

# 時空巨量資料推估技術 於坡地災害風險預警之發展應用 成果報告書



行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 105 年 12 月

出版編號：SWBC-105-120

**時空巨量資料推估技術  
於坡地災害風險預警之發展應用**  
**Spatial-Temporal Big Data Analysis and  
Estimation in Forecasting and Warning of  
Landslide Disaster**

執行單位：國立台灣大學

執行期間：105 年 01 月 01 日至 105 年 12 月 31 日

計畫主持人：余化龍 教授

**行政院農業委員會水土保持局 編印**

**中華民國 105 年 12 月**

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

# 時空巨量資料推估技術 於坡地災害風險預警之發展應用

## 摘要

坡地災害預警研究多利用雨量資料做為大範圍區域的警戒基準參數。降雨量固然為主要引發土石流之因子。另一方面，土壤含水量為影響降雨期間土壤可吸收之水分多寡，亦控制了表面逕流情形，對於瞭解坡地災害發生潛勢，為一重要因子。然而目前對於土壤含水量的監測卻相當有限，對於土壤含水量觀測之空間區域相對侷限，無法全方位對於所有敏感山坡地區域之土壤含水量進行有效之監控。若能利用衛星遙測技術，以此獲得大範圍且即時的土壤含水量資料，便能解決觀測若能再進站空間上監測之侷限性。

由於觀測技術以及時空資料分析技術之進步，透過大量資料擷取以及分析技術，可望對於得到大範圍之土壤含水量資料，對於坡地災害之預警，本研究以MODIS遙測資料利用作物水壓力指數(Crop Water Stress Index, CWSI)之計算來進行之每日土壤含水量推估，研究期間為2015年，並將結果與水保局現地觀測資料進行比較，結果顯示遙測土壤含水量推估可掌握一定程度之土壤含水量土壤含水量變動，然未來還需要透過參數之最佳化來尋找出一套適合台灣環境之土壤含水量推估系統，以做為坡地災害預警之有效資訊。

關鍵字：土石流預警、土壤含水量、衛星遙測資料

# **Spatial-Temporal Big Data Analysis and Estimation in Forecasting and Warning of Landslide Disaster**

## **Abstract**

The current early warning system for landslide disasters in Taiwan mostly consider the rainfall data only, though from various sources. Though rainfall patterns are the primary triggers to the landslide, soil moisture can also be an important factor for landslide early warning that plays a role in the infiltration pattern during the rainfalls. However, the soil moisture observations are very limited and are not possible to obtain the enough knowledge about the soil moisture levels over the landslide-sensitive areas across entire Taiwan.

To increase the spatial extent of the soil moisture observation, the modern remote sensing techniques along with spatiotemporal estimations can be a solution to obtain the soil moisture in a very cheap cost. In this study, we used MODIS data to retrieve daily soil moisture pattern estimation, i.e., crop water stress index (cws<sub>i</sub>), over the year of 2015. The estimations are compared with the observations at the soil moisture stations from the Bureau of soil and water conservation. Results show that the MODIS data can be helpful to the soil moisture estimation. Further analysis can be required to obtain the optimal parameters for soil moisture estimation in Taiwan, for the purposes of real-time soil moisture estimation in landslide early warning system.

**Keywords : Warning of debris flow, Soil moisture, Remote Sensing**

## 目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	III
表次.....	IV
圖次.....	V
第一章 計畫概述 .....	1-1
第一節 計畫緣起及目的 .....	1-1
第二節 計畫工作項目 .....	1-2
第二章 國內外文獻回顧 .....	2-1
第一節 土石流與土壤含水量之關係 .....	2-1
第二節 衛星遙測技術應用於土壤含水量推估 .....	2-2
第三章 資料蒐集與理論彙整 .....	3-1
第一節 MODIS 衛星遙測資料 .....	3-1
第二節 國內土壤含水量資料 .....	3-3
第三節 土壤含水量指標文獻回顧—TVDI.....	3-6
第四節 土壤含水量指標文獻回顧—CWSI .....	3-8
第四章 研究方法與初步成果 .....	4-1
第一節 研究方法與理論 .....	4-1
第二節 資料蒐集方法與流程 .....	4-3
第三節 氣象資料內插 .....	4-7
第四節 初步成果 .....	4-9
第五章 結論與建議 .....	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期中審查會議記錄暨回覆辦理情形 .....	附錄-1

附錄二、期末審查會議問答記錄 .....	附錄-2
----------------------	------

## 表次

表 3-1 MODIS 產品列表 .....	3-2
表 3-2 土石流觀測站基本資訊 .....	3-4
表 4-1 SEBAL 參數總表 .....	4-4
表 4-2 來自 MODIS 之參數 .....	4-6

## 圖次

圖 3-1 Terra 衛星繞行經過地球上空之時間.....	3-1
圖 3-2 Aqua 衛星繞行經過地球上空之時間 .....	3-1
圖 3-3 MODIS 觀測圖磚編號.....	3-2
圖 3-4 土石流觀測站空間分布圖 .....	3-3
圖 3-5 TVDI 計算原理.....	3-6
圖 3-6 TVDI 概念圖 .....	3-6
圖 3-7 四個不同研究區域之 TVDI 與實際土壤含水量比較 .....	3-7
圖 3-8 綜合圖 2-8 四處研究區域之比較圖.....	3-7
圖 3-9 作物表面溫度與氣溫之差值和蒸發散量之關係.....	3-8
圖 3-10 CWSI 隨灌溉時間之變化.....	3-9
圖 4-1 MODIS 資料下載與處理流程圖 .....	4-3
圖 4-2 氣象站與土石流觀測站於台灣的空間分布圖 .....	4-8
圖 4-3 土石流監測站空間分布圖 .....	4-9
圖 4-4 九份二山測站 CWSI 與土壤含水量比較圖.....	4-10
圖 4-5 九份二山測站 CWSI 與土壤含水量散布圖 .....	4-10
圖 4-6 大鳥測站 CWSI 與土壤含水量比較圖 .....	4-11
圖 4-7 大鳥測站 CWSI 與土壤含水量散布圖 .....	4-11
圖 4-8 羌黃坑測站 CWSI 與土壤含水量比較圖 .....	4-12
圖 4-9 羌黃坑測站 CWSI 與土壤含水量散布圖 .....	4-12
圖 4-10 集來測站 CWSI 與土壤含水量比較圖 .....	4-13
圖 4-11 集來測站 CWSI 與土壤含水量散布圖 .....	4-13

## 第一章 計畫概述

### 第一節 計畫緣起及目的

氣候變遷與全球暖化所造成的環境問題已是全人類所必需嚴正對面的挑戰；聯合國氣候變遷小組(IPCC)於2007年11月的評估報告中提出警告：「全球暖化的影響已經顯而易見，而且本世紀料將加劇，有可能無法逆轉」。面對如此嚴峻的挑戰，必須有更積極的態度與行動力。2009年8月8日的莫拉克風災，造成連續4天近3000mm的強降雨，同時誘發了淹水、淺層與深層崩塌、土石流及堰塞湖等不同類型的災害。不僅造成受災區域之重大災害，也使得現有的土石流警戒、預報與應變機制面臨考驗，需積極尋求新的思維與新的機制，以減低類似莫拉克颱風所誘發之複合型土砂災害導致的嚴重災情[1]。

形成土石流的三大基本條件為豐富的堆積物、陡峻的坡度與充足的水源。由於地滑及土石流的遺傳率甚高，也就是在空間分佈上同一區域在發生的機率非常高，因此若能掌握土石流常發生的地區並積極監控「充足水源」此一誘發條件，則能有效推估坡地災害風險。過去，土石流預警研究多利用雨量資料做為大範圍區域的警戒基準參數，目前最常使用的為降雨強度與有效累積降雨量。而土壤含水量(soil moisture)則控制了降雨時，土壤可吸收的水量多寡，亦控制了逕流大小，亦為提供土石流水預報之重要參數之一，故若能在預警系統中加入土壤含水量狀況之考量，即能提升對於土石流預警做更全面的考量。

近年有研究指出土壤含水量對於土石流發生更為息息相關，並指出土壤含水量較低之區域，其遇到極端降雨時之發生坡地災害風險較



低[2]。換言之，如何取得有效之土壤含水量時空間分布，為面對氣候變遷極端氣象下建構坡地災害之預警系統之相當重要一環。然而目前對於土壤含水量的監測卻相當有限，目前土壤含水量觀測儀大多佈設於已知的潛勢溪流集水區內，對於土壤含水量觀測之空間區域相對侷限，無法全方位對於所有敏感山坡地區域之土壤含水量進行有效之監控。近年許多國外研究開始在探討透過衛星遙測資料對於土壤含水量進行評估，並嘗試透過衛星影像所得到之含水量評估應用於土石流預警使用[3]。

本計畫預期應用衛星遙測資料推估目標研究區域之土壤含水量，並以目標研究區域之土石流觀測站土壤含水量觀測值進行率定，期望能建立出符合台灣環境之土壤含水量推估系統，提供一即時的土壤含水量推估值，作為相關智慧型土石流預警機制之建構，以及相關土石流災害即時疏散避難策略發展之參考。

## 第二節 計畫工作項目

本計畫工作項目如下：

- 一、蒐集國內外應用衛星遙測技術推估土壤含水量之文獻資料
- 二、彙整當前土壤含水量推估指標
- 三、建立衛星影像自動擷取及處理系統
- 四、推估目標研究區域之土壤含水量並進行率定

## 第二章 國內外文獻回顧

### 第一節 土石流與土壤含水量之關係

土石流的發生需具備三種主要條件，豐富的堆積物、足夠的傾斜坡度以及充足的水源[4]。坡度傾斜大小的變動不如其餘兩個條件來的快速與劇烈，故現行土石流災害防治的監測著重於堆積物與水源，其中又以降雨量的監測最為重要，當強降雨發生時，引發土石流的可能性大幅提升[5]，當前預警機制即為專一著重於降雨大小來決定發布警報與否。

除了考量引發土石流的基本三大條件外，國內外研究也開始討論土石流啟動的物理機制究竟為何。就歷史事件來看，引發土石流的情形相當多種可能性，而目前研究發現最常發生的狀況為以下兩類，第一種為因雨水入滲而引發之淺層地滑，將有可能漸漸轉變為規模更為龐大的土石流[6-10]；第二種為當坡地出現集中地表逕流時，將引發一連串的水土反應進而導致土石流的產生[11, 12]。此二種可能引發土石流的情形，所造成的水文水力過程、環境以及氣候條件皆不相同。

