

3.3 集水區泥砂侵蝕、流失與生產分析

3.3.1 前言

集水區泥砂的崩蝕(係指各類土壤侵蝕、崩塌及地滑等)、搬運及堆積過程是與時間和空間有關的開放系統。在這個過程中，係由眾多不規則主、支流連接而成的水系，負責輸移從上游至下游沿著流動方向疊加來自坡面和溪谷兩岸之水、砂量體，同時也配合調整適當之斷面形態、底床粒徑組成及坡度，來因應集水區來水量及來砂量之改變；換言之，這個過程是在坡面和溪流載體下進行著水、砂之流失、輸送及生產過程，而水、砂在輸移過程又反過來影響載體的演變特性。因此，集水區泥砂生產過程是由各種不同崩蝕類型和溪流泥砂沖淤所組成的一個極為複雜的過程，它關係著溪流上、下游之間水砂災害的傳遞和平衡問題，是溪流挾砂水流演算不可或缺之關鍵內容。

3.3.2 土壤侵蝕、流失與生產

在土壤侵蝕理論中，土壤侵蝕量(amount of soil erosion)、土壤流失量(amount of soil loss)及泥砂生產量(amount of sediment yield)是一組意義完全不同的術語。土壤侵蝕量(尤指水力侵蝕量)係指在各種外營力作用下，坡面土壤分離位移的總量，而土壤侵蝕量中被輸移離開某一特定坡面或田面的數量，稱為土壤流失量；泥砂生產量則是指輸移至某一流域或集水區特定出口斷面的土砂量(或輸砂量)。例如，大部分坡面地形具有一定的不規則性，使得侵蝕和沉積同時存在，於是在坡面土壤侵蝕量往往不同於坡面下游面的土壤流失量。

以集水區為單元，它係由坡面及溪流兩個地貌單元所組成，基於水、砂輸移在水理上之基本差異，將坡面土壤侵蝕量和崩塌量中輸移匯入溪流的土壤數量，稱之為坡面土壤流失量，而殘留沉積在坡面上未進入溪流的土壤，則不被計入坡面土壤流失量；匯入溪流之後，與水流共同對溪床及兩岸作用而引起之沖淤變化，並攜出特定出口斷面之泥砂數量，謂之泥砂生產量(簡稱產砂量、輸砂量)，如圖 調 3-3-1 為集水區水力侵蝕產砂模型。圖中，集水區泥砂在空間尺度上，係由坡面表土侵蝕量、崩塌量及溪流泥砂沖淤量等所組成，在時間尺度上，則有一次暴雨過程及長期(年)演變之分，如圖 調 3-3-2 所示。

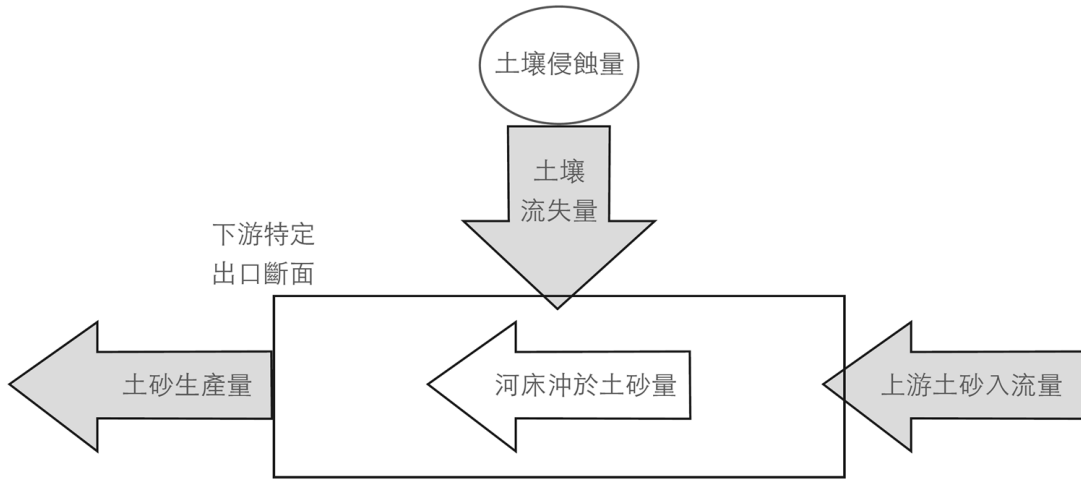


圖 調 3-3-1 集水區水力侵蝕產砂模型示意圖(修改自：連惠邦，2017)

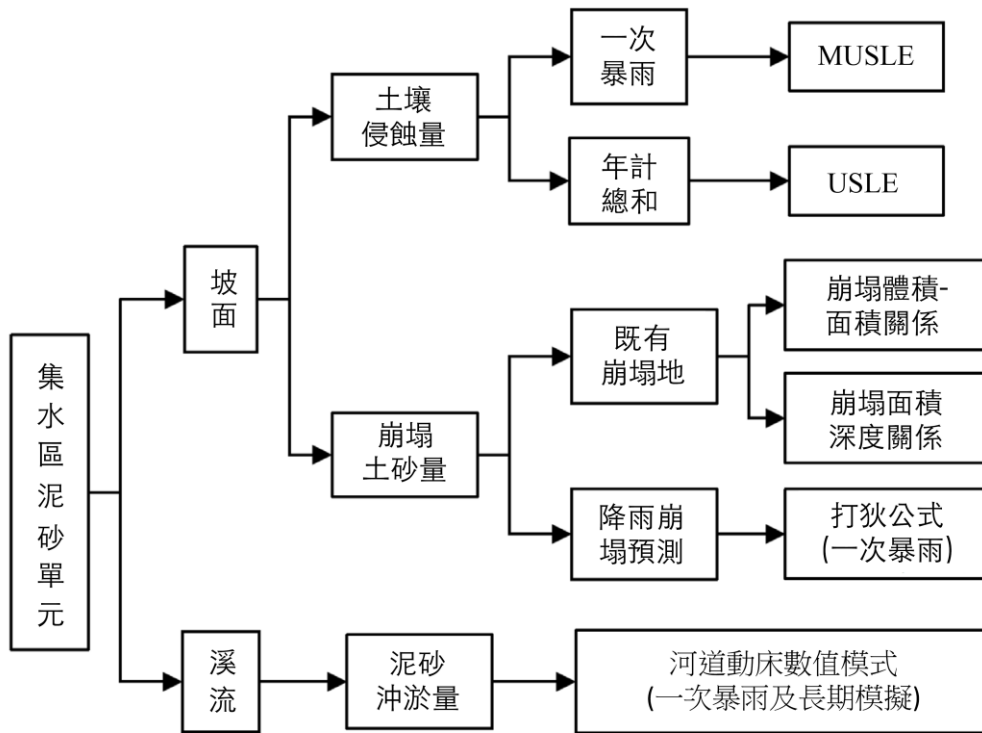


圖 調 3-3-2 集水區泥砂組成單元及時間尺度

3.3.3 土壤流失量估算

集水區土壤流失量為由表面土壤侵蝕量與土體崩塌量所組成，前者係指土壤受外力(主要如雨水、逕流、風力)的剝蝕作用及地震、海浪、重力、溫度變化等衝擊後，自固結之土體分離、搬移與沉積的現象，它是導致土地資源退化乃至徹底破壞的主要原因；後者則是特別針對坡面上的塊體運動，包括地滑、山崩、崩坍、落

