

石門水庫集水區國有林班地土砂 整治成效評估

許振崑* 蕭震洋** 林伯勳*** 陳俊愷** 張玉堦****
張綸纖***** 李膺贊*****

摘要

為完整且量化呈現石門水庫上游集水區國有林班地工程之六年整治計畫期間（民國 95 至 100 年度）整治成效，本文彙整石門水庫集水區歷年遙測及現地監測資料，並分別估算國有林班地 6 個有效集水區治理前後之土砂產量，且納入考量水文條件並符合林務局林班地整治評估需求之「土砂產量整治率」作為成效評估指標，以在同一降雨條件下實質量化評估整治成效。分析結果顯示，「土砂產量整治率」均高於 70%，且整體平均值為 89%，各治理集水區之土砂生產量較治理前均明顯減少，尤以 120 林班地有效集水區之整治減少土方產量為最高，達 32.9 萬方，顯見林務局石門水庫整治計畫工程進駐後確有整治成效。

關鍵字：石門水庫集水區、有效集水區、土砂產量整治率、土砂產量、整治率

一、前言

國有林地常位於偏僻之陡峻山區，自 921 大地震後，地層鬆動，豪雨事件後，常引致大小不一之崩塌與災情；因地處偏僻、海拔高且坡度陡峻，人力機具不易到達，故與一般山坡地災害處理方式並非完全一致。然而，民國 93 年艾利颱風侵台，造成全國各地嚴重災情，尤以石門水庫因土砂災害而濁度上升及漂流木等因素，造成水庫及淨水場長時間停止供應水源，影響大台北及

桃園地區民生與工業供水情形，損失嚴重（林務局，2011）。

為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，林務局依據民國 95 年 1 月公告之「石門水庫及其集水區整治特別條例」，依該條例第三條研擬「石門水庫及其集水區整治計畫」，自民國 95 年度迄今辦理多處國有林班地災害治理，以加快執行水庫集水區治理速度，降低缺水風險為目的。「石門水庫及其集水區整治計畫」共分

* 中興工程顧問社防災科技研究中心副工程師
** 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
**** 中興工程顧問社防災科技研究中心副經理
***** 行政院農業委員會林務局新竹林管處治山課技士
***** 行政院農業委員會林務局新竹林管處治山課課長

兩階段進行，而林務局所負責工作係隸屬於水庫集水區保育計畫分項計畫下，而林班地治理特性主要在於減少土砂量，多以柔性工法及復育造林為手段，並以有效減少土砂生產，控制土砂流出量為目的。

一般而言，「計畫成效」評估可分成事前、事中、事後三階段評估，本文屬計畫執行後之「事後評估」，以量化治理後國有林班地集水區土砂整治成效為目的，並透過遙測及現地監測等方式，配合治理工程進駐時間，藉由治理前後之土砂產量相較值，並納入考量降雨特性之「土砂產量整治率」作為評估指標，用以明確說明工程治理後土砂減量控制情形以及整治成效之優劣。

二、國有林班地整治成效評估方法

本文首先透過有效集水區分區概念進行分析範圍劃分，接著，以國有林班地治理工程進駐時間為界點，並選取擬進行評估整治成效之有效集水區，最後，分別計算治理前後降雨引致土壤沖蝕量以及地形變化劇烈區域之土砂產量。

（一）有效集水區分區

石門水庫集水區於主流、山坡地及林班地等之治理，皆分屬不同權屬機關，為有效釐清各單位權責範圍，可依溪流線及各權屬機關治理權責範圍交接處為治理成效評估界點，並往上游劃設有效集水區，將可分別評估不同治理權責單位之整治成效（概念如圖1）。

本文依上述分區概念，另參考兩萬五千分之一地形圖並設定林班地邊界與同一溪流線之交點，作為集水區溪流線出口下界，藉此方式產製石門水庫林班地內之有效集水區圖層，並將不屬於封閉集水區之「殘流域」及不具林班地代表性之「林班地面積未達 50% 之集水區」等兩者予以剔除，結果於石門水庫林班地內共產製 2,342

