

邊坡表層土壤降雨沖刷雲端監測系統研發與應用

周仕勳¹ 張文忠^{2*} 何幸娟³ 林伯勳⁴ 許振崑⁵

關鍵詞：土壤沖刷、非接觸式量測、物聯網、集水區沖蝕量。

摘 要

集水區整體土壤流失量為評估淤積重要指標，傳統以沖蝕針方式進行人工量測，礙於山區場址廣闊且人力抵達不易，監測密度與量測頻率相對較低，不易評估個別降雨事件於不同坡度、坡長與土壤組成之短、長期沖刷行為。本研究以超聲波感測器監測表層土壤坡面高度變化，以非接觸式測量方式避免因沖蝕針設置改變地表逕流導致其周遭沖刷加劇之效應，配合無線物聯網資料傳遞架構，監測成果可定點定時回傳至雲端平台，所發展系統已佈設於現場進行長期測試，結果顯示監測模組可取代現有沖蝕針人為因素限制，得到高密度與高頻率連續量測之沖刷監測資料，後續可用以釐清降雨事件下之沖刷機制，並應用於長期集水區土壤流失量推估之建立。

DEVELOPMENT OF CLOUD SENSING SYSTEM FOR RAINFALL INDUCED SOIL EROSION ON SLOPE SURFACE

Shih-Hsun Chou Wen-Jong Chang

Hsing-Chuan Ho

Bor-Shiun Lin

Chen-Kun Hsu

Department of Civil Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

Disaster Prevention Research Center
Sinotech Engineering Consultants, Inc.
Taipei, Taiwan 11494, R.O.C.

Key Words : soil erosion, non-contact measurement, internet of things, soil loss.

ABSTRACT

Estimation of the soil loss in the watershed is an important index for the silting prediction of reservoir. Erosion pin measured by manual reading has been widely used to measure the slope erosion after rainfall events. Limited by the low density and frequency, those data are difficult to conduct detailed analysis relating the major factors such as vegetation, slope angle, slope length, and soil types with the rainfall characteristics. Moreover, the installation of erosion pin alters the run-off conditions around the pin and induces deeper erosion around the proximity of the pin than the slope. To overcome these limitations, a non-contact sensing module using pairs of ultrasonic distance sensors has been developed. The module is integrated with communication and other electronic components developed for Internet of Things framework and the data can be continuously upload to cloud platform. The system has been deployed in the field and the results show that the module can substitute the erosion pin and those continuous data can be used for advanced study on erosion mechanism and prediction of soil loss in catchment.

¹ 國立成功大學土木工程系博士候選人

² *通訊作者，國立成功大學土木工程系教授

³ 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心研究員

⁴ 財團法人中興工程顧問社防災科技研究中心正工程師

一、前言

台灣受造山運動影響導致山高坡陡，而河川以中央山脈為分水嶺呈東西分流，地勢起伏大固坡陡流急，降雨後即迅速流入大海，且降雨時間及空間分佈不均勻，因而須仰賴興築水庫水壩蓄水。但因地質年代年輕致脆弱之坡地分佈廣泛，使水庫集水區內之坡地常因降雨發生崩塌及表土沖刷，致使集水區上游地表土砂大量流失且增加河流含砂量，土砂沿河床運搬進入庫區內造成水庫淤積。因氣候變遷引致極端降雨頻率提高，降雨時表土沖蝕益加顯著，使下游河流含砂量大，加速河道與水庫淤積，加上每年汛期颱風豪雨降雨強度大，水庫上游集水區洪水挾帶大量泥砂下移至水庫庫區，進而影響水庫正常運轉及使用壽命。

表土沖蝕為水庫淤積土砂來源之一，因此釐清降雨事件下之表土沖刷行為機制，以準確評估符合場址及其氣候條件下之集水區沖蝕量，有助於長期集水區土壤流失量預測模式之建立與對策擬定。傳統集水區表層土壤沖蝕監測多採用沖蝕針人工量測（如圖 1 所示），以竹節鋼筋（沖蝕針）埋至表土下並由人工定期量測沖蝕深度，但因集水區範圍廣大，需花費大量人力與時間閱讀，且數據量測頻率多為每週或月一次，雖可評估場址長期總體土壤沖蝕量，但無法獲取各別有效降雨事件下之土壤沖蝕量，釐清表層土壤流失與堆積行為之機制。

本研究結合近來新興之物聯網（internet of things, IoT）感測概念進行自動化監測模組之研發，採目前廣為應用之微機電系統（microelectromechanical system, MEMS）感測器與開源程式碼之微控制器（Micro control unit, MCU）進行硬體整合，以超聲波（ultrasonic）距離感測器進行非接觸式地表沖蝕量測，並搭配物聯網軟體環境開發、架構監測系統，客製化具無線網路通訊功能，可連續監測坡面表土流失之監測模組。其優勢包括一致化測量架構可避免人為主觀量測誤差、具定點即時回傳監測資料、無線化資料傳遞與節省人工量測之人力資源等，以提升量測資料密度並取得連續沖蝕深度變化，以利後續發展可準確評估考慮場址及其氣候條件下之水庫集水區沖蝕量。



圖 1 現場沖蝕針示意圖

二、文獻回顧

2.1 土壤沖蝕與雨場切割

土壤沖蝕為表層土壤因受外力作用，造成固結土壤發生鬆散、剝落與搬移之現象，引致土壤沖蝕之外力因子為水與風，例如雨水、逕流與風力的侵蝕作用。水蝕是由雨滴打擊地面及地表逕流作用而造成的，逕流流速決定可搬運之土壤顆粒大小，風蝕則是由風吹動引起之土粒移動。過度土壤沖蝕往往會造成土粒流失、土地貧瘠、生產力降低，甚至形成土砂災害，而沖刷之土砂於集水區內將致使水庫淤積行為明顯加速。

台灣受造山運動影響山高坡陡且地質環境脆弱、河川坡陡流急、降雨強度大，因此地表的土壤沖蝕現象明顯，Dadson *et al.* [1] 依據監測成果提出台灣每年平均土壤沖蝕深度約 3~6 mm。而土壤沖蝕與降雨事件之延時與強度有明顯關係，進行降雨引致坡面表土流失深度探討，必須針對單場有效降雨事件進行判定。水保局（2005）採用之雨場切割為以時雨量大於 4 mm 視為連續降雨開始，當連續 6 小時時雨量均低於 4 mm 視為雨場結束，Wischmeier and Smith [2] 提出當單場降雨事件累積雨量低於 12.7 mm，且與該場降雨間隔 6 小時以上無其他降雨，則該場降雨的沖蝕力太小不產生沖蝕，但若 15 分鐘雨量達 6.35 mm 以上時，該降雨事件仍然具備有沖蝕力，符合上述的降雨稱為有效降雨。