石等。

一、土壤流失量估算：

Zingg(1940)應用小區的模擬降雨和野外條件，證實坡度增加 1.0 倍，土壤流失量增加 2.61~2.80 倍；而斜坡水平長度增加 1.0 倍，逕流中的土壤流失量增加 3.03 倍，這個關係式可表為

$$A_z = C_o S_o^m L^{n-1} \quad (3.3.1)$$

式中， A_z =單寬坡面在單位面積上的平均土壤流失量； C_o =常數； L =坡長； m 及 n 分別為 1.4 和 1.6。Wischmeier et al.(1957, 1958)將美國 21 個州 36 個地區所獲得約 8,000 多個小區一年的土壤侵蝕研究資料進行彙整，對各種影響土壤流失量的因子重新評價，導出了通用土壤流失量公式。而目前應用最廣泛的土壤流失量推估方法，係以 Wischmeier and Smith(Wischmeier et al., 1958; Wischmeier and Smith, 1965, 1978)所提出作為一種預測紋溝間(interrill)和紋溝(rill)侵蝕的年平均土壤流失公式，可表為

$$A_m = R_m \cdot K_m \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3.3.2)$$

上式即為通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)。式中，各項因子茲說明如下。

(一) 年土壤流失量(soil loss, A_m)

年土壤流失量代表某一具體農地或坡面在特定的降雨、作物經營方式及所採用的水土保持措施的條件下，單位面積上產生的年土壤流失量，單位 t/ha/yr。當上式用於選擇合適的農業措施時， A_m 值就為容許土壤流失量。

(二) 降雨與逕流侵蝕指數(R_m)

降雨與逕流侵蝕指數表示在標準試區條件(即坡長 22.1 m，坡度 9%均勻坡面，順坡耕作，連續兩年休耕)下，降雨對土壤的侵蝕指標，單位 MJ·mm/(ha·hr·yr)。降雨與逕流侵蝕指數對土壤的侵蝕包括兩個方面，一是降雨的雨滴動能對土壤的擊濺，二是降雨形成逕流後逕流的紊動對泥砂的搬運。根據大量研究資料顯示，在降雨以外其他因子不變的情況下， R_m 值與降雨的總動能和 30 分鐘的最大降雨強度有關。因此， R_m 是暴雨動能和最大 30 分鐘降雨強度的函數，它確定了雨滴擊濺及逕流擾動對田面土壤顆粒遷移的綜合影響，可表為

$$R_m = \frac{1}{100} \sum E \cdot i_{30} \quad (3.3.3)$$

式中， E = 某次暴雨過程中某個階段降雨量所產生的動能； i_{30} = 某次降雨過程中連續 30 分鐘最大降雨強度。一次降雨過程中連續 30 分鐘最大降雨強度 i_{30} ，可以從自記雨量計記錄曲線上查得，而降雨過程中某階段所產生的動能 E 可表為

$$E = E_o \Delta V_x \quad (3.3.4)$$

$$E = 0.119 + 0.0873 \log i_x \quad (3.3.5)$$

式中， ΔV_x = 某降雨時段之降雨深度 (mm) 增量； E_o = 某次降雨過程中某時段的降雨動能 (MJ/ha · mm)； i_x = 某次降雨過程中某時段降雨強度 (mm/hr)。

利用上述方法，可以計算出某一地區一次降雨事件的降雨侵蝕指數，也可以通過逐次計算而求出每旬、每月及每年的侵蝕指數。某一地區多年的侵蝕指數加上一共，除以年份，即為年平均降雨侵蝕指數，亦即通用土壤流失公式中的 R_m 值，附錄四為臺灣地區之 R_m 。應用各地區的 R_m 值，可繪製某範圍內的 R_m 值等值線圖，如圖 調 3-3-3 所示。

此外，國內亦有類似的研究成果，係以年(或月)降雨量推估年(或月)降雨侵蝕指數，甚屬簡便，惟使用時需注意其適用性問題。例如，盧昭堯等(2005)係以臺中、南投、北部陽明山、臺北市區、基隆、宜蘭、花蓮、臺東、新竹、嘉義等地區天然雨滴粒徑分布，而屏東地區則參考吳嘉俊及王阿碧(1996)建立之屏東老埤地區降雨動能公式，推算降雨侵蝕指數 R_m 值，以及年降雨侵蝕指數與年降雨量之關係式，如表 調 3-3-1 所示。

