

計畫編號：109 保發-11.1-保 01-06-001(32)

**整合大氣土壤分析場資訊建構集水區水蝕
與風蝕評估模式**

**Construction of watershed water and wind
erosion models by integrating land data
assimilation system information**

執行單位：國立中興大學水土保持學系

執行期間：109 年 2 月 6 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：王咏潔 副教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 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)



整合大氣土壤分析場資訊建構集水區水蝕與風蝕評估 模式

摘要

臺灣近年來為探討集水區土砂災害問題，常從集水區的土砂收支概念描述其土砂運移情形，表達集水區內沉積物的產生、移動、貯存等連續過程的預算平衡。土壤侵蝕可視為土砂運動的起始過程，以自然界常見的外力作用，分為水蝕與風蝕兩大類型。水蝕與風蝕不僅為探討集水區土砂收支的重要評估項目，更直接影響國民安全健康與生活品質，為水土保持研究的重要工作項目。

本研究計畫以台灣中部地區大甲溪流域為研究區域，探討水蝕與風蝕在時間與空間上的關聯性，及其對集水區土砂收支的影響。研究中整合氣象、水文測站監測資料、土壤調查資料、大氣土壤分析場產生的土壤狀態資訊，建構集水區水蝕與風蝕評估模式。本研究採用 SWAT 模式建立大甲溪流域之水文模式，進行測站流量與水流含砂量之參數率定及驗證，分析該流域由逕流造成之土壤侵蝕與土砂運移量變化。在風蝕評估方面，本研究應用氣象、土壤分析場，和空氣品質監測資料進行揚塵事件評估模式之參數率定與驗證，分析該流域下游風蝕事件(日最大 PM_{10} 濃度)發生機率，提出模擬模式。

綜整大甲溪流域水蝕與風蝕模擬結果，採 SWAT 模式 2015-2018 年每日平均坡面產砂量控制點計算結果與貝氏風蝕模式-Dep 模擬之日最大 PM₁₀ 濃度值模擬結果，繪製坡面產砂量與日最大 PM₁₀ 濃度分級地圖，呈現大甲溪流域水蝕和風蝕作用強度區位，作為規劃土壤保護措施與水砂治理設施之參考依據。

關鍵詞：大甲溪流域、土壤侵蝕、SWAT、土壤分析場、河川揚塵、貝氏信賴網絡



Construction of watershed water and wind erosion models by integrating land data assimilation system information

Abstract

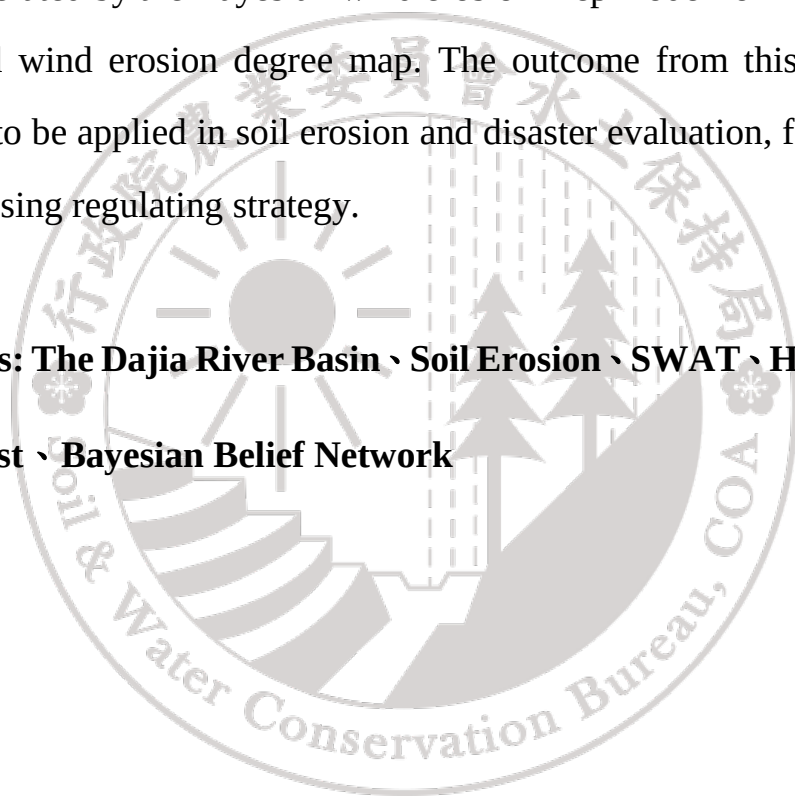
In Taiwan, sediment disaster issues in the watershed are studied by applying the concept of sediment budget, which describes the production, transportation, and storing of watershed sediments during the sediment transport process. Soil erosion can be recognized as the initiative process of sediment transportation, and it can be classified as water erosion and wind erosion based on the external acting force on soil particles. Water and wind erosion are not only the essential components of sediment budgeting, but also the key issue in the soil and water conservation research, which directly affect the health and well-being of people.

In this research project, we select the Dajia River Basin, located in central Taiwan, as the study area and investigate the water and wind erosion, their spatial and temporal variation and effects on sediment budget in the Dajia River Basin. In the project, we construct the water and wind erosion evaluating models for the study area by using data from meteorological station, hydrometric station, soil investigation, and the soil conditions produced from HRLDAS. For water erosion evaluation, we applied the SWAT model to construct the hydrological model for the Dajia River Basin, and carried out the model calibration and validation for the flowrate and suspended sediments of multiple gauge stations. The SWAT

model then can be used for analyzing the soil erosion and sediment transport by water. For wind erosion evaluation, we used meteorological data, HRLDAS data, and air quality monitoring data to construct, calibrate, and validate a dust event evaluation model. The dust model then can be used for analyzed the occurring probability of dust event and may be used for dust event forecasting.

Based on the modeling results of water and wind erosion in the Dajia River Basin, we took the average daily sediment yied from 2015-2018 resulted from the SWAT model and the simulated maximum PM₁₀ within a day generated by the Bayesian wind erosion-Dep model for mapping the water and wind erosion degree map. The outcome from this project is expected to be applied in soil erosion and disaster evaluation, forecasting, and proposing regulating strategy.

Keywords: The Dajia River Basin、Soil Erosion、SWAT、HRLDAS、River Dust、Bayesian Belief Network



目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	IX
第一章 緒論	1-1
第一節 擬解決問題	1-1
第二節 計畫目標	1-3
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
一、研究區域概述	2-3
二、水蝕評估模式	2-8
三、風蝕評估模式	2-11
四、明示結構法	2-16
五、貝氏網路	2-17
六、大氣土壤分析場	2-18
第二節 工作執行步驟	2-37
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖	3-1
一、執行進度	3-1
第二節 計畫交付項目	3-2

一、 計畫項目	3-2
二、 計畫成果	3-4
三、 成果效益	3-69
第四章 結論與建議	4-1
第一節 結論	4-1
第二節 建議	4-4
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、計畫提審審查意見回覆辦理情形	附錄-1
附錄二、期初審查意見回覆辦理情形	附錄-4
附錄三、期中審查意見回覆辦理情形	附錄-18
附錄四、期末審查意見回覆辦理情形	附錄-29



表次

表 3-1 計畫甘特圖	3-1
表 3-2 水庫操作輸入參數.....	3-33
表 3-3 大甲溪流域日流量敏感參數表.....	3-34
表 3-4 大甲溪流域土砂量敏感參數表.....	3-42
表 3-5 MUSLE 公式使用因子計算說明與資料來源.....	3-47
表 3-6 揚塵事件發生定定義與描述.....	3-50
表 3-7 本計畫採用之揚塵事件發生影響因子與輸入資料	3-58
表 3-8 大甲溪下游河川灘地 2015-2019 年 NDVI 值	3-61
表 3-9 大甲溪流域不同土壤類型質地資料.....	3-65





圖次

圖 2-1 研究流程圖	2-2
圖 2-2 大甲溪流域位置及高程圖 (DEM 資料來源：內政部地政司， 2016)	2-3
圖 2-3 大甲溪流域土壤圖 (資料來源：農委會農業試驗所，2015).2- 4	
圖 2-4 大甲溪流域土地利用分類圖 (資料來源：內政部國土測繪中 心，2007)	2-5
圖 2-5 大甲溪流域(A)水蝕評估與(B)風蝕評估採用資料測站點位圖2- 7	
圖 2-6 風蝕過程主要運動類型(改繪自：CORNELIS, 2006).....	2-12
圖 2-7 揚塵事件發生日篩選流程圖	2-14
圖 2-8 WRF-NOAH 地表模式系統概念圖 (改繪自：NCAR & UCAR RESEARCH APPLICATIONS LABORATORY 網站)	2-20
圖 2-9 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤溫度歷年(2014/7 – 2019/8)變 化：豐原(FONGYUAN)測站(A)2014 年、(B)2015 年、(C)2016 年、(D)2017 年、(E)2018 年、(F)2019 年資料	2-23
圖 2-10 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤溫度歷年(2014/7 – 2019/8)變 化：后里(HOULI)測站(A)2014 年、(B)2015 年、(C)2016 年、 (D)2017 年、(E)2018 年、(F)2019 年資料	2-25
圖 2-11 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤溫度歷年(2014/7 – 2019/8)變 化：大甲(DAJIA)測站(A)2014 年、(B)2015 年、(C)2016 年、 (D)2017 年、(E)2018 年、(F)2019 年資料	2-27

圖 2- 12 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤濕度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：豐原(FONGYUAN)測站(A)2014 年、(B)2015 年、(C)2016 年、(D)2017 年、(E)2018 年、(F)2019 年資料	2-30
圖 2- 13 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤濕度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：后里(HOULI)測站(A)2014 年、(B)2015 年、(C)2016 年、(D)2017 年、(E)2018 年、(F)2019 年資料	2-33
圖 2- 14 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤濕度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：大甲(DAJIA)測站(A)2014 年、(B)2015 年、(C)2016 年、(D)2017 年、(E)2018 年、(F)2019 年資料	2-36
圖 3- 1 本計畫採用輸砂測站(A)松鶴橋、(B)(C)龍安橋、(D)東勢大橋、(E)后豐大橋，和(F)大甲溪橋之水砂資料趨勢圖	3-20
圖 3- 2 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與雨量觀測趨勢圖：豐原(FONGYUAN)測站(A)2015 年、(B)2016 年、(C)2017 年、(D)2018 年、(E)2019 年資料.....	3-22
圖 3- 3 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與雨量觀測趨勢圖：后里(HOULI)測站(A)2015 年、(B)2016 年、(C)2017 年、(D)2018 年、(E)2019 年資料.....	3-24
圖 3- 4 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與雨量觀測趨勢圖：大甲(DAJIA)測站(A)2015 年、(B)2016 年、(C)2017 年、(D)2018 年、(E)2019 年資料.....	3-26
圖 3- 5 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與 PM ₁₀ 濃度變化趨勢圖：豐原(FONGYUAN)測站(A)2015 年、(B)2016 年、(C)2017 年、(D)2018 年、(E)2019 年資料.....	3-28

圖 3-6 歷年(2015/1–2019/8)逐時土壤濕度與 PM ₁₀ 濃度變化趨勢圖：	
后里(HOULI)測站(A)2015 年、(B)2016 年、(C)2017 年、(D)2018 年、(E)2019 年資料.....	3-30
圖 3-7 歷年(2015/1–2019/8)逐時土壤濕度與 PM ₁₀ 濃度變化趨勢圖：	
大甲(DAJIA)測站(A)2015 年、(B)2016 年、(C)2017 年、(D)2018 年、(E)2019 年資料.....	3-31
圖 3-8 大甲溪流域多測站日流量率定結果：(A)七家灣、(B)合歡、(C)馬鞍後池、(D)龍安橋測站	3-38
圖 3-9 大甲溪流域多測站日流量驗證結果：(A)七家灣、(B)合歡、(C)馬鞍後池、(D)龍安橋測站	3-40
圖 3-10 大甲溪流域龍安橋測站水砂(推移質)模擬結果：(A)率定階段、(B)驗證階段.....	3-44
圖 3-11 水保局率定 <i>KM</i> 值與農試所調查 <i>KM</i> 值：(A) 大甲溪流域土壤類型 <i>KM</i> 值分布圖、(B) 不同土壤類型 <i>KM</i> 值比較.....	3-46
圖 3-12 大甲溪流域各子集水區坡面平均每日土砂產量：(A)率定階段(2012-2015 年)、(B)驗證階段(2016-2018 年)	3-49
圖 3-13 大甲溪流域下游測站 PM ₁₀ 濃度變化及揚塵事件日：(A)豐原、(B)后里、(C)大甲測站	3-55
圖 3-14 大甲溪流域下游測站揚塵事件日次數：(A)2015、(B)2016、(C)2017、(D)2018、(E)2019 年事件日數.....	3-57
圖 3-15 風蝕事件(最大 PM ₁₀ 濃度)影響因子層級結構圖：(A)明示結構法分析結果；(B) 資料相依性分析結果.....	3-60
圖 3-16 大甲溪下游河川灘地土地覆蓋分類：(A)乾季(2016/11/07)、(B) 濕季(2019/06/15)	3-62

圖 3-17 大甲溪下游貝氏信賴網絡風蝕評估模式：(A)以明示結構法建立影響因子層級，貝氏風蝕模式-ISM、(B)以資料相依性建立影響因子層級，貝氏風蝕模式-DEP	3-64
圖 3-18 大甲溪下游日最大 PM ₁₀ 濃度值機率分布：貝氏風蝕模式-DEP 模擬結果：(A)沖積土、(B)黃壤、(C)崩積土、(D)紅壤..	3-67
圖 3-19 大甲溪流域水蝕與風蝕作用量化評估：SWAT 模式和貝氏風蝕模式-DEP 模擬結果.....	3-68
圖 3-20 大甲溪流域風蝕作用與治理措施區位圖	3-69



第一章 緒論

第一節 擬解決問題

臺灣地區地形陡峭、地質破碎，加上人口密度高，土地開發頻繁，又受到氣候變遷影響，土壤侵蝕和土砂災害問題複雜。於 1999 年第十屆國際土壤保育組織年會提出「全球尺度水蝕與風蝕脆弱度」研究中，以氣候、土壤/土地和人口密度為評估項目，結果指出臺灣同時列為水蝕、風蝕脆弱度極高之地區(Reich et al., 2001)。世界銀行於 2005 年的「天然災害熱點：全球風險分析」報告中指出，臺灣受兩種以上災害衝擊之國土地區高達 90%以上，可能為世界上最易受天然災害衝擊的國家之一。英國的「2011 年自然災害風險圖譜」中列出 196 個國家的天然災害風險排名，報告指出臺灣為天然災害高風險國家之一。

近年來為探討集水區土砂災害問題，常從集水區的土砂收支(Sediment budget)概念描述其土砂運移情形，探討集水區內泥砂的侵蝕、搬運及堆積等運輸過程和因子間的關係，以表達集水區內沉積物的產生、移動、貯存等連續過程的預算平衡。土壤侵蝕可視為土砂運動的起始過程，係指土粒受外力作用，由原來位置被分離而移動至另一位置的現象；以自然界常見的外力作用，如雨水之離散、受風之剪動等作用力，分為水蝕與風蝕兩大類型。

臺灣的水蝕普遍而嚴重，風蝕則發生在濱海地帶。以集水區而言，水蝕過程發生自坡面受降雨侵蝕、表土受逕流沖刷產生剝蝕、河道中的土砂運移乃至河口地區等，土壤嚴重侵蝕導致土地劣化及國土流失；風蝕則主要發生於下游河灘地，在非汛期受東北季風吹襲，產生風吹沙及揚塵問題，嚴重影響空氣品質，對當地居民生活與健康造成威脅。

為減少空氣污染對健康的影響提供全球性指導，世界衛生組織於 2005 年發布了《空氣品質準則》，其中包括了對懸浮微粒濃度的限制。中華民國行政院環境保護署於 2012 年 5 月 14 日公告修正空氣品質標準，增訂 PM_{2.5} 空氣品質標準，並依據其國內健康影響研究結果，以健康影響為優先考量，將「PM_{2.5}」24 小時值訂為 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、年平均値訂為 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；將「PM₁₀」24 小時值訂為 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、年平均値訂為 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2014 年 6 月，教育部頒布「空污停課標準」。2014 年 12 月，中華民國勞動部發布函釋，霾害應視同天然災害、可比照颱風假模式，根據《天然災害發生事業單位勞工出勤管理及工資給付要點》，地方首長可依權限宣布停班。因此，水蝕與風蝕不僅為探討集水區土砂收支的重要評估項目，更直接影響國民安全健康與生活品質，為水土保持研究的重要工作項目。

在水蝕和風蝕現象中，土粒受外力作用下的運動過程包含分離(detachment)、搬運(transport)和沉積/堆積(deposition)等。各運動過程除受侵蝕外力特性，如水、風力作用強度、時間、方向等，也與土壤本身的抗蝕性直接相關，如土壤質地或粒徑大小、粗糙度和含水率等狀態。為合理評估土壤侵蝕量，需同時考量作用侵蝕力與土壤可蝕性因子。侵蝕力因子由氣象及水文監測資料多可獲得較完整的資訊，進行侵蝕力評估；然土壤抗蝕性條件中的土壤狀態常受地形及氣候影響，具高度時間及空間變化，且受限於現地調查與採樣頻率，多無法直接獲得大範圍、高頻度的監測資料，以配合侵蝕之作用力進行分析。

在本研究計畫中擬以兩年為期程，探討集水區尺度的下列問題：

1. 土壤狀態(土壤溫度、含水率)的時間、空間變化資訊對土壤抗蝕性評估之影響與應用；

2. 上述土壤分析資訊應用於土壤侵蝕與災害事件(如河川揚塵)之評估與預測；
3. 水蝕與風蝕在時間與空間上的關聯性，及其對集水區土砂收支的影響。

第二節 計畫目標

本研究以台灣中部地區大甲溪流域為研究區域，整合氣象、水文測站監測資料、土壤調查資料、大氣土壤分析場產生的土壤狀態資訊(如土壤溫度、濕度)，建構集水區水蝕與風蝕評估模式；並應用空氣品質監測資料進行模式之率定與驗證，提出土壤侵蝕評估模式。以評估結果探討水蝕與風蝕在時間與空間上的關聯性或交互作用，及其對集水區土砂收支的影響；應用於土壤侵蝕與災害事件評估、預測，及治理對策研擬之參考。