2.2 土壤沖蝕量測方法

李建堂 [3] 將土壤沖蝕量測方法分為直接測量法（direct method）、間接測量法（indirect method）與沖蝕預估模式（erosion model）等三大類，其中直接測量法還包括實驗區法和集水區輸砂量法，以實驗區沖蝕數據和集水區水樣採集分析進行土壤流失量評估。而間接測量法又分為以沖蝕針量測地表起伏變化法 [4-8]，其中光電沖蝕針（photo-electronic erosion pin, PEEP）[9,10]、鉍 137、鉍 7 之追蹤劑法 [11-13]，及攝影測量法 [14] 可連續紀錄動態沖蝕行為，連續紀錄地表沖蝕變化。

國內現有監測方法常因人力和經費的侷限，使得土壤沖蝕無法連續且長期進行，導致沖蝕行為的土砂來源和搬運過程預測不確定性高，且量測土壤沖蝕的方法缺乏標準流程，無法有效反應監測表層土壤沖蝕隨時間變化歷史與堆積分佈之形態。

2.3 土壤流失量經驗公式

沖蝕預估模式分為經驗模式和物理模式兩大類，經驗模式主要以案例資料進行統計分析導出的經驗公式，通常較為簡單且容易操作，其中最為人所熟知的為 Wischmeier and Smith [15] 依據土壤沖蝕現地實驗資料提出之通用土壤流失公式（universal soil loss equation, USLE），USLE 常被工程界廣泛應用於土壤流失量估算。

依據美國農業部水土保持手冊，通用土壤流失公式包含降雨沖蝕指數、土壤沖蝕指數、坡長因子、坡度因子、覆蓋與管理因子及水土保持處理因子等六項，其公式如下：

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

其中 A_m 為年土壤流失量 (公噸/公頃/年)、 R_m 為降雨沖蝕指數、 K_m 為土壤沖蝕指數、 L 為坡長因子、 S 為坡度因子、 C 為覆蓋與管理因子與 P 為水土保持處理因子。

通用土壤流失公式因以試驗資料迴歸單位降雨動能推估之土壤流失量，其僅考慮降雨強度與經驗單位降雨動能，對於土壤物理特性及降雨特徵等過於簡化，導致其推估值與集水區現地情況仍有差異，因此以實地量測之土壤沖蝕量將有助於準確評估符合場址及其氣候條件下之集水區沖蝕量，釐清降雨事件下之沖刷行為機制。

三、非接觸式沖蝕量測系統

為取代人工進行沖蝕深度量測，本研究自主發展微型自動化與無線傳輸之邊坡無線沖蝕感測系統，因近年微機電系統與物聯網興起，微型嵌入式系統可同時涵蓋感測、致動與資料處理功能，搭配無線傳輸硬體即可即時回傳感測資料至雲端平台，其優勢為自動化、智慧化與無線化，藉由微型控制板撰寫韌體操作感測器進行物理量 (如距離、力量與壓力等) 之量測，且可即時進行感測資料處理與判讀並以無線方式進行資料傳遞，使用者可即時掌控監測動態資料。

無線沖蝕感測系統由感知端 (client)、閘道資料蒐集器 (gateway) 與雲端平台 (cloud platform) 三者組成，監測場址配置數個感知端，由感知端定時啟動進行非接觸式地表沖蝕測量並即時判讀讀數是否異常後，將量測結果以數位無線形式傳遞到資料蒐集器並即時回傳至雲端，回傳資料可結合氣象站雨量資料進行降雨引致表土沖刷量之探討。以下就各系統模組進行說明：

3.1 感知端 (Client)

感知端之核心為微控板，本研究採用之 MCU 是一單晶片的微控制器，相容於開放原始碼的開發平台 Arduino，允許使用者自行發展符合不同需求的模組，所建構簡易輸入/輸出的控制板，可進行類比/數位的量測或控制，整合 SPI、UART、I²C 與 GPIO 等通訊界面，可與不同之感測器/控制板進行連結，常見具備開放原始碼特性之微控板如基於 ATMEGA328P 晶片的 Arduino UNO、Mega，基於 Linux 的 Raspberry Pi 與基於 ESP8266 晶片之 LUA、D1 等如圖 2 所示。

無線沖蝕系統感知端配置 2 個距離感測模組，允許單個監測節點進行兩點之距離感測，感測模組採用超聲波作

為感測距離之計算，此感測器廣泛運用於汽車倒退避障系統，其硬體精度於平坦量測面可達 0.5 mm，採用多次量測平均技術，可提升其平均值精度至 0.1 mm，足以作為表土沖蝕量感測之用途，量測範圍可由 20 ~ 500 cm，其感測原理如圖 3 所示，以微控板作為控制中樞，控制距離感測元件發出超聲波，並計算超聲波接觸測量面反射回傳至感測器之時間差並乘上聲速求得兩點距離，量測結果不受待測面材質影響，由波傳時間進行計算，感測器內置溫度補償，可部分消除溫度引起之聲速變化效應，距離計算如下式所示：

$$H = \left(\frac{TOT}{2} \right) \times V_{\text{sound}} \quad (2)$$

其中 H 為感測器距地表之距離、 TOT 為旅行時間 (travel of time)、 V_{sound} 為聲速，微控板可設定擷取頻率定時定點進行距離測量，而不同時間點下之距離差值即為表層土壤沖刷量 (Δh)：

$$\Delta h = H_i - H_o \quad (3)$$

其中 Δh 為表土沖刷量、 H_i 時間 i 下之感測器至表土層之距離、 H_o 為模組架設時感測器距表土層之初始距離。

而非接觸式地表沖刷量測於現場坡地測試時，量測值會受反射坡面表層不平坦而出現異常大於合理量測值 (reasonable data point) 之數據，其定義為明顯高於超聲波探頭架設高度之值，因此透過微控板將程式邏輯帶入量測架構中，將監測架構升級為智慧化感測以進行感測資料判讀，提升非接觸式地表沖刷量之準確性與穩定性，其智慧量測流程如圖 4 所示，感測模組架設高度設置為 30 ~ 40 cm 左右，當異常測量結果出現時，如 100 cm 之值出現時予以摒除並重新進行量測，並於完成 5 次合理量測值後進行平均，可排除因不平坦面造成超聲波散射之異常量測值，智慧流程設置最大重複量測次數為 10 次，達上限值時，以現有合理值進行平均代表距離量測結果並傳輸置資料接收器。此流程控制感知端於無線資料傳遞後進入睡眠模式待機，待機耗電量為 1 mA，而運行模式時模組耗電為 12 mA 左右，睡眠模式可節省約 90% 之電量。

