

GIS 圖層及修正因子建置台灣通用土壤流失公式 (TUSLE) – 以石門水庫集水區為例

陳樹群^[1] 吳俊毅^[2] 吳岳霖^[3] 王士豪^[3]

摘 要 本研究選定較適合台灣地區使用之因子公式來建置台灣通用土壤流失公式 (TUSLE) 並估算台灣地區之土壤沖蝕量。經本研究修改後之降雨沖蝕性指數 R_m 計算式, 不但具有時變性, 更具有台灣降雨特性; 坡度 S 因子在本研究則採用 McCool *et al.* (1987) 之計算式, 用於台灣地區大部份皆屬陡坡地形之集水區時, 估算結果較 Wischmeier and Smith (1978) 所訂定之坡度因子更為理想; C 值在 NDVI 為負值時, 不採取線性之計算方式, 避免高估河川、建地等土壤沖蝕率低之地區; P 值則藉由台灣地區近期相關的田間試驗資料之蒐集、整理及歸納而獲得, 可作為決定水土保持處理因子時之參考。本研究亦建立 TUSLE 公式中, K_m 、 R_m 及 LS 等因子之 GIS 圖資, 可簡化台灣地區內各集水區土壤沖蝕量之估算流程及提昇正確性。

關鍵詞: 通用土壤流失公式、地理資訊系統、石門水庫。

Taiwan Universal Soil Loss Equation (TUSLE) Based on Revised Factors and GIS Layers- An Example from the Shihmen Reservoir Watershed

Su-Chin Chen^[1] Chun-Yi Wu^[2] Yueh-Lin Wu^[3] Shin-Hao Wang^[3]

ABSTRACT This study used factors and formulae suitable for Taiwan to establish Taiwan Universal Soil Loss Equation (TUSLE) and to estimate soil erosion. The revised equation of rainfall erosivity index, R_m , varies with time and possesses the rainfall characteristic of Taiwan. The formula of slope steepness factor, S , in this study was from McCool *et al.* (1987); the estimation results are better than that from Wischmeier and Smith (1978) when it is applied to the watersheds of steep topography in Taiwan. Not adopting linear equation to calculate the cover and management factor, C , when NDVI is negative could avoid overestimating the C values of areas of low soil erosion rate such as river, building land and so on. The support practice factor, P , determined using past research results conducted inland could be applied on conservation practices in Taiwan. The GIS layers of K_m , R_m and LS developed in this study can simplify the estimation procedures of soil erosion

-
- [1] 國立中興大學水土保持學系特聘教授兼系主任
Distinguished Professor and Chairman, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.
- [2] 國立中興大學水土保持學系博士班研究生 (通訊作者)
Doctoral graduate student, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C. (Corresponding Author)
E-mail: d9442006@mail.nchu.edu.tw
- [3] 國立中興大學水土保持學系碩士
Master, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan, R.O.C.

amount in every watershed in Taiwan, and raise the estimation accuracy.

Key Words: USLE, GIS, Shihmen reservoir.

一、前言

半世紀來，各國針對土壤沖蝕試驗及影響因子分析，進行相當詳細之研究，並且建立各類土壤沖蝕預估模式，除了能對土壤沖蝕潛勢加以預測外，並可提供災害防治工法之設置，針對土地合理開發利用加以評估與管制。台灣地區土壤沖蝕研究已有數十年，現階段多應用國外已開發之模式，諸如 USLE、RUSLE、AGNPS 及 WEPP 等模式，應用於台灣地區時，面臨陡坡地形與高降雨強度等區域特性，導致模式驗證檢定困難與估算結果不盡理想等缺陷。

通用土壤流失公式 (USLE)，係由 Wischmeier and Smith (1958) 收集全美數千個坡面保持連續兩年以上的休耕及裸露之標準試區資料，分析評估影響土壤流失量之因子後發展而得，目前雖廣為世界各國通用，但該公式發展源自美國平坦農地，在地形及氣候等條件均與台灣不同，因此應用到台灣地區時，應針對公式本身進行評估與修正。國內學者針對台灣本土之 USLE 計算因子進行研究，如萬鑫森、黃俊義 (1989) 依據 Wischmeier and Smith 的列線圖推算台灣 280 處土壤沖蝕指數 K_m 值；黃俊德 (1979) 利用基隆、新竹、台中、日月潭、高雄、恆春、花蓮及台東等八處測候所 20 年之自記日雨量資料，與全台 200 個雨量站之月雨量資料，利用迴歸方法推算完成台灣地區之降雨沖蝕指數圖 (R_m)；林俐玲 (1995) 則針對台灣坡地重要作物的作物管理因子 (C) 進行修正，並建立各縣市之容許土壤流失量；吳嘉俊 (1994) 則彙整分析台灣歷年來有關水土保持處理控制土壤流失效益的研究成果，訂定適合於台灣地區的水土保持處理因子 (P) 之初值。若針對以上之研究進行整合再融入新的分析工具，將可發展出適用於台灣地區之 USLE 模式。

地理資訊系統 (geographic information systems, GIS)，係一套能整合各項相關地理資料的資訊化作業系統，可有效地進行空間資訊的擷取、儲存、管理、分析及展示等，更可依特殊用途與其他資料連結，如防災科技、遙測、資料庫管理系統等技術，以改善各項空間事物與提升環境資源之使用效率與效果。近年來，地理資訊系統蓬勃發展，用來處理集水區複雜且龐大之地文、水文資料，劃分格區並演算格

區之各屬性資料之方法，不但大幅提升模擬之精度，更節省大量人力與時間，因此土壤沖蝕模式與地理資訊系統之結合，對於研究土壤沖蝕模式將更有助益。

二、研究方法

1. 研究模式架構

通用土壤流失公式 (USLE) 係由坡長 22.13m、坡度 9% 之均勻坡面，且坡面保持連續 2 年以上的休耕與裸露之標準單位試區-年 (plot-years) 所發展出來。Wischmeier and Smith (1958)，收集並分析美國 21 州 36 個地方，超過 7,500 個標準試區-年 (plot-years) 及 500 個集水區-年 (watershed-years) 的資料，重新評估各影響土壤流失量之因子後，發展成現今最為廣泛應用之通用土壤流失公式，其公式如下：

$$A = K_m \times R_m \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

其中 A 為每公頃之年平均土壤流失量 (ton/ha-year)； K_m 為土壤沖蝕性指數 (ton-ha-hr-year/MJ-mm-ha-year)； R_m 為年平均降雨沖蝕指數 (MJ-mm/ha-hr-year)； L 為坡長因子； S 為坡度因子； C 為作物管理因子； P 為水土保持處理因子。 L 、 S 、 C 和 P 因子，為任何組配條件下之土壤流失量與標準單位試區土壤流失量之比值，為無因次因子。