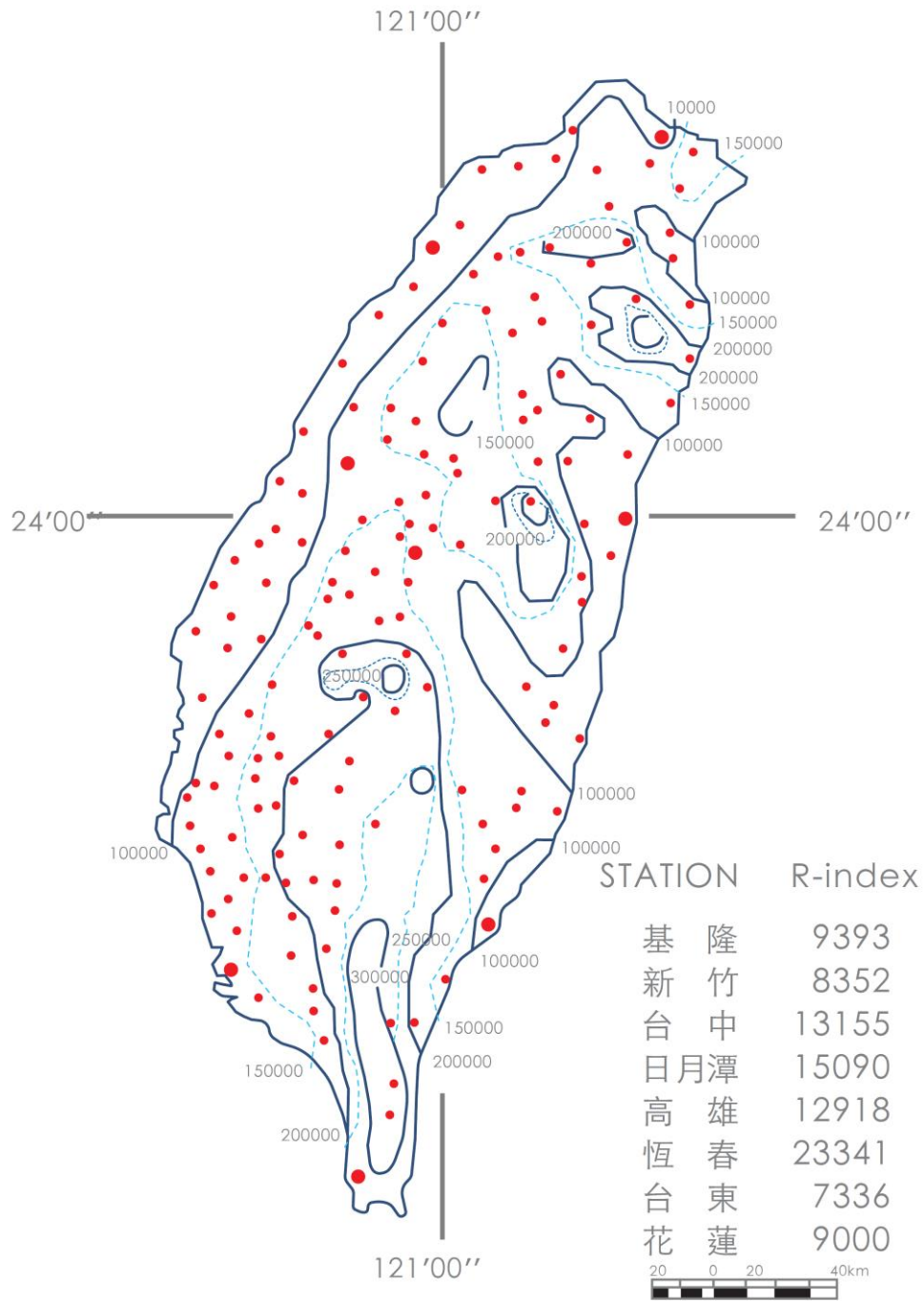


圖 調 3-3-3 臺灣各地降雨侵蝕指數($\frac{MJ \cdot mm}{ha \cdot hr \cdot y}$)(資料來源：水土保持手冊，2005)

表 調 3-3-1 降雨動能與降雨強度、年降雨侵蝕指數與年降雨量之關係式

降雨動能與降雨強度關係式			年降雨侵蝕指數與年降雨量關係式		
地區	$E_o = a + b \log i$		降雨氣候分區	$R_m = a P^b$	
	a	b		a	b
臺北陽明山	873.77	416.52	北部地區(臺北試區)	0.000911	1.71557
臺北地區	745.58	350.51	東北部地區(基隆試區)	0.000013	2.18615
基隆地區	836.32	323.08	宜蘭地區(宜蘭試區)	0.000103	1.99179
花蓮地區	781.58	267.22	花蓮地區(花蓮試區)	0.000891	1.78248
臺東地區	756.30	230.33	臺東地區(臺東試區)	0.003030	1.65534
新竹地區	785.82	229.55	西北部地區(新竹試區)	0.000294	1.91672
臺中地區	830.16	274.65	中部地區(臺中試區)	0.003265	1.62653
嘉義地區	808.35	321.81	中南部地區(嘉義試區)	0.001170	1.79835
屏東地區	930.96	238.54	南部地區(高雄試區)	0.006666	1.58975
南投蓮花池地區	897.65	242.73	中部、中南部山區 (南投蓮花池試區)	0.020653	1.35072
臺灣地區	883	313			

註：1. E_o ($ft \cdot tonf \cdot acre^{-1} \cdot in^{-1}$) ; R_m ($100ft \cdot tonf \cdot in \cdot acre^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot yr^{-1}$) ; i ($in \cdot hr^{-1}$) ; P (mm) 。

2. 高雄試區降雨資料係以高雄氣象站歷年降雨資料為主。

范正成等(2009)以中央氣象局臺北站之歷年雨量資料(1961~2007 年)及盧昭堯等(2005)提出之降雨動能公式，利用月雨量、月降雨強度與月降雨侵蝕指數間之關係，以迴歸分析法建立適用於臺北地區降雨侵蝕指數推估公式，即

$$R_{mj} = 0.002P_j^{2.235} \quad (3.3.6)$$

$$R_{mj} = 0.134(P_j \cdot i_j)^{1.28} \quad (3.3.7)$$

式中， R_{mj} =月降雨侵蝕指數(MJ·mm/(ha·hr·yr))； P_j =月平均降雨量(mm)； i_j =月降雨強度(mm/hr)，係為月雨量除以月降雨延時之商數。

為利取得臺灣地區降雨指數，以作為土壤流失量估算，水土保持局已將 4 年（105 年至 108 年）降雨、土壤沖蝕調查及研究成果圖資介接至「行動水保服務網」（<https://serv.swcb.gov.tw/>）平台提供線上查詢。

(三) 土壤侵蝕性指數(K_m)

土壤侵蝕性指數為平均年土壤侵蝕量(A_m)與單位降雨侵蝕指數(R_m)之比，單位 $t \cdot ha \cdot hr \cdot yr / (MJ \cdot mm \cdot ha \cdot yr)$ 。土壤侵蝕指數為土壤抵抗侵蝕之分離及

搬運作用的一種量化指標，它與土壤本身特性有關。萬鑫森及黃俊義(1981)推估臺灣西北部及南部坡地土壤侵蝕指數與土壤流失量，而將 K_m 值分為低蝕性($K_m < 0.2$)、中蝕性($K_m = 0.2\sim 0.4$)及高蝕性($K_m > 0.4$)等三個等級；而臺灣現行使用通用土壤流失公式(USLE)之土壤侵蝕性指數(K_m)資料，係萬鑫森及黃俊義(1989)利用 Wischmeier & Smith(1978)列線圖，推算得臺灣 280 處土壤侵蝕性指數 K_m 值；經分析，臺灣地區 K_m 值約 73%是小於 0.3，而且變化幅度很小，多介於 0.11~0.4 之間；此外， $K_m < 0.026$ 者，為低蝕性土壤； $K_m = 0.026\sim 0.05$ 者，為中蝕性土壤； $K_m > 0.052$ 者，為高蝕性土壤。