沖蝕感知端電子模組成品與現場佈設如圖 5 所示，電子模組長寬高尺寸為 8.5 × 5.5 × 5.5 cm，現場佈設時，將電子模組、鋰電池組與太陽能控制器配置於防水盒內，外構設置一 5W 太陽能板，於正常日照時為電池模組充電，約 4 個小時正常日照即可充飽電池模組，而氣候情況不佳或夜晚時，無線模組可依靠電池模組維持 7 天之運作時間，因此

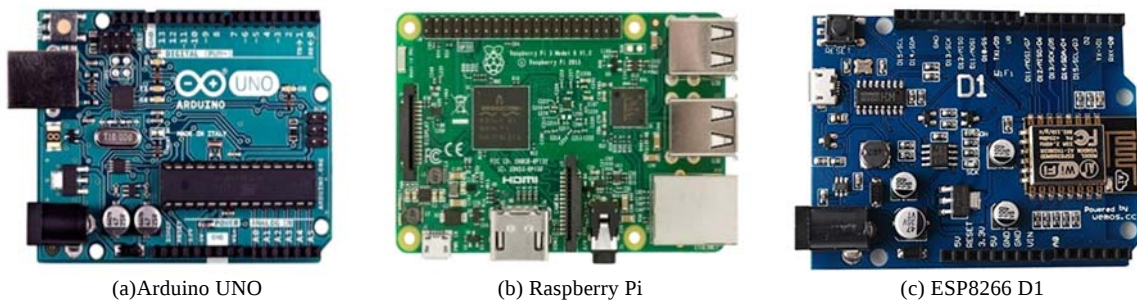


圖 2 具備開放原始碼特性之微控版

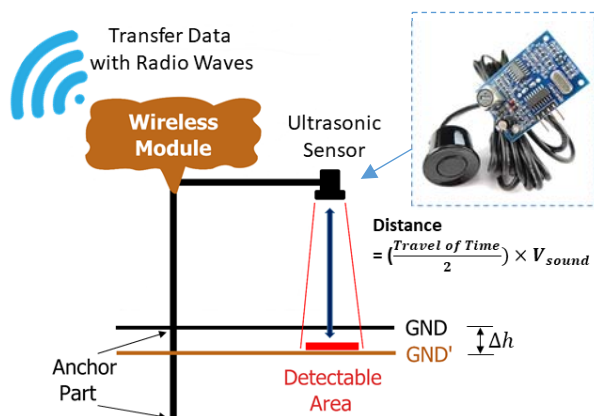


圖 3 非接觸式地表沖刷量測原理

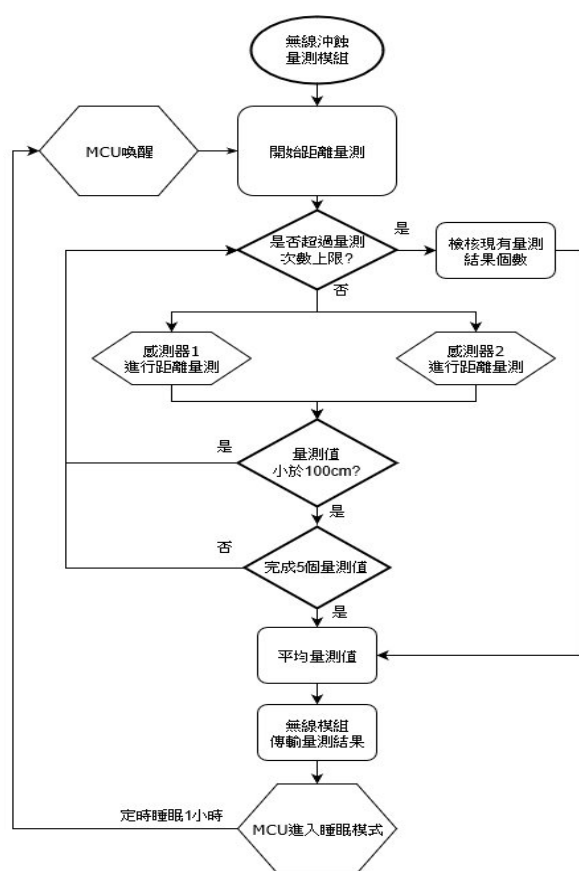


圖 4 非接觸式沖蝕智慧量測控制流程

系統佈設後，可降低電力不足需人工更換電池之情況並持續運轉系統進行地表沖蝕量監測。

3.2 閘道資料接收器 (Gateway) 與雲端平台 (Cloud)

無線沖蝕系統配置一個閘道資料接收器負責接收感知端沖蝕監測數據並傳送至廣域網路之雲端平台，其主要硬體配置為微控板、手機通訊模組 (WCDMA, 3G 無線網路)、無線電接收器 (LoRa) 並配置 micro SD 儲存裝置，監測資料除回傳至雲端平台外，也儲存至模組內建之 SD 卡內進行