2. 模式參數設定

USLE 經由多年的發展，原有之架構雖然沒有改變，但對於各參數所引用之公式卻已針對不同集水區之特性做大幅度修正，本研究根據國內所調查之資料以及國外所推導之公式理論為基礎，修改 USLE 之計算方式，建立台灣地區適用性更高之 USLE 計算方法。

(1) 土壤沖蝕性指數 (K_m)

萬鑫森、黃俊義 (1989) 依據 Wischmeier and Smith 的列線圖推算出台灣 280 處土壤沖蝕性指數 K_m 值；謝兆申、王明果 (1991) 針對台灣地區土壤綜合調查分類出 81 種土類，並計算出各土類之 K_m 值，繪製台灣地區土壤分類圖。本研究利用其土壤分類圖，數化為全台灣地區之 K_m 圖層，配合萬鑫森、黃俊義 (1989) 所調查資料，互相對照後建立出 GIS 可計算之圖

層。

(2) 降雨沖蝕性指數 (R_m)

降雨沖蝕指數，若利用 Wischmeier and Smith (1958) 所提出最大 30 分鐘降雨強度 (I_{30}) 與降雨動能(E) 之乘積計算各單場降雨之降雨沖蝕指數，過程極為複雜，因此美國農部農業研究署 (U.S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service, 2002) 遂研究發展降雨量與降雨沖蝕指數之迴歸關係式，其公式如下：

$$R_{eq} = -823.8 + 5.213P_r \quad (2)$$

其中 R_{eq} (MJ-mm/ha-hr-year) 等同於 USLE 之降雨沖蝕指數； P_r 為年總降雨量 (mm)。

盧昭堯等 (2005) 則依據此概念，利用基隆、花蓮、台東、新竹、台中、嘉義及高雄等雨量站之歷年 (1975~2000) 降雨資料，研究台灣地區年總降雨量與年降雨沖蝕指數之關係，並建立適用於台灣地區之年總降雨量與年降雨沖蝕指數之迴歸關係式，該研究中依台灣地區之地形、地勢高低與降雨特性將台灣分成十個降雨氣候分區，如圖 1 所示。本研究根據盧昭堯等 (2005) 之研究資料，作為 USLE 在台灣地區計算降雨沖蝕指數之公式，其本身並未考慮降雨量分佈形態對土壤沖蝕之影響，只考慮年總降雨量與土壤沖蝕潛勢之關係，如表 1 所示。

(3) 坡長與坡度因子 (LS)

地形因子習慣使用 Wischmeier and Smith (1978) 所推導的公式：

$$LS = \left(\frac{X}{22.13}\right)^m (0.0654 + 4.56 \sin \theta + 65.4 \sin^2 \theta) \quad (3)$$

其中 X 為坡長的水平投影距離 (m)； m 為指數，當坡度大於 5% 時， $m=0.5$ ；5% 到 3% 時， $m=0.4$ ；3% 到 1% 時， $m=0.3$ ；小於 1% 時， $m=0.2$ ； θ 為坡度 ($^\circ$)。

許多學者針對坡度因子研究之結果顯示，坡度範圍在 0.1%~18% 之間，各線之交點在角度為 5.14 度 (9%) 之處，其坡度因子值為 1 (如圖 2 所示)，適用範圍在坡度 18% 以下，在台灣地區之適用性則有待研究；另有一類看法即土壤沖蝕量並非全然隨著坡度增加而遞增，可能為階梯狀之增加 (吳嘉俊, 1995)，或在達到某坡度後將隨著坡度而遞減 (Fan and Lovell, 1988)。

由於台灣地區多屬陡坡地，若在國內應用 Wischmeier and Smith (1978) 所訂定之坡度因子，陡坡計算有高估現象，因此本研究採取 McCool *et al.* (1987) 所建議較適用於陡坡地形之坡度因子來計算，其公式如式(4)所示。

表 1 台灣地區年降雨量與 R_m 之關係式 (盧昭堯等, 2005)

Table 1 Regression relationship between annual precipitation and R_m in Taiwan

降雨氣候分區	年總降雨量與年降雨沖蝕指數之關係	
	a	b
北部地區	0.01551	1.72
東北部地區	0.00022	2.19
宜蘭地區	0.00175	1.99
花蓮地區	0.01516	1.78
台東地區	0.05157	1.66
西北部地區	0.00500	1.92
中部地區	0.05557	1.63
西南部地區	0.01991	1.80
南部地區	0.11346	1.59
中部、中南部山區	0.35151	1.35

註： R_m 之單位為 (MJ-mm/ha-hr-year)， P 之單位為 (mm)

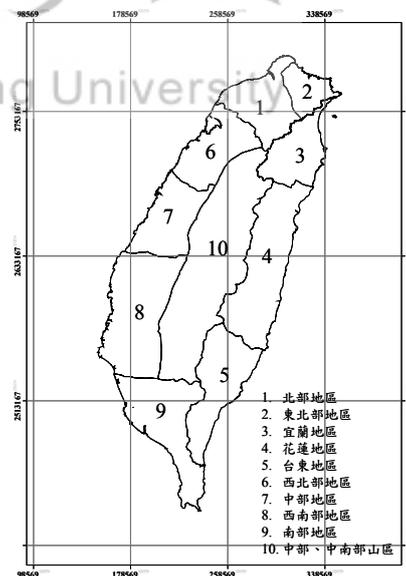


圖 1 台灣地區十個降雨沖蝕指數特性分區圖 (盧昭堯等, 2005)