在這樣的觀察之下，可知土壤含水量為影響堆積物剪應力作用的關鍵因子[13-17]。諸多研究開始進行關於土壤含水量與土石流之間的關係。研究指出，一定強度的降雨為造成土石流的最大原因，但強降雨若配合不同的臨前土壤含水量情形，將導致不一樣的結果。有研究指出，若臨前含水量過高，反而不會導致土石流的發生[4]，若臨前含水量較低時，降雨來臨時入滲速度比臨前含水量較高時更快，更有機會造成岩床與堆積物之間滑動。有學者以渠道模擬實驗預期找出最可能引發土石流之臨前土壤含水量情形[18]，結論

指出土石流引發關鍵在於降雨所導致地表逕流，其水分是否能順利入滲進土層之中，造成土層之間的內部侵蝕。若臨前土壤含水量較高(>5%)或近乎乾燥時，反而導致降水入滲速度不夠快，難以導致以上情況發生。退一步來說，地表逕流的產生也與土壤含水量息息相關[19]。國內學長專家也提到，土石流的引發會依據各種不同環境條件而決定，若土體顆粒細、疏鬆、含水量較高且具有較陡地形時，僅需少量的水即可能引發土石流。[20]。故臨前土壤含水量為一土石流啟動機制之重要因子，若能即時掌握各地區土壤含水量情形，將大幅提高對於土石流預警的準確度。

## 第二節 衛星遙測技術應用於土壤含水量推估

在尚未出現遙測技術時，各種環境的資訊只能以測站來蒐集資料，但測站的架設與維護需要一定的開銷，只能架設於重點區域，無法獲得大面積的環境資訊。隨著遙測技術的蓬勃，若能應用遙測大面積之影像資訊進行適當的處理，即可獲得大範圍且即時之資訊。遙測初期以航空照相為主要資訊來源，感測範圍為近紫外線、可見光、近紅外線等波段，由於航空飛行受氣候影響相當劇烈，難以長期持續的獲得遙測資訊。1972 年美國發射了地球資源科技衛星 ERT-1(即現今 Landsat 衛星系統)，開啟對地球環境遙測的新紀元。由於衛星運行依循一定規律，且不如航空飛行會受到氣候不佳的影響而無法進行量測，故現今遙測改以衛星遙測系統為大宗。衛星遙測可量測之光譜波段根據不同衛星遙測系統而有所不同，以美國 NASA 的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)衛星系統來說，其涵蓋波段為  $0.4\mu\text{m}\sim 14.4\mu\text{m}$ ，可量測到可見光、近紅

外光至中紅外光之間的波段資訊，對於農業及環境監測而言即可獲得許多有用的訊息。

早期研究指出，土壤含水量與地物植被之蒸發散有一定之關係(Kramer et al. 1969)，但蒸發散的量測與計算需應用到諸多氣象因子觀測資料，計算過程若因有一觀測因子缺漏，即導致推估困難[21]。學者開始試圖藉由遙測資料進行土壤含水量推估。地表溫度與植生指數隨即成為土壤含水量推估熱門的研究對象[22, 23]，若結合此二者，將可獲得更加完整之土壤含水量訊息，TVDI溫度植生乾燥指數[24]開始被廣泛應用。也有學者應用此一土壤含水量指標對泰國Maesa集水區進行土壤含水量推估[25]，預期能加強其水資源管理。除了TVDI之外，尚有其他能代表土壤含水量之指標，如由作物潛勢蒸發散量所計算之CWSI(Crop Water Stress Index)，乃藉由作物表面溫度所進行之推估[26, 27]。近年來有國外學者嘗試以衛星遙測技術來計算CWSI[28]。有研究指出，植物蒸發散的情形與植被溫度與氣溫之差值息息相關[27]，進而發展出一套以地表能量平衡為原則的演算式[29]，期望藉此找尋出能有效推估作物蒸發散的關係式，即能得知目標區域之作物生長情形，進而得知該區域之土壤含水量狀況[30]。

在防災領域上，土壤含水量對於坡地災害的影響也受到學者注目與研究[15, 31-33]。近年有國外學者研究以遙測計算之土壤含水量指標來評估坡地災害發生之情形[14, 34]，可見其影響力，不過目前在國內較少此類研究，故藉由此計畫期望能進行台灣地區遙測資訊對於土壤含水量的監測。

## 第三章 資料蒐集與理論彙整

### 第一節 MODIS 衛星遙測資料

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 為美國太空總署 Terra 及 Aqua 衛星所搭載的重要裝備之一。Terra 衛星的軌道運行設計為早晨時(UTC 時間)可由地球北端越過赤道，到達地球南端(如圖 3-1)；而 Aqua 衛星則為下午時(UTC 時間)由地球南端越過赤道，到達地球北端(如圖 3-2)。每一至兩天 Terra 及 Aqua 衛星之 MODIS 將可觀測完整個地球，取得 36 個波段的光譜資料，以圖磚的形式分布於整個地球，圖磚編號如圖 3-3。這些光譜資料將有助於我們了解整個地球陸地上與海洋上的能量活動情形，對於建立全球系統模型中扮演重要的角色，有助於我們更加準確的預測地球上的變動，讓決策者有更好的參考依據。

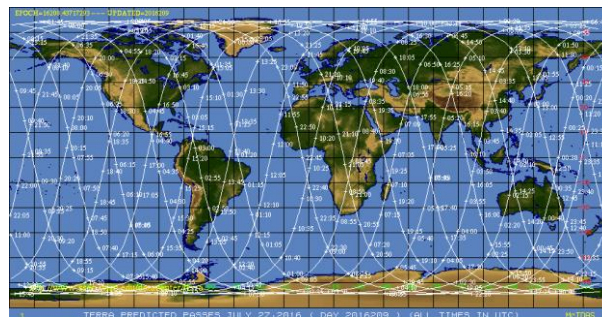


圖 3-1 Terra 衛星繞行經過地球各地上空之時間

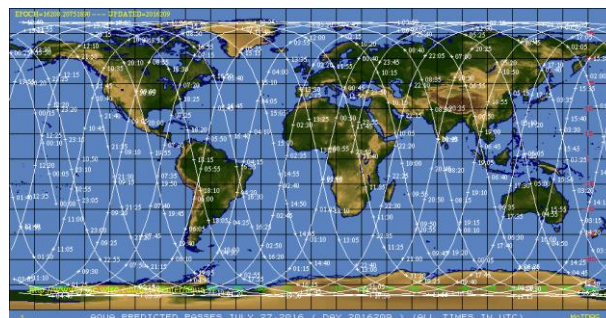


圖 3-2 Aqua 衛星繞行經過地球各地上空之時間

資料來源：<https://modis.gsfc.nasa.gov/>

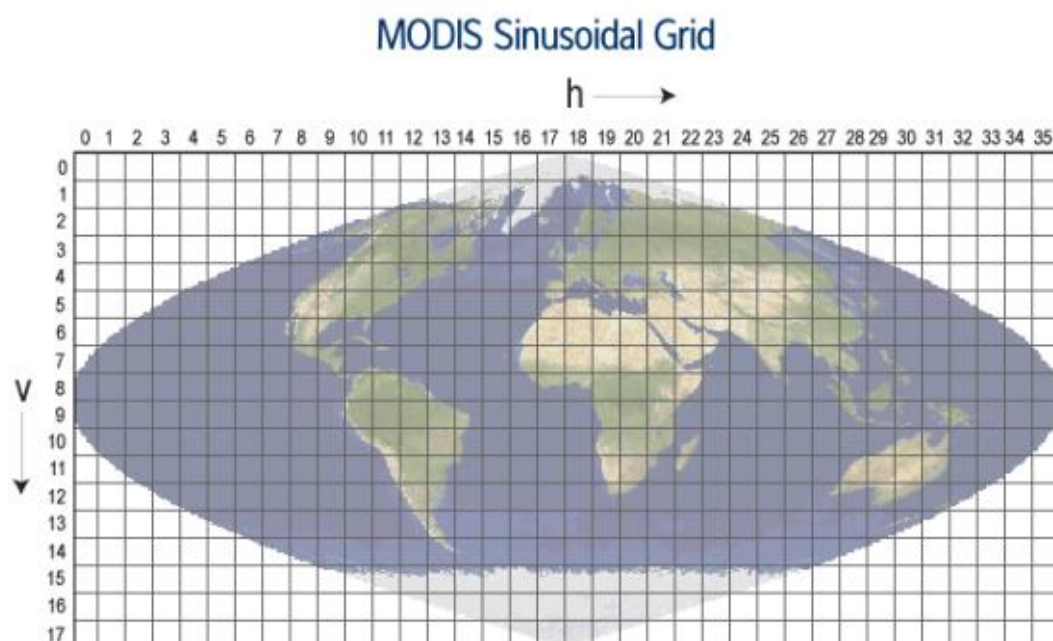


圖 3-3 MODIS 觀測圖磚編號

資料來源：<https://modis.gsfc.nasa.gov/>

基於 MODIS 所觀測到的各波段光譜資料，將可藉由物理方程式演算出各種不同產品，同一項產品也提供不同的解析度資料，如表 3-1 所示。本計畫期望運用由 MODIS 觀測資料演算出之產品，建立一即時土壤含水量指標系統。

表 3-1 MODIS 產品列表

Shortname	MODIS Product	Raster Type	Res (m)	Temporal Granularity
MCD43A3	Albedo	Tile	500m	16 Day
MOD11A1	Land Surface Temperature & Emissivity	Tile	1000m	Daily
MOD13A1	Vegetation Indices	Tile	500m	16 Day

資料來源：<https://modis.gsfc.nasa.gov/>

## 第二節 國內土壤含水量資料

本計畫採用行政院農業委員會水土保持局土石流防災資訊網所提供的土壤含水量資料來進行推估結果的率定。水土保持局共架設了 26 座土石流觀測站，分別位於大粗坑、蘇樂、司馬庫斯、玉峰、下田埔、白布帆、松鶴、上安、郡坑、神木、豐丘、九份二山、南豐、華山、坪頂、豐山、羌黃坑、集來、來義、和中、大興、鳳義坑、射馬干、大烏、寒溪及火炎山，測站資訊如表 3-2，空間分布如圖 3-4 所示。其中位於寒溪及火炎山的測站資料並未開放申請，其他 24 座觀測站之觀測資料皆可申請。由觀測資料供應平台中，可查詢到最早的土壤含水量資料為 2008 年的觀測資料。土壤含水量計設定為每 5 分鐘會紀錄一筆觀測資料，不過偶有漏測之情形。