一般，影響 K_m 值的土壤特性有土壤的質地、結構、有機質含量、滲透性等，其推估方法有二：一是在標準試區實測法；二是用列線圖法(nomograph)或公式推估。此外，亦可參考附錄五「臺灣各地之土壤侵蝕性指數表」。

1.實測法

在標準試區下方設置沉砂槽，降雨時地面產生逕流，土壤被侵蝕至下方沉砂槽內，然後稱重烘乾，測得土壤流失量 A_m 。因實驗試區處在標準條件下，通用土壤流失公式中的LS、C及P等因子皆為 1.0，故公式就成為 $A_m=R_mK$ 。這樣，測得 A_m 值後，只要再計算降雨侵蝕指數 R_m 值，便可求出 K_m 值。

2.公式法

Wischmeier et al.(1971)及 Wischmeier & Smith(1978)根據土壤的 5 個參數提出 K_m 值的計算式，即

$$K_m = 0.1317 \frac{2.1 \times 10^{-4} [d(d+e)]^{1.14} (12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)}{100} \quad (3.3.8)$$

式中， a =有機質含量(%)，當土壤之有機質含量超過 4%時，仍以 4%計算； b =土壤結構參數(參見表 調 3-3-2)； c =土壤滲透性參數(參見表 調 3-3-2)； d =土壤粉粒(silt)及極細砂(粒徑：0.002mm~0.1mm)含量(%)； e =土壤粗砂(粒徑：0.1mm~2.0mm)含量(%)。不過，上式僅能應用於 $d < 70\%$ 的條件。圖 調 3-3-4 係依上式所建立之圖解。

表 調 3-3-2 土壤結構及滲透性參數(資料來源：水土保持手冊，2005)

土壤結構參數			土壤滲透性參數		
參數值	土壤	粒徑 (mm)	參數值	滲透速度	mm / hr
1	極細顆粒	<1.0	6	極慢	<1.25
2	細顆粒	1~2	5	慢	1.25~5.0
3	中或粗顆粒	2~10	4	中等慢	5.0~20.0
4	塊狀或片狀或粗顆粒	>10	3	中等	20.0~62.5
			2	快	62.5~125.0
			1	極快	>125.0

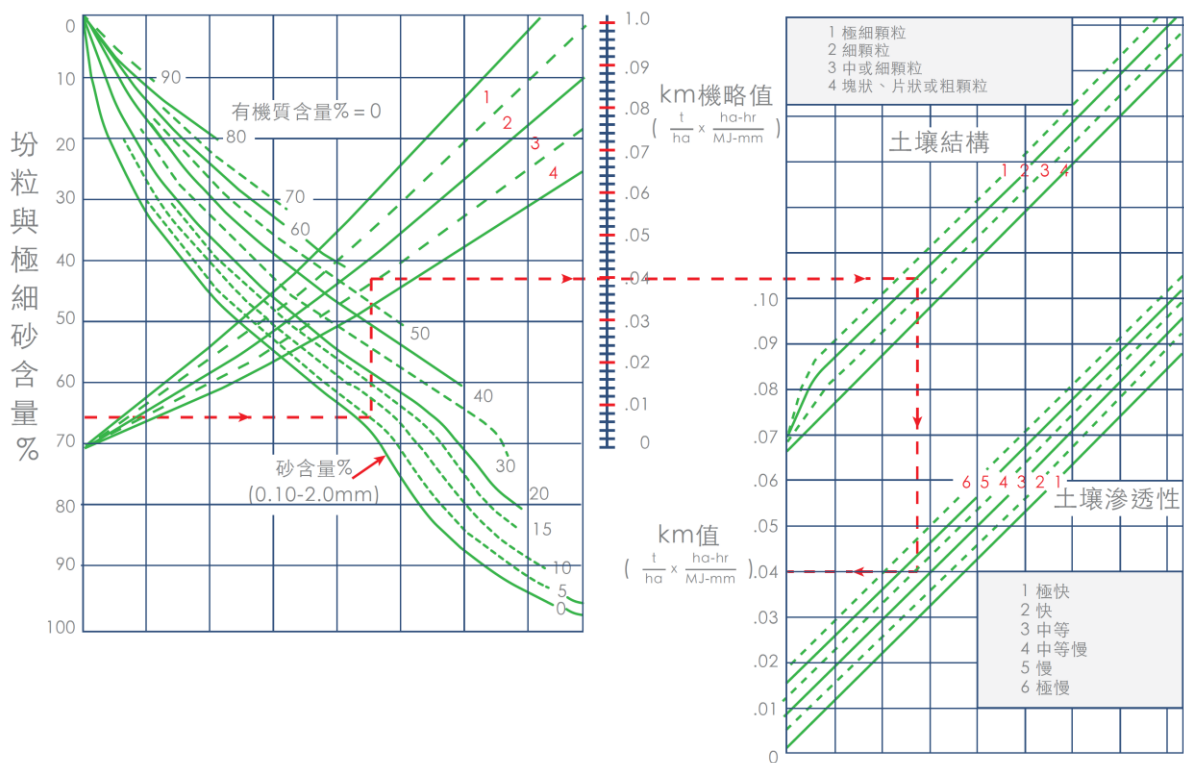


圖 調 3-3-4 臺灣各地土壤侵蝕指數圖解(資料來源：水土保持手冊，2005)

3. 為利取得臺灣地區土壤沖蝕指數，以作為土壤流失量估算，水土保持局已將 4 年（105 年至 108 年）降雨、土壤沖蝕調查及研究成果圖資介接至「行動水保服務網」（<https://serv.swcb.gov.tw/>）平台提供線上查詢。

(四) 地形因子(LS)

通用土壤流失公式中，坡長及坡度的影響分別表示為L及S。坡長係指從地表逕流的起點至坡度降到足以發生沉積的位置或逕流進入一個規定渠道的入口的距離，其中渠道也許是一個水文網的一部分，或者是一個人工渠道。坡度

是田面或部分坡面的傾角，通常用%表示。不過，通常把它們作為一個獨立的地形因子LS來估算，表徵特定坡面單位面積上土壤流失量與標準試區單位面積土壤流失量之比，其計算式可表為

$$LS = \left(\frac{\ell}{22.1} \right)^k (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (3.3.9)$$