Fig.1 Ten regions of rainfall erosivity index in Taiwan

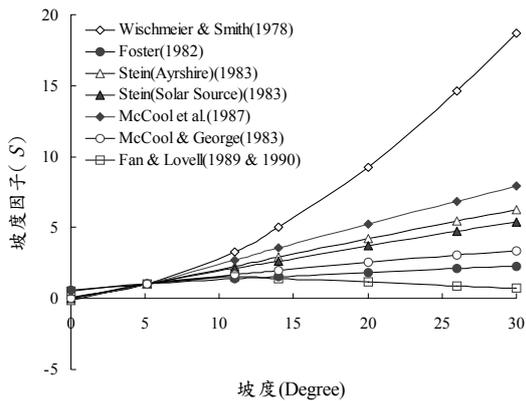


圖 2 坡度因子與坡度之關係圖（范正成，1995）

Fig.2 Relationship between slope steepness factor and slope

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03, \quad \theta < 9\%$$

$$S = (\sin\theta / 0.0896)^{0.6}, \quad \theta \geq 9\% \quad (4)$$

另外，本研究之坡長因子 (L)，係參考 USLE 之標準試區坡長為 22.13 公尺，故在 GIS 圖層上採用類似標準試區之網格大小 20 公尺來計算。

(4) 作物管理因子 (C)

林文賜 (2002) 利用 NDVI 值 (值域 -1~1) 反向配置求取作物管理因子 (C) 值，惟 NDVI 小於 0 時，表示地表為非植生情況，而非植生情況下之土地利用，則包含裸露地、水體以及建屋用地等，其中裸露地與建屋用地之 NDVI 值域重疊性高，但 C 值差異大。非植生情況下之土地利用種類，NDVI 通常為負值，出現正值情況亦可能是人為誤差等因素造成，比較建地、裸露地及水體三者之 NDVI 值出現統計次數後發現，建地及裸露地出現最多次數之 NDVI 值相似，但建地之 NDVI 值範圍較裸露地分散，此結果可能為建地顏色均一性較裸露地低，因此建地可吸收及反射之光譜波段特性較裸露地情況多，造成二者 NDVI 值集中與分散程度之差異性，而水體顏色之均一性高，因此 NDVI 值之集中趨勢更為明顯。統計水體出現最多次數之 NDVI 值，比建地及裸露地所出現最多次數之 NDVI 值大。因此本研究將 NDVI 值反向配置之計算方法予以修改，其公式如下：

$$\text{NDVI} \geq 0, \quad C = \left[\frac{1 - \text{NDVI}}{2} \right]^{1 + \text{NDVI}} \quad (5)$$

NDVI < 0, 建地等非裸露地, $C = 0.01$

裸露地, $C = 1.0$

在衛星影像處理技術尚未能有效分類裸露地及建屋用地之情況下，(5)式中裸露地，須經由人為判別方式予以定義，其餘 NDVI 小於 0 者，皆視為建屋用地或水泥地等敷蓋率佳，而非植生情況下之土地利用型態，此結果可避免錯估裸露地之土壤沖蝕量。

(5) 水土保持處理因子 (P)

吳嘉俊 (1994) 彙整分析台灣歷年來有關水土保持處理控制土壤流失效益的研究成果，訂定適合於台灣地區的水土保持處理因子 (P) 之初值。為讓決定 P 值時能有更多的參考依據，本研究蒐集台灣地區 1995~2005 年相關的田間試驗資料 (江清榮, 2005; 吳嘉俊, 2001; 吳嘉俊, 2002; 吳嘉俊等, 2003; 吳輝龍等, 1995; 林俐玲, 1996; 林俐玲, 1997; 林俐玲, 1998; 林俐玲, 1999; 林俐玲等, 2001; 張清寬等, 2002; 張清寬等, 2003; 張賢明等, 2001; 張賢明等, 2001; 陳慶雄等, 1999; 陸象豫等, 2003; 黃俊德等, 1995; 鄭慶生等, 1995)，整理歸納不同水土保持處理之抑制土砂成效 (陳樹群等, 2007)，並結合吳嘉俊 (1994) 所分析之台灣水土保持處理因子之初值，來完成台灣地區現階段之水土保持處理因子之 P 值，如附表 1 及圖 3 所示。由附表 1 可知在不同坡度下，不同水土保持處理之 P 值變化情形；由圖 3 則可知平台階段+全面除草、平台階段+局部除草、敷蓋區、內斜階段、等高密植、草帶法+敷蓋、攔砂圍籬及打樁編柵等 8 種處理之 P 值分佈情形及平均值，並可知此 8 種處理方法之總平均值為 0.279。此外，平台階段+全面除草、等高密植之 P 值變化範圍大，代表該處理受立地條件之影響較大；草帶法+敷蓋之 P 值變化範圍小，代表該處理較不受立地條件之影響。

P 值在物理意義上亦有遞移率 (sediment delivery ratio) 之特性，代表最終泥砂流失量與沖蝕量之比值，因此在水土保持處理方式混雜難以估算或集水區特大之情況下，建議可用遞移率取代之。

3. 台灣地區 USLE 各因子之圖層建立

本研究綜合上述之方法並結合 GIS 軟體，建立台

灣地區 USLE 各因子於 GIS 可用之網格計算圖層，如圖 4 所示。其中，土壤沖蝕性指數 (K_m) 及坡長與坡度因子 (LS) 等，屬於較不易隨時間而有所改變之因子。 K_m 係利用謝兆申、王明果 (1991) 之台灣土壤分佈圖，數化為向量檔格式後，並將計算之各種土壤 K_m 值建立於屬性資料內，再轉換為網格檔。 LS 圖層係利用農林航測所 1999 年製作之數值高程模型 (DTM)，配合公式於 ArcGIS 軟體內所製作出 LS 網格圖層。

降雨沖蝕性指數 (R_m) 及作物管理因子 (C) 則會隨著時間變動。本研究 R_m 係利用水利署網站提供之全台灣雨量站及中央氣象局所屬之北中南八個雨量站等，統計近 30 年之降雨資料後，參考盧昭堯等 (2005) 針對台灣十個降雨氣候分區所提出之公式，求出各雨量站歷年之 R_m 平均值，再採用地理統計之反距加權法製作出 R_m 網格圖層 (如圖 4(c))；亦可直接輸入模擬地區實際之年降雨量，以分析模擬區域不同降雨條件下之沖蝕量變化。地表植生覆蓋程度隨時間改變程度更大，且改變方式較難掌握，可能因為天災或人為等因素而改變，因此雖可計算出 C 值歷年之平均值，但較難說明變動之趨勢，因此實用性較差，故本研究遂未建立作物管理因子之歷年平均之網格圖層。