本計畫為原規劃之第一年期計畫，計畫目標為：

1. 以水土評估工具(Soil & Water Assessment Tool, SWAT)建立大甲溪流域之水蝕評估模式，分析其坡面土壤流失與河道土砂運移量體；
2. 應用氣象測站、國家空品測站、智慧城鄉空品微型感測器等監測資料，整合土壤分析場資訊(High-Resolution Land Data Assimilation System, HRLDAS)，建立大甲溪流域風蝕評估模式，針對易發生揚塵區位提出揚塵事件發生機率分析方法；
3. 提出大甲溪流域土壤侵蝕(水蝕與風蝕)情形時間與空間分布或變化，作為後續研究參考。



第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

本研究計畫以第一年期規劃內容為主，提出研究流程與工作執行方法，以達到第一年計畫目標及預期成果。研究流程詳見圖 2-1，主要步驟包括：文獻收集與回顧；研究區域資料收集；水蝕評估模式(SWAT)建立、率定、驗證；揚塵事件日篩選；風蝕評估模式建立、修正、驗證；大甲溪流域水蝕、風蝕評估；綜合討論；提出結論與建議，並發表計畫成果。



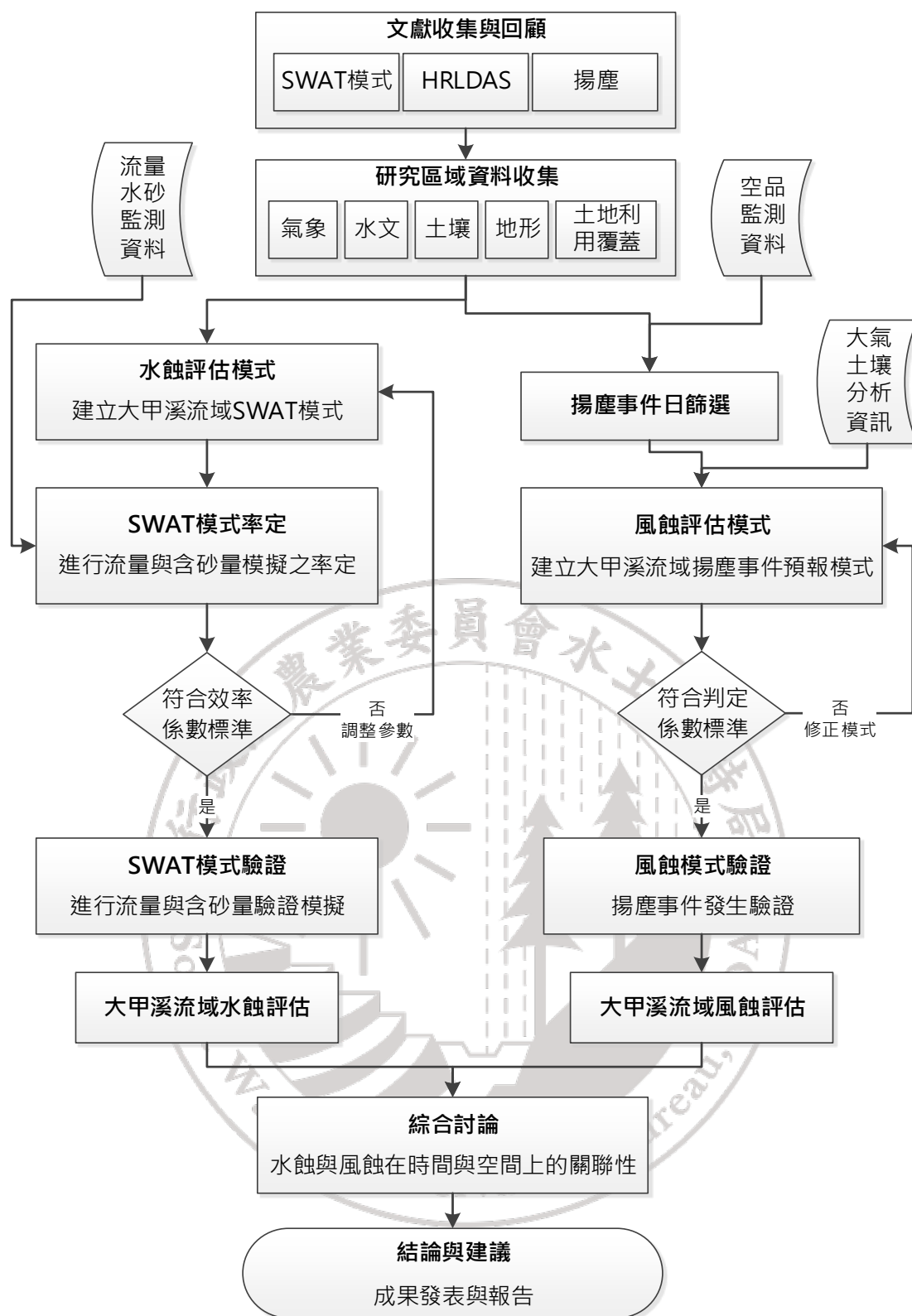


圖 2- 1 研究流程圖

一、研究區域概述

大甲溪發源於海拔高度 3,400 公尺以上的雪山及南湖大山等群嶽，主流由東往西橫貫台中市，於大甲與清水間注入臺灣海峽(圖 2- 2)；全長 124.2 公里，平均坡降約 2.6%。其流域位於臺灣島中西部，北鄰大安溪、南臨烏溪；流域面積為面積 1,244.94 平方公里。大甲溪流域之上游泛指德基水庫以上、中游為德基水庫以下至馬鞍寮間、下流為馬鞍寮以下至河口之溪段。

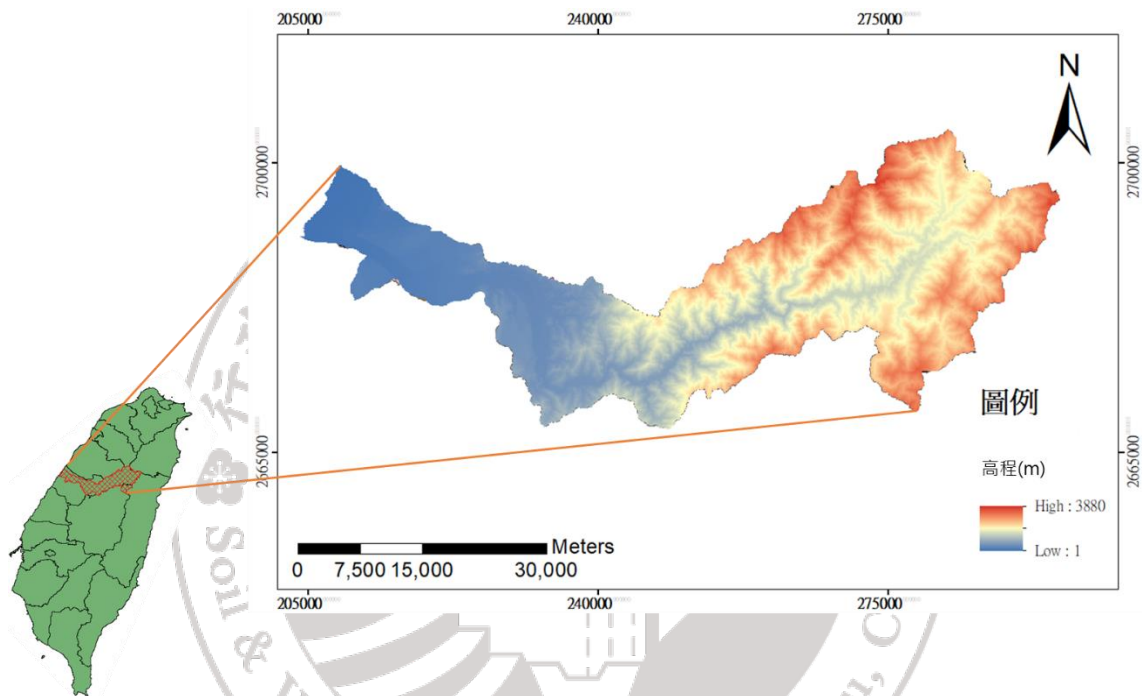


圖 2- 2 大甲溪流域位置及高程圖
(DEM 資料來源：內政部地政司，2016)

由民國 1970 至 2010 年降雨量統計資料指出，2003 年後大甲溪流域之降雨量有明顯增加趨勢，且 2005 年後高重現期距降雨量增加。以流域的降雨分布而言，馬鞍壩以上區域的年平均降雨量約為 2400 至 2800 毫米；河口至石岡壩間的年平均降雨量約

1400 至 1700 毫米。大甲溪流域的最大雨量發生在天輪壩以上的區域，因降雨對於山區坡面侵蝕(水蝕)劇烈，此區域土砂量豐碩，為大甲溪主要土砂來源。由大甲溪流域之土壤圖(圖 2- 3)，流域中、下游區域以崩積土為主，紅壤、沖積土次之，另有少部分之石質土與黃壤。2014 年之「大甲溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫」中指出，大甲溪流域 2009-2014 年崩塌地變遷情形不明顯，流域整體崩塌率為 2.45%(經濟部水利署水利規劃試驗所，2014)。而流域下游的后豐大橋至出海口區域為大甲溪易發生揚塵河段(經濟部水利署，2014)，顯示此區域風蝕作用旺盛。

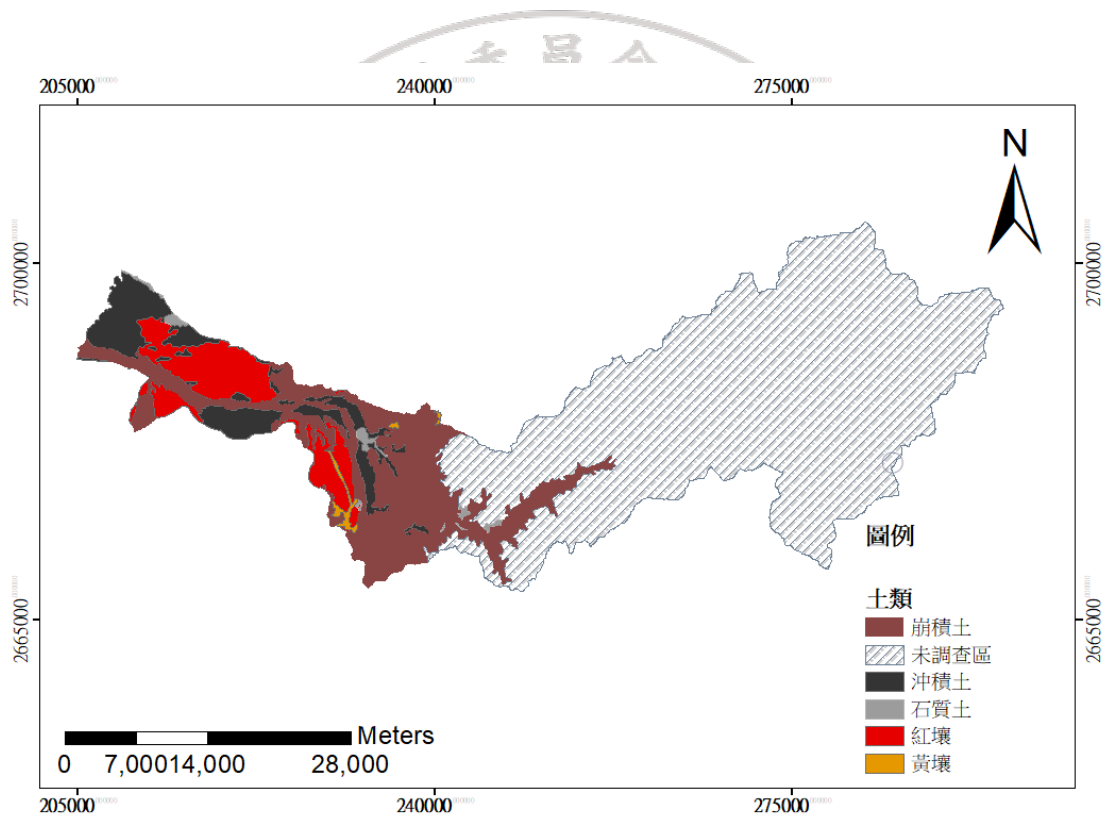


圖 2- 3 大甲溪流域土壤圖

(資料來源：農委會農業試驗所，2015)

就大甲溪流域土地利用而言(圖 2- 4)，概以白毛台氣象測站

為分界，農業用地多集中於其下游地區，上游地區除梨山附近有農業使用情形外，多屬森林地區。統計 2007 年土地利用類型所佔面積百分比為：農業用地(16.03%)、森林(69.33%)、交通用地(1.65%)、水利地(3.52%)、建地(2.83%)、公共用地(0.32%)、遊憩用地(0.21%)、礦鹽用地(0.08%)和其他(6.04%)。

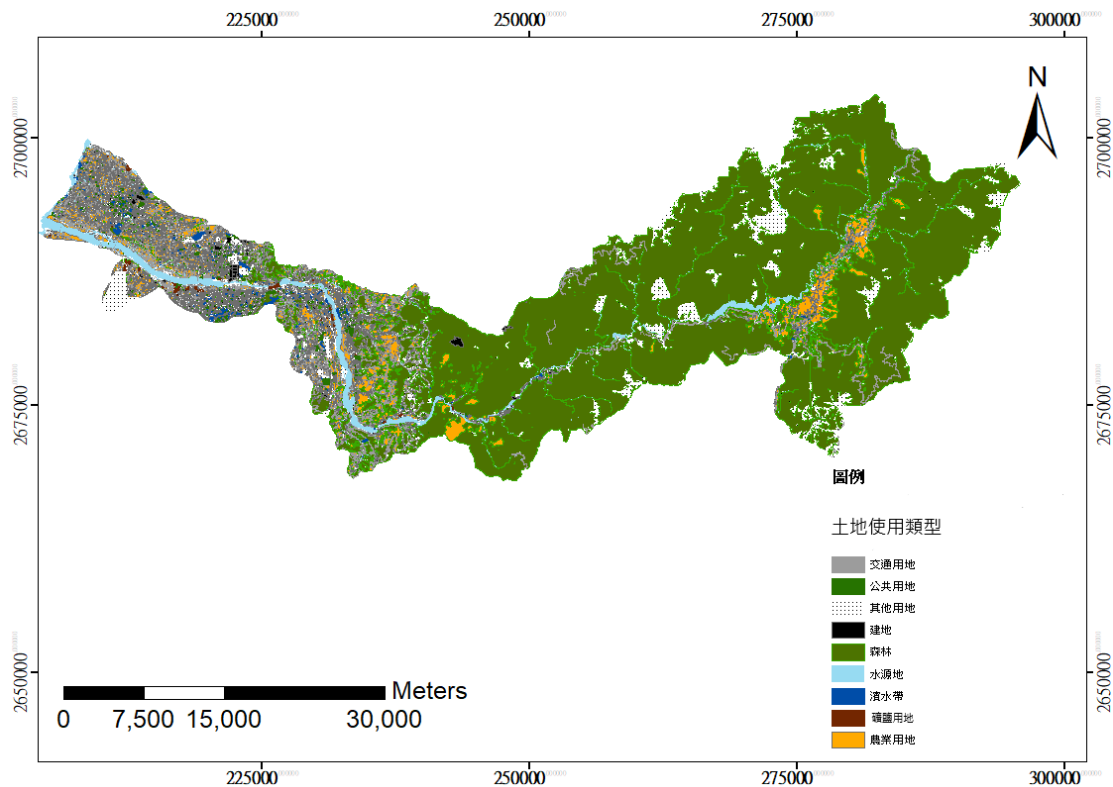


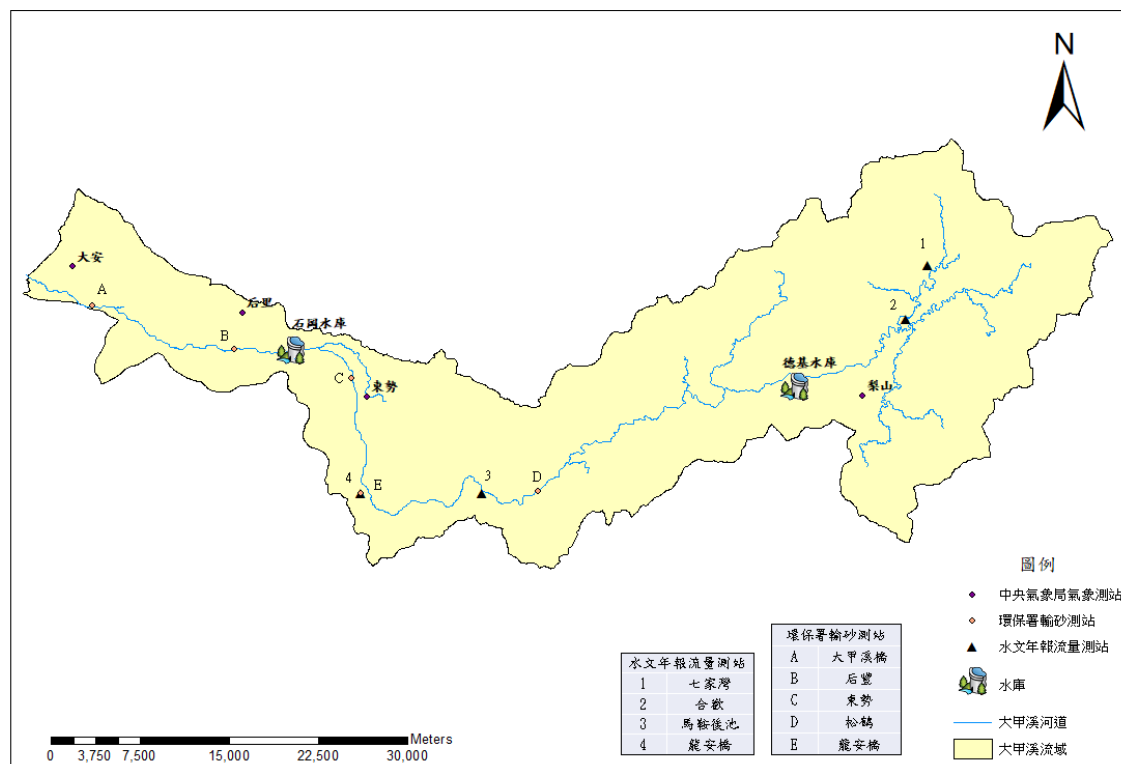
圖 2-4 大甲溪流域土地利用分類圖

(資料來源：內政部國土測繪中心，2007)