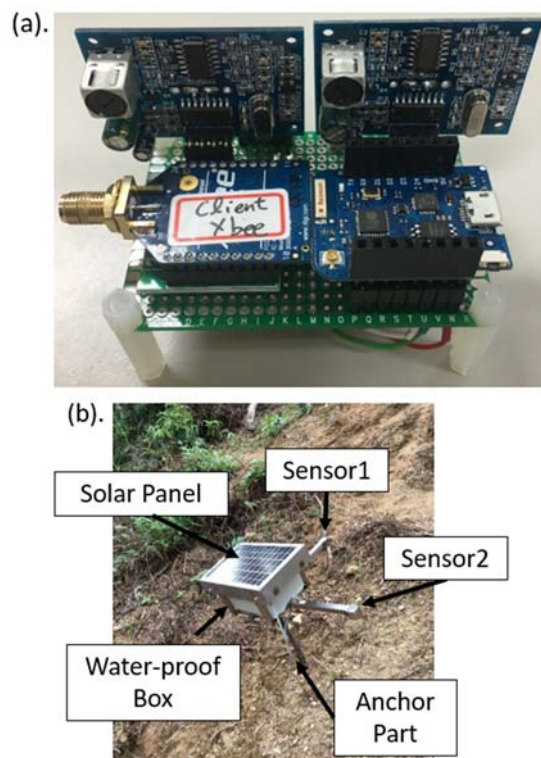


圖 5 無線沖蝕系統感知端 (a) 電子模組 (b) 現場佈設情況

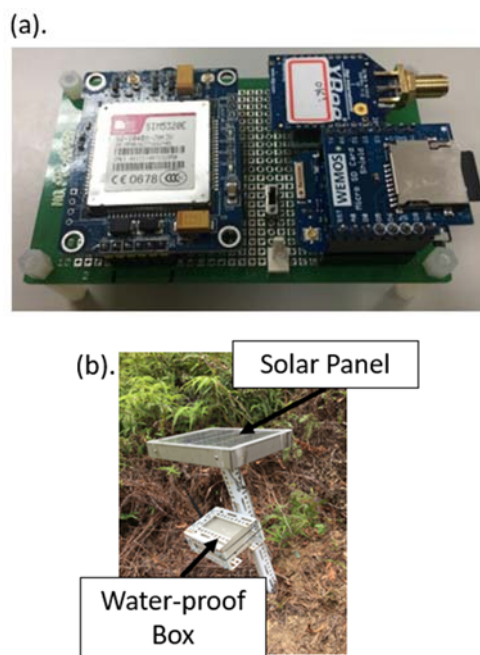


圖 6 無線沖蝕系統閘道接收器 (a) 電子模組 (b) 現場佈設情況

資料備份，圖 6 為無線沖蝕系統閘道接收器電子模組成品與現場佈設情況。

本系統導入物聯網之概念，以無線網路串聯感測器、閘道資料接收器與雲端顯示平台，對於監測現場感知端與閘道資料接收器之區域網路而言，主要以長距低功耗 (long

range low consumption, LoRa) 通訊協議進行無線化資料傳輸，可免去現場佈設線路之需求，節省人力與安裝時間並可擴大監測區域，而閘道資料接收器將視接收資料之節點編號 (node) 傳送至雲端平台對應之頻道，完整資料傳遞流程如圖 7(a) 所示；本研究以 Matlab 公司所提供之免費 ThingSpeak.com 網頁伺服器作為雲端系統，可於雲端平台中設定不同資料接收頻道 (channel) 並即時顯示監測現場回傳之數據，如圖 7(b) 所示。

四、無線沖蝕監測系統現地測試成果

4.1 小尺度監測場址配置與成果

為檢核無線沖蝕感測系統準確性與穩定性，研究初期於一裸露坡面進行人工沖蝕針量測結果並與無線沖蝕感測系統進行比較，選定場址為宜蘭礁溪一裸露之坡面，坡度

約為 35~45 度，現場配置 5 個感測節點 (編號 Node 1~5)，量測點位涵蓋坡面上、中與下段，並設置一閘道資料蒐集器 (gateway) 負責回傳沖蝕監測成果，模組相對位置如圖 8 所示。

為比較人工與無線沖蝕監測成果，現場於每一無線監測模組對應至少一沖蝕針 (編號 EA-01~10)，以無線模組之兩組距離感測器分別佈設於沖蝕針同高層左側與沖蝕針下方坡面，與無線感測模組形成四角形之配置 (如圖 9 所示)。而各無線模組對應之人工沖蝕針編號如表 1 所示，以沖蝕針 EA-02 對應無線模組 Node 2，沖蝕針 EA-04 對應無線模組 Node 3，沖蝕針 EA-08 對應無線模組 Node 4，沖蝕針 EA-09 對應無線模組 Node 5，並以無線模組 Node 1 配置於裸露坡面下用以量測土壤堆積行為。沖蝕針與無線模組分別於 106 年 7 月進行安裝，進行為期 2 個月之測量，無線沖蝕系統每 30 分鐘進行一次沖蝕深度量測，而沖蝕針於 9 月 6 日測量期間之總沖刷深度。

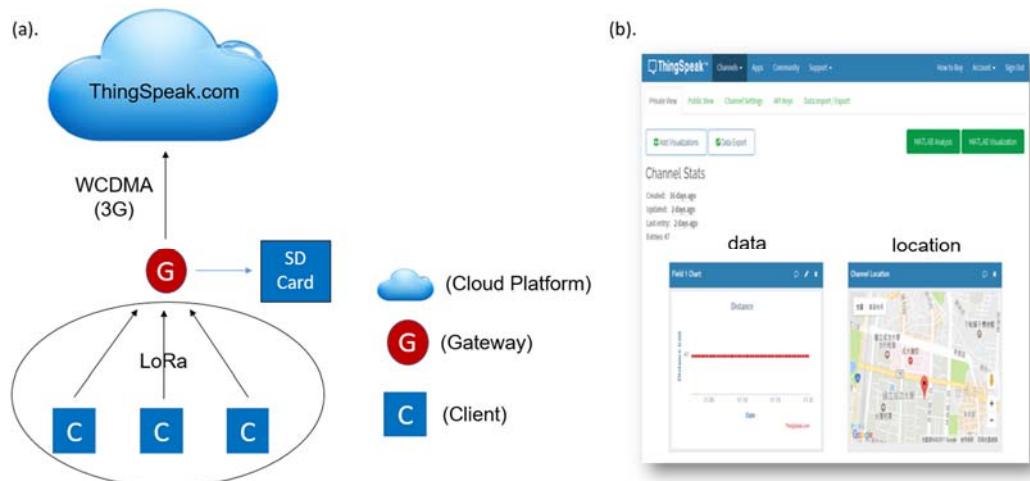


圖 7 無線沖蝕系統 (a) 無線資料傳遞流程 (b) 雲端平台 (ThingSpeak.com)