三、石門水庫集水區土壤沖蝕量

1. 研究試區概述

石門水庫集水區位於大漢溪上游，面積約為

75,929 公頃，為台灣第三大水庫。地理位置居於東經 $121^{\circ}10'15''\sim 121^{\circ}23'10''$ 及北緯 $24^{\circ}25'45''\sim 24^{\circ}51'20''$ 之間，分別與台北、宜蘭、台中及苗栗四縣相臨，行政區域主要隸屬桃園、新竹二縣，僅集水區東端的一小部分屬於宜蘭縣，大部分隸屬於桃園縣復興鄉及新竹縣尖石鄉 (如圖 5)。全區大都屬山岳地形，僅有西北端地勢較為低緩，為丘陵地形。海拔高介於 135 公尺 (石門水庫壩址) 至 3,529 公尺 (品田山) 之間，地勢由東南向西北傾斜。坡度小於 30% 者佔總面積之 10.2%，30~55% 者佔總面積之 29.3%，大於 55% 以上佔總面積之 60.5%。集水區年平均降雨量約為 2,350mm，多集中於夏季。本區地質岩性脆弱，復經強力擠壓破碎，地勢陡峻而強化河川侵蝕營力，河床兩側岩壁遂常發生崩塌，土層亦受嚴重沖蝕。以土壤部份而言，西北部之丘陵地主要為黃棕色紅壤，山區主要為石質土，其他地形尚包含有紅黃色灰壤、沖積土及黑色基性岩土等 (如圖 6)。

2. 研究材料

(1) 數值高程模型

單純描述三維高程點所組成之地表模型，不含地物或其他屬性之數值模型，稱為數值高程模型 (digital elevation model, DEM)。本研究所使用之數值高程模型為農林航測所 1999 年製作，解析度為 $20m \times 20m$ 。

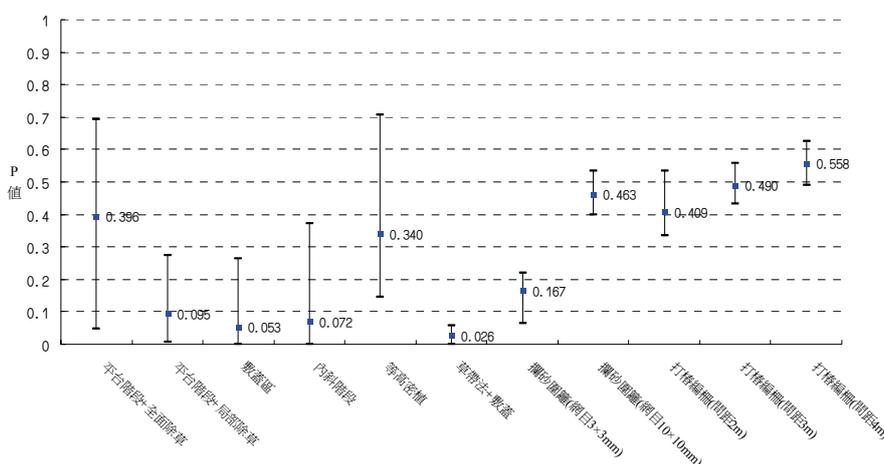


圖 3 各種水土保持處理之 P 值分佈圖

Fig.3 Distribution of P values of conservation practices

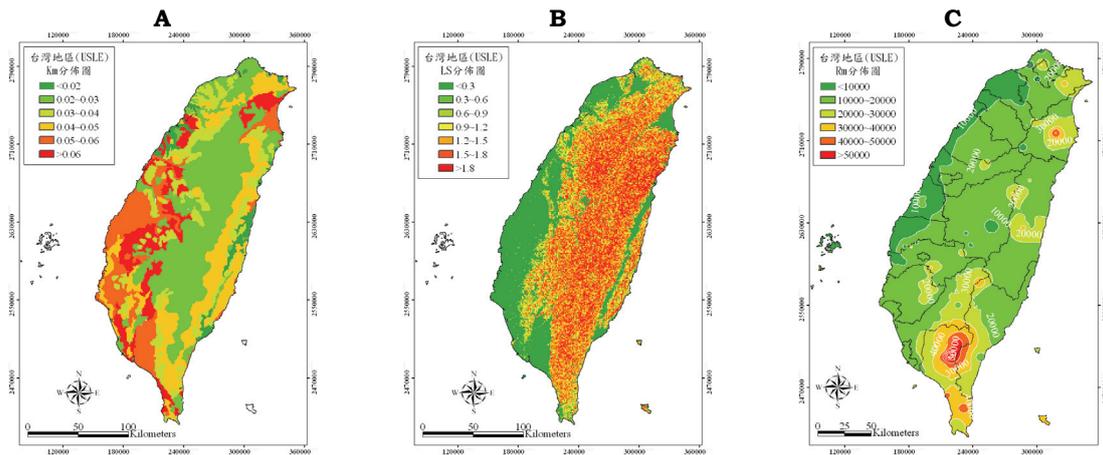


圖 4 台灣地區 USLE 各因子之圖層：(A) K_m ；(B)LS；(C) R_m

Fig.4 The layers of USLE factors in Taiwan : (A) K_m ; (B)LS; (C) R_m

(2) SPOT-5 衛星影像

SPOT-5 衛星於 2002 年 5 月 4 日發射升空，擁有 3 種光學儀器分別為 HRG (2 個)、VI 及 HRS。每 1 個 HRG 儀器分別擁有 2 個全光譜影像 (HM)、1 個多光譜影像 (HI) 及 1 個短波紅外線波段 (SWIR) 影像；其中，全光譜影像空間解析度為 5 公尺，多光譜影像空間解析度為 10 公尺，而短波紅外線波段空間解析度為 20 公尺。若利用兩組 HRG 感測器同時拍攝 HM 資料，再經過影像融合處理可以提昇其空間解析度到 2.5 公尺，稱為超解像模式 (supermode) 影像。經由各種波段計算結果，可分析地表地物覆蓋狀況，如利用近紅外光及紅光計算出 NDVI，可反映地表植生狀況。本研究使用之衛星影像圖為國立中央大學架設之接收站所接收之 SPOT-5 衛星影像，含原始之光譜波段等。