式中， ℓ =坡長(m)； θ =坡度($^\circ$)； k =指數，與坡面坡度(S_o)相關，可寫為

$$k = \begin{cases} 0.5 \\ 0.4 \\ 0.3 \\ 0.2 \end{cases} \begin{cases} S_o > 5\% \\ S_o = 3.0\% \sim 5.0\% \\ S_o = 1.0\% \sim 3.0\% \\ S_o < 1.0\% \end{cases} \quad (3.3.10)$$

式中， ℓ =坡長(m)； S_o =坡面坡度(%)。式(3.3.9)是在單向規則的坡面上發展起來的，故它們只適用於這類坡面。當應用於凹型坡面時，會有高估的問題；反之，應用於凸型坡面時，則有低估之虞。因此，在應用時必須注意複雜坡面地形因子的推估問題。

倘若現場之原地形或開發中、後地形變化顯，無法以單一平均坡度來表示時，應先將代表坡長(L_e)之地形縱斷面，依坡度分割成上坡面(L_u)及下坡面(L_d)，如圖 調 3-3-5 所示。依據上、下坡面之平均坡度，以式(3.3.9)分別求出上、下坡面之S值(即 S_u 、 S_d)，再由上、下坡面所占之比例 $L_u : L_d$ ，於附錄六中分別查出上、下坡面S值之修正比 $C_u : C_d$ ，並以下式推估

$$S = C_u S_u + C_d S_d \quad (3.3.11)$$

式中， C_u =上游坡面S值修正比； C_d =下游坡面S值修正比； S_u =上游坡面S值； S_d =下游坡面S值。

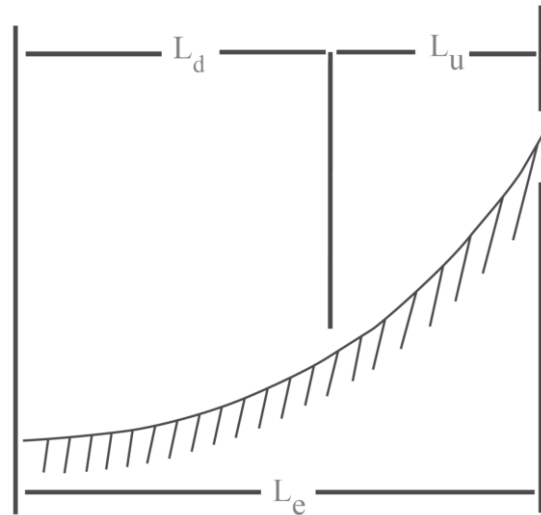


圖 調 3-3-5 坡面分割圖($L_u : L_d$)(資料來源：水土保持手冊，2005)

若現場之原地形或開發中、後地形複雜，無法以上、下坡面表示時，則應先將代表坡長(L_e)之地形縱斷面，依坡度分割成上(L_u)、中(L_m)及下坡面 (L_d)，如圖 調 3-3-6 所示。依據上、中、下坡面之平均坡度，以式(3.3.9)分別求出上、中、下坡面之S值(即 S_u 、 S_m 、 S_d)，再由上、中、下坡面所占之比例 $L_u : L_m : L_d$ ，於附錄六中分別查出上、中、下坡面S值之修正比 $C_u : C_m : C_d$ ，並以下式推估

$$S = C_u S_u + C_m S_m + C_d S_d \quad (3.3.12)$$

式中， C_m =中游坡面 S 值修正比； S_m =中游坡面S值。

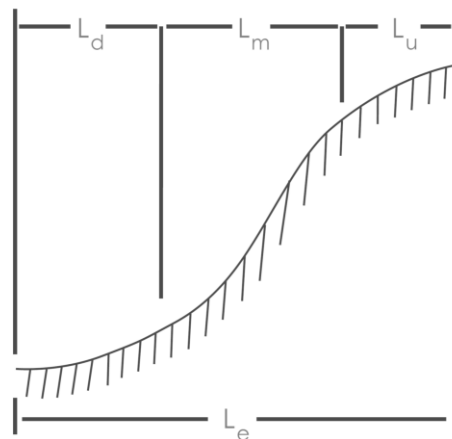


圖 調 3-3-6 坡面分割圖($L_u : L_m : L_d$)(資料來源：水土保持手冊，2005)

(五) 覆蓋與管理因子(C)

覆蓋與管理因子(C)係表在相同的土壤、地形和降雨等條件下，實際耕作地上的土壤流失量與連續休耕地上的土壤流失量之比。依現地上不同種類之

植生、生育狀況、季節、覆蓋及敷蓋程度而定。C值越大，代表土壤流失量越嚴重，休耕地處於裸露狀態，沒有植被，土壤流失量嚴重，C =1.0；開挖整地處C值不得小於 0.05，而生長茂密的林地，因植被良好，C =0.01。

由於植生或作物的植物冠層遮蔽(canopy cover)與生長或收成後的殘株敷蓋(residual mulch)屬於兩種不同的保護土壤方式，故通用土壤流失公式將覆蓋與管理因子以次因子(subfactor)的方式來分別表示植物冠層遮蔽(CC)及殘株敷蓋(CS)，而代表該覆蓋與管理方式的 C 值即為各次因子之乘積，即

$$C = CC \times CS \quad (3.3.13)$$

C值推估方式如下：

- 1.依現地之地表及植被狀況，由表 調 3-3-3 直接求得C值。
- 2.若現地之地表及植被狀況不在表 調 3-3-3 中時，則應依現地植物冠層遮蔽百分比、植株平均落高，由表 調 3-3-4 求出 CC 值。再依現地地表殘株敷蓋百分比，由表 調 3-3-5 求出 CS 值。將 CC 值與 CS 值相乘，即為現地之 C 值。因此，敷蓋百分比 11%的 CS 值即為 0.759。
- 3.如遇地表礫石敷蓋明顯，應先估計地表礫石敷蓋百分比，再利用表 調 3-3-5 求出CS值，即為礫石敷蓋之 CS 值。
- 4.如採用地工織物作為土壤侵蝕控制之資材時，應先估計其敷蓋百分比，再利用表 調 3-3-5 求出 CS 值，即為該地工織物之C值。

表 調 3-3-3C值對照表(資料來源：水土保持手冊，2005)

地表及植被狀況	C 值	地表及植被狀況	C 值
百喜草	0.01	裸露地	1.00
水稻	0.10	水泥地	0.00
雜作	0.25	瀝青地	0.00
果樹	0.20	雜石地	0.01
香蕉	0.14	水體	0.00
鳳梨	0.20	建屋用地	0.01
林地（針業、闊葉、竹類）	0.01	牧草地	0.15
蔬菜類	0.90	高爾夫球場植草地	0.01