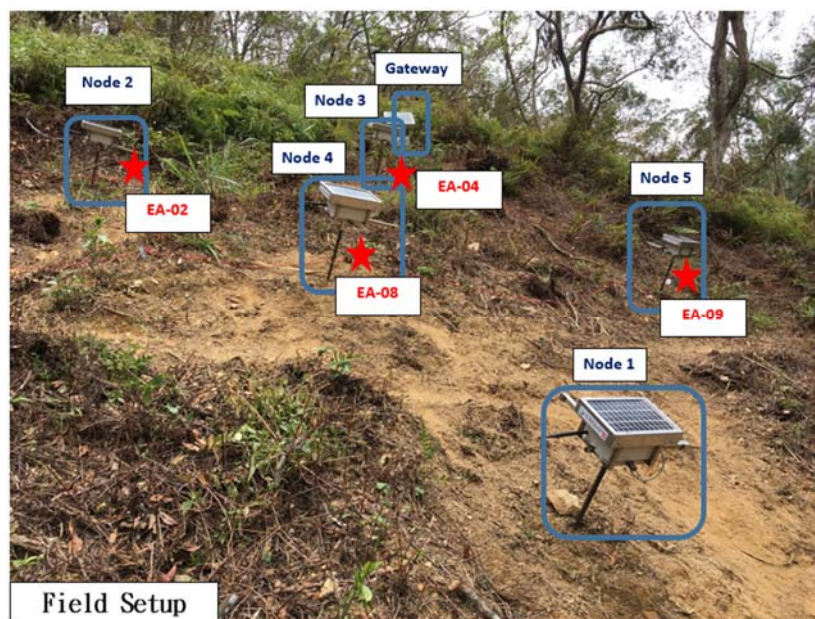


圖 8 無線沖蝕模組現場佈設情況

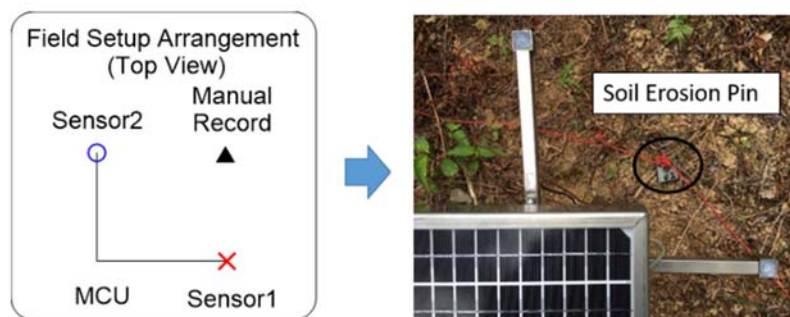


圖 9 無線沖蝕模組與人工沖蝕針配置圖

表 1 沖蝕針資料與無線沖蝕節點對照表

人工沖蝕針	沖蝕針沖蝕深度 (mm)		對應之無線模組
	106/7/7 (初始安裝)	106/9/6	
—	—	—	Node 1
EA-02	0	2.9	Node 2
EA-04	0	3.5	Node 3
EA-08	0	1.5	Node 4
EA-09	0	0.2	Node 5

4.2 自動化與人工監測數據比較

106 年 7 ~ 9 月期間主要有 3 場降雨事件，由人工量測之沖刷深度顯示，此裸露坡面右側 (EA-09) 沖刷行為不明顯 (0.2 mm)，坡面上方 (EA-04) 沖刷量最大達 3.5 mm，而坡面中段沖刷量約為 2.2 mm 左右 (EA-02 與 EA-08)。以無線模組 (Node 1 ~ Node 5) 監測期間總沖刷深度與人工量測結果比較，加上鄰近氣象局測站雨量紀錄，每一模組具有兩組超聲波測距，結果如圖 10 ~ 圖 13 所示；圖中沖刷深度之