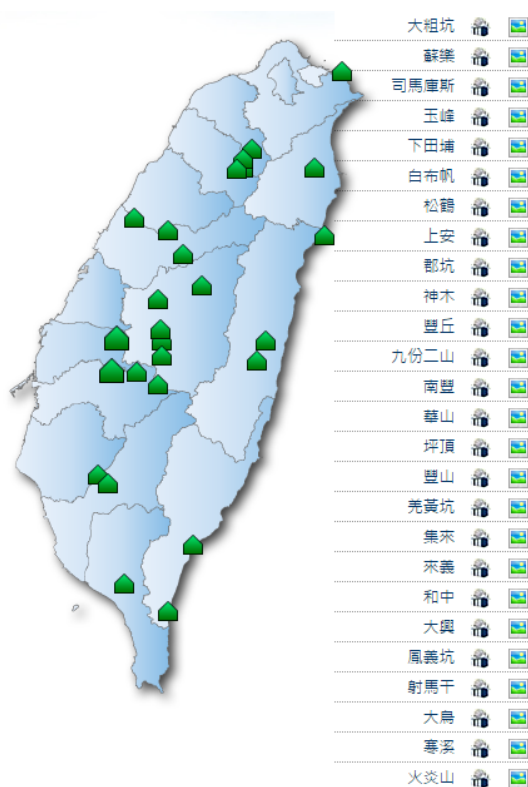


圖 3-4 土石流觀測站空間分布圖

資料來源：土石流防災資訊網 <http://246.swcb.gov.tw/>



表 3-2 土石流觀測站基本資訊

觀測站	高程 (m)	TM 二度分帶 X 座標	TM 二度分帶 Y 座標
大粗坑	196	334625	2776134
蘇樂	679	286109	2732677
玉峰	708	280939	2727553
下田埔	974	276835	2725698
白布帆	503	240423	2688002
松鶴	770	248525	2674657
上安	828	237412	2624605
郡坑	647	236766	2626219
神木	1187	235367	2602749
豐丘	633	237443	2618257
九份二山	538	235142	2649469
南豐	790	259016	2656957
華山	542	209977	2610061
坪頂	306	213215	2627817
豐山	933	223941	2609683
羌黃坑	274	201720	2552550
集來	400	207449	2547710



來義	190	216704	2491823
和中	19	325315	2685218
大興	259	288581	2615400
鳳義坑	236	293458	2626390
射馬干	229	253895	2513847
大烏	190	216704	2491823

資料來源：土石流防災資訊網 <http://246.swcb.gov.tw>

### 第三節 土壤含水量指標文獻回顧—TVDI

溫度植被乾燥指數(Temperature Vegetation Dryness Index)為一在遙測領域中廣泛被應用於表示土壤含水情形之指標，其計算見圖 3-5 所示，圖形代表意義見圖 3-6 所示，橫軸為植被指數(越高表示地表植被越豐富)，縱軸為地表溫度。圖中三角形即可代表研究區域之土壤含水量情形，若位於三角形左上方，則表示該區域土壤乾燥，植被稀少，即為裸土區域；若研究區域之土壤含水量情形位於右下方三角形，則表示土壤含水量高，且地表植被豐富。[23]

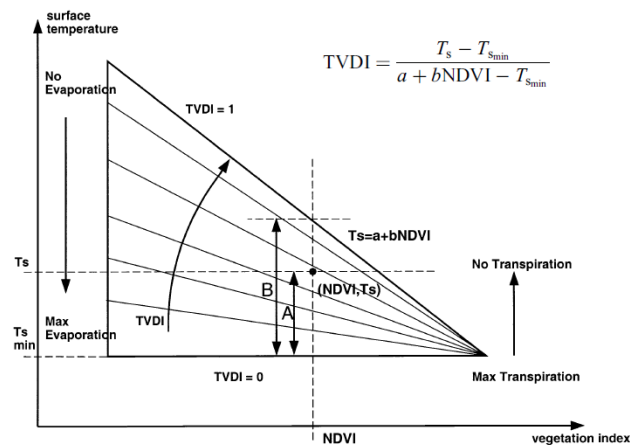


圖 3-5 TVDI 計算原理

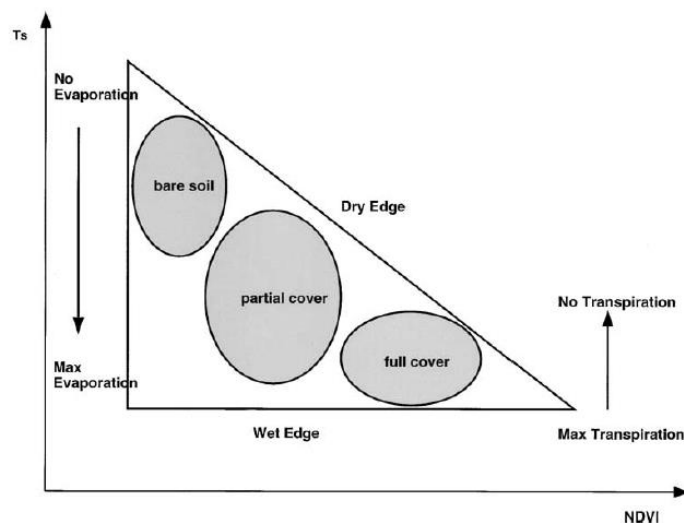


圖 3-6 TVDI 概念圖

根據前人研究[23]，計算出之 TVDI 與實際土壤含水量之關係如圖 3-7、圖 3-8 所示。由圖 3-8 可得知，TVDI 與實際土壤含水量呈現一負相關關係。

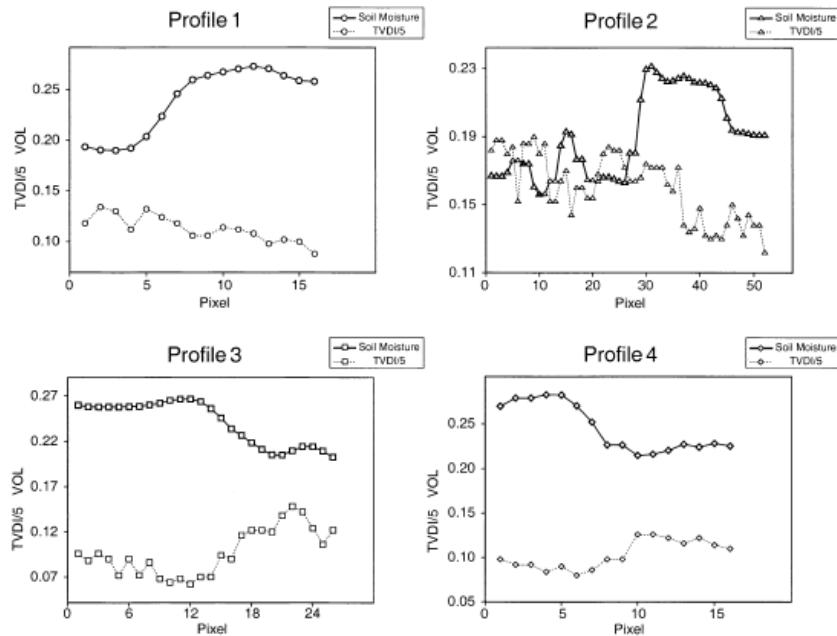


圖 3-7 四個不同研究區域之 TVDI 與實際土壤含水量比較

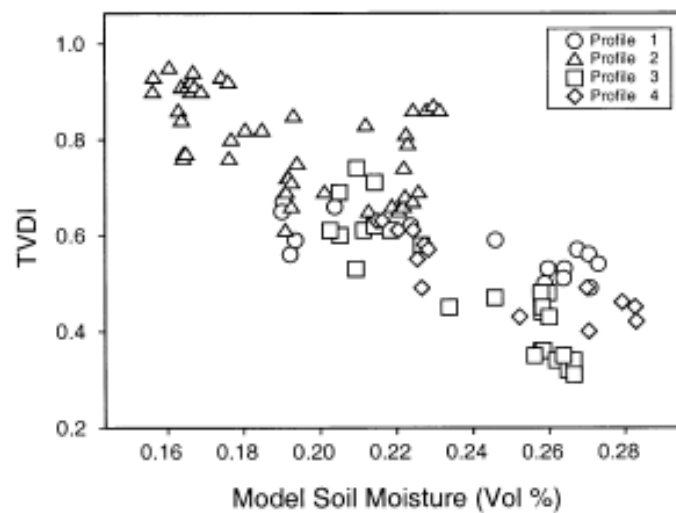


圖 3-8 綜合圖 2-8 四處研究區域之比較圖

資料來源：Sandholt, I., K. Rasmussen, and J. Andersen, *A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status*. Remote Sensing of environment, 2002. 79(2): p. 213-224.

#### 第四節 土壤含水量指標文獻回顧—CWSI

前一節所探討的土壤含水指標：TVDI 乃利用地表溫度與植被指數之關係建構其關係，雖然計算容易且直觀，但其指標僅能代表表層土壤之含水情形。CWSI(Crop Water Stress Index)之原理為以作物實際蒸發散量與潛勢蒸發散量的比值來做計算，能代表出作物根系所達深度的土壤含水量情形。此一指標構想源自當作物擁有充足水分能進行蒸發散時，作物表面溫度將低於氣溫，利用此一關係與蒸氣壓做比例後可得出符合作物蒸發散特性的指標。如圖 3-9[27]所示，作物表面溫度與氣溫之差值與蒸氣壓差呈現一線性關係，由此特性可計算出一代表作物潛勢蒸發散量之指標[27]。

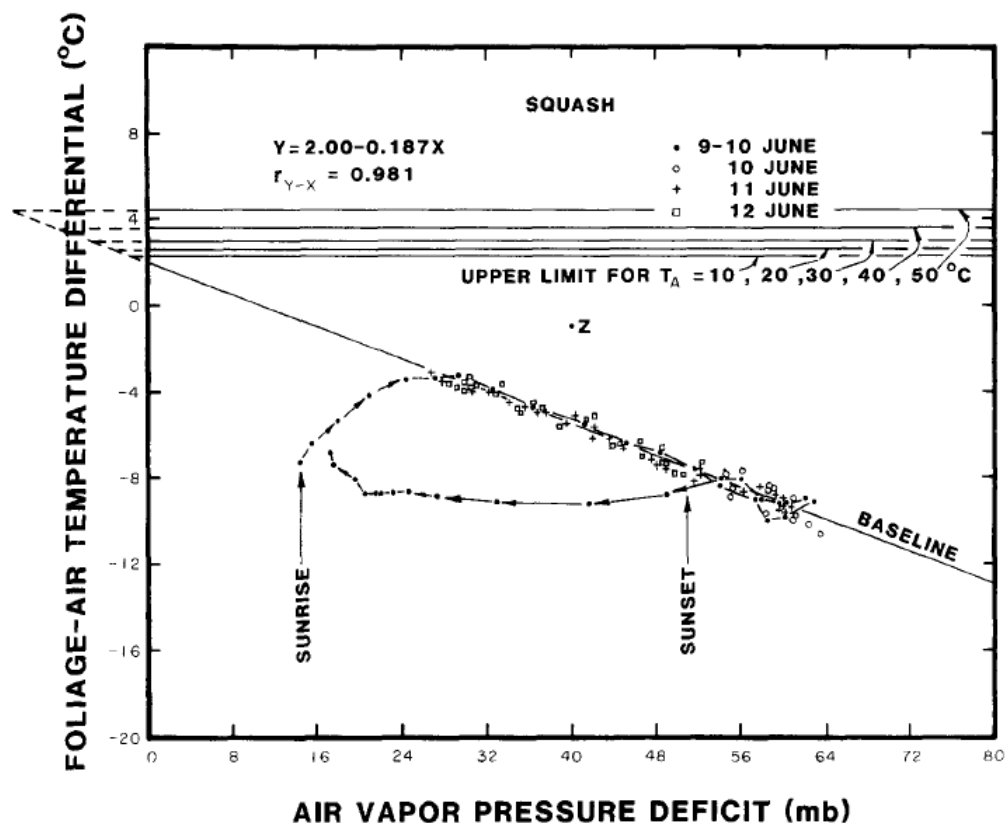


圖 3-9 作物表面溫度與氣溫之差值和蒸發散量之關係

經地表能量平衡方程式與 Penman-Monteith 蒸發散方程式可合併推導得出此一作物表面溫度所代表的土壤含水情形指標可利用作物實際蒸發散量與潛勢蒸發散量的比值來計算。如圖 3-10[26]所示，實線部分為觀測區域計算出之 CWSI 趨勢線，位於 TIME=100 處之垂直虛線表示該觀測區域灌溉之時間點，可得知 CWSI 趨勢線能反映出作物所在處之土壤含水情形，彼此呈現負相關關係[26]。