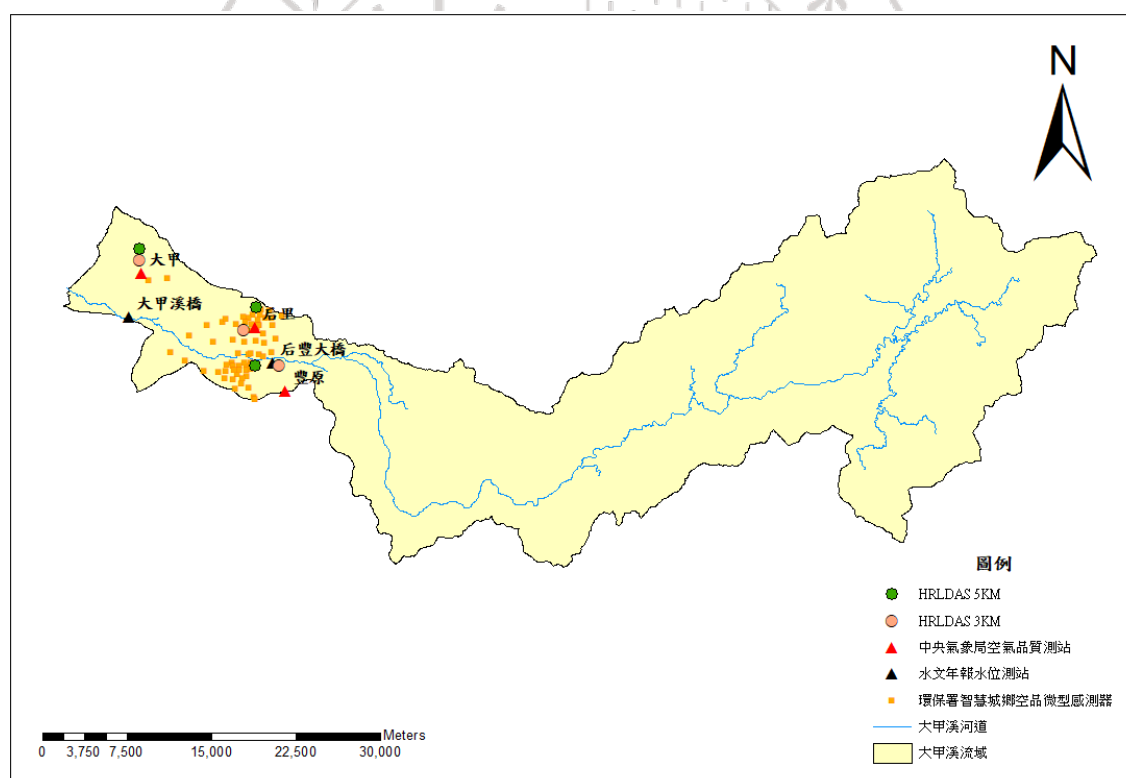
在本計畫中，使用之資料範疇包含氣象、水文、水庫操作、土壤、土地利用與覆蓋，與空氣品質等，採用的測站類型包括中央氣象局測站、水利署流量站、主要水庫、環保署國家空品測站以及智慧城鄉空品微型感測器等；各測站點位如圖 2-5 所示。圖

2- 5(b)中，土壤溫度與溼度採自中央氣象局以大氣土壤分析場 HRLDAS 模式產出的資料(HRLDAS 5KM、HRLDAS 3KM)；環保署提供的智慧城鄉空品微型感測器於 2017 年 6 月起始，更新頻率為 3 分鐘屬大甲流域範圍者皆位於揚塵易發生河段區域，將大幅增加僅由國家空品測站所測得之空氣懸浮微粒(PM₁₀、PM_{2.5})資料，對風蝕與揚塵事件之評估應有重要貢獻。





(a)



(b)

圖 2-5 大甲溪流域(a)水蝕評估與(b)風蝕評估採用資料測站點位圖

二、水蝕評估模式

(一)水土評估工具 SWAT 模式介紹

水土評估工具(Soil & Water Assessment Tool, SWAT)於 1994 年由美國農業部(USDA)農業研究中心(ARS)的 Jeff Arnold 博士等人組成之研究團隊所開發。SWAT 為經驗式為基礎的半物理模式，以集水區為尺度、將其劃分成水文反應單元(Hydrologic Response Unit, HRU)為最小計算單元的半分布式水文模式。該模式模擬連續時間下，水文及水質的空間分布及傳輸過程(Neitsch et al., 2005)；其水文過程分為陸面(超滲逕流和坡面集流)與水面(河道匯流)等兩部份，以模擬水文循環系統並遵循質量守恆之水文平衡規律。由於 SWAT 可以計算流域的空間異質性，已被廣泛用於環境議題研究上，包括水流的產生、沉積物的運輸以及氣候和土地覆蓋變化導致逕流或營養鹽的變化的影響等(Wu and Chen, 2012; Abeyou et al., 2018)。

SWAT 之主要輸砂計算模組為逕流量及水文平衡、土壤沖蝕計算，以及河道輸砂公式計算。在逕流量及水文平衡中，SWAT 模擬雨量產生地表逕流關係採用美國土壤保持局(U.S. Soil Conservation Service, SCS)發展之曲線法(Curve Number method, CN method)；水文循環之過程則透過水平衡方程式計算最終土壤含水量為起始降水、土壤含水量、表面逕流、蒸發散、入滲和基流量的函式。

土壤沖蝕造成之土壤流失量計算採用修正後通用土壤流失公式(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)，在 MUSLE

中，原 USLE 所考慮的降雨侵蝕力因子(R)，被逕流因子取代。逕流因子可展現出流域中單場降雨逕流能量及泥砂受外力輸送過程。不必考慮泥砂遞移率，並使公式可應用在各個獨立的降雨事件中預測土壤沖蝕造成的流量。SWAT 中提供五種輸砂公式作為河道輸砂計算使用，即 Simplified Bagnold equation、Modified Bagnold model、Kodatie model、Molinas and Wu model，和 Yang sand and gravel model 等。

(二)SWAT 於國內之應用研究

參考近年國內應用 SWAT 模式進行之相關研究，如陳立宗(2009)、Chang et al. (2015)、吳蕙雯(2016)、林冠州(2017)、盧至美(2018)，和張君葭(2019)等，評估該模式在臺灣的適用性。其中陳立宗(2009)以 SWAT 模擬翡翠水庫集水區泥沙有較好的結果；Chang et al. (2015)利用 SWAT 模式模擬高屏溪因莫拉克颱風所導致之輸砂、濁度變化進行模擬，並利用衛星影像分析 1994~2012 年之崩塌地變遷情形，結果指出，在崩塌地變遷明顯之時期與區域，SWAT 模式應考慮崩塌地、崩塌事件發生後對河川輸砂的長遠影響。盧至美(2018)使用整合臺灣通用土壤流失公式(TUSLE, 陳樹群等人，2009)及崩塌面積-體積關係式後的 SWAT-TUSLE 模式進行陳有蘭溪流域之產砂量評估，顯著提升原 SWAT 模式之評估效率。因此，使用 SWAT 模式進行臺灣集水區模擬時，考量臺灣土壤侵蝕特性能合理提高集水區坡面產砂與河道輸砂量模擬之準確性。

(三)應用 SWAT 於大甲溪流域之適用性評估

本計畫參考近年國內應用 SWAT 模式相關研究和國際對 SWAT 模式應用案例的回顧文獻，如 Gassman et al. (2007)和 Tan et al. (2019)等，評估 SWAT 模式應用於大甲溪流域的適宜性和限制，並納入計畫說明，如下所示：

1.流域面積大

大甲溪流域面積約為 1244km^2 ，於國內應用 SWAT 模式進行分析的流域案例中，面積較大；根據 Gassman et al. (2007)之 SWAT 模式應用回顧文獻，使用該模式進行分析的流域面積範圍由小於 1km^2 至 $491,700\text{km}^2$ ；根據 Tan et al. (2019)對東南亞地區 SWAT 模式應用的回顧文獻，流域面積範圍由小於 100km^2 至大於 $100,000\text{km}^2$ ，其中流域面積為 1001km^2 至 5000km^2 的案例高達 30%以上，大甲溪流域(面積 1244km^2)就面積大小而言屬 SWAT 模式合理應用範圍。

2.高差大、坡度陡

在 SWAT 模式中，藉由土地利用、土壤、坡度等資料套疊後的特定組合，將集水區分割為多個水文反應單元(HRU)，作為最小單元進行計算。因此高差大的因素在分割 HRU 時即有考慮，尤其在以 MUSLE 公式計算時能反應坡度變化對土壤流失的影響，且應可反應集水區複雜條件。

3.大型塊石多

在 SWAT 模式中，可輸入含石量比例，本計畫中無實際調查資料，目前不考慮大型石塊，只考慮坡面土壤流失及河道中土砂傳輸過程。

4.壩體多

本計畫考慮主要影響模式模擬結果之水工構造物，即德基水庫和石岡壩，使用 SWAT 模式中的水庫模組建立模式，探討其對流量與輸砂之影響。

5.逕流與流量模擬

考量集水區流況特性，SWAT 模式在坡面使用 SCS 逕流曲線，在河道內採用曼寧公式進行逕流與流量模擬，其結果在德基水庫上游地區如七家灣測站尚屬滿意(日流量 NS 值皆較下游高)，下游測站結果稍不理想，為未來改善方向之一。

(四)模式輸入資料與參數率定

本計畫建立 SWAT 模式時，採用實測氣象資料，如降雨量(mm/day)、平均風速(m/s)、日最高溫度及最低溫度(攝氏)、日照強度(MJ/m²)，和平均相對濕度(%)等計算天氣資料相關統計量，未涉及大氣參數使用及率定；其中使用降雨量資料計算逕流量，影響計算坡面土壤流失量的 MUSLE 公式中流量峰值，日照因子則屬作物生長模擬之必要資料，其他氣象因子則屬作蒸發散之必要資料。SWAT 模式中使用的土壤相關參數使用(如土壤圖等)和土地利用資料皆由國內相關單位調查之資料輸入；而氣象因子、坡度等使用本土實測資料，並參考國內研究的參數項目進行率定，故模式建立以本土資料為基礎，經適當參數率定與模式驗證後，應能反應大甲溪流域流量及輸砂之變化，進行評估。

三、風蝕評估模式

臺灣河川豐枯水期流量變化大，921 地震後河床上升，下游河床裸露地增加。受風力作用下，河床裸露地土砂揚起，在風蝕過程中飛砂的運動類型分為滾動、跳躍和懸浮三大類型(圖 2-6)，不同類型之運動機制，取決於風速、土砂粒徑及表面狀態。近年來，大甲溪下游河段因土砂失衡，淤砂及砂粒粒徑細化現象嚴重；於冬季枯水期間因水位下降，河床裸露面積大增且逢東北季風的盛行，加上農業整地行為造成表面破壞，使土砂微粒藉風力向上揚起，導致空氣中懸浮粒子遽增產生揚塵現象(林德貴等人，2011)。

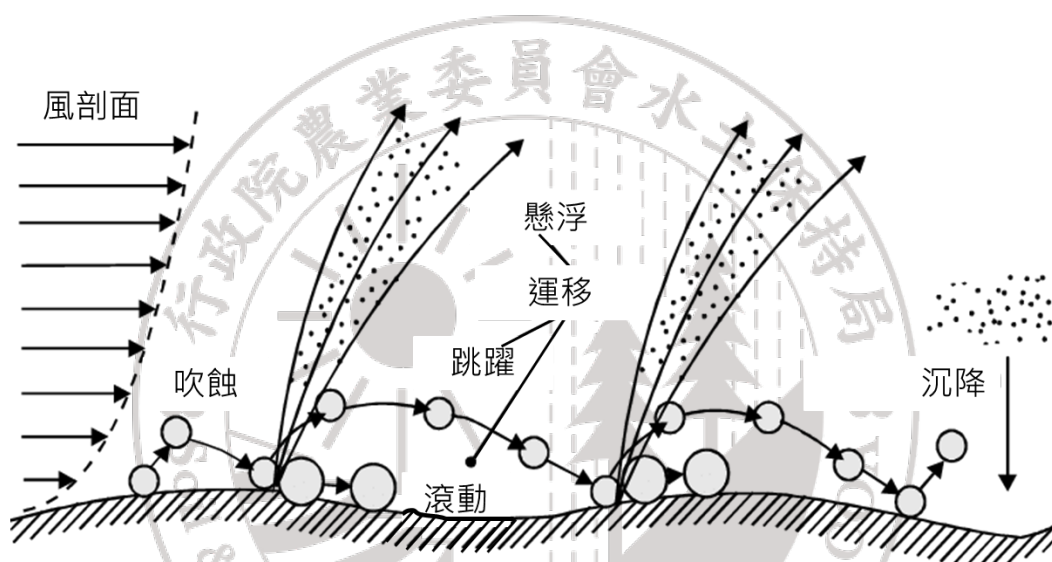


圖 2-6 風蝕過程主要運動類型(改繪自：Cornelis, 2006)

在本計畫中，以揚塵事件為主要評估項目，進行大甲溪流域的風蝕情況分析。在前人研究中，對於中部地區揚塵問題之研究涵蓋空間分析，如揚塵潛在區位劃定(林昭遠等人，2008)、懸浮微粒濃度數值模式模擬與風洞試驗(林德貴等人，2011)；和發生影響因素分析(林昭遠、林政侑，2012)等。相關研究中多探討氣

象因子、裸露地面積等對揚塵發生之影響，然對於裸露地土壤狀態(如粗糙度、濕度等)討論較少。但土壤濕度顯示表面乾燥程度，直接影響風蝕產生之飛砂與懸浮微粒量體(Blanco and Lal, 2008)且土壤濕度受降雨、風、日照、植被等影響，為時間及空間變化之因子。本計畫研究中，先探討揚塵事件發生之原因，彙整文獻資料中，對於揚塵事件發生定義與描述並列出影響因子；參考行政院環境保護署(2008)計畫成果，考量 PM10 濃度、沙塵暴事件、降雨日、平均風速、揚塵粒徑比例等，作為揚塵事件發生日之篩選基準，篩選步驟如圖 2-7 所示：



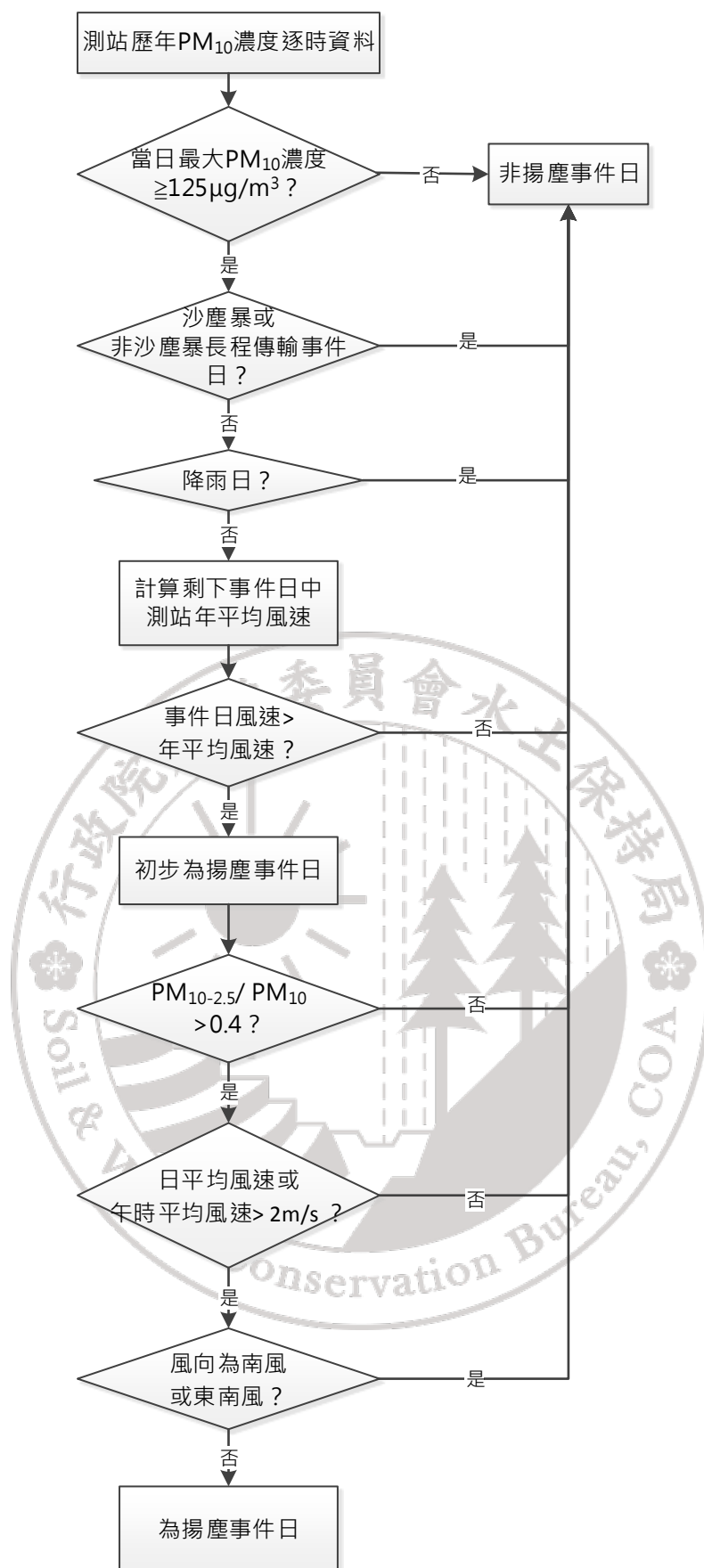


圖 2-7 揚塵事件發生日篩選流程圖

揚塵事件發生日之篩選各項基準說明如下：

找出各測站歷年 PM10 事件日($PM_{10} > 125 \mu g/m^3$)。

(1)扣除沙塵暴事件日及非沙塵暴長程傳輸事件日。由於是觀測河川揚塵事件，因此將因沙塵暴引起 PM10 過高的情況刪去。

(2)扣除降雨天。

(3)所剩下事件日取各測站之年平均風速，將風速大於年平均風速者先歸類於河川揚塵事件日。

(4)被歸類為河川揚塵事件日只需再以 $PM_{10-2.5}/PM_{10}$ 之比值(此比值需大於 0.4)、日平均風速、午時平均風速(12:00~17:00)、風向及天氣型態來驗證、再刪除不含合理者。(日平均風速與午時平均風速兩者至少需有一項需大於 2m/s;大部分南風及東南風不易形成河川揚塵亦予以刪除)。