個有效集水區（如圖2），面積介於 0.058~22.37km² 之間，佔石門水庫國有林班地面積 97.08%，其總面積達 527.9km²。

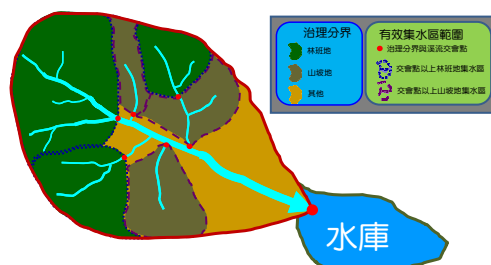


圖1 集水區土砂整治成效分區示意圖

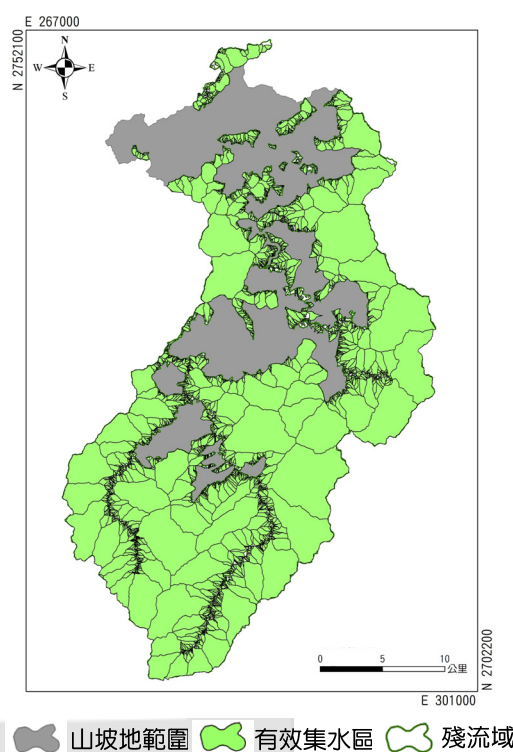


圖2 石門水庫林班地內有效集水區分布圖

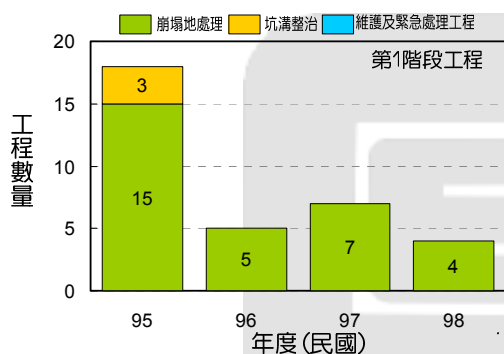
（二）國有林班地整治成效分析區位

評估國有林班地整治成效前，需先進行集水區土砂產量分析區域篩選。首先，選擇林務局林班地治理工程點位坐落之有效集水區，其次，考量土砂產量評估所需基礎資料之有無，故優先剔除無數值高程資料之集水區，接著，參考工程資料之開工、竣工時間以區別治理時間界點，最

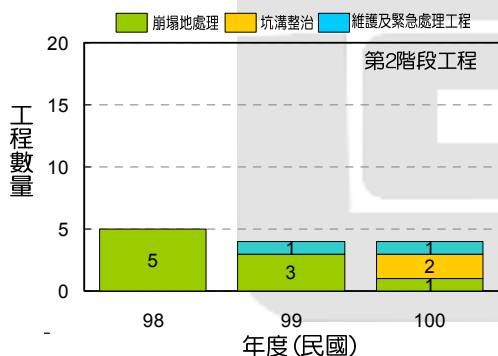
後，透過各單位歷年數值高程、降雨量及土壤沖蝕量等資料，進行有效集水區內之治理前後土砂產量估算，依序說明如下。

1. 國有林班地治理工程資料蒐集

蒐集石門整治計畫期間林務局工程資料並統計工程類型及數量發現，民國 95 至 100 年間共計有 47 件工程，工程類別含「崩塌地處理」、「坑溝整治」以及「維護及緊急處理工程」等三種；其中第 1 階段（民國 95 年至 98 年）工程有 34 件，第 2 階段（民國 98 年至 100 年）工程有 13 件，兩階段治理重點均以崩塌地處理為主，其整治工程數量比較，如圖 3 所示。



(a) 第 1 階段（民國 95 年至 98 年）



(b) 第 2 階段（民國 98 年至 100 年）

圖 3 民國 95 至 100 年整治工程數量比較圖

2. 分析區位選取

針對上述石門水庫集水區國有林班地既有工程分布資訊，先確定林務局曾進行治理之有效集水區，再套疊與各單位歷史數值高程資料重疊區

域（如表 1），以供後續作為本文案例分析區域；結果發現，共計 6 個有效集水區可進行治理前後之土砂產量分析，其分別坐落於 120、152 及 155 林班地範圍內，相關地理位置如圖 4 所示；同時為釐清工程實際進駐時間，除參考工程資料中之開工及竣工日期外，並檢核比對各期航照圖是否正確顯示該工程結構物影像，最後選擇較接近開工時間之拍攝航照日期作為治理時間界點（如圖 5），依此，則可作為後續治理前後土砂產量計算界點判定之依據。上述有關集水區土砂產量分析區域選擇流程如圖 6，而選出有效集水區相關資訊如表 2 所示。