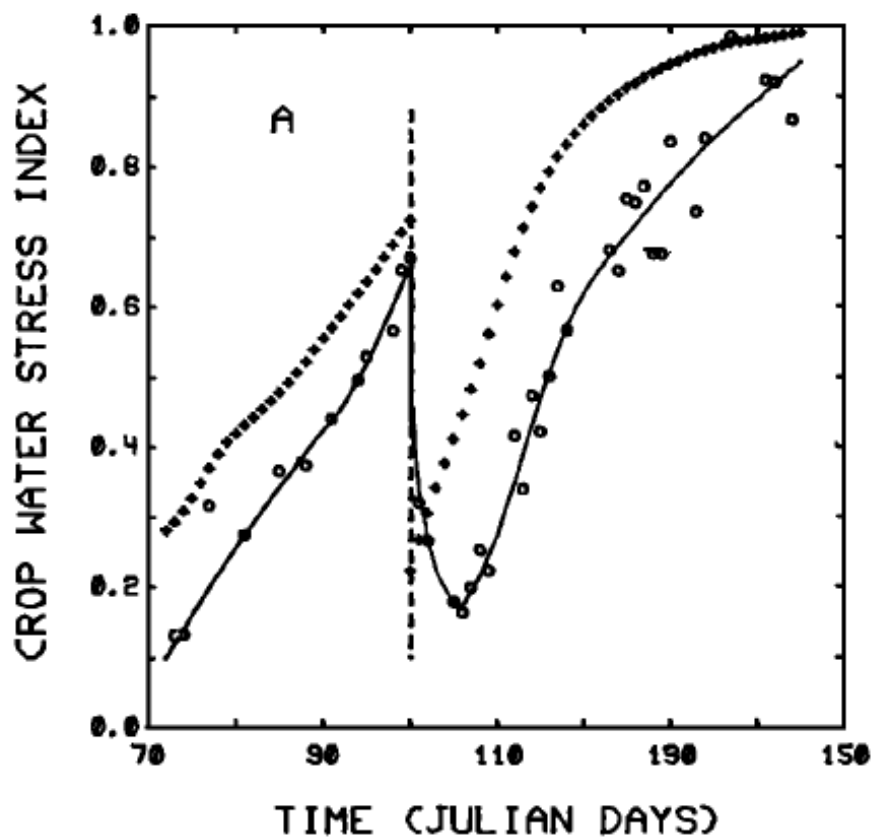


Fig. 3. Crop water stress index as a function of Julian days for plot A, which received a single postemergence irrigation. Circles represent the data points, and the solid line was drawn by eye to show the trend of the data points. The plus symbols represent the extractable water used from the 0- to 1.1-m depth. Values on the ordinate also represent extractable water used.

圖 3-10 CWSI 隨灌溉時間之變化

資料來源：Jackson, R.D., et al., *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. Water resources research, 1981. 17(4): p. 1133-1138.

## 第四章 研究方法與初步成果

### 第一節 研究方法與理論

本研究以 CWSI(Crop Water Stress Index)建立一地之土壤含水量推估值，並與土石流防災資訊網提供之觀測土壤含水量做驗證。

CWSI 經前人研究可以地表能量做計算：

$$CWSI = 1 - \frac{LE}{R_n - G}, \text{ 式 3-1}$$

$$LE = R_n - G - H, \text{ 式 3-2}$$

如式 3-1 所示，LE為潛熱通量， $R_n$ 為淨輻射量，G為土壤熱通量。而LE的計算如式 3-2 所示，其中H為可感熱通量。上述地表能量可經由 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)之演算式計算，如式 3-3 至式 3-5 所示[29]。

式 3-3 為淨輻射能量之物理方程式，淨輻射量即為目標系統所接收之總輻射能量值。式中可知計算方法為將短波即長波輻射依據特性及地表反射率做運算，各參數詳細說明如式 3-3 所示。

$$R_n = (1 - \alpha)K^\downarrow + L^\downarrow - L^\uparrow - (1 - \epsilon_0)L^\downarrow, \text{ 式 3-3}$$

其中 $\alpha$ 為地表反射率， $\epsilon_0$ 為地表放射率， $K^\downarrow$ 為短波輻射量( $W/m^2$ )，如式 3-4 所示； $L^\downarrow$ 為入射長波輻射量( $W/m^2$ )，如式 3-5 所示； $L^\uparrow$ 為出射長波輻射量( $W/m^2$ )，如式 3-6 所示。

$$K^\downarrow = S_c \cos \theta_s \left( \frac{d_m}{d} \right)^2 \tau_{sw}, \text{ 式 3-4}$$

其中 $S_c$ 為太陽常數，1367 ( $W/m^2$ )； $\theta_s$ 為太陽入射天頂角； $d_m$ 為平均地日距(km)；d為地日距(km)； $\tau_{sw}$ 為短波波段大氣穿透率。

$$L^{\downarrow} = e_{\text{sky}} \sigma T_s^4, \text{ 式 3-5}$$

其中  $e_{\text{sky}}$  為大氣放射率； $\sigma$  為史帝夫波茲曼常數 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ )； $T_a$  為氣溫 (K)。

$$L^{\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4, \text{ 式 3-6}$$

其中  $\varepsilon_0$  為地表放射率； $\sigma$  為史帝夫波茲曼常數 ( $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ )； $T_s$  為地表溫度 (K)。

土壤熱通量為目標系統未接收到之輻射能量，轉而由土壤接收。土壤熱通量與  $T_s$  (地表溫度)、 $\alpha$  (地表反射率)、植被指數 (NDVI) 及淨輻射量 ( $R_n$ ) 有關，各參數詳細說明如式 3-7 所示。

$$G = T_s (0.0038 + 0.0062\alpha)(1 - 0.978\text{NDVI}^4) \times R_n, \text{ 式 3-7}$$

其中  $R_n$  為淨輻射量 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )； $T_s$ ：瞬時地表溫度 (K)； $\alpha$  為地表反射率；NDVI 為常態化差值植生指標。

可感熱通量為使目標系統產生溫度改變之輻射能量值。其計算與空氣密度、空氣比熱、地表溫度與氣溫之差值及熱傳空氣動力阻抗等參數相關，各參數詳細說明如式 3-8 所示。

$$H = \frac{\rho C_p}{r_{\text{ah}}} dT, \text{ 式 3-8}$$

其中  $\rho$  為空氣密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $P$  為氣壓 (kPa)； $rh$  為相對溼度 (%)； $T_a$  為氣溫 (K)； $C_p$  為空氣比熱 ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )； $dT$  為瞬時地溫與氣溫差值 (K)； $r_{\text{ah}}$  為熱傳空氣動力阻抗，如式 3-9 所示。

$$r_{\text{ah}} = \frac{1}{k^2 u(Z)} \ln\left(\frac{Z_{\text{ref}}}{Z_{\text{oh}}}\right) \ln\left(\frac{Z}{Z_{\text{om}}}\right), \text{ 式 3-9}$$

其中  $k$  為 Von Karman constant； $Z_{\text{ref}}$  為氣溫計之高度 (m)； $Z_{\text{om}}$  為動量傳遞粗糙長度 (m)； $Z_{\text{oh}} = 0.1 Z_{\text{om}}$  (m)； $Z$  為氣象站風速儀高度 (m)； $u(Z)$  為在  $Z$  高度下之風速 (m/s)。

## 第二節 資料蒐集方法與流程

經由 MODIS 網站上可連結至其衛星遙測演算產品資料庫 (<http://modis.gsfc.nasa.gov>)，資料庫內存有全世界所有地區(圖 2-3)觀測資料之 HDF 檔。若由人工手動方式抓取資料將耗費大量時程選取並下載，本研究利用開源程式語言—Python，結合模組 pyModis (<http://www.pymodis.org>)進行自動化的資料下載。程式中可指定所需資料之日期、時間範圍、產品編號，即可由 MODIS 資料庫中下載所需資料。

MODIS 所提供之資料格式為 HDF 檔，HDF 全名為 Hierarchical Data Format，用於儲存與組織較大量且種類繁多的資料。由於 MODIS 產品之資料與諸多輻射頻段及觀測條件有關，資料的儲存格式上便選擇使用 HDF 檔。此種檔案格式無法直接利用，需經過特別的地理資訊資料庫—GDAL(Geospatial Data Abstraction Library)來進行處理。本研究利用 OSGeo4W 程式來進行 HDF 檔案的處理。