茶	0.15	雜草地	0.05
特用作物	0.20	墓地	0.01
檳榔	0.10	~	~

表 調 3-3-4 冠層遮蔽遮蔽(CC)因子(資料來源：水土保持手冊，2005)

冠層遮蔽百分比(%)	植株平均落高(m)							
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
5	0.958	0.965	0.971	0.975	0.979	0.982	0.984	0.986
10	0.917	0.930	0.941	0.950	0.957	0.963	0.969	0.973
15	0.875	0.895	0.912	0.925	0.936	0.945	0.953	0.959
20	0.833	0.860	0.882	0.900	0.915	0.927	0.937	0.946
25	0.792	0.825	0.853	0.875	0.894	0.909	0.921	0.932
30	0.750	0.790	0.823	0.850	0.872	0.890	0.906	0.919
35	0.708	0.755	0.794	0.825	0.851	0.872	0.890	0.905
40	0.667	0.720	0.764	0.800	0.830	0.854	0.874	0.892
45	0.625	0.685	0.735	0.775	0.808	0.835	0.858	0.878
50	0.584	0.650	0.705	0.750	0.787	0.817	0.843	0.865
55	0.542	0.615	0.676	0.725	0.766	0.799	0.827	0.851
60	0.500	0.580	0.646	0.700	0.744	0.780	0.811	0.837
65	0.459	0.545	0.617	0.675	0.723	0.762	0.795	0.824
70	0.417	0.510	0.587	0.650	0.702	0.744	0.780	0.810
75	0.375	0.475	0.558	0.625	0.681	0.726	0.764	0.797
80	0.334	0.440	0.528	0.600	0.659	0.707	0.748	0.783
85	0.292	0.405	0.499	0.575	0.638	0.689	0.732	0.770
90	0.250	0.370	0.469	0.550	0.617	0.671	0.717	0.756
95	0.209	0.335	0.440	0.525	0.595	0.652	0.701	0.743
100	0.167	0.300	0.410	0.500	0.574	0.634	0.685	0.729

表 調 3-3-5 殘株敷蓋(CS)因子(資料來源：水土保持手冊，2005)

敷蓋百分比(%)	+0	+1*	+2*	+3*	+4*	+5*	+6*	+7*	+8*	+9*
0	1.000	1.000	0.998	0.959	0.925	0.896	0.869	0.844	0.821	0.799
10	0.778	0.759	0.740	0.722	0.704	0.687	0.671	0.655	0.640	0.625
20	0.611	0.597	0.583	0.570	0.557	0.544	0.532	0.519	0.507	0.496
30	0.484	0.473	0.462	0.451	0.441	0.430	0.420	0.410	0.400	0.391
40	0.381	0.372	0.363	0.354	0.345	0.336	0.327	0.319	0.311	0.303
50	0.295	0.287	0.279	0.271	0.264	0.256	0.249	0.242	0.235	0.228
60	0.221	0.215	0.208	0.202	0.195	0.189	0.183	0.177	0.171	0.165
70	0.159	0.154	0.148	0.143	0.137	0.132	0.127	0.122	0.117	0.112
80	0.107	0.102	0.098	0.093	0.089	0.084	0.080	0.076	0.072	0.068
90	0.064	0.060	0.056	0.053	0.049	0.045	0.042	0.039	0.035	0.032
100	0.029									

註：* 代表敷蓋百分比的個位數。

(六) 水土保持處理因子(P)

水土保持處理因子(P)係表有水土保持措施土地上的土壤侵蝕量與順坡耕作的農田上的土壤侵蝕量之比，故P值主要是根據水土保持措施來選取適當的值；措施好的P值小，惟開挖整地處P值不得小於 0.5，未採取任何水土保持措施者、或棄土場、或陸砂及農地砂石開採處，P =1.0。

- 1.等高耕作之P值與其坡長最長限制，如表 調 3-3-6 所示。
- 2.露天採掘之P值，如表 調 3-3-7 所示。
- 3.高填土坡之P值，如表 調 3-3-8 所示。

表 調 3-3-6 等高耕作之 P 值(資料來源：水土保持手冊，2005)

地面坡度(%)	P 值	坡長限制(m)
1~2	0.6	120
3~5	0.5	90
6~8	0.5	60
9~12	0.6	36
13~16	0.7	24
17~20	0.8	18

21~25	0.9	15
-------	-----	----

表 調 3-3-7 露天採掘之 P 值(資料來源：水土保持手冊，2005)

採掘面坡度(度)	採掘面高度(m)	P 值
60	5	$P=0.1299\text{Ln}(n)-0.0536$
	10	$P=0.0628\text{Ln}(n)-0.0202$
	15	$P=0.0453\text{Ln}(n)-0.0128$
65	5	$P=0.1229\text{Ln}(n)-0.0509$
	10	$P=0.0593\text{Ln}(n)-0.0186$
	15	$P=0.0431\text{Ln}(n)-0.0116$
70	5	$P=0.1166\text{Ln}(n)-0.0482$
	10	$P=0.0563\text{Ln}(n)-0.0170$
	15	$P=0.0414\text{Ln}(n)-0.0105$
75	5	$P=0.1109\text{Ln}(n)-0.0456$
	10	$P=0.0538\text{Ln}(n)-0.0154$
	15	$P=0.0401\text{Ln}(n)-0.0093$
n=階段個數;(n≥2)		

表 調 3-3-8 高填土坡之 P 值(資料來源：水土保持手冊，2005)

填土坡度(度)	P 值
25	0.125
26	0.120
27	0.115
28	0.111
29	0.107
30	0.103

通用土壤流失公式是以推估集水區長期平均(年)的土壤流失量為主，不適用於推估單場暴雨作用下的土壤流失量。因此，採用 Williams and Berndt (1977) 提出之修正土壤流失公式(MUSLE)，即

$$A_s = 11.8(V_{eff} \cdot Q_p)^{0.56} \cdot K_m \cdot C \cdot P \cdot L \cdot S \quad (3.3.14)$$

$$V_{eff} = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (3.3.15)$$

式中， A_s ＝一場暴雨所產生土壤流失(ton)； V_{eff} ＝有效逕流量(Effective Rainfall)(m^3)； Q_p ＝洪峰流量(Peak Flow Discharge)(cms)； Q ＝每小時流量(cms)；

t_1 、 t_2 =事件起迄時間；其他參數同通用土壤流失公式。

二、修正通用土壤流失公式(RUSLE)