為瞭解不同土地利用之 NDVI 之差異性，本研究利用艾莉颱風後之石門水庫集水區航拍圖 5 張 (比例尺 1/5000，圖幅號碼 96221063、96221064、96221073、96221074)，數化時分成五種不同土地利用種類，分別為無樹冠農地、林地、建地、崩塌地及水體，利用這五種不同土地利用圖層萃取艾莉颱風後所拍攝之 NDVI 影像，並統計分析各土地利用種類與 NDVI 之關係，其結果如圖 7 所示。顯示各種土地利用種類與 NDVI 關係呈現區段之範圍分佈，植生情況下

之 NDVI 幾乎為正值，負值情況可能為數化之人為誤差或 NDVI 圖層受陰影及坡向等因素影響造成其值為負，假設若無誤差產生之情況下，比較林地與無樹冠農地之 NDVI 值可發現，林地之 NDVI 值比無樹冠農地之 NDVI 值來的集中且其值較大，而林地之植生覆蓋率程度通常比無樹冠農地大，顯見植生覆蓋率越佳者其 NDVI 值越大。

(3) 崩塌地圖層

本研究使用農林航測所於 2004 年艾利颱風後，依據石門水庫集水區之航空正射影像圖，所數化之崩塌地圖層，來判定集水區內之裸露地分佈。石門水庫集水區於 2004 年艾利颱風期間引發 959 處 598.1 公頃之崩塌地 (如圖 8)，其中玉峰溪集水區之崩塌案例佔總崩塌案例之 23.9% (217 處崩塌佔 108.1 公頃)、泰崗溪集水區之崩塌案例佔總崩塌案例之 30.6% (278 處崩塌佔 156.0 公頃) 及薩克雅金溪集水區之崩塌案例佔總崩塌案例之 19.9% (181 處崩塌佔 189.2 公頃) 等，此三子集水區乃石門水庫集水區主要土砂來源。

(4) 水文資料

本研究利用水利署水文水資源資料管理供應系統網站所提供之全台灣各雨量站資料，收集石門水庫集水區內及周圍共 18 處雨量站降雨資料，利用反距加權法來推估石門水庫集水區平均年總降雨量 (如表 2)。再依據本研究所使用之 R_m 計算式，由年總降雨量 (P) 推求年降雨沖蝕指數 (R_m)。

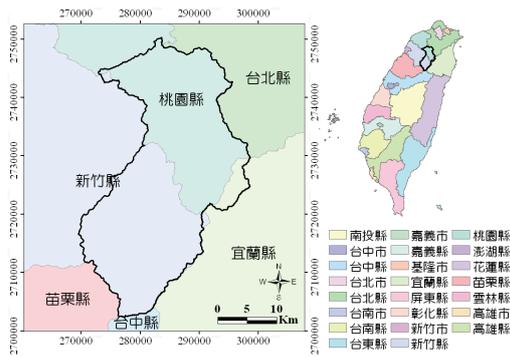


圖 5 石門水庫集水區地理位置
Fig.5 The location map of Shihmen reservoir watershed

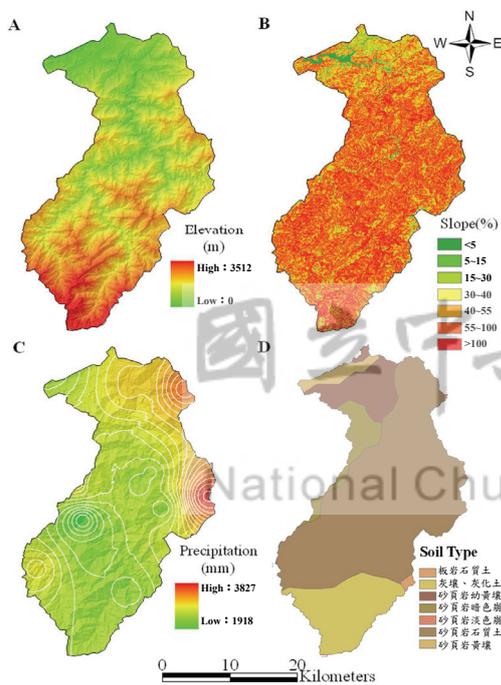
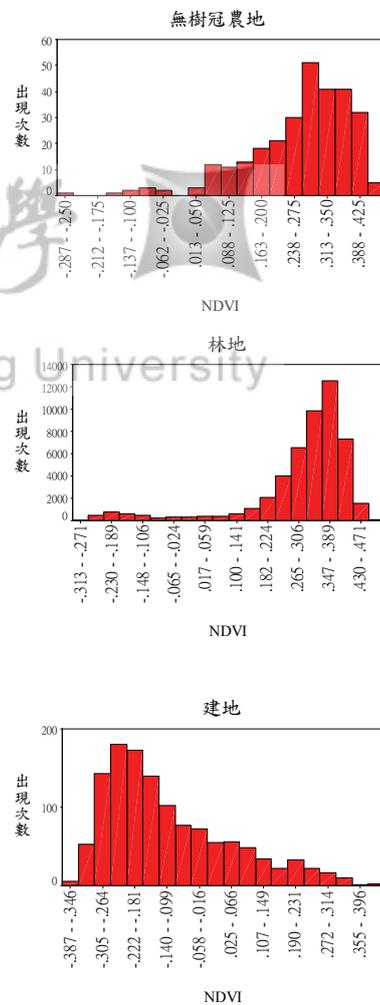


圖 6 石門水庫集水區：(A)高程；(B)坡度；(C)平均降雨量；(D)土壤
Fig.6 Elevation(A), slope(B), average annual precipitation(C) and soil type(D) of Shihmen reservoir watershed

3. 石門水庫集水區土壤沖蝕潛勢估算

本研究利用修正後之 TUSLE 估算石門水庫集水區自 2002 年到 2005 年，共 4 個年度之土壤沖蝕量。以石門水庫集水區之範圍，套入全台灣之 TUSLE 因子圖層後，即可得到石門水庫集水區之 K_m 、 LS 等網格