蒐集並處理 MODIS 所需資料之流程如圖 4-1 所示：

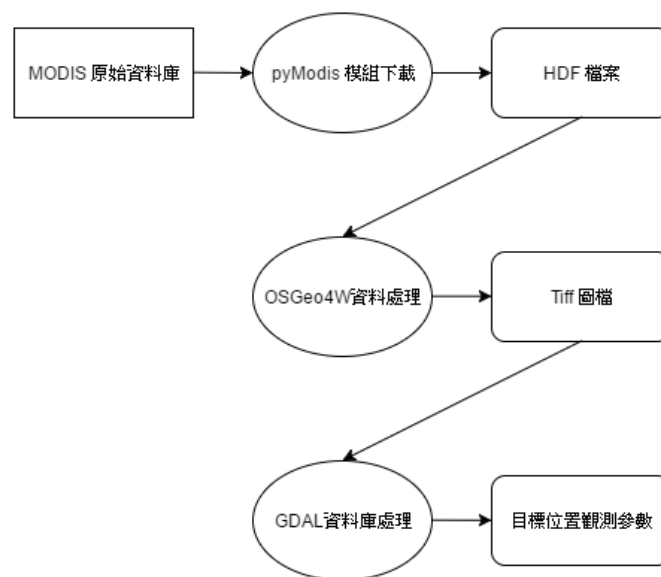


圖 4-1 MODIS 資料下載與處理流程圖

資料來源：本計畫



SEBAL 演算式所需參數皆以上述流程及中央氣象局觀測資料查詢系統來取得，整理如表 4-1 所示。

表 4-1 SEBAL 參數總表

SEBAL 參數	參數資料來源
$\alpha$ (地表放射率)	MCD43A3
$S_c$ (太陽常數)	1367 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$T_s$ (地表溫度)	MOD11A1
$\varepsilon_0$ (地表放射率)	MOD11A1
$\sigma$ (史帝夫波茲曼常數)	$5.67 \times 10^{-8}$ ( $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ )
NDVI (植被指標)	MOD13A1
CP (空氣比熱)	1004 ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )
$T_a$ (氣溫)	中央氣象局觀測資料平台
$k$ (Von Kármán constant)	0.41
$Z_{\text{ref}}$ (觀測氣溫之高度)	2 (m)
$Z_{\text{om}}$ (動量傳遞粗糙長度)	依據土地利用而定
$Z$ (氣象站風速儀高度)	2 (m)
$u(Z)$ (風速)	中央氣象局觀測資料平台

資料來源：本計畫

取自 MODIS 衛星遙測的參數如表 4-2 所示。由於本研究目的為建立即時土壤含水量監測系統，故資料選取上採用每日一筆的 MODIS 產品；資料解析度上也選擇最細緻的產品做為本研究參數使用。

地表反射率資料源自 MCD43A3，最佳解析度為 500 公尺。此一 HDF 資料檔中含有 20 層資訊，包含 Band01~Band07、Band shortwave 的 White-sky albedo 與 Black-sky albedo 資料，而現地真正的反照率即以太陽入射角及光學深度所構成之比例來計算。

地表溫度與地表放射率資料源於 MOD11A1，最佳解析度為 1000 公尺。此 HDF 中包含有 12 層資訊，分別為白日地表溫度、白日地表溫度品質控制參數、白日地表溫度觀測時間、白日地表溫度觀測天頂角、夜時地表溫度、夜時地表溫度品質控制參數、夜時地表溫度觀測時間、夜時地表溫度觀測天頂角、Band 1 放射率、Band 2 放射率、白日無雲遮蔽面積比率、夜時無雲遮蔽面積比率。由 CWSI 理論中可知，其計算原理取中午時之目標系統參數效果最佳，故地表溫度擷取白日地表溫度值為研究參數，而地表放射率擷取 Band 2 放射率做為 CWSI 計算參數。

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)為一遙測領域中廣泛應用的植生指標。MOD13A1 為 MODIS 所提供的植生指標產品，解析度為 500 公尺，頻率為 16 天一筆，由於植被變化狀況不如溫度、反射率等參數每一時刻皆有明顯變動，故 MODIS 並無提供每日一筆之植被指數產品，而以 16 天為單位也可進行影像最佳化的挑選，能減少雲遮蔽的資料狀況。此產品包含有 NDVI、EVI、植被指數品質參數、可見紅光反射率、近紅外光反射率、可見藍光反射

率、中紅外光反射率、觀測天頂角、太陽天頂角、相對方位角、觀測儒略日即像素可靠度參數。此處擷取 NDVI 為計算參數。

**表 4-2 來自 MODIS 之參數**

SEBAL 參數	參數資料來源
$\alpha$ (地表放射率)	MCD43A3
Ts (地表溫度)	MOD11A1
$\varepsilon_0$ (地表放射率)	MOD11A1
NDVI (植被指標)	MOD13A1

資料來源：本計畫

### 第三節 氣象資料內插

為驗證所計算之指標其趨勢是否符合現地土壤含水量變化趨勢，本計畫所計算之指標皆位於目前水保局所設立之土石流觀測站點位，將所計算之指標值與土石流觀測站所觀測之土壤含水量進行比對。由於土石流觀測站並未有氣象觀測資料，故利用中央氣象局之地面氣象站及自動氣象站進行內插，取得土石流觀測站所在地的氣象資料，再配合遙測資訊進行計算。圖 3-2 為氣象站與土石流觀測站於台灣的空間分布。內插方法採反距離權重法，以優先找出能大致表現土石流觀測站區域之氣象資料為考量，而由圖 3-2 可觀察，土石流觀測站周圍皆有氣象觀測站，以此氣象站密度而言，反距離權重法能推估出一代表性內插數值。反距離權重法演算式如式 (4-10) 所示。

$$u(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N w_i(\mathbf{x}) u_i}{\sum_{i=1}^N w_i(\mathbf{x})}, & \text{if } d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) \neq 0 \text{ for all } i \\ u_i, & \text{if } d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = 0 \text{ for some } i \end{cases}$$

where

$$w_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)^p} \quad \text{式 4-10}$$

其中  $p$  為反距離權重之次方比重，本計畫採  $p=2$  來進行演算。

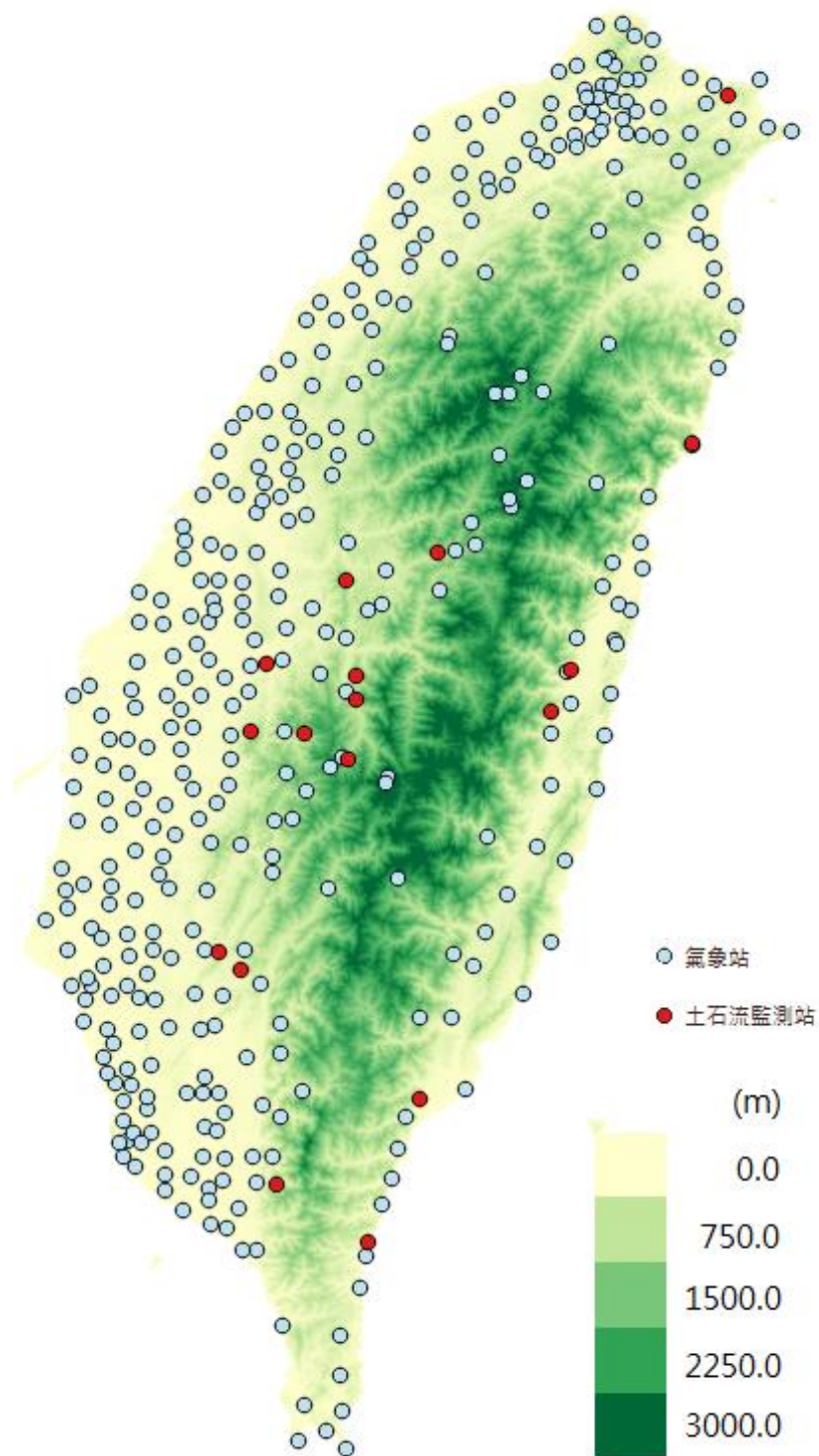


圖 4-2 氣象站與土石流觀測站於台灣的空間分布圖

資料來源：本計畫

#### 第四節 初步成果

由 CWSI(Crop Water Stress Index)蒸發散原理可知，經由 SEBAL 模型可計算淨輻射量、可感熱通量、潛熱通量與土壤熱通量，透過能量項之間的關係即可推得作物水分脅迫指數。本節將以 CWSI 與土石流觀測站之土壤含水量觀測值作率定，比較模式計算成效。

本計畫採用 2015 年間之全台土石流監測站資訊來進行驗證。目前全台擁有 26 站土石流監測站，經土石流防災資訊網之觀測資料供應平台可申請到 2015 年間九份二山、豐丘、大鳥、羌黃坑、南豐、華山、神木、集來、來義、上安、和中、坪頂等 12 座監測站的土壤含水量觀測值，故遙測與氣象資料也針對此 12 座監測站點位進行計算。

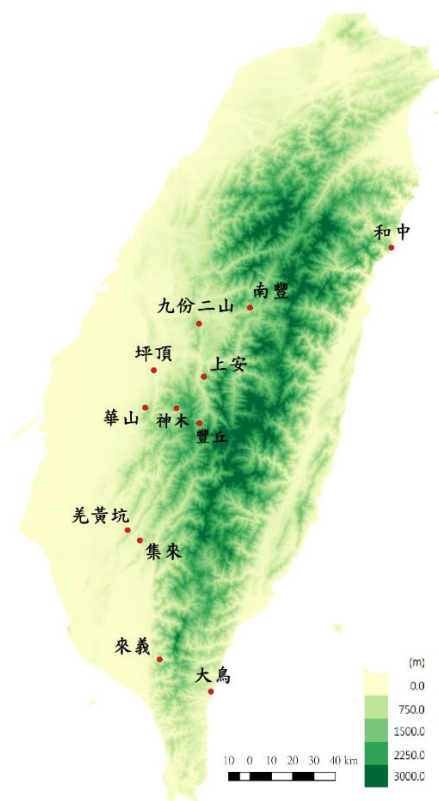


圖 4-3 土石流監測站空間分布圖

資料來源：本計畫

圖 4-4 為九份二山土石流觀測站的土壤含水量觀測值(sm,藍點)與遙測資訊結合環境氣象因子所計算之 CWSI 指標(CWSI,紅點)。可觀察出於四月 3 日至七月 2 日間，土壤含水量觀測值呈現一上升趨勢，而 CWSI 指標值有遞減趨勢；十月 1 日至十二月 31 日間也同樣呈現一反比趨勢。不過四月 3 日前土壤含水量觀測值原來平穩的狀態突然驟減，這一變化 CWSI 值並未顯現。圖 4-5 為 2015 年間土壤含水量與 CWSI 散布圖。