表 1 數值高程資料屬性表

項次	施測或拍攝時間	執行單位	計畫/資料名稱
1	民國 91 年至 93 年	內政部地政司	民國 93-95 年度「高精度高解析數值高程模型建置計畫」
2	民國 97 年 11 月 6 日及 11 月 15 日	農委會水土保持局	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
3	民國 98 年 7 月 17 日及 7 月 23 日	農委會水土保持局	石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討
4	民國 99 年 11 月 9 日及 11 月 12 日	農委會水土保持局	石門水庫集水區土砂災害歷程分析

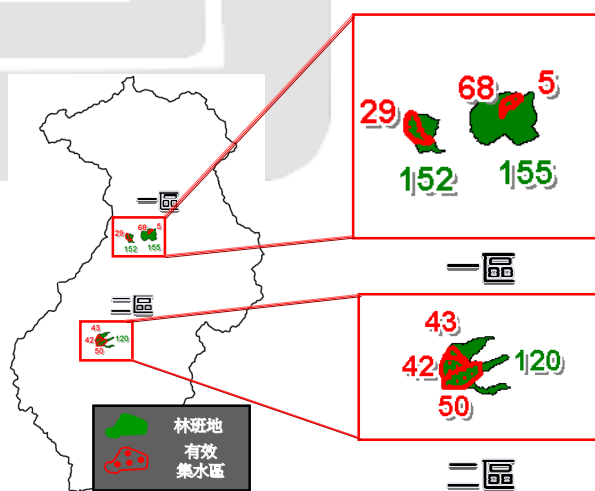


圖 4 6 個有效集水區地理位置圖

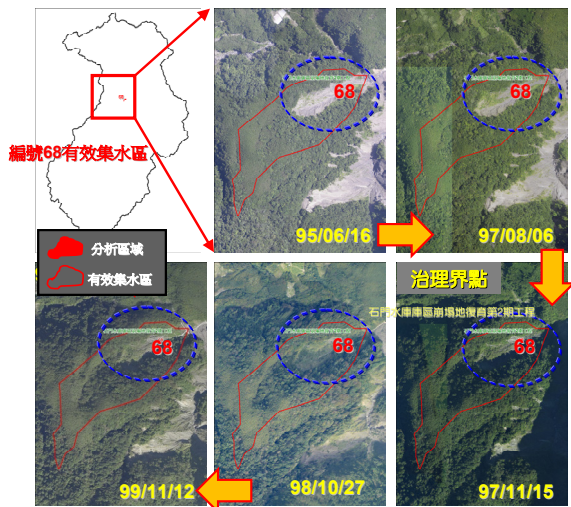


圖 5 治理時間界點判定示意圖

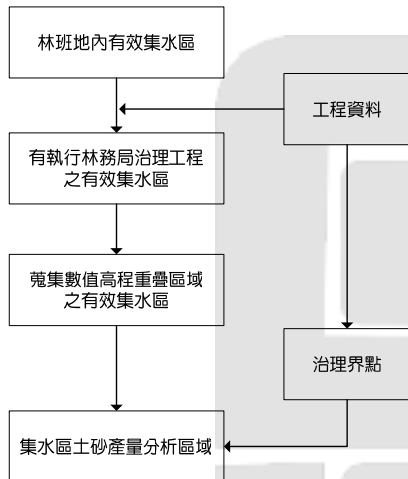


圖 6 集水區土砂產量分析區域選擇流程圖

表 2 各分析有效集水區之治理時間界點一覽表

項次	分屬區塊	有效集水區編號	坐落林班地編號	治理時間界點
1	第一區塊	5	155	97/11/15
2		68		97/11/15
3		29		97/11/15
4	第二區塊	42	120	98/7/23
5		43		98/7/23
6		50		98/7/23