(5) 被歸類為非河川揚塵事件日者，若其 $PM_{10-2.5}/PM_{10}$ 之比值大於 0.4，且日平均風速或午時平均風速兩者有一項需大於 3m/s 者，則移至河川揚塵事件日。

由文獻回顧與彙整，初步分析發生揚塵事件之因子可分為大氣、土壤、水文和人為等方面，收集相關資料，如氣象因子、土壤質地與狀態、水文監測資料、防治管理措施等。以明示結構法探討各因子之影響關係，並應用貝氏推論統計概念，建立貝氏網路統計模式；找出揚塵發生事件之關係式與發生條件，評估揚塵事件日之發生機率，作為風蝕評估目標，並應用於揚塵易發生區位，進行未來應用在災害事件預報和警戒發布參考。

四、明示結構法

Warfield (1973) 提出之電腦輔助方法論-明示結構法 (Interpretive Structural Modeling, ISM)，又稱為詮釋結構模式法；將此方法應用於進行確認與特定關聯因子間的關係，並解釋問題。明示結構法藉由專家諮詢或群體問卷，給予複雜因子間的相對層級架構；分析程序以二元關係矩陣(binary matrix)與有向圖(digraph, directed graph)間的對應機制為基礎，由「元素集合」與「遞移關係」所組成(張耀茂，2019；張揚祺等人，2012；張寧，2007)。

明示結構法分析流程為評估因子的決定、可達矩陣分析，以及影響層級區分。決定評估因子時，首先以系統化方式根據專家意見與知識，並且可以多次機會修正，建立二元矩陣表示因子之間的關聯性。其中，評估因子 S_i 是否影響評估因子 S_j ，以下列二元矩陣 A 為例， S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 為評估因子，在矩陣 A 中，呈現出 1 者，表示評估因子間有影響，根據矩陣 A 中，評估因子 S_1 與 S_2 相互影響，評估因子 S_3 則分別影響評估因子 S_1 與 S_2 ，評估因子 S_2 影響評估因子 S_1 與 S_4 ，評估因子 S_4 影響評估因子 S_3 ，另外呈現出 0 者，表示評估因子間無關聯性(張耀茂，2019；張揚祺等人，2012；張寧，2007)。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

評估因子的階層分級需透過可達矩陣中的先行集合與可達集合進行聯集過程，首先計算元素關聯矩陣 N ，再透過冪次運算得到可達矩陣 M 。

$$N = A + I$$

$$N \neq N^2 \neq N^3 \neq N^4 \neq N^r \neq N^{r+1} = M$$

A ：二元矩陣

I ：單位矩陣可達矩陣 M

為區分各因子之影響層級，需透過可達矩陣中的先行集合與可達集合之交集，呈現評估因子之間影響關係；其中先行集合表示該項評估因子受多個評估因子所影響，故這些多個因子即為該評估因子的先行集合，則可達集合表示該評估因子可影響多個評估因子，這些多個因子即表示為該評估因子之可達集合。上述二集合交集與可達集合評估因子相同時，列為第一層，除去第一層因子後，可達集合與交集相同時為第二層，依此類推可得到最終層。依照層級的分布與專家討論產生的關係矩陣，將評估因子關係作為建立貝氏網路評估因子相依性之基礎。

五、貝氏網路

使用大量數據資料分析時，為避免極端數據對研究結果產生扭曲，善用先前知識配合觀察有助於推論，此類推論模式稱為貝氏推論統計(Bayesian inference)。以貝氏推論統計為基礎並透過圖形理論(graphical theory)表達變項間關係的統計模式稱為貝氏網路(Bayesian network)(Richard and Neapolitan, 2003)。貝氏網路

又稱為機率網路(probabilistic network)，以條件機率(conditional probability)為基礎，並與具有方向性之有向非循環圖(directed acyclic graph, DAG)所建構。DAG的主要結構組成包括節點(node)及節點間的有向邊(directed edges)，其中節點表示隨機變量，有向邊則表示隨機變量間的因果關係，其影響程度則由條件機率表示。

貝氏網路的推論演算基礎為貝氏定理(Bayes' theory)延伸而來，其推論方法是由輸入的證據來推導其他節點間狀態機率。貝氏定理計算事件發生的條件機率時，需利用事前機率如 $P(A)$ ，而變數 A_i 與 A 兩者的條件機率如 $P(A|A_i)$ ，透過貝氏網路的推理演算法，即可得到事後機率 $P(A_i|A)$ ，計算方式如下表示：

$$P(A_i | A) = \frac{P(A | A_i)P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i)P(A | A_i)}$$

由上述貝氏定理的計算可以得知，使用貝氏網路推論預測最大的優點為結合事前機率與可經由訓練樣本得知的樣本機率。因此，貝氏網路模式可應用於災害事件發生機率與風險評估分析(張揚祺等人，2012)。

六、大氣土壤分析場

本計畫中風蝕評估模式考量之土壤因子包含土壤質地與狀態，其中土壤狀態因子為表層土壤之溫度和濕度，其資料採用氣象局產出的土壤分析場資訊，獲得研究區域土壤分層之逐時溫度

和濕度歷史資料(自 2017 年 3 月起)，作為風蝕與揚塵事件評估模式中的土壤表面狀態重要因子。

HRLDAS，全名為高解析度土壤資料同化系統(High-Resolution Land Data Assimilation System)，由美國國家大氣研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)所研發的土壤分析場系統，可作為 WRF(Weather Research and Forecasting)模式之地表狀態(如土壤濕度、溫度、降雪)模擬驅動模式。HRLDAS 以土壤模式 Noah 為核心(圖 2-8)，結合氣象資料(降雨、太陽和長波輻射，以及地表風、濕度、溫度)驅動土地表面模式來模擬土表狀態之變化(Chen et al., 2007)。Noah 土壤模式將土壤分為四層，分別為地下 5、25、70 和 150 公分處，考量土壤溫度及濕度的擴散機制與植被影響，處理植物的蒸散作用、植物冠層截留等過程(洪于琚等人，2014)。



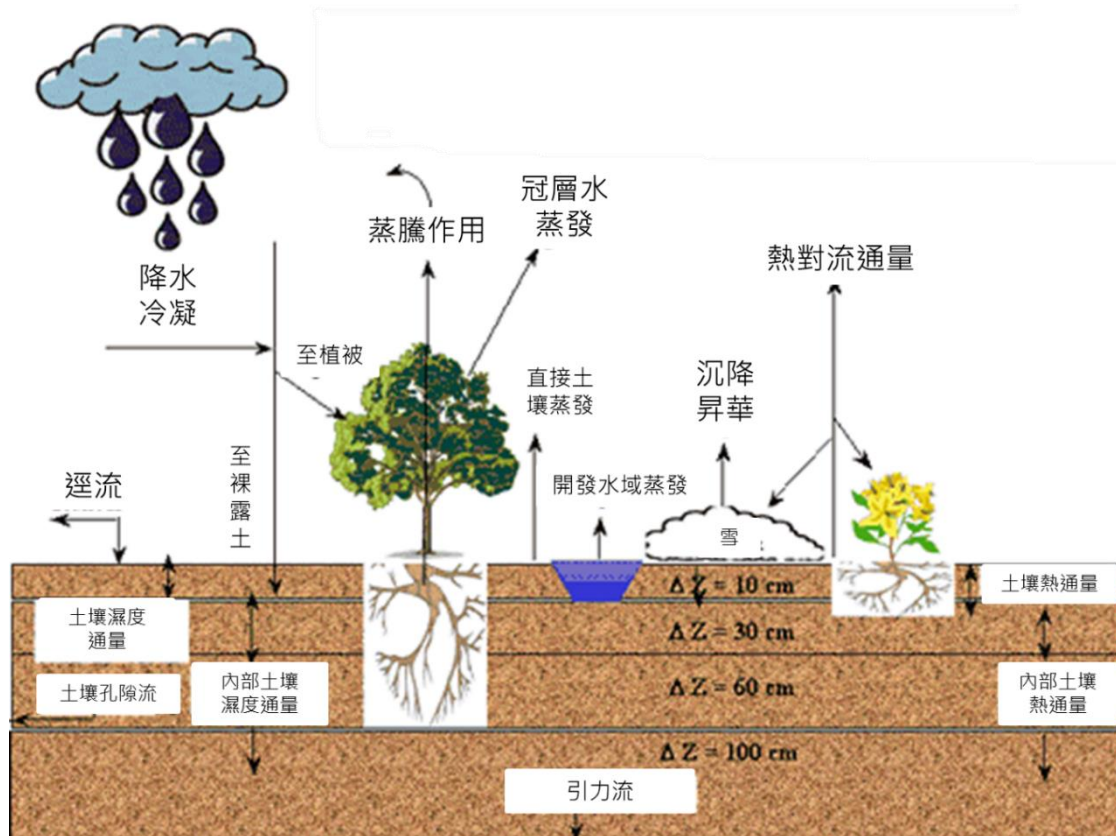


圖 2-8 WRF-Noah 地表模式系統概念圖

(改繪自：NCAR & UCAR Research Applications Laboratory 網站)

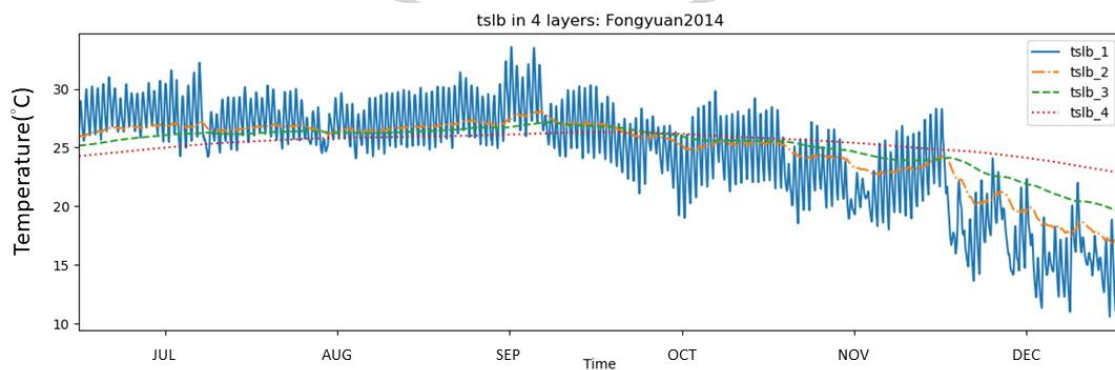
HRLDAS 利用近地面的大氣驅動資料，透過土壤模式的物理過程，將上邊界大氣觀測資訊經長時間的積分，把資料逐步影響至深層土壤，調整土壤溫度與濕度，經長時間模式起轉後取得和大氣交互作用下平衡的土壤溫度和土壤濕度，即為 HRLDAS 之土壤分析場(洪于琄等人，2014)。

中央氣象局研究團隊引進 HRLDAS，使用觀測之降水及地面的大氣溫度、濕度、風場和輻射量等，藉 Noah 土壤模式產出臺灣地區土壤溫度和濕度資訊，評估 HRLDAS 土壤溫度和土壤濕度分析場之效能。由定性分析顯示，HRLDAS 須經 3 個月以上之模式起轉，方能與近地面的大氣驅動資料達能量平衡，產出

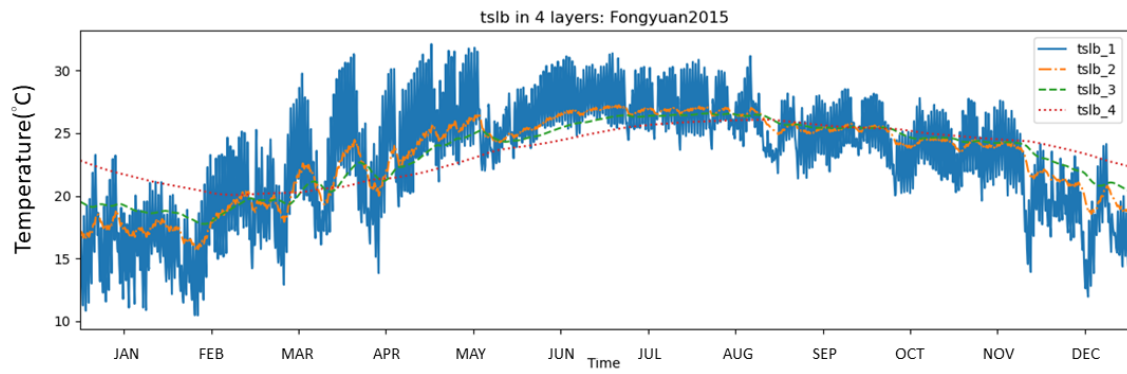
之土壤溫度和濕度分析場變化對降水事發生有合理的反應(洪于琄等人，2014)。

本計畫中，以分布於大甲溪流域下游之中央氣象局空氣品質測站，即豐原、后里，和大甲測站(圖 2-5b)為中心，選取鄰近之大氣土壤分析場的網格資訊，作為附近測站周圍土壤溫度與濕度之代表值；其土壤分層(地下 5、25、70 和 150 公分處)之溫度與濕度變化時間序列如圖 2-9 至圖 2-14 所示。由土壤溫度時間序列(圖 2-9 至圖 2-11)看來，表層土壤溫度(tslb_1)之變化隨日出上升、日落下降，以日為變化循環週期；隨土壤層深度增加，土壤溫度變化受日照與氣溫影響變小，溫度變化幅度降低；受季節變化影響，春夏季(3 月-10 月)土壤溫度由表層向下減少，即 $tslb_1 > tslb_2 > tslb_3 > tslb_4$ ，秋冬季(11 月-隔年 2 月)則呈相反趨勢。

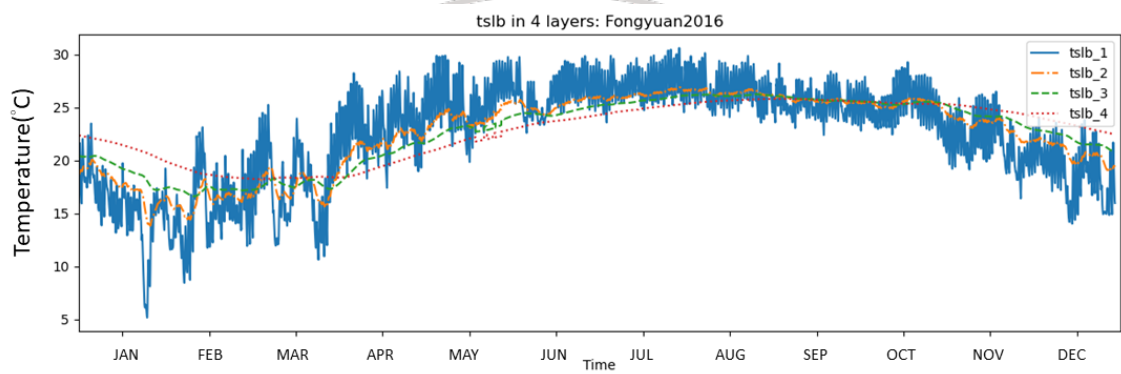
由土壤濕度時間序列(圖 2-12 至圖 2-14)看來，前三層土壤濕度(smois_1、smois_2、smois_3)隨時間之變化趨勢一致，但表層土壤濕度(smois_1)之變化幅度最大，且濕度變化幅度隨土壤深度增加而減少；第四層土壤濕度(smois_4)隨時間之變化較前三層穩定，且受降雨影響小，但亦可能與前三層之變化趨勢相當。



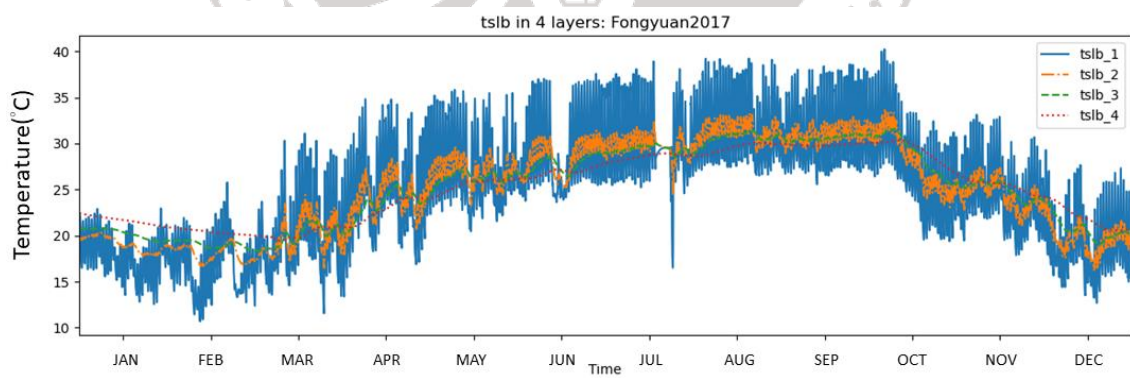
(a)