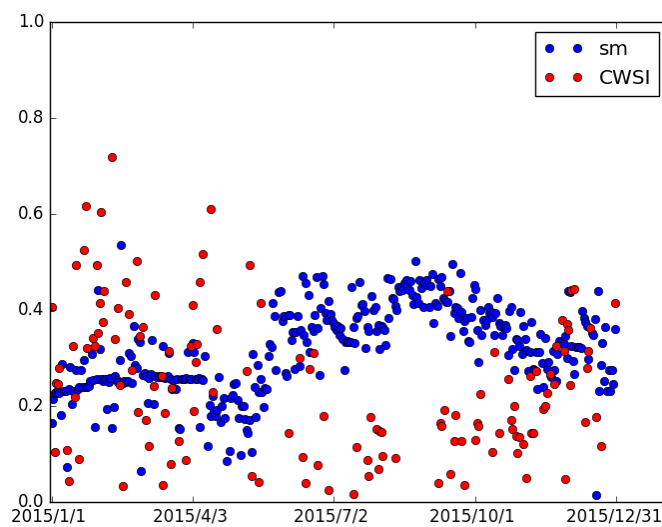


圖 4-4 九份二山測站 CWSI 與土壤含水量比較圖

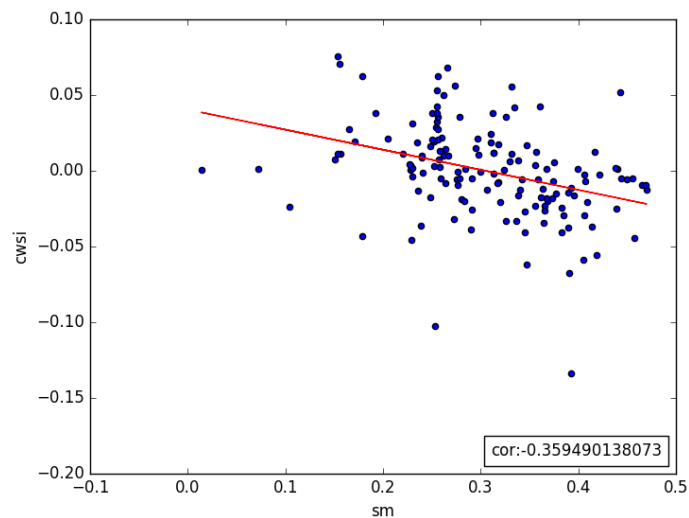


圖 4-5 九份二山測站 CWSI 與土壤含水量散布圖

圖 4-6 為大鳥土石流觀測站的土壤含水量觀測值(sm,藍點)與遙測資訊結合環境氣象因子所計算之 CWSI 指標(CWSI,紅點)。可觀察出於四月 3 日至九月期間，土壤含水量觀測值呈現一上升趨勢，而 CWSI 指標值漸漸向下遞減，十一月至十二月期間土壤含水量觀測值由 0.5 開始遞減，於十二月 31 日遞減至 0.2，此一趨勢也可由 CWSI 的上升得知。不過四月期間、七月期間、九月期與十月期間的土壤含水量觀測值跳動，CWSI 值未能表現出這樣的趨勢。圖 4-7 為 2015 年間土壤含水量與 CWSI 散布圖。

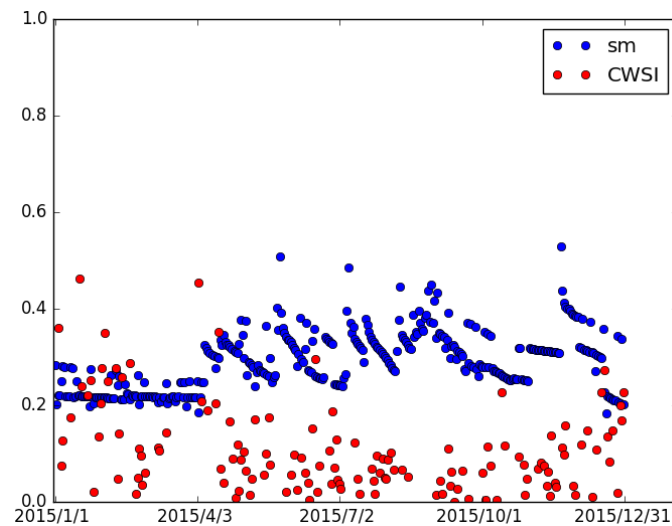


圖 4-6 大鳥測站 CWSI 與土壤含水量比較圖

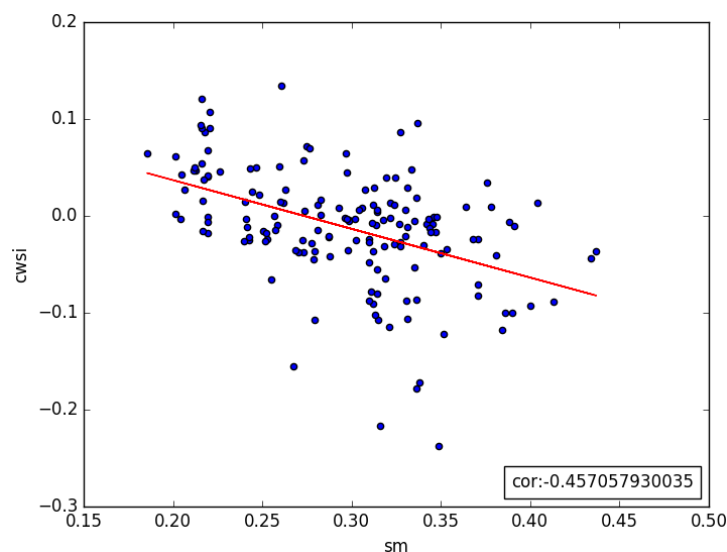


圖 4-7 大鳥測站 CWSI 與土壤含水量散布圖



圖 4-8 為羌黃坑土石流觀測站的土壤含水量觀測值(sm,藍點)與遙測資訊結合環境氣象因子所計算之 CWSI 指標(CWSI,紅點)。於六月至十月間，土壤含水量呈現穩定上升趨勢，CWSI 也可觀察出一下降趨勢；於十月至十二月底期間，土壤含水量開始向下減少，而 CWSI 也相應開始上升。圖 4-9 為 2015 年間土壤含水量與 CWSI 散布圖。

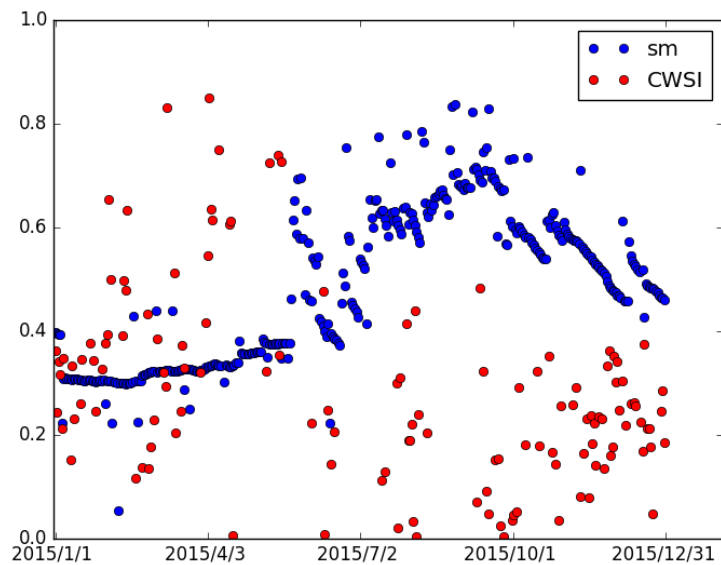


圖 4-8 羌黃坑測站 CWSI 與土壤含水量比較圖

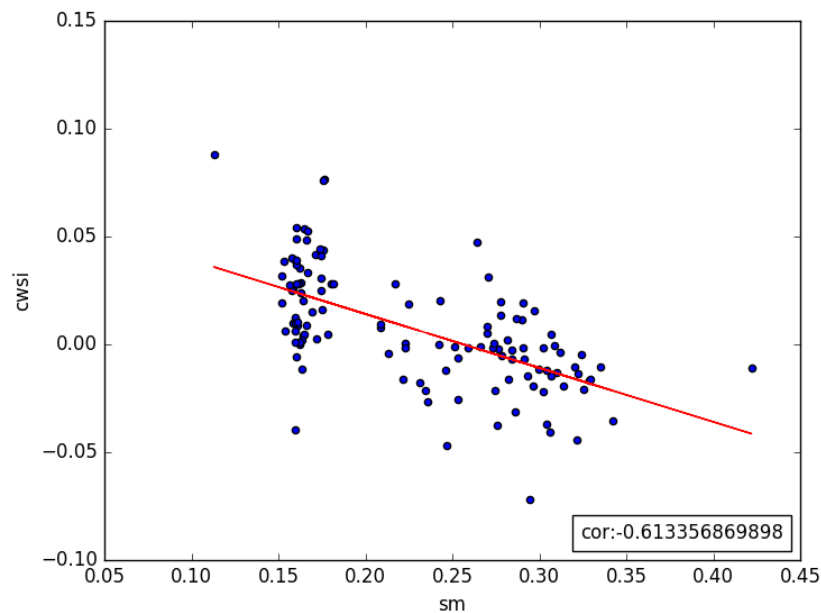


圖 4-9 羌黃坑測站 CWSI 與土壤含水量散布圖

圖 4-10 為集來土石流觀測站的土壤含水量觀測值(sm,藍點)與遙測資訊結合環境氣象因子所計算之 CWSI 指標(CWSI,紅點)。圖 4-11 為 2015 年間土壤含水量與 CWSI 散布圖。