(三) 集水區土砂產量

集水區土砂產量包含集水區植生區域之「土

壤沖蝕量」以及非植生區域之「地形變化劇烈區域」土砂產量；集水區土砂產量計算公式如式 1，而土砂產量計算流程如圖 7 所示。

$$V_T = V_S + V_{WSY} \quad (1)$$

式中 V_T ：集水區土砂產量； V_S 為集水區土壤沖蝕量； V_{WSY} 為集水區地形變化劇烈區域土砂產量。

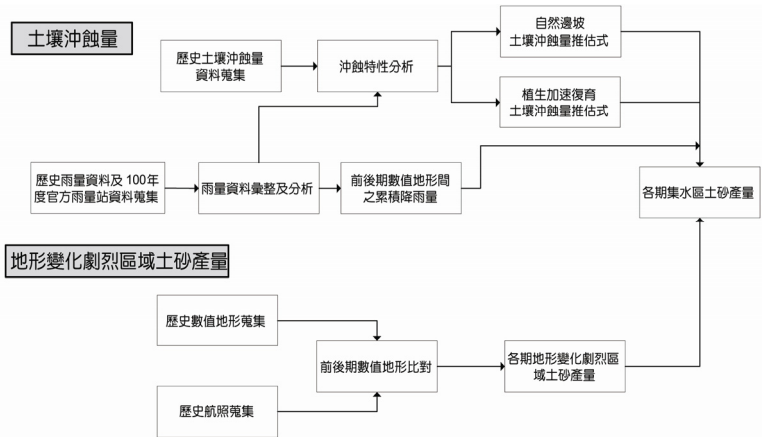


圖 7 集水區土砂產量計算流程圖

1. 集水區土壤沖蝕量 (V_S)

彙整地調所 (2008)、水利署 (2009)、水保局 (2011) 及林務局 (2011) 等公部門於石門水庫集水區歷年土壤沖蝕針監測調查資料，並搭配監測期間之雨量資料，分別建立植生覆蓋區內植生加速復育邊坡及自然邊坡等兩類型態之土壤沖蝕量與雨量之關係式，如式 2 及式 3，並繪製歷次新增土壤沖蝕深度 (X) 與累積雨量 (Y) 關係圖，如圖 8 所示。

(1) 植生加速復育邊坡：

$$Y = 0.0084X^{0.7321} \quad R^2 = 0.58 \quad n = 290 \quad (2)$$

(2) 自然邊坡：

$$Y = 0.0135X^{0.7204} \quad R^2 = 0.62 \quad n = 281 \quad (3)$$

式中 Y：新增土壤沖蝕深度 (mm)；

X：單場降雨累積降雨量 (mm)；

n：總樣本數。

透過上述計算公式，可用以估算某個期間單場降雨或連續降雨所引致之土壤沖蝕量，據以區分不同植生邊坡於治理前後所佔之土壤沖蝕量體。

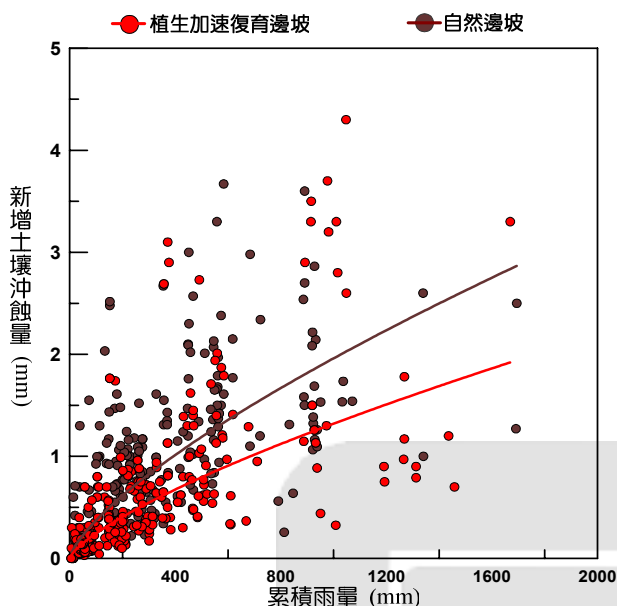


圖 8 不同植生邊坡新增土壤沖蝕量與累積雨量關係圖

2. 集水區地形變化劇烈區域土砂產量 (V_{WSY})

所謂「地形變化劇烈區域」土砂產量來源係為坡面崩塌及河道下刷等地形變化劇烈區域。透過比對前後兩時期數值高程變化量，判釋地形變化劇烈區域之土砂材料供應來源與堆積區域，進而估算其集水區土砂產量。其中資料比較計算方式係以後期數值高程減去前期數值高程，若所得網格內數值為負值即為崩塌或下刷之「土砂流失」，反之，正值即為「土砂堆積」；「無資料」表示網格無數值高程資料，故不納入計算，如圖 9 所示；再乘上數值地形網格面積大小，即為單一網格之地形變化體積量（蕭震洋等人，2009；水保局，2011；林務局，2012）。

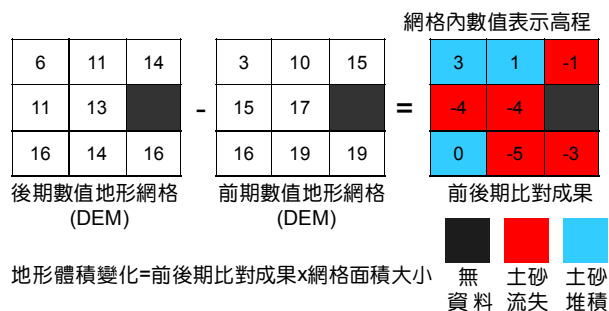


圖 9 前後期數值高程比對方式示意圖
(修改自蕭震洋等人，2009)