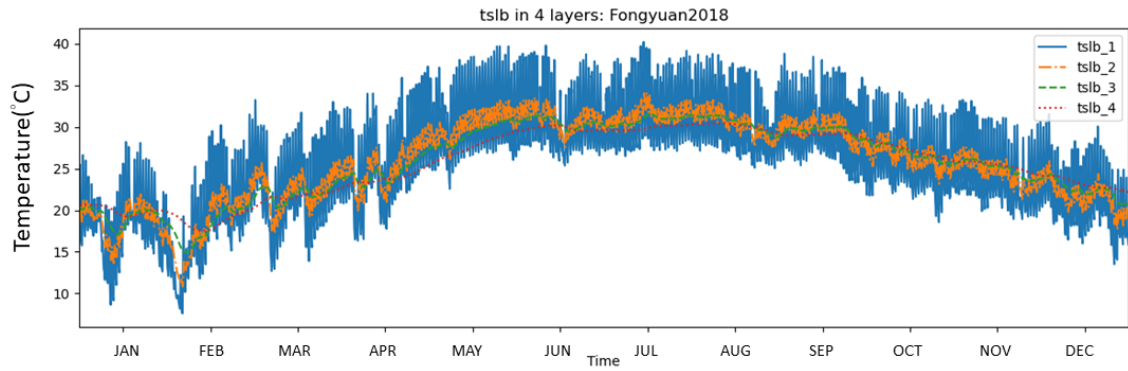
(b)



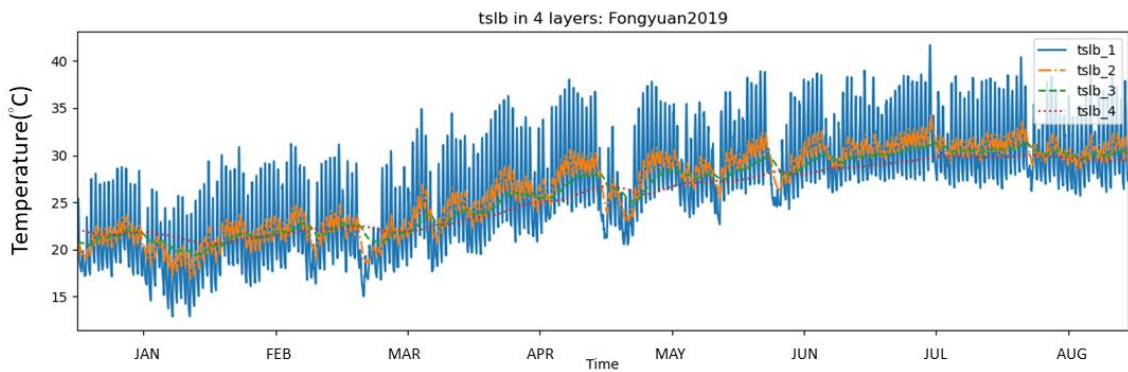
(c)



(d)

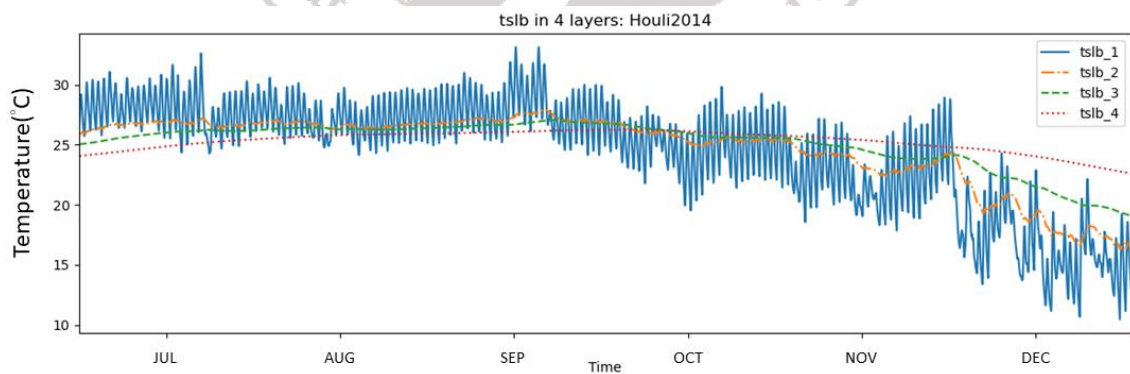


(e)

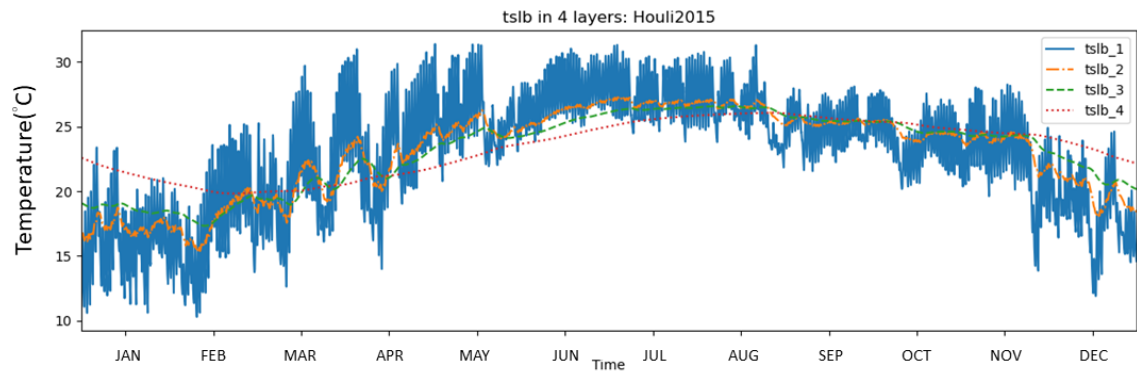


(f)

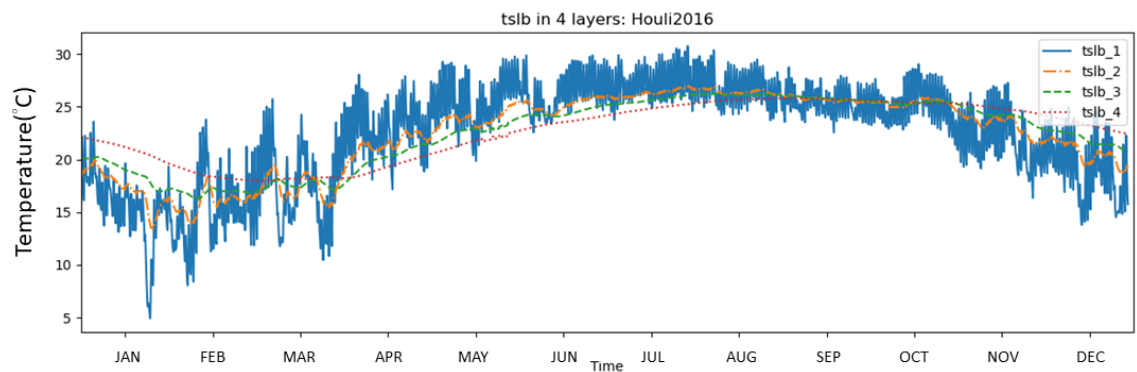
圖 2-9 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤溫度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：豐原(Fongyuan)測站(a)2014 年、(b)2015 年、(c)2016 年、(d)2017 年、(e)2018 年、(f)2019 年資料



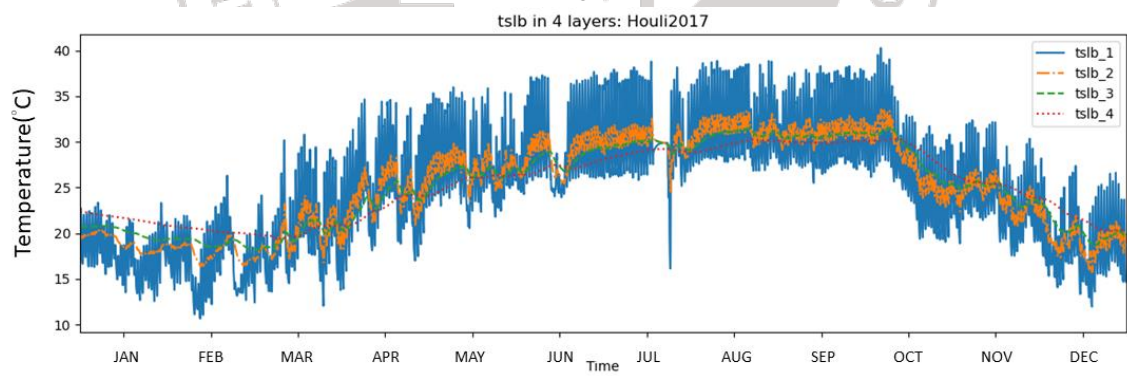
(a)



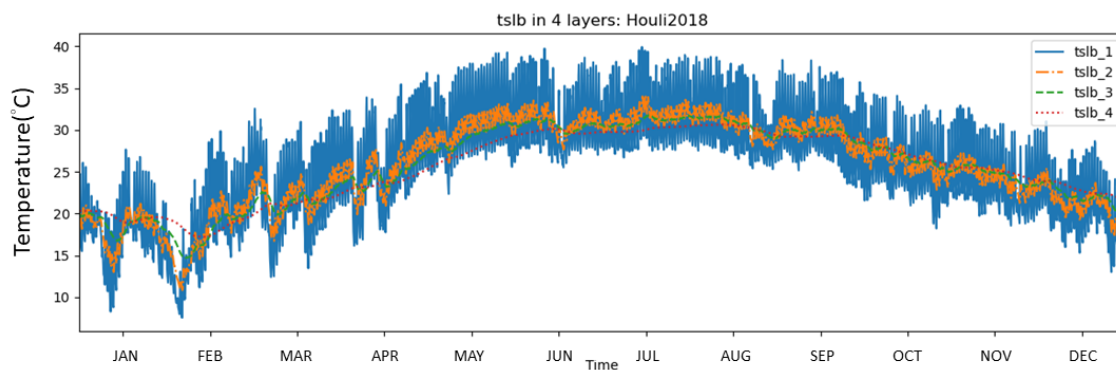
(b)



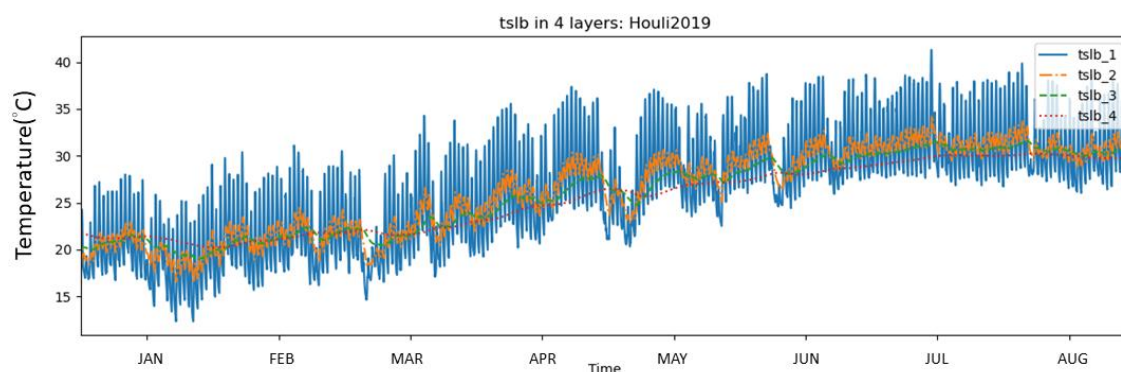
(c)



(d)

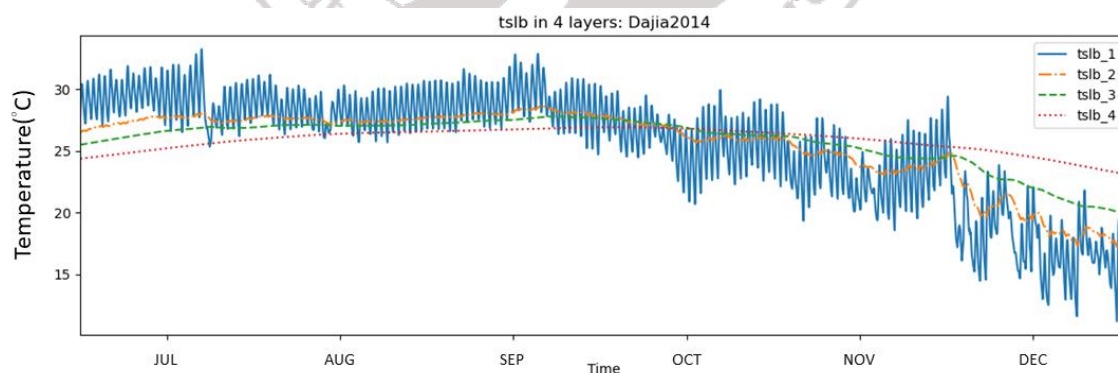


(e)

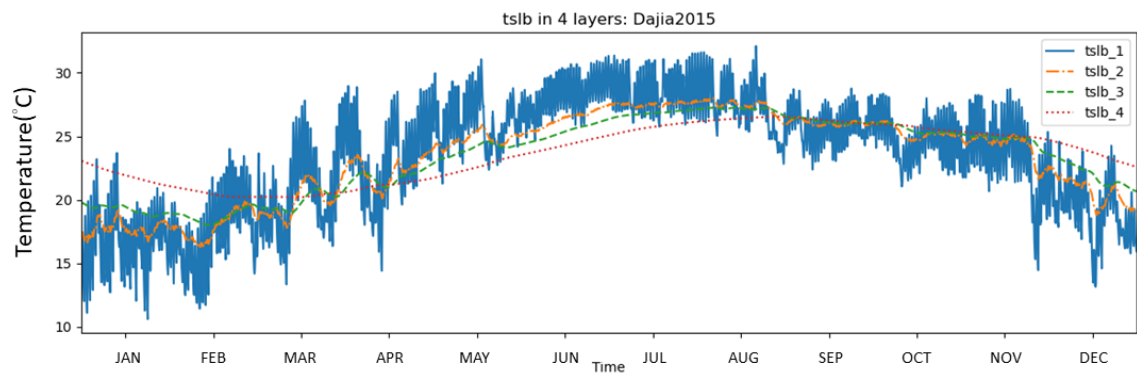


(f)

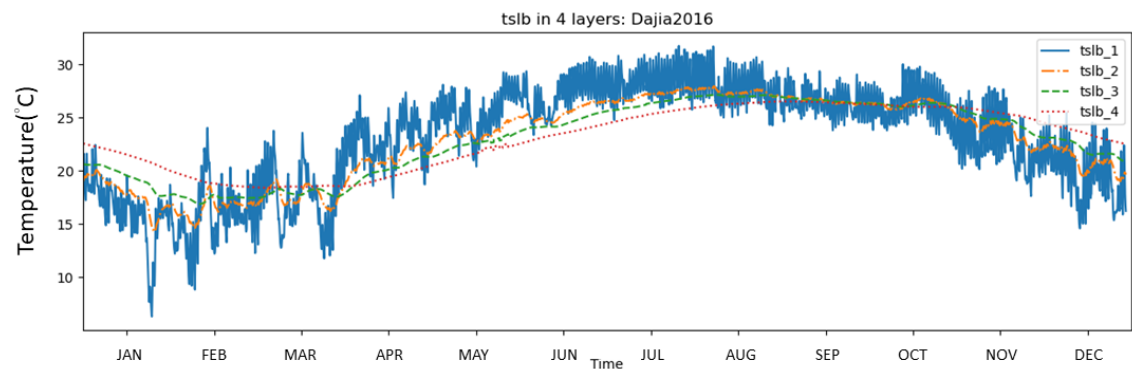
圖 2-10 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤溫度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：后里(Houli)測站(a)2014 年、(b)2015 年、(c)2016 年、(d)2017 年、(e)2018 年、(f)2019 年資料



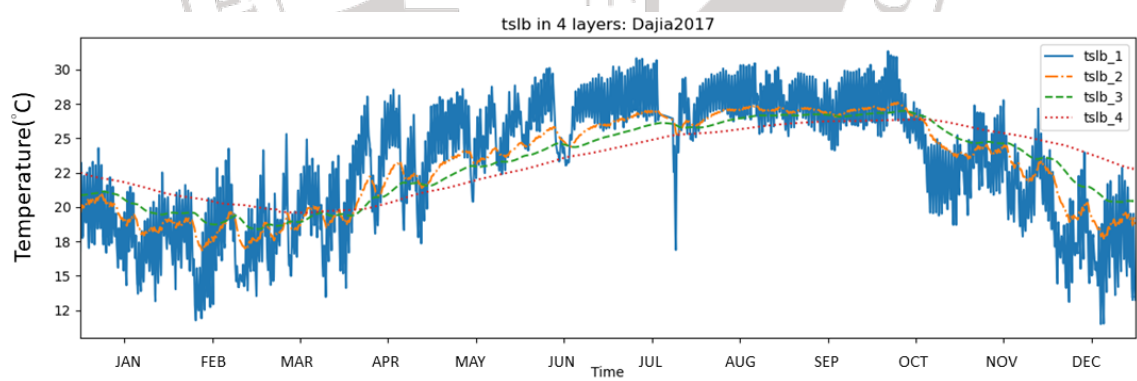
(a)



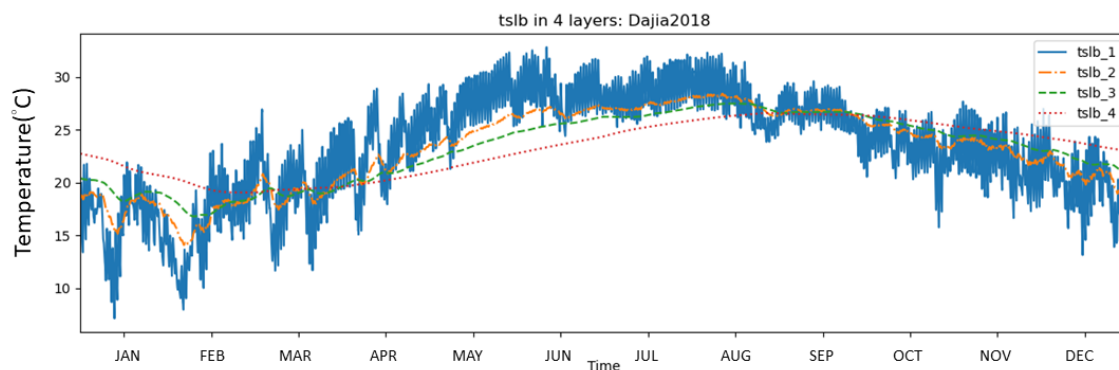
(b)



