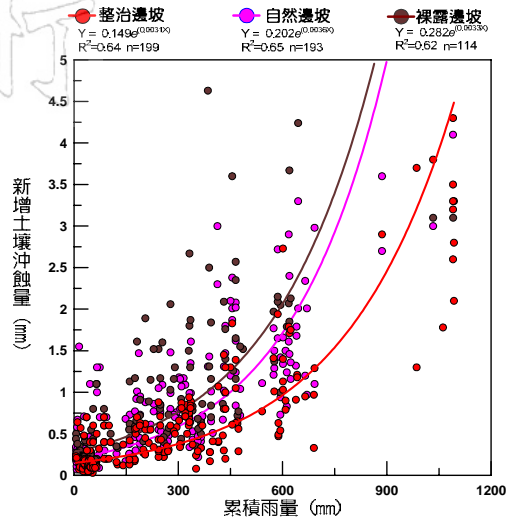
4.3 河道輸砂變化

本節利用巴陵壩舊址上游玉峰泥砂流量站之歷年流量及懸浮值資料，探討集水區土砂生產受天然颱風事件及人為治理造成集水區泥砂生產環境及輸砂行為變化影響，分析結果如圖十一所示。圖中顯示石門水庫集水區第1階段整治計畫(民國95-98年)：集水區雖受密集颱風及豪雨等災害事件影響，高流量下含砂濃度仍大致與過去相同，但於中低流量下玉峰含砂濃度則約為整治前之3/10，顯示第1階段保育治理計畫，已發揮整治效益。此外，再藉巴陵壩舊址上游玉峰溪歷年各次河道断面資訊(水土保持局，2011)，根據工作断面法推估各河段土方沖淤量如圖十二所示，由圖可知，目前玉峰溪河道其主流匯流口大致沖淤平衡，惟接近原巴陵壩舊址附近河道仍呈現下刷狀態，表示上游集水區保育治理效應已逐漸減緩巴陵壩潰壩後對於河相變化之衝擊，並減低水庫庫容淤積潛勢之虞。

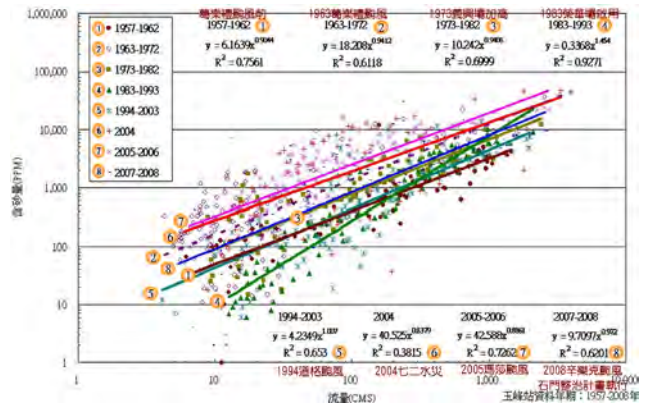
4.4 治理成效案例分析

本文案例分析以位於石門水庫集水區中部之「蘇樂集水區」為例，細究其整治後坡面及河道土砂運移量，據此評估河道沖淤變化；並具體量化說明集水區保育治理成效，其蘇樂集水區分布如圖十三所示；該集水區自93年艾利颱風後，共產生22個崩塌地，總崩塌面積約21.67公頃，佔石門水庫庫區總崩塌量之3.5%，又以蘇樂溪距河段右岸下游1.3公里處之乙處大型崩塌規模最大且最為明顯，亦為主要土砂供應源區，目前已投入大量整治工程，為境內具指標性重要治理集水區。因此，透過多時期空載LiDAR施測產製高精度數值地形及同步航拍，可用於分析坡面土砂主要供應來源、溪床是否有下蝕現象及防砂設施是否有達其攔阻成效。

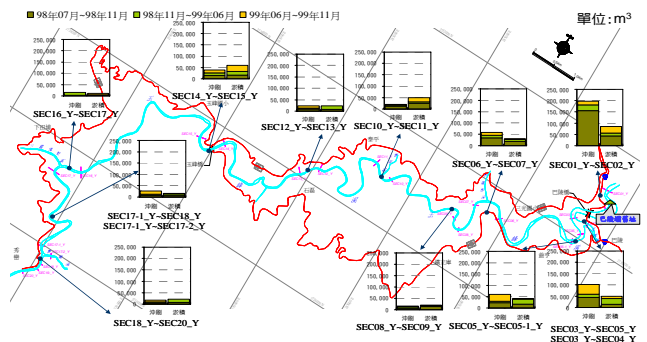
經分析結果顯示，95年6月至97年8月間溪床中游有明顯下刷現象，但於97年8月後新增防砂設施減緩改善河道坡度且穩固溪床後，已無下蝕現象且流心穩定，如圖十四至圖十五；97年11月至98年10月間，接近大型崩塌地溪床上游側至下游側間，土砂產量有明顯減少現象；經檢核相關工程資料得知(水土保持局，2011)，因本區域防砂設施已淤滿而影響溪流原有流路，且上游大



圖十 各類型邊坡之累積雨量與新增沖蝕深度關係



圖十一 不同時期玉峰溪河道輸砂變化曲線(摘自水土保持局，2011)