三、集水區土砂產量整治率計算

當分析區位選定及土砂產量計算完成後，配合治理時間界點及期間雨量資料，即可計算集水區土砂產量整治率，進以比較說明工程治理前後之優劣。以下說明集水區土砂產量整治率分析重點與評估方式。

(一) 治理前後集水區土砂產量計算

本文集水區治理前及治理後之土砂產量相關說明如下：

1. 治理前土砂產量

治理前地形變化劇烈區域高程變化量，加上自然邊坡土壤沖蝕量，用以代表治理前土砂產量，如圖 10 所示。

2. 治理後土砂產量

治理後地形變化劇烈區域高程變化量，加上自然邊坡及植生加速復育邊坡之土壤沖蝕量，用以代表治理後土砂產量，如圖 10 所示。

針對集水區內「植生區域」之「土壤沖蝕量」以及「非植生區域」之「地形變化劇烈區域」土砂產量推估，配合工程治理時間界點，分別計算分析區域之治理前、後土砂總產量。

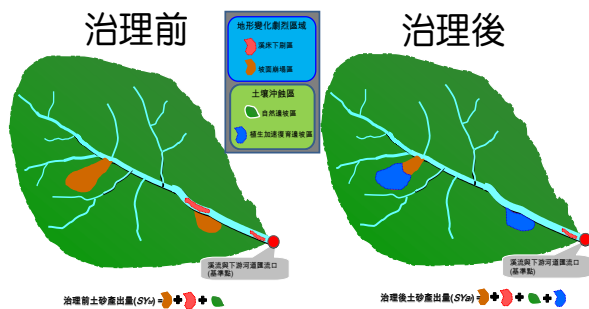


圖 10 集水區治理前後土砂產量計算示意圖

(二) 整治成效評估

因受限於氣候水文、地文及治理面積廣大等種種因素，林班地於「石門水庫及其集水區整治計畫」無法設定以一定量基準值或預定值，以表達計畫成效；由於林班地治理特性主要在於減少土砂量為主，故採用「土砂產量整治率」作為整治成效之評估指標（林務局，2012），其係以「治理前土砂產量」減去「治理後土砂產量」除以「治理前土砂產量」；土砂產量整治率亦即表示治理前後土砂產量減少之相較值；其值越高，則表示整治成效愈佳，公式如下：

$$SYCR = \frac{SY_{bf} - SY_{af}}{SY_{bf}} \times 100(\%) \quad (4)$$

式中 SY_{bf} ：治理前土砂產量 (m^3)

SY_{af} ：治理後土砂產量 (m^3)

$SYCR$ ：土砂產量整治率 (%)

惟治理前後土砂產量計算可能會受到降雨特性及統計天數不同而無法於同一基準下進行比較，故本文考量能呈現出統計期間之降雨動能、降雨強度、累積降雨量及降雨延時等特性的降雨逕流因子 Rm 之影響，進行治理前後土砂產量之正規化，故修正式 (4)，如下式：

$$SYCR = \frac{(SY_{bf}/Rm_{bf}) - (SY_{af}/Rm_{af})}{(SY_{bf}/Rm_{bf})} \times 100(\%) \quad (5)$$

式中 SY_{bf} ：治理前土砂產量 (m^3)； Rm_{bf} ：治理前降雨逕流因子 ($MJ \cdot mm/ha \cdot hr \cdot period$)；

SY_{af} ：治理後土砂產量 (m^3)； Rm_{af} ：治理後降雨逕流因子 ($MJ \cdot mm/ha \cdot hr \cdot period$)； $SYCR$ ：土砂產量整治率 (%)

因水利署及氣象局大多僅提供時雨量資料，故無法直接得到計算降雨逕流因子 $Rm (=I_{30})$ 所需的最大三十分鐘降雨強度 I_{30} ，故本文使用范正成 (1993) 所建立降雨總動能 E 及最大三十分鐘降雨強度 I_{30} 之關係式進行估算 (如式 6 至式 8)。

$$E = \sum_{m=1}^n e_m \cdot \Delta V_m \quad (6)$$

$$e = 0.099 + 0.06 \log_{10} I \quad (7)$$

式中 e 為每單位面積每單位深度之動能 ($MJ/ha \cdot mm$)； I 為降雨強度 (mm/hr)； m 為第 i 個雨場事件。

$$I_{30} = 44.87 \times \frac{(V+5)^{0.65}}{(D+1.68)^{0.59} \times [0.6 + \log \frac{(V+3.72)^{1.14}}{(D+1)^{1.07}}]} - 75.38 \quad (8)$$