圖層。而圖層中唯有降雨因子是因每年降雨特性不同而有所變化，其餘 TUSLE 之土壤沖蝕指數 (K_m)、地形因子 (LS)、作物管理因子 (C) 等圖層，均可假設為近年內無太大變異之情形；故降雨特性之變動，將決定不同年份土壤沖蝕量之變異性。另外，計算作物管理因子 (C) 時所需之裸露地圖層，雖然每年情況會有所不同，然幾年內之差異性應不致過大，且非各年份皆有裸露地調查圖層，因此本研究假設各年份之裸露地無太大之差異，並以艾利颱風 (2004) 過後之崩場地圖層為評估依據。本研究之衛星影像圖係購自中央大學遙測中心於 2004 年 10 月 31 日所接收之影像，在計算 NDVI 值後，代入(5)式求出相對應之 C 值；並且將農林航測所於 2004 年所判釋之崩場地圖層套入，圈選裸露地之面積，並給予裸露地之 C 值為 1，因此可得到包含裸露地在內之整個石門水庫集水區之 C 值分佈情形。



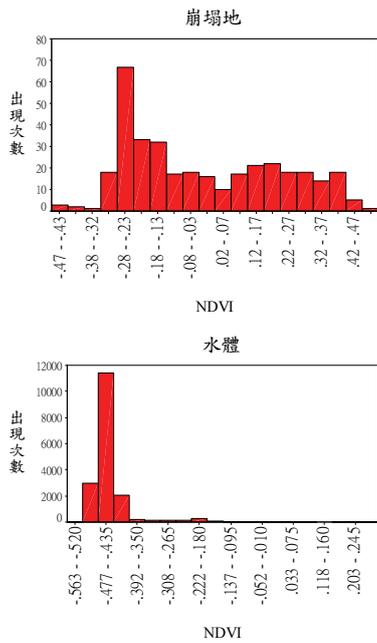


圖 7 石門水庫集水區不同土地利用種類與 NDVI 之關係

Fig.7 Relationship between land-use types and NDVI values in Shihmen reservoir watershed

將石門水庫集水區之各因子網格式圖層，代入台灣地區修正後 TUSLE 之 GIS 模組計算，便可求得石門水庫集水區自 2002 年到 2005 年之土壤沖蝕量（如表 3）。由估算結果可知，土壤沖蝕量最大值發生在 2005 年，高達約 1575 萬立方公尺，相當於年平均沖蝕深度約為 2.14 公分；估算之最小值則發生在 2002 年，約為 426 萬立方公尺，相當於年平均沖蝕深度約為 0.58 公分。

此外，利用本研究統計台灣近 30 年之降雨資料所製作出 R_m 網格式圖層，以石門水庫集水區之範圍，套入 R_m 圖層求得該區年平均降雨情況，再配合其他因子

表 3 利用 TUSLE 計算之土壤沖蝕量

Table 3 The soil erosion amount estimated by TUSLE

年份	年總降雨量 (mm)	土壤沖蝕量 (10^4 tons)	土壤沖蝕土方量 (10^4 m ³)	土壤沖蝕深度 (cm)
2002	1896	615	426	0.58
2003	2115	898	621	0.84
2004	3589	2067	1430	1.94
2005	4008	2276	1575	2.14

網格式圖層，便可求得石門水庫集水區之年平均土壤沖蝕量。計算結果顯示，石門水庫集水區之年平均土壤沖蝕量為 290 公噸/公頃-年，而年平均土壤沖蝕土方量約為 1525 萬立方公尺，相當於年平均沖蝕深度 2.07cm。與之前所估算 2002~2005 年之石門水庫集水區土壤沖蝕量比較，發現石門水庫集水區於 2004 年及 2005 年有重大颱風事件發生，年沖蝕量尤以 2005 年受馬莎颱風之影響下為最大。

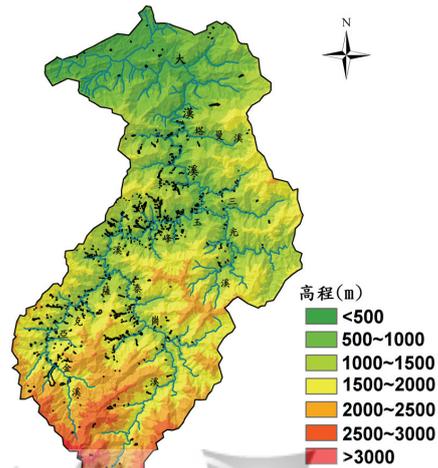


圖 8 石門水庫集水區崩塌地分佈

Fig.8 Landslides in Shihmen reservoir watershed

表 2 石門水庫集水區之平均年總降雨量

Table 2 Average annual precipitation in Shihmen reservoir watershed

年份	2002	2003	2004	2005
平均年總降雨量 (P) (mm)	1896	2115	3589	4008

利用台灣地區 USLE 各因子之圖層,經由 ArcGIS 軟體處理後,可製作石門水庫集水區各因子分佈圖及土壤沖蝕潛勢圖,如圖 9、10 所示。由圖 9 可知,石門水庫集水區西北部庫區一帶之土壤抗沖蝕性效果較差,土壤沖蝕性指數 (K_m) 較高;歷年平均之降雨沖蝕性指數 (R_m),以集水區東部一帶之地表土壤受降雨影響較巨;地形因子 (LS) 除了西北部庫區一帶較為平緩,沖蝕潛勢較低外,其餘部份皆為陡坡地形,沖蝕潛勢較高;作物管理因子 (C),除了河川及庫區水體外,其他部分植生覆蓋良好,唯有些許因崩塌造成之裸露地,其沖蝕潛勢較高。由圖 10 可發現,石門水庫集水區整體之土壤沖蝕潛勢,以西北部地區及東部地區較嚴重,可能是受土壤抗沖蝕性及降雨影響所致,此外,裸露地亦是石門水庫集水區內,造成土壤沖蝕較為嚴重之地區。

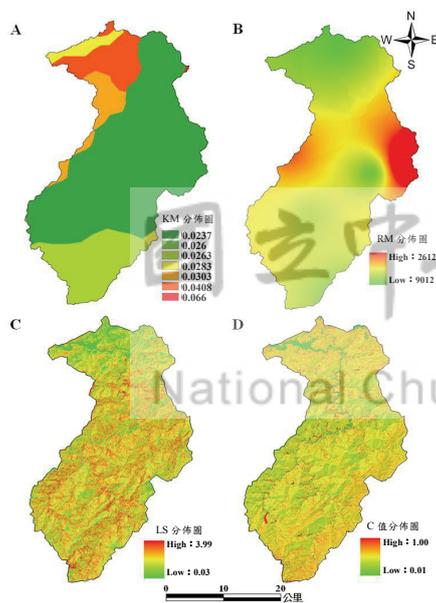


圖 9 石門水庫集水區之 TUSLE 各因子分佈圖 (A) K_m ; (B) R_m ; (C) LS ; (D) C

Fig.9 The layers of TUSLE factors in Shihmen reservoir watershed : (A) K_m ; (B) R_m ; (C) LS ; (D) C