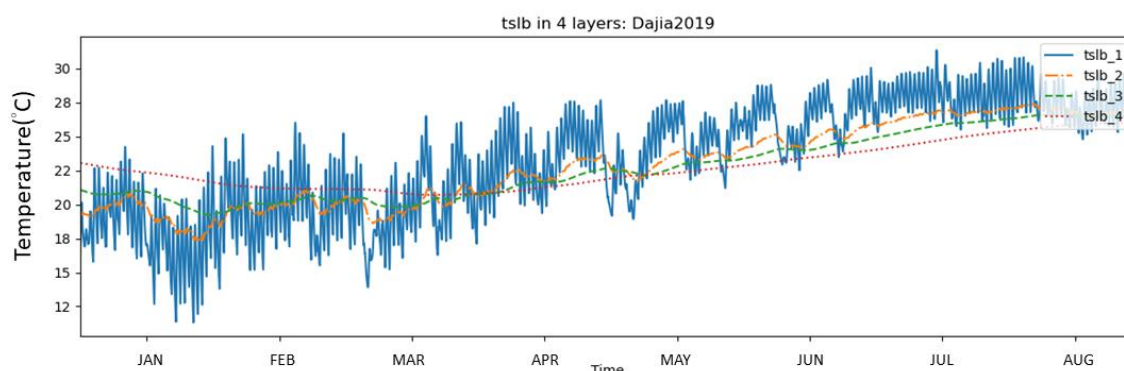
(c)



(d)

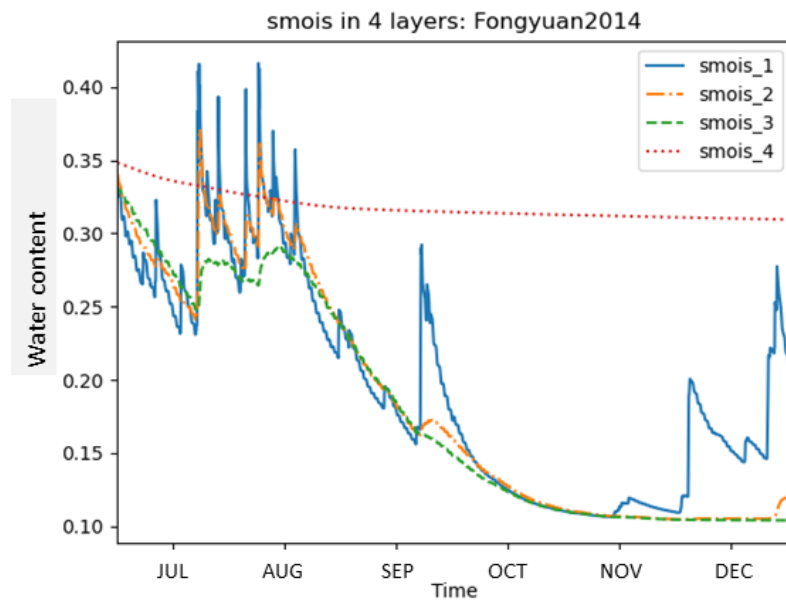


(e)

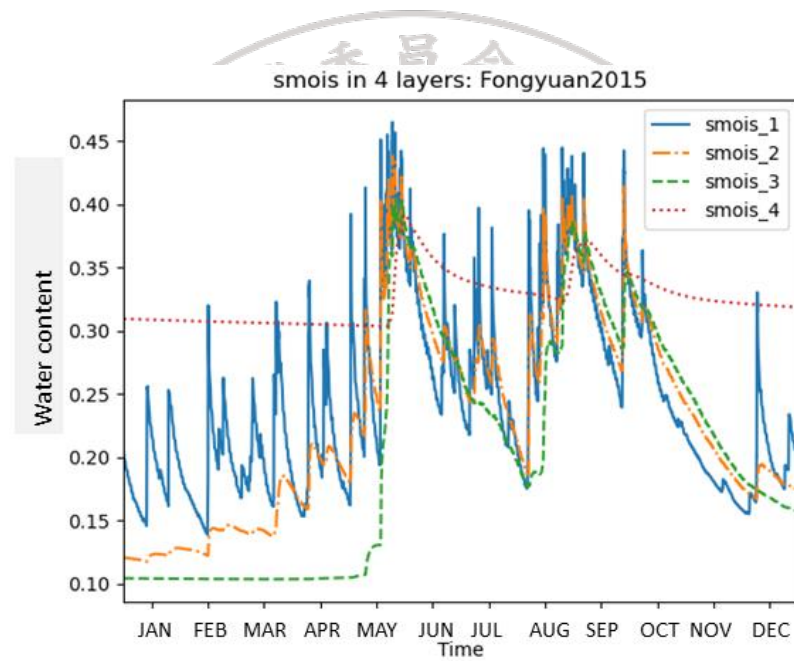


(f)

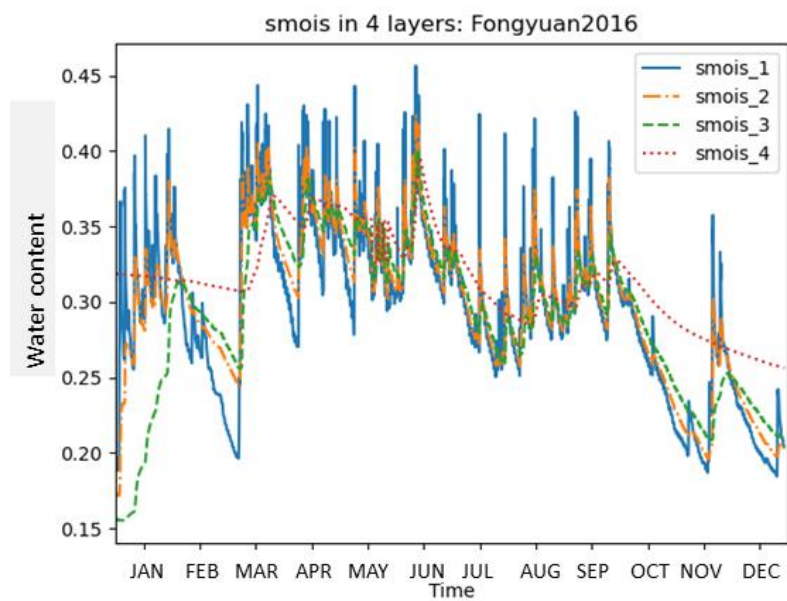
圖 2-11 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤溫度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：大甲(Dajia)測站(a)2014 年、(b)2015 年、(c)2016 年、(d)2017 年、(e)2018 年、(f)2019 年資料



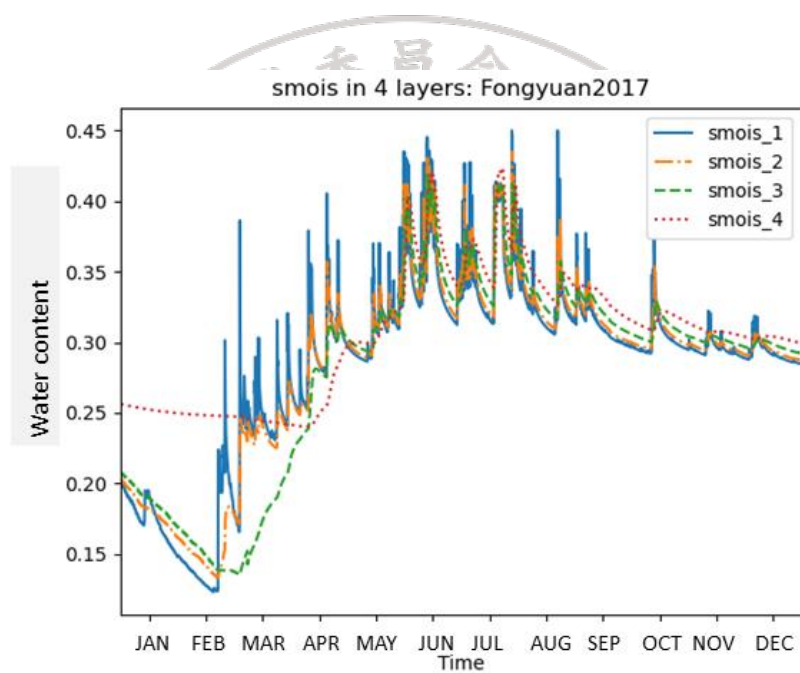
(a)



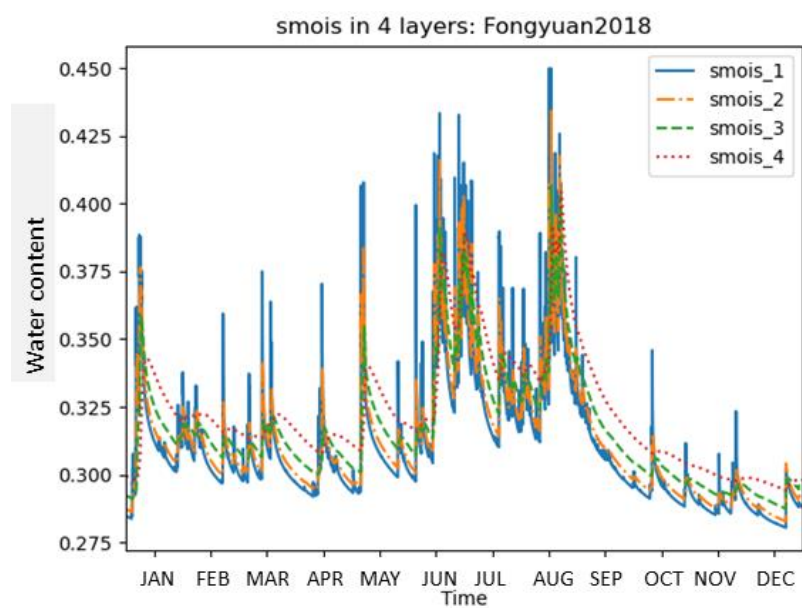
(b)



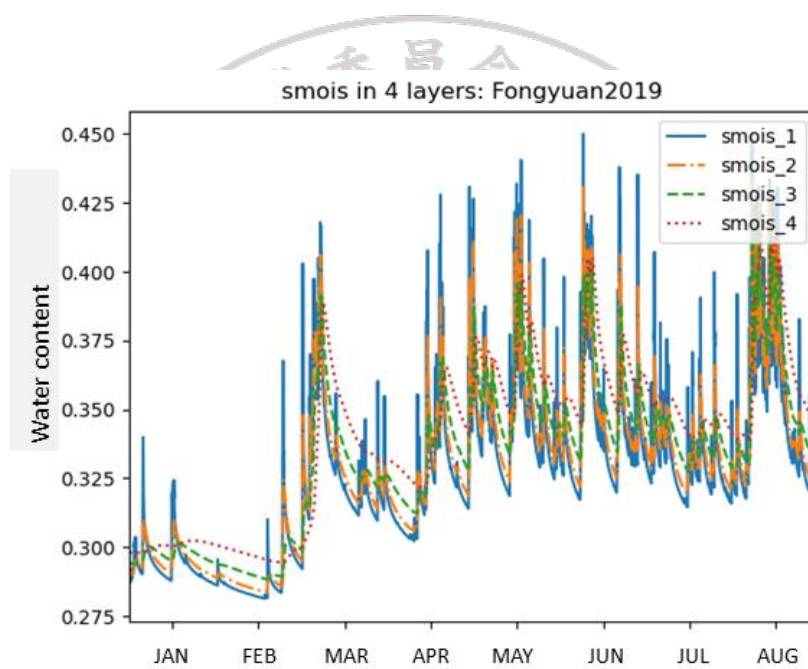
(c)



(d)

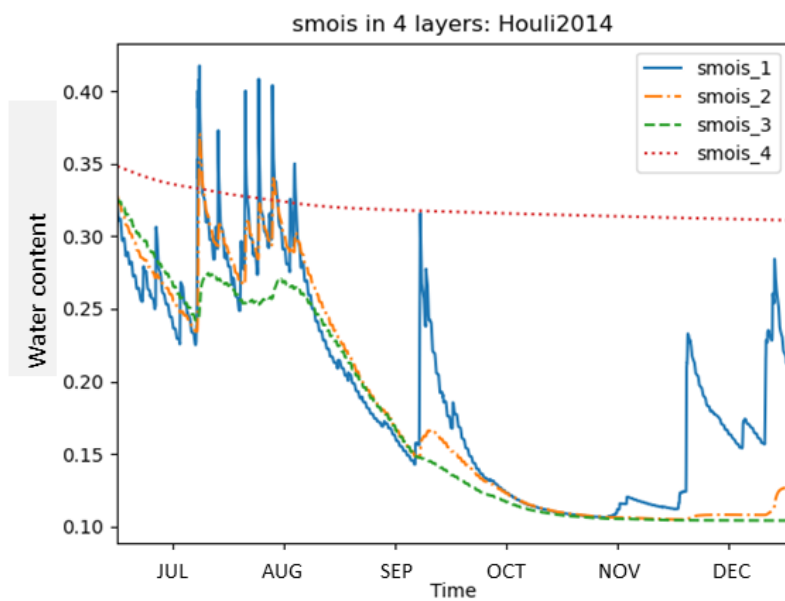


(e)

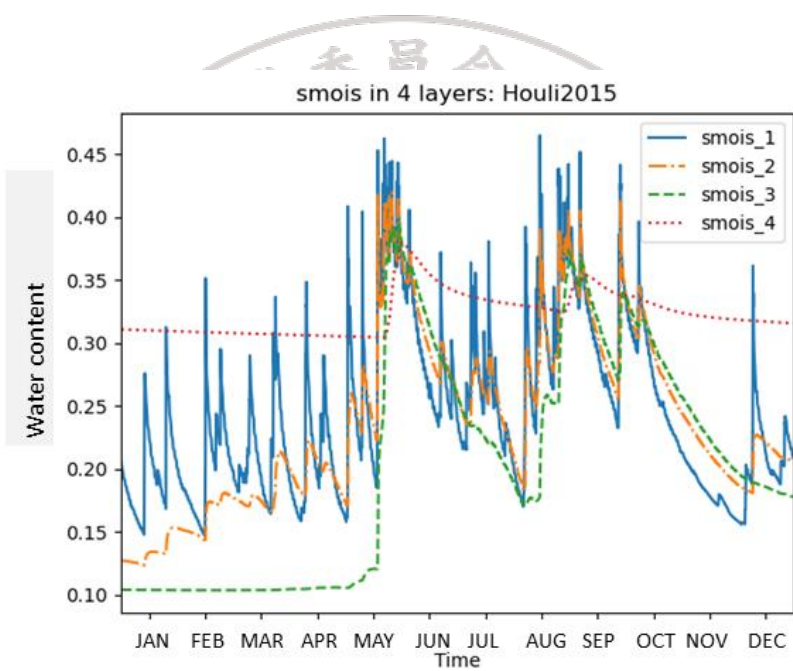


(f)

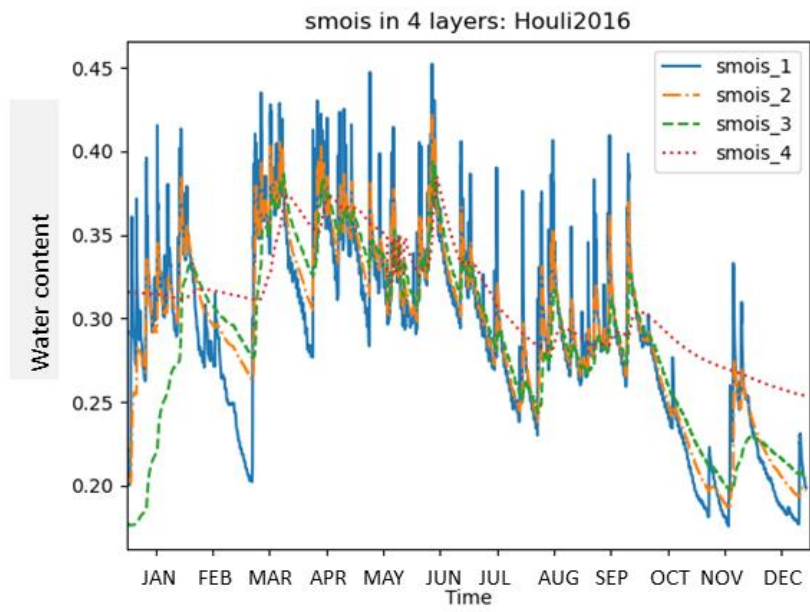
圖 2- 12 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤濕度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：豐原(Fongyuan)測站(a)2014 年、(b)2015 年、(c)2016 年、(d)2017 年、(e)2018 年、(f)2019 年資料



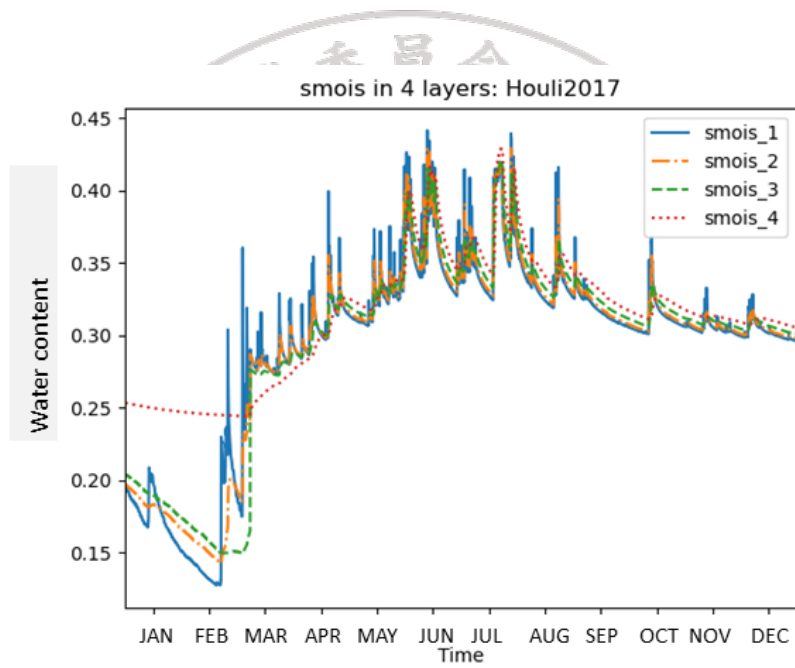
(a)