式中 I_{30} 為最大三十分鐘降雨強度 (mm/hr)； V 為總降雨量 (mm)； D 為總降雨延時 (hr)。

四、土砂整治評估

本節針對前述 6 個有效集水區進行土砂整治評估，並參考石門水庫集水區及其周緣之水利署 20 個雨量站統計期間之雨量及雨場資料 (民國 94 年至 99 年)，利用權重分析進行各雨場雨量分析 (降雨歷線圖如圖 11 所示)，並透過工程資料與航照數化獲得治理前後不同植生邊坡所涵蓋區域範圍、面積大小及治理時間界點，進以推算各雨場於「植生加速復育邊坡」及「自然植生邊坡」兩類型邊坡所引致之土壤沖蝕量 (如圖 8)，並針對兩區塊治理前後之土砂量計算，結果列於表 3 至表 4 所示，而分析結果重點摘要說明如下：

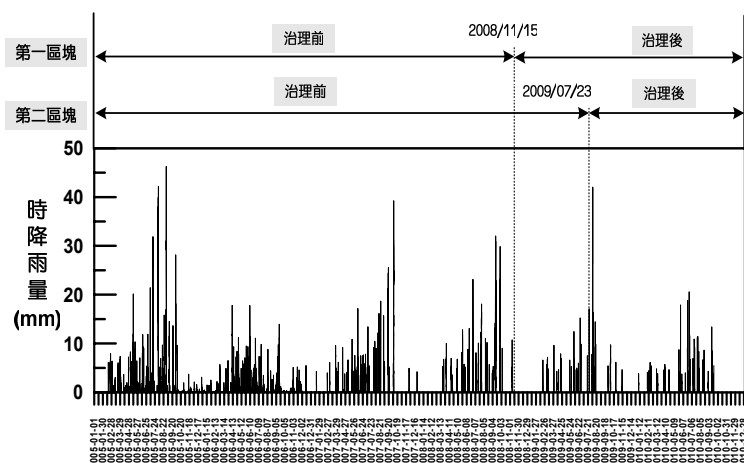


圖 11 兩大評估區塊治理前後降雨歷線圖

(一) 治理前後集水區土砂產量差異

整體上，集水區治理前主要以地形變化劇烈區域所貢獻之土砂產量所占比率較大，顯示其為土砂主要供應來源（如表 3 與表 4）。此外，因林班地工程治理係針對崩塌或裸露邊坡進行相關坡面整治，故治理後之土砂產量均呈大幅下降。

其中，治理前與治理後之土砂產量皆以坐落於泰崗集水區第 120 國有林班地內之編號第 50 號有效集水區土砂產量最高。另由治理前後土砂差異量變化結果，亦以該區之土砂減少量最大，達 329,503m³。此現象經評估後發現，係因該區為林務局坡面及河道治理等工程投入重點災區，故相對之土砂減少量甚為明顯。

(二) 土砂產量整治率

利用水利署石門水庫集水區周緣 20 站雨量資料分別進行治理前後之降雨逕流因子計算，再以克利金法 (Kriging) 空間內插獲得兩區塊治理前後之降雨逕流因子分布圖，如圖 12 及圖 13。然後，藉由土砂產量整治率計算方式，進行 6 個有效集水區之「土砂產量整治率」評估，相關計算成果如表 5 及表 6；同時，繪製治理前後之土砂生產量與土砂產量整治率成果圖，如圖 14 所示。由結果可知，各個有效集水區治理後相較於

表 3 第一區塊土砂產量分析成果表

項次	有效子集水區編號	坐落林班地編號	治理前 (民國 94 年 1 月 1 日~ 民國 97 年 11 月 14 日)			治理後 (民國 97 年 11 月 15 日~ 民國 99 年 11 月 12 日)				治理前後 土砂差異量 (m ³)
			地形變化劇烈區土砂產量 (m ³)	自然植生區土壤沖蝕量 (m ³)	總計 (m ³)	地形變化劇烈區土砂產量 (m ³)	植生加速復育區土壤沖蝕量 (m ³)	自然植生區土壤沖蝕量 (m ³)	總計 (m ³)	
1	5	155	8,274	84	8,358	8	3	34	46	8,312
2	68		150,856	3,478	154,334	167	51	1,243	1,462	152,872
3	29	152	190,300	8,611	198,912	714	92	2,895	3,702	195,210