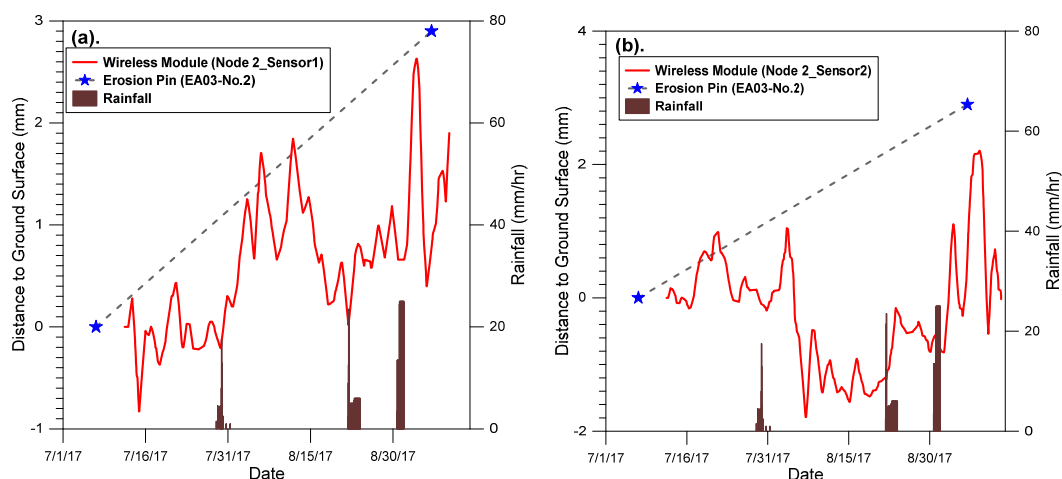


圖 10 無線沖蝕模組 Node2 監測成果

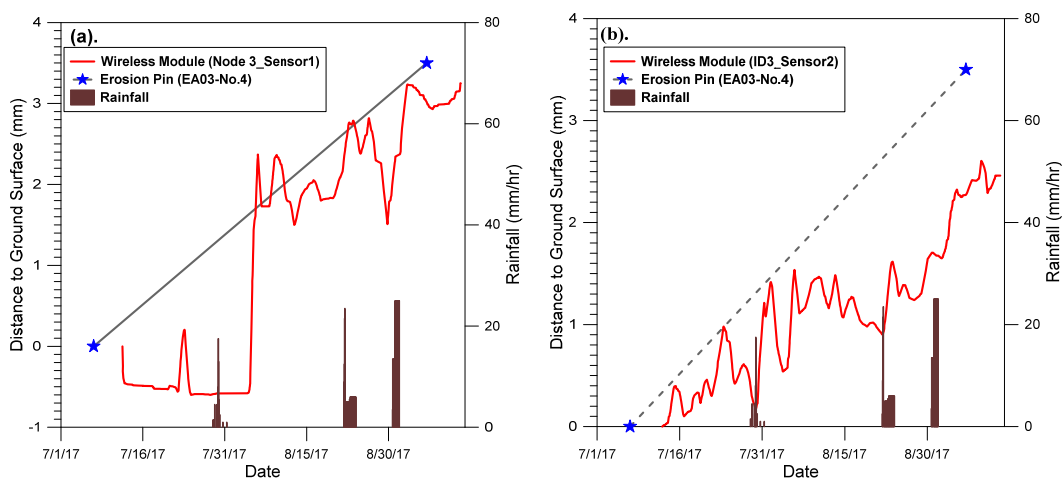


圖 11 無線沖蝕模組 Node3 監測成果

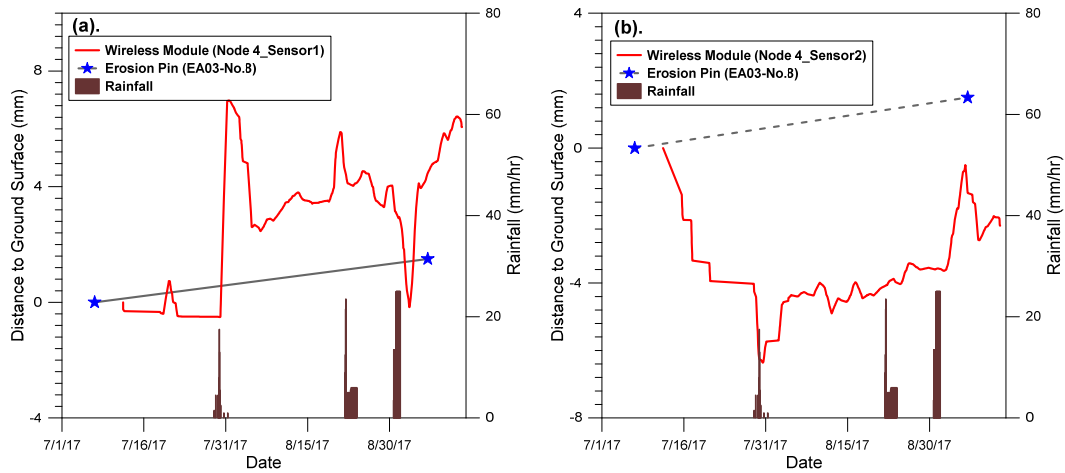


圖 12 無線沖蝕模組 Node4 監測成果

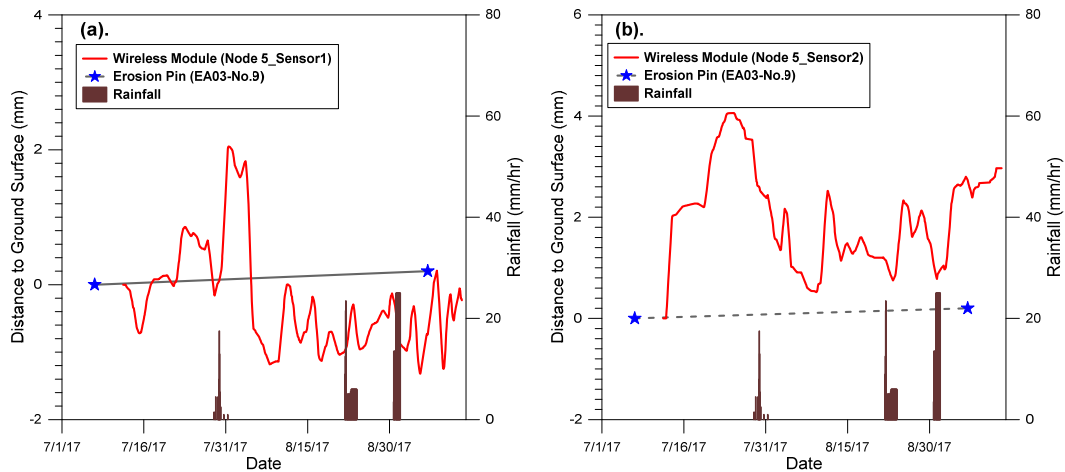


圖 13 無線沖蝕模組 Node5 監測成果

計算為以表層距離減去初始安裝高度，正值為沖刷深度，負值則為堆積高度。圖 10 ~ 圖 13 分別為感測節點 Node 2、Node 3、Node 4 與 Node 5 監測期間與人工量測數據之比較圖，整體而言，沖蝕針與無線模組長期沖刷趨勢一致且總沖刷深度相近，沖刷主要發生於特定降雨事件之後，非降雨期間變化主要與溫度變化及堆積均勻度有關。

監測值以裸露坡面上部、中與下坡面分別討論，位於裸露坡面上部之 Node 3 其長期沖刷深度約為 3 mm 與沖蝕針 EA-04 之 3.5 mm 結果接近；裸露坡面左側之 Node 2 其長期沖刷深度約為 2.7 mm 與沖蝕針 EA-04 之 2.9 mm 結果接近；裸露坡面中間段之 Node 4 其沖刷行為包含明顯之沖刷與堆積，為反應較劇烈的地方；裸露坡面右側之 Node 5 顯示其於此期間淨沖刷量不明顯。另由各感測節點監測資料均反應於降雨事件後其沖刷量有明顯之上升行為，但依坡面之位置、角度情況，降雨事件短時間內之沖刷深度亦有所差異。

對於此裸露坡面，其總體沖刷量隨坡面位置由上而下遞減，推測為坡面上部為植被區域逕流匯集初始接觸的地方，沖刷行為較為嚴重，下方則因地形坡度減緩開始堆積。另監測結果顯示，除降雨事件中雨滴與逕流造成土壤顆粒

之鬆散化、運搬與堆積行為外，模組監測數據於非降雨期間感測距離亦有所變動，其與風蝕、溫度變化及堆積均勻度等因素有關。綜合上述，所研發非接觸式自動監測結果與人工沖蝕針結果並無顯著差異，顯示現有自主研發之無線沖蝕監測系統適用於現地土壤長期沖蝕行為監測，可提供長期沖刷深度與短期沖刷行為之變化。