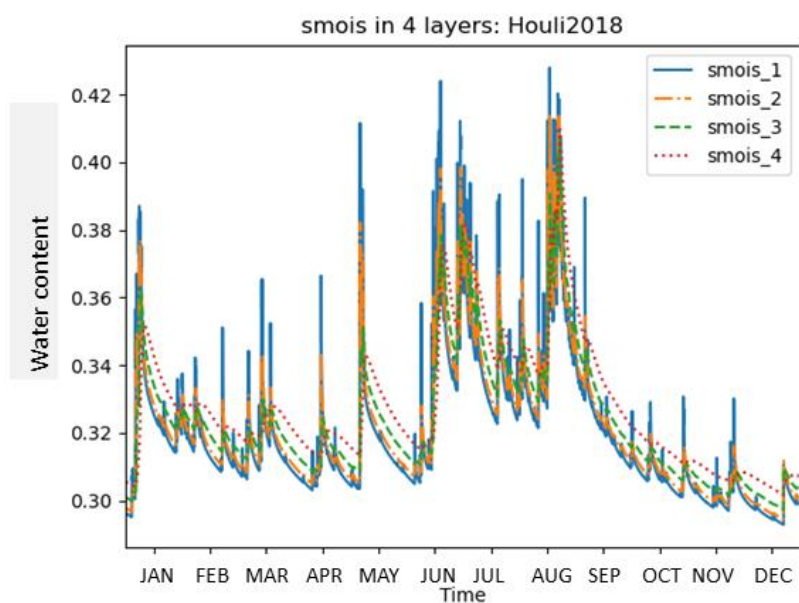
(b)



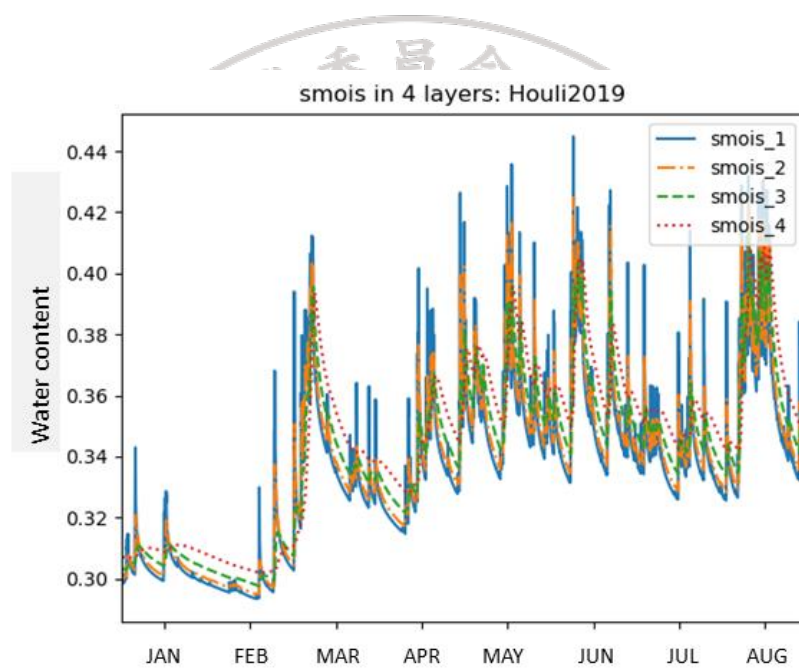
(c)



(d)

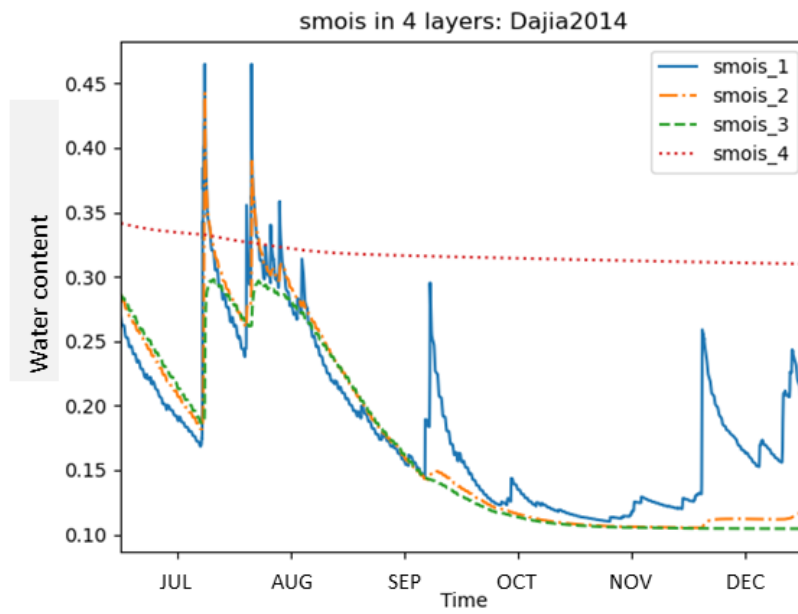


(e)

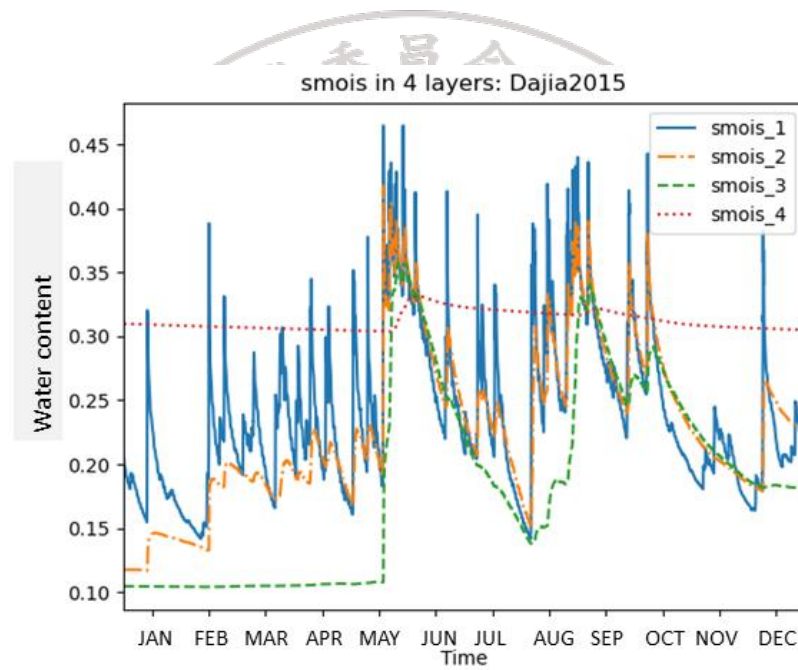


(f)

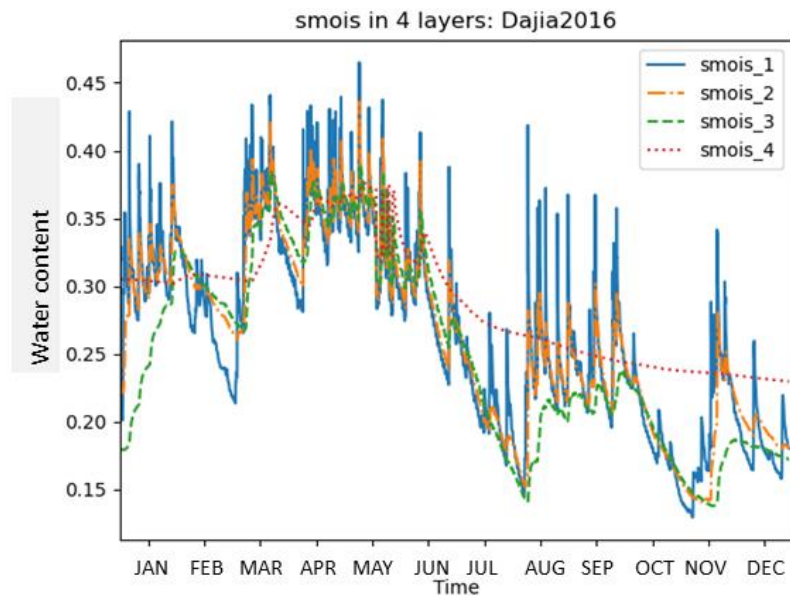
圖 2-13 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤濕度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：后里(Houli)測站(a)2014 年、(b)2015 年、(c)2016 年、(d)2017 年、(e)2018 年、(f)2019 年資料



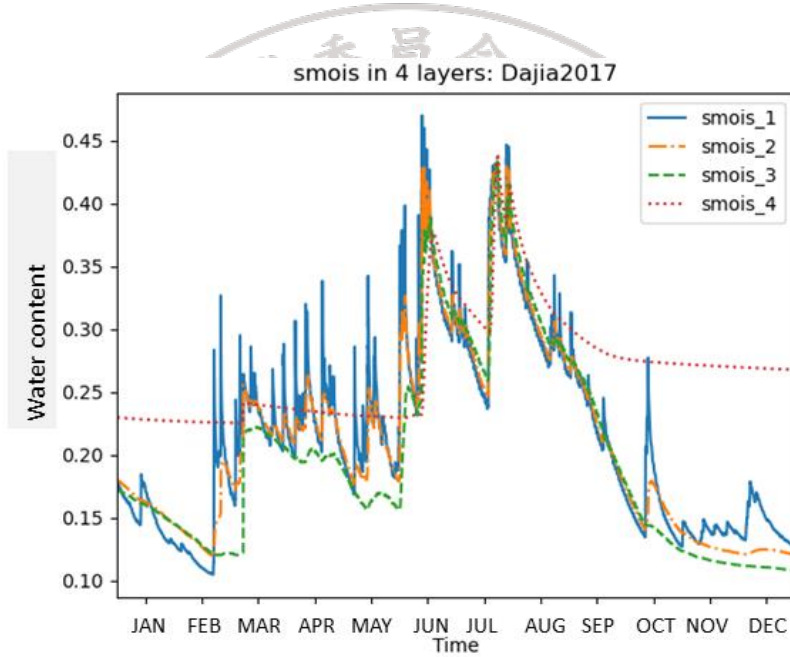
(a)



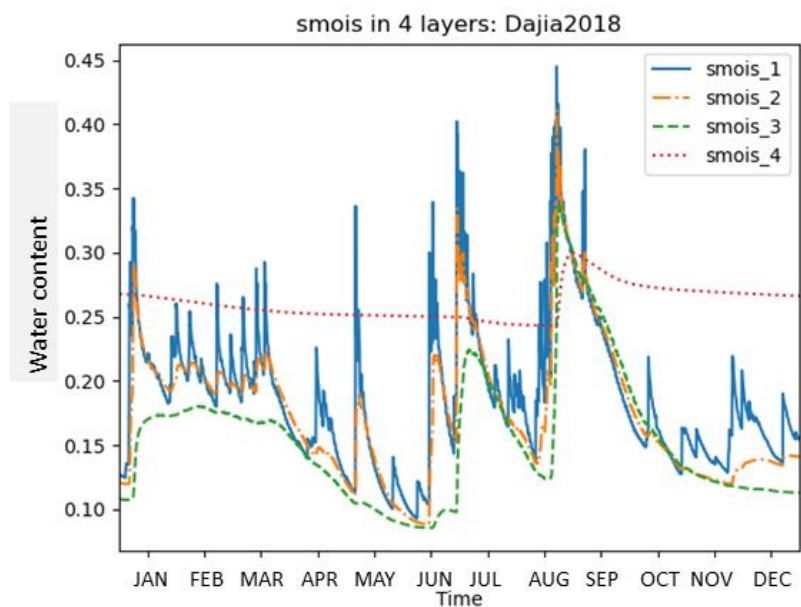
(b)



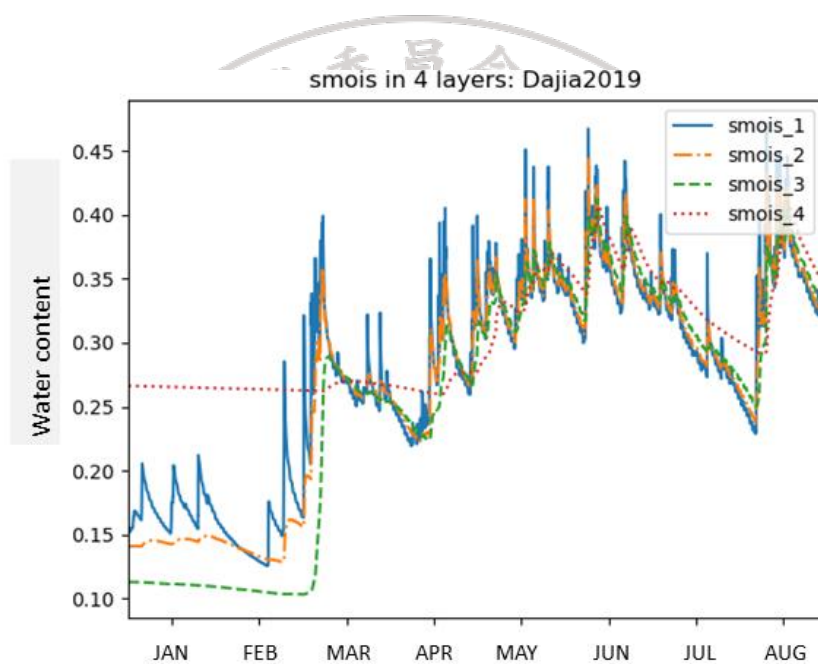
(c)



(d)



(e)



(f)

圖 2- 14 大氣土壤分析場 HRLDAS 土壤濕度歷年(2014/7 – 2019/8)變化：大甲(Dajia)測站(a)2014 年、(b)2015 年、(c)2016 年、(d)2017 年、(e)2018 年、(f)2019 年資料

第二節 工作執行步驟

本研究計畫進行步驟如下：

1. 文獻收集與回顧
2. 研究區域資料收集與彙整
3. 建立大甲溪水蝕評估模式-SWAT 模式
4. SWAT 模式率定
5. SWAT 模式驗證
6. 大甲溪流域水蝕評估
7. 揚塵事件日篩選
8. 建立大甲溪流域風蝕評估模式
9. 參數率定與模式修正
10. 風蝕模式驗證
11. 大甲溪流域風蝕評估
12. 綜合討論與比較
13. 提出結論與建議，發表計畫成果





第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫設定工作期限為自 109 年 2 月 6 日起至民國 109 年 12 月 31 日止，預定工作進度與執行進度如表 3-1 所示。

表 3-1 計畫甘特圖

工作項目	工作 比重	年	民國 109 年											
		月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
1. 文獻收集與回顧	15%	計畫進度												
		實際進度												
2. 研究區域資料收集	20%	計畫進度												
		實際進度												
3. 水蝕評估模式	20%	計畫進度												
		實際進度												
4. 風蝕評估模式	20%	計畫進度												
		實際進度												
5. 大甲溪流域水蝕評估	5%	計畫進度												
		實際進度												
6. 大甲溪流域風蝕評估	5%	計畫進度												
		實際進度												
7. 綜合討論與比較	5%	計畫進度												
		實際進度												
8. 提出結論與建議，發表計畫成果	10%	計畫進度												
		實際進度												

一、執行進度

1. 文獻收集與回顧：工作比重佔 15%，計畫進度為民國 109 年 2 月至 4 月，截至 11/12 完成度 100%。

2. 研究區域資料收集與彙整：工作比重佔 20%，計畫進度為民

國 109 年 2 月至 6 月，截至 11/12 完成度 100%。

3. 大甲溪流域水蝕評估模式建立：工作比重佔 20%，計畫進度為民國 109 年 4 月至 9 月，截至 11/12 完成度 100%。

4. 大甲溪流域風蝕評估模式建立：工作比重佔 20%，計畫進度為民國 109 年 4 月至 9 月，截至 11/12 完成度 100%。

5. 大甲溪流域水蝕評估：工作比重佔 5%，計畫進度為民國 109 年 7 月至 11 月，截至 11/12 完成度 100%。

6. 大甲溪流域風蝕評估：工作比重佔 5%，計畫進度為民國 109 年 7 月至 11 月，截至 11/12 完成度 100%。

7. 綜合討論與比較：工作比重佔 5%，計畫進度為民國 109 年 8 月至 11 月，截至 11/12 完成度 100%。

8. 提出結論與建議，發表計畫成果：工作比重佔 10%，計畫進度為民國 109 年 10 月至 12 月，截至 11/12 完成度 70%。

第二節 計畫交付項目

一、計畫項目

1. 文獻收集與回顧

(1) SWAT 模式分析及應用

(2) 土壤分析場 HRLDAS 分析及應用

(3) 揚塵機制、影響因素、觀測實驗、模擬分析等研究

2. 研究區域資料收集

(1) 基礎資料，含氣象、水文、土壤、地形、土地利用覆蓋

(2) 衛星影像資料

(3) 水砂監測資料

(4) 空氣品質監測資料

(5) 土壤分析場 HRLDAS 資料

3. 水蝕評估模式

(1) 大甲溪流域 SWAT 模式建立

(2) SWAT 模式參數率定

(3) SWAT 模式驗證

4. 風蝕評估模式

(1) 揚塵事件日篩選

(2) 初步模式建立

(3) 模式修正

(4) 模式驗證

5. 大甲溪流域水蝕評估

6. 大甲溪流域風蝕評估

7. 綜合討論與比較

8. 提出結論與建議，發表計畫成果

二、計畫成果

(一)文獻收集與回顧

1. SWAT 模式應用研究

土壤和水評估工具(SWAT)是一種基於物理的半分佈式水文模式，適用於小尺度的集水區。該模式可以計算流域的空間異質性，並用於各種問題，包括逕流的產生，沉積物的運輸以及氣候和土地覆蓋變化的影響。除集水區流量評估外，SWAT 亦應用於模擬流域水土流失和水庫淤積，淤積將縮短水力發電廠的使用壽命。使用 SWAT 來估算沉積物的沉積量，作為生態系服務之建議。對於水力發電廠而言，淤積造成的成本很高，但通常不會考慮其他環境和社會成本。破壞自然情況的沉積物和養分流會影響下游生態、捕魚等人類活動，並增加發生洪災的風險。為解決這類問題，潛在的解決方案是投資於保護措施和土地利用變化上，這有助於將沉積物落淤，使地表逕流的推移質和懸浮質降低 (Arias et al., 2011)。通過以 SWAT 模擬和評估土地使用，在 SWAT 中以不同的佈局配置不同的土地利用組成部分(森林、牧場、農業用地等)，用戶和決策者可以更清楚地了解開發與保育上對環境造成的影響，同時減少負面影響。