表 4 第二區塊土砂產量分析成果表

項次	有效子集水區編號	坐落林班地編號	治理前 (民國 94 年 1 月 1 日~ 民國 98 年 7 月 22 日)			治理後 (民國 98 年 7 月 23 日~ 民國 99 年 11 月 12 日)				治理前後 土砂差異量 (m ³)
			地形變化劇烈區土砂產量 (m ³)	自然植生區土壤沖蝕量 (m ³)	總計 (m ³)	地形變化劇烈區土砂產量 (m ³)	植生加速復育區土壤沖蝕量 (m ³)	自然植生區土壤沖蝕量 (m ³)	總計 (m ³)	
1	42	120	74,608	11,364	85,972	185	131	2,393	2,710	83,262
2	43		163,076	3,849	166,926	75	318	604	998	165,927
3	50		315,011	19,163	334,174	257	179	4,234	4,671	329,503

治理前之土砂生產量明顯大幅減少，而土砂產量整治率均達 70% 以上，其中以坐落於 155 號林班地之編號 5 號有效集水區之土砂產量整治率最

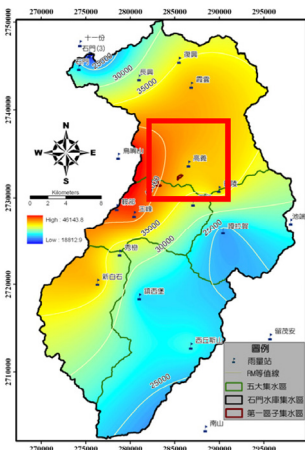
高，達 97%；其次為坐落於 155 號林班地之編號 68 號有效集水區；整體上，6 個有效集水區之土砂產量整治率平均為 89%，顯示治理有其成效。

表 5 第一區塊有效集水區土砂產量整治率成果

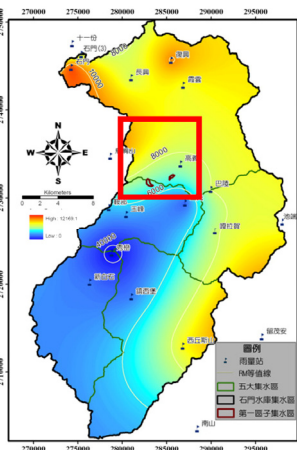
項次	有效集水區編號	治理時間界點	坐落林班地編號	治理前 (民國 94 年 1 月 1 日~ 民國 97 年 11 月 14 日)		治理後 (民國 97 年 11 月 15 日~ 民國 99 年 11 月 12 日)		土砂產量 整治率 (%)
				土砂 生產量 (m^3)	降雨 逕流因子 Rm	土砂 生產量 (m^3)	降雨 逕流因子 Rm	
1	5	民國 97 年 11 月 15 日	155	8,358	37,380	46	6,900	97%
2	68			154,334	37,587	1,462	6,840	95%
3	29		152	198,912	40,366	3,702	6,919	89%

表 6 第二區塊有效集水區土砂產量整治率成果

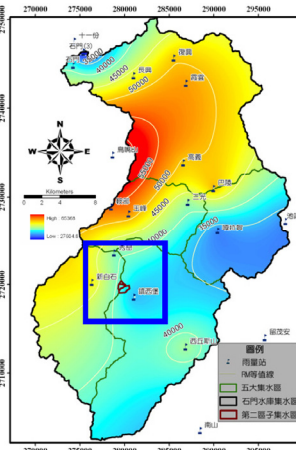
項次	有效集水區編號	治理時間界點	坐落林班地編號	治理前 (民國 94 年 1 月 1 日~ 民國 98 年 7 月 22 日)		治理後 (民國 98 年 7 月 23 日~ 民國 99 年 11 月 12 日)		土砂產量 整治率 (%)
				土砂 生產量 (m^3)	降雨 逕流因子 Rm	土砂 生產量 (m^3)	降雨 逕流因子 Rm	
1	42	民國 98 年 7 月 23 日	120	85,972	38,688	2,710	3,995	70%
2	43			166,926	38,668	998	3,923	94%
3	50			334,174	37,765	4,671	4,100	87%



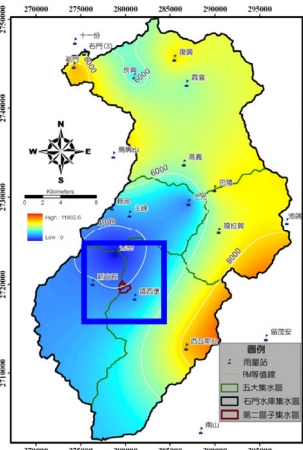
(a) 治理前
(民國 94 年 1 月 1 日~
民國 97 年 11 月 14 日)