隨著計算機技術的發展，大量觀測數據的更新，對土壤侵蝕理論認識的深入，以及在應用 USLE 過程中出現的一些問題，故美國農業部於 1985 年發表新一代的土壤流失推估公式，即修訂版通用土壤流失公式(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)。修正版通用土壤流失公式具有兩個較為突出的特點，包括：

- (一) 建立了計算機模型，並為使用者提供技術和使用手冊。模型還提供了一些主要參數和變量的數據庫，供使用者根據實際情況選擇使用。
- (二) 根據已有研究成果，細化了各個因子的計算過程。
 - 1.將降雨與逕流侵蝕指數的計算擴展到西部地區，同時考慮了融雪侵蝕和窪地集水的影響。
 - 2.土壤侵蝕性指數計算考慮了季節變化的影響，並给出了一些特殊類型土壤的可蝕性值。
 - 3.在坡度和坡長因子計算時，分別考慮了紋溝侵蝕和紋溝間侵蝕的差異，以及不同類型坡的組合；其中，坡長因子可表為

$$L = \left(\frac{\ell}{72.6}\right)^k \quad (3.3.16)$$

式中， ℓ =坡長(ft)； k =待定指數，可依下式計算

$$k = \frac{B}{1 + B} \quad (3.3.17)$$

式中， B =紋溝與紋溝間侵蝕之比值，可表為(McCool et al., 1997)

$$B = (\sin \theta / 0.0896) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \quad (3.3.18)$$

當坡長大於 15 ft時，其坡度因子 S 可表為

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & S_o < 9\% \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & S_o \geq 9\% \end{cases} \quad (3.3.19)$$

- 4.將覆蓋與管理因子的比值表改為由前期土地利用、地表覆蓋、作物覆蓋、地表糙度和土壤水分等 5 個次因子乘積形式的計算公式。
- 5.在水土保持措施中，不僅將以前包括的措施如等高耕作、帶狀耕作和梯

田計算進行了改進，而且增加了其它一些措施。

6.在上述所有各個因子的計算中，都充分考慮了季節變化或農事活動的影響。降雨侵蝕力的季節變化以半個月為基本時段分別計算，如果其中有作物輪作或農事活動，還可在半個月內進行時段劃分，以便按照這一時段計算覆蓋與管理因子和水土保持措施因子。這樣，便可足以反映不同時期由於自然和人類活動影響造成的地表狀況變化對土壤流失量的影響。

7.為利取得台灣地區降雨沖蝕指數(Rm 值)及土壤侵蝕性指數(Km 值)，水土保持局已將 4 年（105 年至 108 年）降雨、土壤沖蝕調查及研究成果圖資介接至「行動水保服務網」(<https://serv.swcb.gov.tw/>) 提供線上查詢。

三、土壤侵蝕指標模式(Soil Erosion Index Model, SEIM)

陳樹群等人(1998)為改善 USLE 於臺灣地區之適用性，以 PSIAC(PSIAC, 1968)的概念為基礎，同時運用臺灣地區多年來對土壤侵蝕的野外觀測成果，再考量影響土壤侵蝕的重要因子為依據，發展本土化土壤侵蝕指標模式(Soil Erosion Index Model, SEIM)。本模式採用土壤性質、降雨、地形狀況、土地利用方式及地表植生覆蓋等作為影響土壤侵蝕的主要因子，其架構如圖 調 3-3-7 所示。

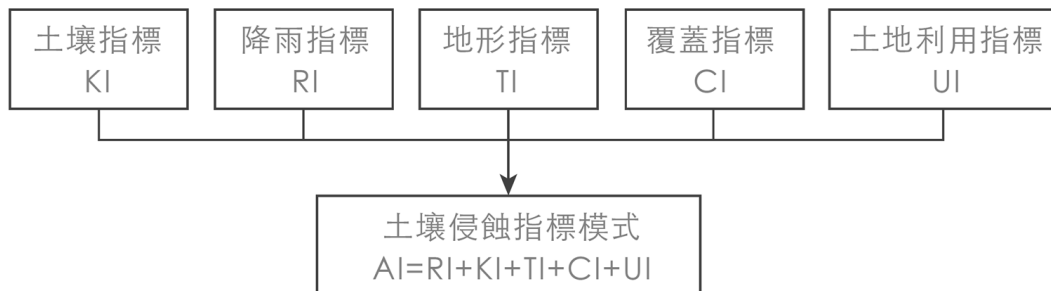


圖 調 3-3-7 土壤侵蝕指標模式架構流程圖

(一) 土壤指標(KI)：

土壤指標推估方式有二：

- 1.由土壤分類經查表 調 3-3-9 取得對應之土壤指標KI值。
- 2.直接以 USLE 之土壤侵蝕指數(K_m)代入下式推估之，即

$$KI = \text{Int}(200K_m) + 1 \quad (3.3.20)$$

(二) 降雨指標(RI)：

降雨指標(RI)係依據月降雨偏差值 S_p (單位:mm)與年降雨量P (單位:m),重新整理合併可得到降雨指標公式,即

$$RI = \text{Int}\left(\frac{PS_p}{62.5}\right) + 1 \quad (3.3.21)$$

(三) 地形指標(TI):

地形指標值係以集水區平均坡度為因子,代入下式求得。利用地形指標關係整理出常用坡度之地形指標對照,如表 調 3-3-10 所示。

$$TI = \text{Int}(10 \times S_0) + 1 \quad (3.3.22)$$

表 調 3-3-9 臺灣地區各主要土類土壤指標值(資料來源:陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明,1998)