4.3 水庫集水區坡面表土流失監測

本研究以研發之無線沖蝕監測模組佈設於曾文水庫集水區境內，佈設點位考量分析資料空間均勻性、歷史比較性以及集水區境內土砂變動性等條件，所選定監測區位鄰近三處水文站，且屬 3G 訊號收訊良好與具淺層風化土壤之裸露坡面。考量現地監測區域坡面表層土壤為非均質面，故本研究統一以待測面高程最高點（即量測距離最短值）進行後續沖蝕深度變化探討，並於超聲波反射區域噴灑除草劑抑制植生，降低植生對量測之干擾。

本測試監測日數超過 200 個日曆天，以每 30 分鐘一筆之監測頻率觀測。其中樂野治理分區雨量與沖蝕觀測資料如圖 14 所示，其中 H 為地表與超聲波探頭之距離，降雨期

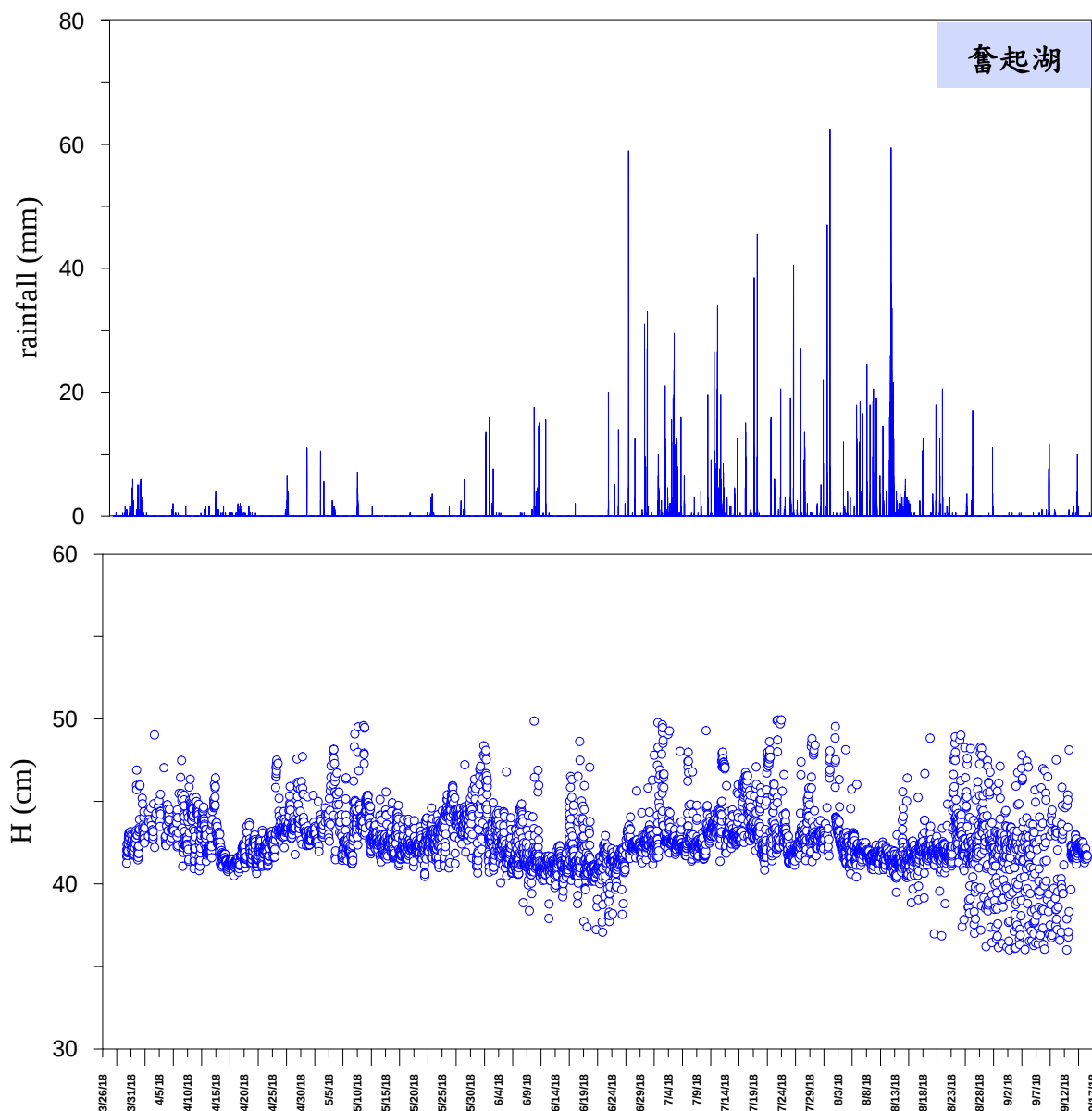


圖 14 樂野治理分區監測資料之冲刷變化趨勢降雨量關係圖

間地表高程變動達 10 公分至 20 公分情況，其係因非接觸式監測儀器於降雨期間易受雨滴影響，故跳動程度較高，為監測儀器限制。因此本研究採用降雨事件前、後相對距離變化計算雨場之冲刷深度，仍可反應表層之冲刷深度變化於無外在降雨干擾情況下之數據觀測降雨事件後冲刷深度。

為驗證坡面無線監測表土流失資料之可信度，本研究於三處坡面表土流失無線監測點位旁，皆佈設一冲刷針，以比對自動計讀與人工測量資料之差異；其中冲刷深度之計算以表層距離減去初始安裝高度，至 2018 年 6 月之比對結果如表 2 所示，結果顯示坡面表土流失無線模組自動計讀資料與人工測量結果相近，各處冲刷量整體相對誤差約介於 1.5~9.9% 之間，以樂野治理分區誤差量相對較大，推測係因樂野崩場地坡度相對於其他兩處監測區域陡，降雨引致冲刷相對較高所致。整體而言，三處監測區域平均相對誤差約 5.9%，且冲刷針之讀數均較非接觸冲刷模組為大，顯

示冲刷針引發之逕流改變確有影響。數據顯示觀測模組資料具參考度與可信度，相關誤差來源，可能係因現地土壤並非均質面，因此回傳之超聲波可能因監測面不平整，而產生散射接收量測誤差，以及受樹葉、雜物、動物或人為影響而造成差異。

表 2 無線冲刷模組監測資料與人工冲刷針量測資料成果比較

監測區	冲刷量 (cm)		
	人工量測 (A)	無線冲刷模組 (B)	相對誤差% $\frac{ A-B }{A}$
大埔治理分區	0.28	0.26	6.5
新美治理分區	0.19	0.19	1.5
樂野治理分區	0.25	0.23	9.9
平均			5.9