(b) 治理後
(民國 97 年 11 月 15 日~
民國 99 年 11 月 12 日)



(c) 治理前
(民國 94 年 1 月 1 日~
民國 98 年 7 月 22 日)



(d) 治理後
(民國 98 年 7 月 23 日~
民國 99 年 11 月 12 日)

圖 12 第一區塊治理前後降雨逕流因子分布圖

圖 13 第二區塊治理前後降雨逕流因子分布圖

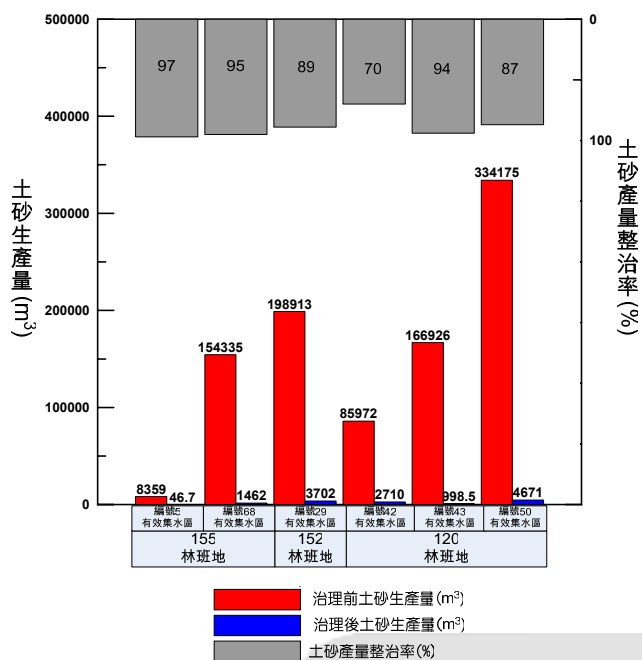


圖 14 本文經治理後 6 個林班地有效集水區分析成果圖

五、結論與建議

本文依工程整治進駐時間、多時期航照以及歷史數值地形資料，再透過土砂產量推估與分析，針對有效集水區進行治理前後土砂產量估算。此外，再考慮分析期間水文條件，同時納入含有降雨強度、降雨動能及累積雨量等降雨特性概念之降雨逕流因子，進而合理並實質量化石門水庫集水區國有林班地土砂整治成效。茲將結論及建議摘要敘述如下：

1. 第一區塊以第 152 國有林班地內之編號第 29 號其治理前後之土砂減少量達 195,210 m³，為本分析區塊整治成效較顯著者；第二區塊其治理前與治理後之土砂產量皆以坐落於泰崗集水區第 120 國有林班地內之編號第 50 號有效集水區土砂產量為鉅，及治理前後土砂減少量最為明顯，約可達 329,503 m³。
2. 各有效集水區之「土砂產量整治率」至少高於 70%，其中以坐落於 155 號林班地之編號 5 號

有效集水區之土砂產量整治率最高，達 97%；整體上，6 個有效集水區之土砂產量整治率平均為 89%，相關評估成果可有效彰顯近年林務局石門水庫整治計畫工程進駐後之治理成效，以及國有林班地土砂整治貢獻度。

3. 鑑於目前國內在集水區土砂評估及監測工作尚未建立統一規則或標準供遵循，導致各單位評估分析成果有所差異，實有必要建置一套適用於集水區土砂評估及監測工作之標準作業程序，輔以水庫永續經營發展以及治理規劃滾動檢討，希冀未來可依本文成果作為發展集水區健康檢查之整治成效評估及追蹤參考依據。

參考文獻

- 范正成、盧光輝（1993）臺北地區最大三十分鐘降雨強度與平均降雨強度之關係—量測及分析，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，1993 年 6 月
- 張三郎（1996）治山防洪計畫之展望，坡地防災研討會論文集
- 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
- 陳樹群（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
- 經濟部中央地質調查所（2008）易淹水地區上游集水區地質調查資料庫建置（第一階段 96 年度）—子計畫：集水區侵蝕及堆積量之調查與評估計畫
- 蕭震洋、林伯勳、鄭錦桐、辜炳寰、徐偉城、冀樹勇（2009）應用光達技術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 17-25 頁
- 行政院農業委員會水土保持局（2010）石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討
- 行政院農業委員會水土保持局（2011）石門水庫集水區土砂災害歷程分析
- 行政院農業委員會林務局（2011）石門水庫集水區林務局新竹林區管理處整治工程之環境生態監測及評估
- 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
- 許振崑、林伯勳、冀樹勇（2012）多元尺度監測評估石門水庫重點治理集水區整治成效，水保技術，第 7 卷，第 1 期，第 43-56 頁