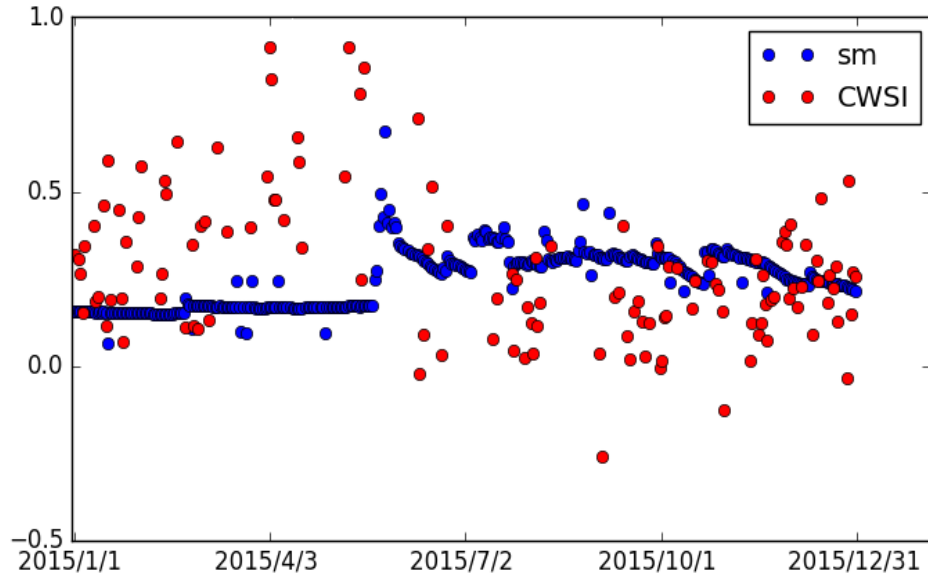


圖 4-10 集來測站 CWSI 與土壤含水量比較圖

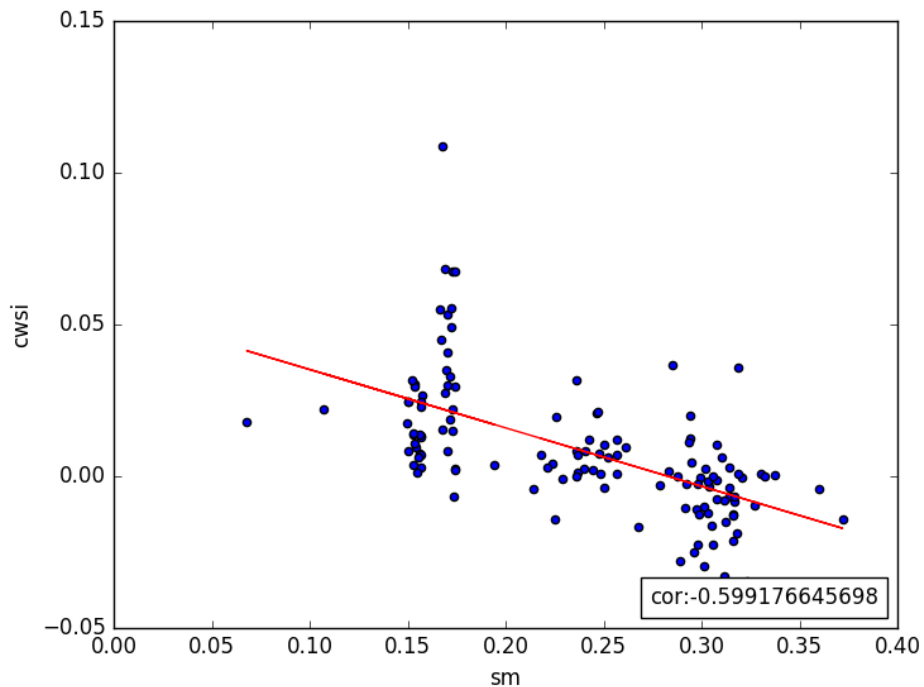


圖 4-11 集來測站 CWSI 與土壤含水量散布圖

## 第五章 結論與建議

由第四章第四節的初步成果中，可總結出此推估方法可有效以 CWSI(Crop Water Stress Index)代表出目標研究區域土壤含水量的長時間趨勢，如圖 4-4、圖 4-6、圖 4-8、圖 4-10 中所示，由於 CWSI 為一與真實土壤含水量成負相關之指標，若土壤含水量高，則 CWSI 會相對反應出低值，反之亦然。故可由圖 4-4、圖 4-6、圖 4-8、圖 4-10 觀察出當土石流觀測站測得之土壤含水量逐漸升高時，本計畫所推估出的 CWSI 會隨之逐漸下降；當土石流觀測站測得之土壤含水量下降時，CWSI 會呈現上升趨勢。

雖然此方法能表現出目標研究區域之土壤含水量長時間變化情形，但也可觀察出若有短時程所發生的土壤含水量變動，推估出的 CWSI 並沒有展現這樣的變動。初步研判為此模式初出發展於平地的反演算，然而本計畫所進行的研究區域多處於坡度變化較劇烈的山區，模式中經驗公式的部分需要在進行討論改進。若期望能將此推估結果納入預警系統的參考中，短時程的變動會是相當重要的資訊，此部分為未來需要探討加強的部分。

衛星遙測影像的反演算能獲得時間頻率高、大範圍面積的資訊，但其致命傷在受限於雲朵遮蔽的效應，若雲層過厚，將難以取得衛星遙測資訊。此部分未來期望引進時空推估的技術，結合各時空下無雲狀況所反演之資料對雲朵遮蔽的時空間進行推估，將能獲得相當程度之有效資訊。

## 參考文獻

1. 李鎮洋, et al., *莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建: 以小林村深層崩塌為例*. 2011.
2. 吳怡瑩, 劉哲欣, and 張志新, *降雨量與表層土壤含水量關係之研究*, in *社團法人中華水土保持學會 102 年度年會*, 社團法人中華水土保持學會, Editor. 2013.
3. Zhao, Y., H. Yang, and F. Wei, *Soil Moisture Retrieval With Remote Sensing Images For Debris Flow Forecast In Humid Regions*, in *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows III*, D.d. WRACHIEN, Editor. 2010, WIT Transactions on Engineering Sciences.
4. Coe, J.A., D.A. Kinner, and J.W. Godt, *Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado*. *Geomorphology*, 2008. **96**(3): p. 270-297.
5. WEI, F., K. HU, and J. CHEN, *Determination of Effective Antecedent Rainfall for Debris Flow Forecast [J]*. *Journal of Mountain Research*, 2005. **4**: p. 011.
6. Guzzetti, F., et al., *The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update*. *Landslides*, 2008. **5**(1): p. 3-17.
7. Cascini, L., et al., *Seasonal effects of rainfall on the shallow pyroclastic deposits of the Campania region (southern Italy)*. *Landslides*, 2014. **11**(5): p. 779-792.
8. Marchi, L., M. Arattano, and A.M. Deganutti, *Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps)*. *Geomorphology*, 2002. **46**(1): p. 1-17.

9. Malet, J.-P., et al., *Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows*. *Geomorphology*, 2005. **66**(1): p. 215-235.
10. Papa, M., et al., *Estimation of debris flow critical rainfall thresholds by a physically-based model*. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2012. **9**: p. 12797-12824.
11. Berti, M. and A. Simoni, *Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff*. *Landslides*, 2005. **2**(3): p. 171-182.
12. Takahashi, T., *Mechanical characteristics of debris flow*. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978. **104**(8): p. 1153-1169.
13. Fredlund, D., N.R. Morgenstern, and R. Widger, *The shear strength of unsaturated soils*. *Canadian geotechnical journal*, 1978. **15**(3): p. 313-321.
14. Zhao, Y., H. Yang, and F. Wei, *Soil moisture retrieval with remote sensing images for debris flow forecast in humid regions*. *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows III*, 2010. **67**: p. 11189.
15. Anderson, S.A. and N. Sitar, *Analysis of rainfall-induced debris flows*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995. **121**(7): p. 544-552.
16. Wieczorek, G.F., *Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California*. *Reviews in Engineering Geology*, 1987. **7**: p. 93-104.
17. Johnson, K. and N. Sitar, *Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation*. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990. **27**(6): p. 789-801.

18. Hu, W., et al., *Sensitivity of the initiation of debris flow to initial soil moisture*. Landslides, 2015. **12**(6): p. 1139-1145.
19. Wang, Y.-C., et al., 室內模擬降雨觀測土壤初始含水量對入滲與逕流之影響. 2007.
20. 詹錢登, 豪雨造成的土石流, 科學發展. 2004.
21. 葉信富, et al., 利用有限氣象參數評估蒸發散量之研究. 作物, 環境與生物資訊, 2014. **11**(4): p. 203-218.
22. Patel, N., et al., *Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status*. International Journal of Remote Sensing, 2009. **30**(1): p. 23-39.
23. Sandholt, I., K. Rasmussen, and J. Andersen, *A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status*. Remote Sensing of environment, 2002. **79**(2): p. 213-224.
24. Carlson, T., *An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery*. Sensors, 2007. **7**(8): p. 1612-1629.
25. 張子瑩 and 林李耀, 應用 MODIS 影像反演土壤含水率-以泰國 MaeSa 集水區為例. 航測及遙測學刊, 2013. **17**(1): p. 67-75.
26. Jackson, R.D., et al., *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. Water resources research, 1981. **17**(4): p. 1133-1138.
27. Idso, S., et al., *Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability*. Agricultural Meteorology, 1981. **24**: p. 45-55.
28. Khomarudin, M.R. and P. Sofan, *Crop Water Stress Index (CWSI) Estimation Using Modis Data*. International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES), 2010. **3**.

29. Bastiaanssen, W., et al., *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation*. Journal of hydrology, 1998. **212**: p. 198-212.
30. McKee, T.B., N.J. Doesken, and J. Kleist. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. in *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 1993. American Meteorological Society Boston, MA.
31. Huang, C.-C., et al., *Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge*. Engineering Geology, 2008. **101**(3): p. 134-145.
32. Pelletier, J.D., et al., *Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides*. Engineering Geology, 1997. **48**(3): p. 255-268.
33. Goodrich, D., et al., *Runoff simulation sensitivity to remotely sensed initial soil water content*. Water Resources Research, 1994. **30**(5): p. 1393-1405.
34. Baum, R.L. and J.W. Godt, *Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA*. Landslides, 2010. **7**(3): p. 259-272.