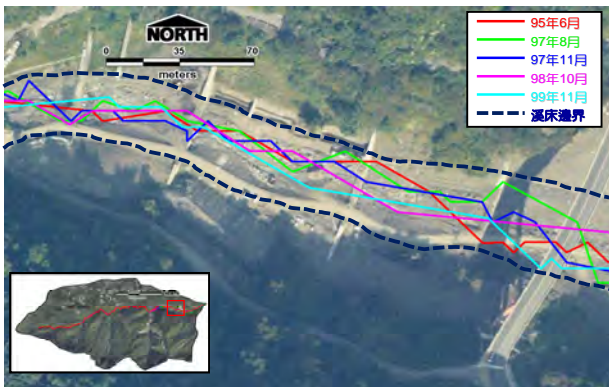
圖十二 玉峰溪歷次河道断面沖淤土方

崩型場仍持續有土砂產出；為減低土砂災害發生之虞，曾於98年1月開始進行溪床清疏，以保持溪床水流暢通且維持防砂壩之功能；98年10月後迄今坡面無明顯土砂產出、溪床亦無明顯下蝕現象且溪床防砂設施有明顯土砂堆積情況，顯示蘇樂集水區已有良好治理成效。經比較治理前後，土砂總生產量已大幅下降約31%，顯示目前治理成效確實良好，但上游大型崩塌地具有早期崩塌

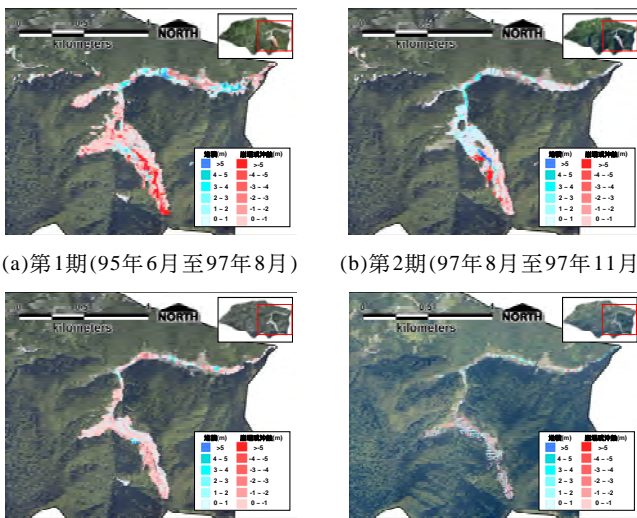
堆積之潛在大量不穩定土方，建議仍需持續進行監測。同時，土砂攔阻率已由35%增加至65%，顯示防砂設施已能有效抑制土砂流出量，達至預期整治標的，如圖十六所示。



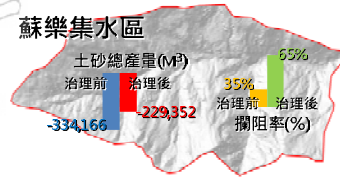
圖十三 蘇樂集水區地理位置



圖十四 蘇樂集水區治理後流心線變化圖



(a) 第1期(95年6月至97年8月) (b) 第2期(97年8月至97年11月)
(c) 第3期(97年11月至98年10月) (d) 第4期(98年10月至99年11月)
圖十五 蘇樂集水區之土砂運移分析成果圖



圖十六 蘇樂集水區治理前後土砂總產量及攔阻率

五、結論與建議

本文藉由歷年多期集水區實際監測數據，並以境內重要治理區域為案例分析，以確實呈現並驗證說明保育治理成效。茲提出相關結論與建議，供作未來水庫治理規劃參考，分述如下：

1. 經分析顯示，自95年第1階段整治工程進駐後，以人為復育優於自然復育，尤以97年蓄蜜颱風後至98年莫拉克颱風前最為明顯，充份顯示人為治理介入確有整治成效。

2. 由蘇樂集水區治理案例分析結果，吾人可瞭解整治後確實能砂設施減緩改善河道坡度且穩固溪床，以及流心穩定；經比較治理前後，土砂總生產量已大幅下降，達至預期整治標的。

3. 透過石門水庫集水區歷年治理經驗，建議未來全台集水區保育治理計畫，除有工程計畫實施外，應從工程總成本從中編列適宜之監測計畫，期能兩項計畫配合形成互助機能，確保工程品質及評估工程之完善，靈活調整最適合治理工法、整治經費比例以及區位規模，以防治土砂災害發生。

誌謝

感謝行政院農業委員會水土保持局，提供計畫相關遙測及監測資訊，作者深表謝忱。

參考文獻

水土保持局(2011)，石門水庫集水區土砂災害歷程分析。
 水土保持局(2008)，集水區整體調查規劃參考手冊。
 蕭震洋，林伯勳，鄭錦桐，辜炳寰，許偉城，冀樹勇(2009)，「應用光達技進行集水區土砂運移監測及攔阻率評估」，中興季刊，第105期，第17至25頁。
 Avian M., Kellerer-Pirklbauer A., And Bauer A. (2009), "LiDAR for Monitoring Mass Movements in Permafrost Environments at the Cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, pp. 1087-1094
 Lin, Bor-Shiun (2010), "Estimation of Sediment Discharge and Trapping Efficiency in Shih-Men Watershed from LiDAR Technology", *The Young Southeast Asia Geotechnical Conference*, Taipei, Taiwan, May, 9~12.