4. USLE 修正前後估算結果之比較

本研究為比較 USLE 修正前後之差異性,故利用未修正之 USLE 估算石門水庫集水區之年平均沖蝕量,再與之前利用 TUSLE 所估算之結果進行分析比

較。未修正之 USLE 同樣採用圖層網格來估算,相較於 TUSLE,兩者僅有地形因子 (LS) 圖層不同,未修正之 USLE 係採用 Wischmeier and Smith (1978) 所推導的(3)式而建立之圖層,其他圖層則可直接利用本研究所建立的石門水庫集水區之 TUSLE 各因子圖層。將 USLE 修正前後之估算結果(如表 4 所示)比較後發現,修正前所估算之土壤沖蝕量高出修正後之估算值,且土壤沖蝕深度高達 23.63cm,此與石門水庫集水區之沖蝕情況不符,有明顯高估之現象。而修正後之估算值雖略有高估現象,但較接近實際值,故本研究之 TUSLE 估算模式,較適用於估算台灣地區之土壤沖蝕情況。而修正前後之 USLE 之估算結果有如此大之差異,主要原因為 LS 因子所使用之公式不同,此結果亦證明了國內應用 Wischmeier and Smith (1978) 所訂定之坡度因子來估算台灣地區之土壤沖蝕量,有明顯高估現象。

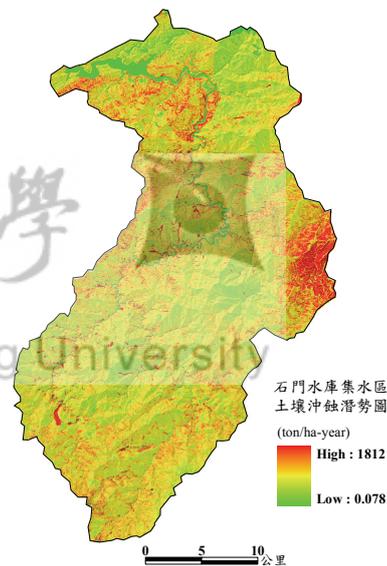


圖 10 TUSLE 估算石門水庫集水區之年平均土壤沖蝕潛勢圖

Fig.10 Annual average potential soil erosion amount estimated by TUSLE in Shihmen reservoir watershed

四、結 論

本研究利用適合於台灣地區之 TUSLE 因子來建構 GIS 土壤沖蝕估算模組,並以石門水庫集水區作為驗證。 R_m 在本研究中係利用盧昭堯等(2005)所提

出之計算式，不但提昇 R_m 之計算速率，計算結果亦不失真；S 因子在本研究則採用 McCool *et al.* (1987) 所提出之計算式，用於台灣地區大部份皆屬陡坡地形之集水區時，估算結果將比 Wischmeier and Smith (1978) 所訂定之坡度因子更為理想；C 因子之估算方面，本研究在 NDVI 為負值時，修正林文賜 (2002) 所建議之線性計算方式，不至於高估河川、建地等土壤沖蝕率低之地區；P 因子則藉由台灣地區近期相關的田間試驗資料之蒐集、整理及歸納而獲得，可作為決定水土保持處理因子時之參考。本研究亦建立 TUSLE 公式中， K_m 、 R_m 及 LS 因子之 GIS 軟體可用圖資，可作為估算台灣地區各集水區土壤沖蝕量之使用。

表 4 USLE 修正前後估算石門水庫集水區之年平均土壤沖蝕量

Table 4 The soil erosion amount estimated by ULLE and TUSLE in Shihmen reservoir watershed

公式	土壤沖蝕量 (ton/ha)	土壤沖蝕土方量 (10^4m^3)	土壤沖蝕深度 (cm)
USLE	3310	17406	23.63
TUSLE	290	1525	2.07

參考文獻

- 江清榮 (2005)，「不同處理對陡坡地荔枝果園水土保持效益之研究」，國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 吳嘉俊 (1994)，「台灣水土保持因子之初步訂定」，中華水土保持學報，25(4):209-218。
- 吳嘉俊 (1995)，「台灣水土保持因子之訂定與坡長坡度之研究」，中美陡坡土壤流失量推估技術研討會論文輯，pp. 117-134。
- 吳嘉俊 (2001)，「山坡地開發期間簡易臨時攔砂工法之研究」，90 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業委員會。
- 吳嘉俊 (2002)，「綠籬保護帶攔阻土砂效益之研究 (2/4)」，91 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業委員會。
- 吳嘉俊、侯建宣、林瑞仁、王建成、巴玉英 (2003)，「培地茅於崩塌裸露地之應用與規劃設計」，行政院農業委員會水土保持局。
- 吳輝龍、張文詔、黃俊德 (1995)，「坡地檳榔園試區水土流失量第一年成果初步探討」，中華水土保持學報，26(3):197-209。
- 林文賜 (2002)，「集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究」，國立中興大學水土保持學研究所博士論文。
- 林俐玲 (1995)，「覆蓋管理因子 (C 值) 之評定」，中美陡坡土壤流失量推估技術研討會論文輯，pp. 109-116。
- 林俐玲 (1996)，「土壤沖蝕推估模式之建立—中海拔地區土壤沖蝕之觀測試驗」，85 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業委員會。
- 林俐玲 (1997)，「中海拔地區土壤沖蝕之觀測試驗」，86 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業委員會。
- 林俐玲 (1998)，「茶園不同水土保持處理之土壤沖蝕研究」，87 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業委員會。
- 林俐玲 (1999)，「茶園不同水土保持處理之土壤沖蝕研究」，88 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，行政院農業委員會。
- 林俐玲、蔡義誌、杜怡德 (2001)，「陡坡茶園水土流失控制之研究」，水土保持學報，33(1):15-24。
- 范正成 (1995)，「通用土壤流失公式在台灣地區應用之探討」，中美陡坡土壤流失量推估技術研討會論文輯，pp. 1-52。
- 張清寬、李淑美、楊美珠 (2002)，「緩坡地茶園不同坡面處理對茶園生育及土壤沖蝕之影響」，集水區茶園保育與利用管理技術研究，行政院農業委員會茶葉改良場。
- 張清寬、李淑美、楊美珠 (2003)，「集水區茶園保育與利用管理技術研究—緩坡地茶園不同坡面處理對茶園生育及土壤沖蝕之影響」，集水區茶園保育與利用管理技術研究，行政院農業委員會茶葉改良場。
- 張賢明、黃國鋒 (2001)，「通用土壤流失公式中水土保持因子之研究」，水土保持學報，33(1):25-30。
- 張賢明、董聞達、李德榮、劉士余 (2001)，「紅壤坡地果園水土保持處理效益之研究」，中華水土保持學報，32(2):79-85。