## 附錄

### 附錄一、期中審查會議記錄暨回覆辦理情形

周委員：水保局所關注的尺度會希望小一點，因為 MODIS 的空間解析度為 1km\*1km，可能太大了，不太適用於水保局的情況。

回覆：

謝謝委員的提點，目前的測站觀測方式多為點資料，故尺度的問題需要再多加考量，若以 MODIS 衛星的解析度來推估點資訊，在空間的適用性上確實較不適合。本計畫使用 MODIS 衛星遙測資料的主要目的乃因 MODIS 在時間上的頻率可達一至兩天即有一筆資料，以防災的觀點來說此時間頻率較適合用於防災監測，其他開放資訊衛星雖然有較佳的空間解析度，不過資料的時間頻率上不如 MODIS 衛星高。此計畫原本預期為三年期計畫，目前為第一年的測試與校正階段，主要目標為實作測試此構想是否可行，以遙測資料推估的土壤含水量其「趨勢」是否能與現地觀測值一致，若趨勢相符合，即可考慮應用其他空間解析度較高之衛星資料來校正尺度上的不足，故目前著重於觀察其趨勢是否吻合。

連委員：1.此計畫的題目好像看不出與內容有太大的相關性。

2.點資料與遙測資料尺度上的差距，可能不太適用。

回覆：

1. 謝謝委員的提問，在本期中此計畫仍未應用到計畫名稱中所提及的「巨量資料推估技術」，最初構想本計畫預期將進行三年期，計畫名稱所提到的「巨量資料推估技術」為後期動作，在本期中主要目的為確立遙測技術推估土壤含水量之可行性與趨勢，若所計算出的成果能表現出土壤含水量的趨勢，將導入巨量資料推估技術進行時空間推估，以期掌握最完善的山坡地區域土壤含水量情形。



2. 委員的這個疑問也是我們做本計畫最初的一個擔憂，因目前土壤含水量的觀測皆為點資料，在進行率定時若所採用的遙測資料尺度並非點資料，且尺度達一平方公里，似乎會減少其代表性。後來考量到防災監測上時間頻率的重要性後，做出了這樣的取捨，決定採用雖空間尺度較不合適，但時間頻率上較適合防災監測的 MODIS 衛星觀測資訊。更詳細的回覆可參考周委員的問題答覆，謝謝。

蘇委員：

1. 土壤含水量與土石流關連的證實，期望能有數據來證實。
2. 遙測影像尺度與點位的差異。
3. 土壤含水量的觀測通常不會只有一點，而是一群。

回覆：

1. 感謝蘇委員的提問，目前根據我們文獻回顧的經驗，國外已有研究針對土壤臨前含水量情形做出實驗與討論，如 Hu, W., et al. "Sensitivity of the initiation of debris flow to initial soil moisture." Landslides 12.6 (2015): 1139-1145. 對於土石流啟動的環境初始條件做了討論，其中提及臨前土壤含水量為一重要因子，可影響地表逕流的入滲情形，決定坡地災害的種類與規模大小。更多相關文獻回顧可參考本報告第二章內容。
2. 確實 MODIS 衛星在影像尺度上就現地的觀測來說，顯得太廣泛了，由其若將此資訊與點位資料相比較，有失其代表性。不過於防災監測上來考量，MODIS 衛星資訊的時間頻率較適用。此問題更詳細的答覆可參考周委員的問題回覆，謝謝。
3. 目前本計畫所參考的土壤含水量觀測資料來自土石流防災資訊網上的觀測資料供應平台，此平台所提供之 2015 年資料除九份二山、豐丘、大鳥、羌黃坑、南豐、華山、豐山、集來、來義、神木

等十站觀測資料有一具儀器以上之觀測資料，不過資料上未說明各儀器的空間分布細節，故僅考慮不同儀器間平均的結果。其餘如上安、大粗坑、和中、坪頂等四站觀測資料僅有一具儀器之資料。

謝委員：MODIS 的誤差落在何處？雲遮蔽的問題如何解決？

回覆：

謝謝委員的提問，MODIS 所提供的產品為 HDF(Hierarchical Data Format)，每項產品中包含了許多層級的資訊，當中即包含有 QA(Quality Assurance)與 QC(Quality Control)的資訊可供使用者參考。至於雲遮蔽的障礙也是我們當初所察覺到的一大困難，只要是衛星遙測影像，皆無法避免需要面對當觀測區域有厚雲遮蔽時，光譜能量即無法反射回衛星感測器，雲遮蔽可說是衛星遙測的天敵。不過此問題即可呼應本計畫的名稱「巨量資料推估」，在本計畫完成資訊的率定後，即可引入時空間推估技術，將可進一步對於雲遮蔽的部分做推估補遺。

游委員：熱平衡公式在此處的應用有待檢討，因熱會隨時間環境不斷變動，直接做套用似乎不太合適。

回覆：

感謝委員的提點，土壤含水量指標的計算中，溫度是很重要的參數之一，如同委員所言，熱能的變化瞬息萬變，若直接以觀測溫度做評估將不適宜，故本計畫採用 SEBAL 模型來作能量的計算，在此模型中，將能量拆分為四項：淨輻射量、可感熱通量、潛熱通量與土壤熱通量，其中可感熱通量、土壤熱通量的演算式中，需考量研究區域的土地利用情形，不同的環境皆產生相對應的計算結果。可感熱通量中也有考量環境風對於能量的影響，雖然模型的計算仍無法完全代表真實觀測地點的狀況，不過此模型的演算式下仍

可代表觀測地點一定程度的能量變化情形。

林委員：1.遙測影像尺度與單點的差距

2.土壤特性與分布有沒有考慮？

回覆：

1. MODIS 衛星的影像尺度最佳可達 250 平方公尺，不過對於現地監測來說仍屬於較粗放的尺度，若以此粗放程度的資料來對點位資料的探討確實有失代表性。不過 MODIS 衛星影像的優勢在於時間頻率可達每一至兩天即產生一筆資訊，就防災監測的應用上來說較為合適，故本計畫採用 MODIS 遙測衛星影像做討論。更詳細的答覆可參考周委員的問答部分，謝謝。

2. 謝謝委員提問，此部分的考量已包含於 SEBAL 模型中的參數，此模型中可感熱通量與土壤熱通量的計算即須考慮延就區域的土地利用情形，由其土壤熱通量的計算上需要植被指數做運算，一定程度上對於土壤的特性有其代表性。

主席：1.空間解析度可能不太適用。

2.MODIS 衛星影像的時間頻率為何？

回覆：

1. 謝謝主席的提問，關於空間尺度的問題也是我們一直在思考的問題，當初在考量該應用何種衛星影像資訊時，是有其他空間解析度更佳的衛星可應用，不過其影像的時間頻率皆不如 MODIS 衛星，就防災監測的角度來考量，最後決定選擇 MODIS 衛星做應用。更詳細的回覆可參考周委員問題答覆。

2. MODIS 遙測衛星為繞極衛星，每一至兩天即可環繞地球一周，其觀測影像處理頻率也可達每一至兩天即回傳一筆觀測影像，故在應用上，時間頻率可達到每日一筆。

## 附錄二、期末審查會議記錄暨回覆辦理情形

1. 研究主題非常有趣，但由衛星取得土壤含水量資料解析度太低、頻率太低的缺點。

答覆：

此問題也是我們執行計畫前所考量到的疑慮，但最後仍選擇衛星遙測是期望能取得全台灣所有區域之土壤含水量情形，目前土石流觀測站的土壤含水量觀測值時間頻率可達每 5 分鐘一筆，不過測站式的觀測法僅能依據架站位置進行觀測，若需取得其他區域之觀測值，則須另行架站工作，且觀測儀器也需進行定期保養與校正。而衛星遙測雖然時間頻率上目前最高也僅能達到每日一筆觀測值，但能立即獲得大範圍區域的觀測值，且沒有儀器維護的問題。若本計畫之架構建立完成，將可對全台灣進行每日一次的土壤含水量監測，即能掌握台灣各區域土壤含水量的時空趨勢，在災害來臨前可依據此時空趨勢進行防災預警決策。本計畫目前校正的方式以點資料進行比較，故尺度的問題需要再多加考量，若以 MODIS 衛星的解析度來推估點資訊，在空間的適用性上確實較不適合，不過此部分可納入其他衛星做考量，如 SPOT 衛星空間解析度最高可達 2.5 公尺。此計畫原本預期為三年期計畫，目前為第一年的測試與校正階段，主要目標為實作測試此構想是否可行，以遙測資料推估的土壤含水量其「趨勢」是否能與現地觀測值一致，若趨勢相符合，即可考慮應用其他空間解析度較高之衛星資料來校正尺度上的不足，故目前著重於觀察其趨勢是否吻合。

## 2. 土壤含水量與坡地災害風險關連性為何？

答覆：

這部分於本計畫中沒有採取實際的研究與實驗，不過有針對此部分進行文獻回顧，有研究指出一定強度的降雨為造成土石流的最大原因，但強降雨若配合不同的「臨前土壤含水量」情形，將導致不一樣的結果。有研究指出，若臨前含水量過高，反而不會導致土石流的發生，若臨前含水量較低時，降雨來臨時入滲速度比臨前含水量較高時更快，更有機會造成岩床與堆積物之間滑動。此部分的論述也有學者針對不同的「臨前土壤含水量」狀況來進行小規模實驗，如 Hu, W., et al. "Sensitivity of the initiation of debris flow to initial soil moisture." *Landslides* 12.6 (2015): 1139-1145.。此部分可參考本報告第二章節，日後也將繼續針對此部分做更完整的研究，感謝委員的建議。

## 3. 建議以過去歷史災害進行驗證。

感謝委員的建議，MODIS 衛星可取得由 2000 年至今的所有遙測影像資料，日後將針對此一期間所發生之歷史災害進行驗證。

4. 對土壤含水量之推估屬創新性做法，為因屬前期嘗試在諸多探討因素中，仍未完全納入考量，技術面上之精度亦有待再提升，值得後續之引進利用。

答覆：

謝謝委員的建議，經過本期計畫的執行與結果探討後，可知經此推估方法能表現土壤含水量的長期趨勢變化，惟因此推估模式可能無法完全套用於台灣，若日後再針對模式進行修正，盼能完成一符合台灣之衛星遙測土壤含水量推估模式。

5.期末摘要報告 p8 土壤含水量觀測值跳動，(圖 3)cwsi 值並無跳動現象，宜增加原因的研究或說明。

答覆：

謝謝委員的建議，此部分將於期末報告進行補充。初步研判此一現象為此模式初出發展於平地的反演算，然而本計畫所進行的研究區域多處於坡度變化較劇烈的山區，模式中經驗公式的部分需要在進行討論改進。

6. MODIS 屬中尺度衛星，又屬被動式，如併同主動式方式處理效果是否可提升。

答覆：

謝謝委員的建議，本計畫使用 MODIS 衛星遙測資料的主要目的乃因 MODIS 在時間上的頻率可達一至兩天即有一筆資料，以防災的觀點來說此時間頻率較適合用於防災監測。一般主流反演算土壤含水量的衛星遙測方式為主動式微波技術，目前所知空間解析度最高可達 2.5 公尺，但主動式微波遙測資訊的時間頻率約為 20 天，如直接使用此一資料對坡地災害的預警上不適用。日後將考慮併同主動式微波衛星資料做處理，提升資訊於空間上的解析度。

行政院農業委員會水土保持局  
與您一起打拼



行政院農業委員會水土保持局  
54044 南投市中興新村光華路 6 號  
<http://www.swcb.gov.tw>