土壤分類	KI	土壤分類	KI
玄武岩石質土	6	片岩暗色崩積土	10
玄武岩暗色崩積土	5	片岩淡色崩積土	8
玄武岩淡色崩積土	6	片岩黃壤	11
玄武岩鹼性黃壤	5	片岩紅壤	9
玄武岩酸性黃壤	9	東北部粘板岩非石灰性老沖積土	12
玄武岩紅壤	7	東北部粘板岩石灰性老沖積土	11
玄武岩黑色土	8	東北部粘板岩非石灰性新沖積土	13
火成岩石質土	5	東北部粘板岩石灰性新沖積土	7
火成岩黑色土	4	版岩石質土	6
玢岩紅壤	8	板岩暗色崩積土	10
砂頁岩老沖積土	12	板岩淡色崩積土	8
砂頁岩非石灰性新沖積土	13	板岩黃壤	11
砂頁岩含石灰結核新沖積土	12	板岩紅壤	9
砂頁岩石灰性新沖積土	10	海岸山脈母岩沖積土	8
含石灰結核臺灣粘土	8	火成岩泥岩混合淡色崩積土	10
北部砂頁岩沖積土	4	火成岩泥岩混合黑色土	11
砂頁岩幼黃壤	9	砂頁岩泥岩混合石質土	10
砂頁岩石質土	6	砂頁岩泥岩混合暗色崩積土	11
砂頁岩暗色崩積土	7	砂頁岩泥岩混合淡色崩積土	8
砂頁岩淡色崩積土	14	砂頁岩泥岩混合黃壤	9
砂頁岩黃壤	7	洪積母質紅壤	7
石灰岩黃壤	9	洪積母質黃壤	10
石灰岩紅壤	7	洪積母質淡色崩積土	11
尼岩石質土	13	紅壤母質沖積土	6
東北部片岩非石灰性沖積土	12	低腐植質粘化土	5
東北部片岩石灰性沖積土	14	有機質土	5
片岩老沖積土	11	洪積物石灰岩混合黃壤	7

片岩非石灰性新沖積土	11	洪積物砂頁岩混合黃壤	9
片岩石灰性新沖積土	3	砂頁岩石灰岩混合黃壤	11
片岩石質土	6		

表 調 3-3-10 常用坡度地形指標值表(資料來源：陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明，1998)

平均坡度	<i>TI</i>	平均坡度	<i>TI</i>
< 10%	1	50% ~ 60%	6
10% ~ 20%	2	60% ~ 70%	7
20% ~ 30%	3	70% ~ 80%	8
30% ~ 40%	4	80% ~ 90%	9
40% ~ 50%	5	> 90%	10

(四) 覆蓋指標(CI)：

覆蓋指標初值係以覆蓋率 C_m 值為參考因子。若已知地表覆蓋率 C_m 代入下式中即可求得CI值。根據臺灣不同地表及植被狀況下，整理出常見之覆蓋指標，如表 調 3-3-11 所示。

$$CI = 21 - \text{Int}(20 \times C_m) \quad (3.3.23)$$

(五) 土地利用指標(UI)：

土地利用指標係根據不同土地利用方式對土壤侵蝕之關係，如表 調 3-3-12 求算權值(U_0)，代入式(3.3.24)獲得不同土地利用指標

$$UI = \text{Int}(U_0/8.5) + 1 \quad (3.3.24)$$

或是利用開發度對泥砂產量之影響，其中開發度之定義為道路(或平台)和其上下邊坡崩塌面積及裸露地面積之總和與集水區全面積之百分比，如表 調 3-3-13 所示。

表 調 3-3-11 適用於臺灣地區覆蓋指標值表(資料來源：陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明，1998)

分類	地表及植被狀	C_m	<i>CI</i>
林地	針葉林	100	1
	闊葉林	100	1
	竹林	100	1

草生地	百喜草	100	1
	高爾夫球場	100	1
	戀風草	100	1
	南非鴿草	100	1
	雜草地	93	2
	柏氏小槐花	91	3
	大葉爬地藍	88	3
有樹冠之農園	檳榔	82	5
	香蕉	74	6
	茶	73	6
	柑橘	63	8
	果樹	63	8
農墾地	水稻	82	5
	牧草地	73	6
	特用作物	63	8
	鳳梨	63	8
	雜作	56	10
	花生	50	11
	玉米	50	11
	蔬菜類	39	13
有敷蓋之非農業用地	水泥地	100	1
	瀝青地	100	1
	建屋用地	100	1
	雜石地	100	1
	墓地	100	1
裸露地		0	20
水體		100	1

表 調 3-3-12 不同土地利用下之土壤侵蝕量(日本林野廳，1987)

土地利用型態	土壤侵蝕量(ton/ha)	權值 U_0
森林地	1.8	1.0
草生地	2.1	1.2
農墾地	14.8	8.3
裸露地	87.1	48.4

荒廢地	306.9	170.5
-----	-------	-------

表 調 3-3-13 常用土地利用指標值表

土地利用型態	UI
森林地(針葉、闊葉、雜林、竹林)	1
草生地	1
農耕地(果園、蔬菜園、茶園、牧草原)	2
低密度開發區(開發度低於 20%)	3
中密度開發區(開發度介於 20%與 40%之間)	7~9
高密度開發區(開發度高於 40%)	19~20
裸露地	6~7
崩塌地	20

(六) 土壤侵蝕指標(AI)：

綜合上述各指標，代入下式可得集水區土壤侵蝕綜合指標，即

$$AI = KI + RI + TI + CI + U \quad (3.3.25)$$

由上式與實測土壤侵蝕量SE經迴歸分析求得之迴歸式，便可求得集水區之土壤侵蝕量SE ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$)。陳樹群等人(1998)應用臺灣地區北、中及南部三個試區之實測土壤侵蝕量，以及推估土壤侵蝕綜合指標(SE)建立了下列公式

$$\begin{aligned} SE &= 6 \times 10^{-7} AI^{5.12} & R^2 &= 0.88 & \text{for } AI &\geq 50 \\ SE &= 0.233 AI^{1.83} & R^2 &= 0.94 & \text{for } AI > 50 \end{aligned} \quad (3.3.26)$$

式中，R=迴歸係數。

指標法的特點是簡易，且直接採用本土實測資料進行建模，具有較高的區域適用性。不過，僅採三個試區和天然小集水區及水庫集水區進行驗證，在通用性上宜應持續驗證。

四、土壤侵蝕水力模型

除了集水區地表土壤流失量的估算外，土壤侵蝕亦與非點源污染(non-point source pollution)問題息息相關。非點源污染是當今世界上普遍存在的一個嚴重環境問題，它係指降雨期間遭地表水流淋洗沖刷進入水體的地面污染物，包括土壤

泥砂顆粒、氮磷等營養物質、農藥殘留、...等。這一類型的污染係伴隨降雨全面產生，沒有集中而明確的發生地點，故稱為非點源污染。由於非點源污染與土壤侵蝕關係密切，在一些非點源污染預報模型中皆涉及了土壤流失量的估算，包括農業管理系統中的化學污染物逕流負荷和流失模型(Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems，CREAM)、農業非點源污染模型(Agricultural Non-point Source Model，AGNPS)、農田尺度的水力侵蝕預測模型(Water Erosion Prediction Project，WEPP)、流域非點源污染模擬模型(Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation，ANSWERS)等涉及了坡面土壤流失的相關演算。