20. 陳慶雄、吳嘉俊、謝杉舟、黃國禎 (1999), 「水土保持處理對陡坡果園水土流失及果樹生長勢之影響 (五)」, 88 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編, 行政院農業委員會。
21. 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、李育修 (2007), 「水土保持技術對土砂抑制成效之先驅研究」, 行政院農業委員會水土保持局委託。
22. 陸象豫、盧惠生、劉瓊霏、林壯沛、黃良鑫、唐凱軍 (2003), 「重要植生覆蓋水土資源保育效益之研究 (4/5)」, 集水區經營對森林生態系影響之研究, 行政院農業委員會林業試驗所。
23. 黃俊德 (1979), 「台灣降雨沖蝕指數之研究」, 中華水土保持學報, 10(1):127-144。
24. 黃俊德、徐森雄、陳慶雄、吳嘉俊、謝杉舟、黃國禎 (1995), 「水土保持處理對陡坡果園保土蓄水及果樹生長勢之影響」, 84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編, 行政院農業委員會。
25. 萬鑫森、黃俊義 (1989), 「台灣坡地土壤沖蝕」, 中華水土保持學報, 20(2):17-45。
26. 鄭慶生、張賢明 (1995), 「陡坡地果園土壤沖蝕量及保育方法之研究 (四)」, 84 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編, 行政院農業委員會。
27. 盧昭堯、蘇志強、吳藝昀 (2005), 「台灣地區年等降雨沖蝕指數圖之修訂」, 中華水土保持學報, 36(2):159-172。
28. 謝兆申、王明果 (1991), 「台灣地區主要土類圖輯」, 國立中興大學土壤調查試驗中心。
29. Fan, J. C. and C. W. Lovell (1988), "Slope steepness factor for predicting erosion on highway slopes," *Transportation Research Record 1188*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp. 63-73.
30. McCool, D. K., L. C. Brown, G. R. Foster, C.K. Mulchler and L.D. Meyer (1987), "Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation," *Transaction of the ASAE*, 30(5):1387-1475.
31. U.S. Department of Agriculture-Agricultural Research Service (USDA-ARS) (2002), <http://www.sedlab.olemiss.edu/rusle/>, Accessed January 2002.
32. Wischmeier, W. H. and D.D. Smith (1958), "Evaluation of Factors in the Soil Loss Equation," *Agricultural Equation*, 39:458-462.
33. Wischmeier, W. H. and D.D. Smith (1978), "Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning," *US Department Agricultural Handbook*, 537:1578-1582.

2008 年 8 月 22 日 收稿

2008 年 9 月 2 日 修正

2008 年 12 月 20 日 接受

(本文開放討論至 2009 年 12 月 31 日)

附表 1 台灣水土保持處理之 P 值
Attached Table 1 P values of conservation practices in Taiwan

	坡度 (%)															
	9	17	18	20	24	25	27	29	32	40	47	49	52	58	60	81
水土保持處理																
		0.692				0.124	0.048		0.481		0.232					
平台階段+全面除草		0.408							0.546							
									0.479							
									0.551							
平台階段+局部除草		0.006	0.011			0.009	0.236		0.166		0.062		0.036			
		0.007							0.187				0.027			
									0.165				0.084			
									0.273				0.064			
敷蓋區		0.018					0.110		0.024		0.025			0.009		
		0.021					0.264		0.028					0.0001		
									0.031							
內斜階段		0.0004		0.072	0.010			0.047	0.061							
		0.0004						0.014	0.055							
								0.022	0.213							
								0.372	0.002							
								0.071	0.233		0.145			0.214		
等高密植		0.579	0.192						0.272							
		0.496							0.372							
									0.705							
									0.194							
等高密植+敷蓋																
等高疏植																
單株平台									0.796							
									0.010							
單株平台+覆蓋									0.012							
草帶法 (2.5m 間距)									0.038							
草帶法 (5.0m 間距)									0.130							
									0.028	0.011	0.012			0.0001		
草帶法+敷蓋									0.023	0.059				0.0296		
									0.028					0.0435		
草帶法+不敷蓋									0.102					0.006		
									0.086					0.018		

水土保持處理	坡度 (%)															
	9	17	18	20	24	25	27	29	32	40	47	49	52	58	60	81
敷、覆蓋				0.003	0.085	0.080	0.004			0.118				0.0002	0.0005	
					0.101									0.0001	0.0002	0.0268
山邊溝								0.078	0.078							
								0.092								
山邊溝+覆蓋							0.474					0.045			0.0004	
															0.0072	0.0008
迂迴溝									0.335							
	0.229															
	0.246															
水平排水平台階段					0.005			0.033								
								0.010								
								0.009								
							0.204									
水平蓄水平台階段								0.000								
								0.021								
外斜平台階段								0.039								
								0.082								
內斜階段+山邊溝									0.067							
攔砂固籬(網目 3×3mm)	0.219			0.190					0.065						0.194	
攔砂固籬(網目 10×10mm)	0.400			0.535					0.451						0.465	
綠籬保護帶(寬 3m)	0.270															
	0.160															
綠籬保護帶(寬 6m)	0.490															
	0.370															
綠籬保護帶(寬 9m)	0.440															
	0.300															
打樁編柵(間距 2m)										0.534	0.333			0.369	0.398	
打樁編柵(間距 3m)										0.435	0.538			0.556	0.431	
打樁編柵(間距 4m)										0.525	0.490			0.624	0.594	

註：表格中細體之數據引用自吳嘉俊(1994)；粗體之數據則為本研究所彙整。