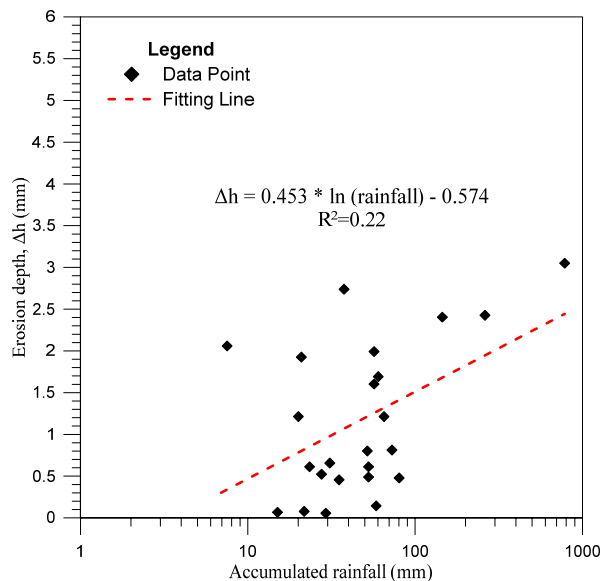


圖 15 樂野治理分區累積雨量與沖刷深度關係圖

利用所得連續沖刷監測記錄及雨場切割，可建立場址降雨特徵與沖刷深度關聯，得到坡面表土流失深度回歸公式，圖 15 為各降雨事件下累積雨量與沖刷深度之關係，觀察結果發現，亦即累積雨量較高降雨事件會伴隨著較顯著土壤沖刷行為，且沖刷於降雨停止後，會持續受地表逕流影響而持續進行。依中央氣象局之雨量分級定義，大雨 (Heavy rain) 為 24 小時內累積雨量達 80 毫米以上，由迴歸關係式可知該場址啟動降雨沖蝕之累積雨量約為 3.5 mm，可知該監測場址極易受降雨沖刷影響，而相關成果可用於沉砂池容量規劃設計及水庫淤積估算。

五、結論與建議

傳統進行沖蝕針量測沖刷深度時，因沖蝕針與地表逕流互制而影響沖刷數據，採用非接觸式沖蝕量測將可避免此影響且達到自動化目標。研究以人工量測之沖蝕針與非接觸無線沖蝕感測系統進行同一場址之沖蝕深度量測，驗證非接觸式沖蝕量測可行性，並結合物聯網概念之無線模組概念可減少傳統人工量測之人力資源，定點即時回傳監測資料、無線化資料傳遞，提升量測資料密度、頻率與品質，準確評估符合場址及其氣候條件下之集水區沖蝕量。

研究進行小規模高密度及集水區大面積測試，小規模現地測試於 2 個月期間經歷 3 場降雨事件之總沖蝕深度約為 3 mm；集水區坡面表土流失監測為期超過 200 天，結果顯示非接觸式自動計讀資料與人工測量結果趨勢相近，各處沖刷量整體相對誤差約介於 1.5 ~ 9.9% 之間，三處監測區域平均相對誤差約 5.9%，且沖蝕針之讀數均較非接觸沖蝕模組為大，顯示沖蝕針引發之逕流改變確有影響。

測試結果顯示所研發之監測系統可實現連續現地沖蝕資料量測，進行有效降雨事件評估確認啟動沖蝕力之降雨延時與強度，有助於掌握降雨沖蝕力對土壤的影響，減少由經驗公式僅由降雨特性推估表土流失造成之誤差。所研發

之測量設備與技術，應能提供更準確土壤沖蝕量測及建立具代表性之場址坡面表土流失深度預測公式。

誌謝

本研究部分成果為交通部運輸研究所「公路邊坡深層滑動無線感測網路監測系統研發」-計畫編號 MOTC-IOT-106-H1DB002a 及農委會水土保持局「107 年 66 座水庫集水區土砂環境檢查與評估」計畫編號 SWCB-107-096 之成果，謹表致謝。

參考文獻

1. Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C., Lague, D., and Lin, J.C., "Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen," *Nature*, Vol. 426, pp. 648-651 (2003).
2. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., "Rainfall energy and its relationship to soil loss," *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 39, No. 2, pp. 285-291 (1958).
3. 李建堂，「土壤沖蝕的量測方法」，國立台灣大學地理學系地理學報，第二十三期，第 89-106 頁 (1997)。
4. Slaymaker, H. O., "Patterns of present sub-aerial erosion and landforms in Mid-Wales," *Transactions of the Institution of British Geographers*, Vol. 55, pp. 47-68 (1972).
5. Lawler, D. M., "A new technique for the automatic monitoring of erosion and deposition rates," *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 2125-2128 (1991).
6. Gardiner, T., "Some factors promoting channel bank erosion, River Lagan, County Down," *Journal of Earth Science Royal Dublin Society*, Vol. 5, pp. 231-239 (1983).
7. Hagerty, D. J., Sharifounnasab M., and Spoor, M. F., "Riverbank erosion - a case study," *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. 20, No. 4, pp. 411-437 (1983).
8. Murgatroyd, A. L. and Ternan, J. L., "The impact of afforestation on stream bank erosion and channel form," *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 8, pp. 357-369 (1983).
9. Lawler, D. M., "A new technique for the automatic monitoring of erosion and deposition rates," *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 8, pp. 2125-2128 (1991).
10. Lawler, D. M. and Leeks, G. J. L., "River bank erosion events on the Upper Severn detected by the Photo-Electronic Erosion Pin (PEEP) system," *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, IAHS Publ., No. 210 (1992).
11. Yang, H., Chang, Q., Du, M., Minami, K., and Hatta, Y., "Quantitative model of soil erosion rates using Cs137 for uncultivated soil," *Soil Science*, Vol. 163, No. 3, pp. 248-257 (1998).
12. Blake, W. H., Walling, D. E., and Q. He., "Using 7Be as a tracer in soil erosion investigations," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 51, pp. 599-605 (1999).
13. Sepulveda, A., Schuller, P., and Walling, D. E., "Use of 7Be to document erosion associated with a short period of extreme rainfall," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 99, pp. 35-49 (2007).

14. Barker R., "Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion," *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 22, pp. 1217-1227 (2000).
15. Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., "Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning," US Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537 (1978).

108 年 4 月 23 日	收稿
108 年 6 月 25 日	修改
108 年 6 月 27 日	接受