Li et al. (2017)應用 SWAT 模式對乾旱及半乾旱區，小流域集水區寧夏清水河流域逕流進行多情景模擬預測。以歷史氣候要素變化趨勢和 CA-Markov 模式分別設置未來氣候和土地利用變化狀況，以決定係數 R^2 和 Nash.Sutcliffe 效率係數(NS)來衡量模擬值與實測值之間的流域適用性。在此研究中，SWAT 模式的輸入數據包括 DEM 數據(90m×90m，來源於國際科學數據服務平台)、土壤數據、土地利用數據、氣象數據和水文數據。土壤數據包括土壤空間分佈數據和土壤物理屬性數據。土地利用數據以流域 2000 年和 2010 年兩期 TM 影像(來源於國際科學數據服務平台)。氣象數據為流域內部及周邊 6 個氣象站點 1980—2010 年的日觀測數據(來源於中國氣象數據網)。水文數據為清水河流域中游韓府灣水文站和下游泉眼山水文站 2000—2011 年的月逕流實測數據。

由於 ArcSWAT 模式參數敏感性分析、模式率定和驗證工具的功能相對較弱，Li et al. (2017)選取 SWAT-CUP 對清水河流域 SWAT 模式進行模式率定和驗證。將 2000 年作為暖機期，2001-2005 年為率定期，2006-2011 年為驗證期。遵循流域自上而下的率定原則，先對韓府灣水文站以上區段，後對韓府灣至泉眼山間區段進行參數敏感性分析和率定。以 1980—2010 年 3 個

分區的氣象站的降水和氣溫變化，以 2010 年氣象數據(C0)為基礎，以 10 年為研究尺度，設置 2020 年氣候變化情景如下：

情景 1(C1)-只降水發生改變。北部汛期降水增加 0.87mm，非汛期減少 2.57 mm；中部汛期下降 11.84mm，非汛期降水下降 4.68 mm；南部汛期降水下降 10.05 mm，非汛期減少 2.34 mm。

情景 2(C2)-只氣溫發生改變。北部最高溫上升 0.49°C，最低溫上升 0.59°C；中部最高溫上升 0.38°C，最低溫上升 0.39°C；南部最高溫上升 0.59°C，最低溫上升 0.71°C。

情景 3(C3)-降水和氣溫同時發生改變的組合情景。

Li et al. (2017)研究結果指出，逕流變化主要由降水變化主導，降水減少和氣溫升高，逕流變化影響最為顯著。推薦藉由規劃較自然景觀和氣候變化的逕流下降最為明顯，增加林地和加強生態保護對減緩流域逕流下降具有一定作用。

Licciardello et al. (2017) 進行地中海水庫沉積物評估長期水深測量和 SWAT 估算的比較研究。研究區域為 Ragoletto 人工水庫於 1963 年投入運行，位於西西里島南部的 Acate 河上；集水區擴展範圍約為 117.5 km²，平均坡度為 20.5%。氣候為半乾旱地中海地區，年平均降水量約為 566mm(1960 – 2008 年)。其水庫和水文數據庫的主要特徵大壩高 61m、長 332 m，底部有兩個方

形的出口，海拔 285 m。水庫的沉積物量體以 DEM 隨時間的變化計算，在 1960 年大壩建造之前進行了航空攝影測量、1980 年和 1996 年進行了兩次測深調查(Tamburino et al., 1990)；2005 年 10 月、2007 年 12 月、2009 年 6 月和 2009 年 12 月進行四次詳細的測深調查。調查方法使用帶有迴聲測深儀和兩個 GPS 站的船，以達到 0.1 m 的水平精度和 0.15 至 0.35 m 的垂直誤差。為減少沉積物的沉積，自 1975 年至 1991 年，該水庫從底部出口進行沖洗(16 年內進行 4 次)。

Licciardello et al. (2017) 使用 SWAT 模式進行的地表逕流 1980-2008 年期間計算出的月平均地表逕流係數為 0.17。逕流量(用水庫和水文數據庫主要特徵部分中所述的程序評估)用於率定和驗證模式。篩選後僅識別出三個參數，該模式指示出與年度地表逕流有關的敏感性。根據從最高到最低的模式敏感性，這些參數按以下順序排序：PET(勢能蒸發)，CN(CN 值)和 ESCO(土壤蒸發補償因子)。SWAT 模式應用於 Ragoletto 水庫的集水區，以評估其模擬泥沙沉積量(從 1963 年至 2009 年)以及每月流入水庫的水量(從 1963 年至 2008 年)的能力。在地中海地區，SWAT 模式可以模擬水庫中的水流和泥沙量，長期模擬要優於短期模擬，對極端事件有關的預測有較良好的擬合性。該模式可用於幫助決

策者確定人工水庫集水區中易發生水土流失的區域，從而實施最佳管理方法以減少水土流失並延長水庫壽命(Licciardello et al., 2017)。

在 Li et al.(2018)研究中，改進 SWAT 模式水庫模組，並應用於水庫控制流域的逕流模擬。目前 SWAT 模式在該流域的應用多局限於內部的小流域(Yang and Xu, 2011；Lin et al., 2013)或僅進行月尺度逕流模擬(Lu et al., 2014)，大多研究文獻中不考慮水庫對下游的綜合調蓄作用。故此研究在逕流模擬中考慮水庫的綜合調蓄作用，修改 SWAT 模式的水庫算法，增加以水庫供水發電規則的出流模擬算法，以提高逕流模擬精度。研究區域為位於廣東省東部的東江流域，改進前後的 SWAT 模式進行逕流模擬，分析模式改進的效果。修改後的 SWAT 模式解決水庫模擬出流量在非汛期過低、汛期過大的問題，能更有效模擬逕流和洪峰流量。月逕流模擬中率定期內 R^2 提高了 0.06~0.22，NS 提高了 0.06~0.52，驗證期內 R^2 提高了 0.1~0.19，NS 提高了 0.12~1.22。日逕流模擬中率定期內 R^2 提高了 0.04~0.16，NS 提高了 0.04~0.46，驗證期內 R^2 提高了 0.11~0.15，NS 提高了 0.15~1.21。結果指出，SWAT 透過考慮水庫調度規則，修改模式中水庫模組的計算方法，得以獲得更佳水庫的綜合調蓄作用，其逕流模擬效果較在目

標庫容法計算水庫出流基礎上的模擬效果有較大提升，且不合實際流量的洪峰數量明顯減少。

在 Brighenti et al. (2019) 研究中，比較使用 SWAT 模式模擬水流和懸浮泥沙的兩種率定方法，其目的為評估使用 SWAT 模擬流量和懸浮沉積物時順序率定和同步率定方法之間的差異。將序列不確定度擬合(SUFI-2)與 SWAT 結合使用，遵循三個主要步驟：(i)模式敏感性分析；(ii)使用來自兩種參數對對集水點的數據對溪流模式和懸浮泥沙模式參數進行率定；(iii)使用不確定性分析和不同的目標函數評估順序和同步率定方法的差異。研究區域位於巴西南部的聖卡塔琳娜州，流域海拔範圍在 818 至 982 m 之間；原始森林占總面積的 84%，其特徵是混合的混交林或巴西松林，已轉變為松樹造林，佔總面積的 8%。除重新造林外，還有農業(主要是玉米和大豆)和牧草，佔總面積的 8%。研究區域的土壤類型主要是雛形土；氣候為潮濕，悶熱，幾乎沒有缺水。年平均氣溫在 17°C 之間，平均降水量為 1500mm/year。流量監測期為 2011 年至 2013 年；測站一選擇 322 個數據、測站二選擇了 435 個數據。懸浮泥沙的監測期為 2011-2013 年。測站一選擇 458 個數據，測站二選擇 617 個數據。

Sufi-2 順序不確定度擬合-SUFI-2(Abbaspour et al., 2004)用於

率定和不確定性分析。通過順序和擬合過程確定不確定性。在這種方法中，不確定性考慮了不同的可能來源，包括模式輸入，模式結構，參數以及用於率定和驗證目的的觀測數據。重複 SUFI-2，直到滿足不確定性標準。獲得了不確定性參數，其對應於預測不確定性的 95%信賴區間(95PPU)，計算的 95PPU 在輸出變量的累積分佈的 2.5%至 97.5%之間的變量(Abbaspour et al., 2004)。Brighenti et al. (2019)使用 p 值定義最敏感的參數。 p 值低(≤ 0.05)表示假設相關，如果 p 值為 0.05，則只有 5%的機會出現隨機分佈的結果，而有 95%的概率可以正確地證明變量對輸出產生了影響。初始參數均在模式手冊中總共選擇了 25 個，其中 20 個用於順序率定，17 個同時使用。17 個對流量影響，8 個對懸浮泥沙。

Brighenti et al. (2019)研究探討連續和同時率定方法對使用 SWAT 模擬水流(Q)和懸浮沉積物(SS)的影響。透過統計指標和圖形表示分析兩種方法之間的差異。結果發現分析統計指標和圖形解決方案的組合很重要，以減少通常僅由一種評估方法引入的主觀性。當使用 KGE 作為目標函數時，結果在同時率定中更可接受。對於 NS，最佳值在順序率定中。在懸浮泥沙標定過程中保持了水流模擬的質量。在同時率定中，對於流量(Q)和懸浮沉

積物(SS)，總不確定度範圍較小。在頻率分佈中，最高的直方圖高度總是相對應的，顯示出模擬值和觀察值之間的正相關。此外還發現，多站點率定方法改善了懸浮沉積物 4 個模擬中 3 個的結果，表明在 SS 模式率定中包括多個監測點的重要性。

近年國內應用 SWAT 模式進行之集水區模擬之研究包括《應用 SWAT 模式模擬來社溪集水區土砂與逕流之產出》(吳蕙雯，2016)、《應用非點源污染模式 SWAT 模擬翡翠水庫上游集水區流量及氮素之輸出與移動》(林冠州，2017)、《非點源污染與氣候變遷對集水區水質之影響評估》(施品智，2018)、《整合 TUSLE 於 SWAT 模式於小型山區集水區之輸砂模擬-以陳有蘭溪為例》(盧至美，2018)、《氣候變遷情境下於翡翠水庫集水區之總最大日負荷規劃》(張君葳，2019)、《SWAT 修正模式應用於台灣多流域之輸砂模擬適宜性評估》(廖啟鈞，2020)，和《中港溪集水區之水庫操作模式與非點源污染影響評估》(陳昱愷，2020)等；上述研究主要針對集水區中上游和水庫上游之區域進行模擬，除陳昱愷(2009)之研究外，多未考量水庫操作之影響。

施品智(2018)使用 SWAT 模式與台灣地區水資源氣候變遷模式 TaiWAP 探討非點源污染與氣候變遷對於後龍溪流域水質之影響，結合作物合理化施肥情境、點源污染數據(人口、畜牧、

工廠)，模擬後龍溪流域水質，並採用環保署水質監測數據與本研究現地採樣水質分析數據，進行水文模式之率定與驗證。研究中對多個測站進行月尺度的流量、懸浮固體、硝酸鹽氮、氨氮、總磷水文模式率定與驗證，結果顯示模式對於流量與產砂量能有效反應集水區之現況，對於營養鹽模擬仍有改善空間。氣候變遷情境結果顯示在未來雨季雨量增加，乾季雨量減少，形成嚴重之乾濕季，對營養鹽影響最為嚴重之情境為 RCP4.5，在氣候變遷影響下未來長期(2081~2100 年)流域上游產水量與產砂量將大幅增加。

盧至美(2018)整合台灣通用土壤沖蝕公式(TUSLE)於 SWAT 模式，並考慮台灣山區遇強降雨易發生山崩、土石流等事件，將崩塌面積-體積關係式配合土石流警戒之臨界雨量加入模式 SWAT-TUSLE，考慮強降雨所造成之土砂量。以陳有蘭溪為例，模擬陳有蘭溪之流量、產砂量、輸砂量，並評估 SWAT 模式內建之 4 種輸砂公式對模擬結果所產生的影響。在整合 TUSLE 及崩塌面積-體積關係式後，SWAT-TUSLE 模式可更合理地預測陳有蘭溪流域之產砂量，4 種輸砂公式中，Bagnold equation 及 Yang equation 表現最佳，提出使用 SWAT 模式進行模擬時，考慮台灣土壤侵蝕特性，可更合理地模擬集水區之產砂量、輸砂量，以提

高後續模擬之準確性。

廖啟鈞(2020)以濁水溪、立霧溪與花蓮河流域為例，利用 SWAT-TUSLE 模式模擬各流域輸砂，並探討模式應用於台灣流域之適宜性，應用於模擬未來不同氣候條件對集水區環境之影響。此研究進行流量與輸砂量之敏感度分析、率定及驗證，結果指出三個流域之流量測站之日平均流量模擬皆達滿意水準以上，顯示 SWAT 模式可良好地模擬流量趨勢。日輸砂量之模擬結果表明，SWAT-TUSLE 之模擬結果皆優於 SWAT2016(官方版)，惟獨溪洲大橋測站(濁水溪流域)例外，比較輸砂結果，發現 SWAT2016 會高估峰值輸砂、低估低輸砂量，SWAT-TUSLE 則可較為合理地模擬輸砂趨勢，適用於台灣多流域之輸砂模擬。

中港溪流域上游有大埔水庫設立且附近環境為農業發展，中下游人口聚集區和工廠聚集地，長期以來的污染影響用水。陳昱愷(2009)使用 SWAT 模式，結合農作物合理化施肥和點源污染相關數據(人口、畜牧、工廠)與水庫操作管理，模擬中港溪流域之流量、懸浮固體、營養鹽。研究中加入水庫模式，改善模擬結果。分析點源與非點源污染對研究區之影響，發現雖非點源污染排放量大於點源污染，但點源污染之排放會直接影響水質，對環境影響較大需嚴加控管。非點源污染雖影響並不比點源污染明顯，但

對於整體環境之影響不容小覷，有效減少施肥量也能減少對環境之污染。

2.風蝕影響因子研究

為瞭解砂粒運移特性與含水率之關係，黃隆明和蔡易衡(2015)選定大安溪鄰近出海口處，飛砂及揚塵危害嚴重地點，採集地砂粒樣本後，攜回實驗室進行砂粒物性分析，並於風洞從事砂粒起動風速與含水率之觀測。實驗結果指出，大安溪土壤質地為級配不良之砂土，自然風乾時之含水率約為 0.5%，砂粒大都分佈於 0.25~0.42mm 之間，平均粒徑為 0.313mm，密度為 2.72g/cm^3 ，形狀係數接近球體為 0.9794。砂粒在起動風速時，砂粒之起動含水量，隨粒徑遞減而遞增，當風速提高時，亦有相同之趨勢，原因可能為顆粒越排列越細，顆粒接近開放型，故孔隙度大於封閉型排列之顆粒，使顆粒越細保水性越佳，加上粒徑越小重量越輕，使表層細粒較易被帶動，但整體水分損失較少，因而起動含水率越高。

林昭遠等人(2008)，以濁水溪河口為研究試區，分析裸露地揚塵起因，並利用地理資訊系統，配合影像處理技術，劃定河川揚塵的潛在區位，並進行揚塵潛在發生區位的水位頻率年分析並提出管理策略。林昭遠和林政侑(2012)以濁水溪下游河段為樣區，

收集氣象測站資訊與衛星影像資料，分析河川揚塵發生之因素與關係，建立河川揚塵濃度推估模式。其結果指出河川揚塵事件日之各氣象因子與 PM_{10} 濃度相比，皆有峰值遲滯的現象；所提出之 PM_{10} 濃度推估模式能有效及應用崙北測站揚塵最大 PM_{10} 之濃度變化。

郭石柱(2009)以台東縣關山鎮空氣品質監測站為例，進行揚塵懸浮微粒(PM_{10})與氣象因子相關性分析。此研究使用環保署2006~2007 年台東縣關山鎮空氣品質監測資料，彙整懸浮微粒濃度(PM_{10})年平均值達 $65 \mu g/m^3$ 以上資料，及其對應之風速、風向、氣溫、濕度、降雨量等氣象因子，進行懸浮微粒濃度與氣象因子相關性分析。結果指出，懸浮微粒濃度與風速成正比關係，而與相對濕度成反比關係。懸浮微粒濃度與各氣象因子(單一因子與多重因子)迴歸分析結果顯示，夏季期間，懸浮微粒濃度與風速(E)與濕度有較高的相關性，並提出以相對濕度、風速為影響因子之指數關係式，得以預測懸浮微粒濃度(PM_{10})。

林德貴等人(2012)以大甲溪出海口至后豐大橋間之河段作為揚塵數值分析範圍，採用揚塵模式(Fugitive Dust Model, FDM)進行河床裸露地微粒土砂之擴散行為數值模擬。在研究中，首先彙整現地之地文參數與氣象資料，依室內風洞實驗數據，建立河

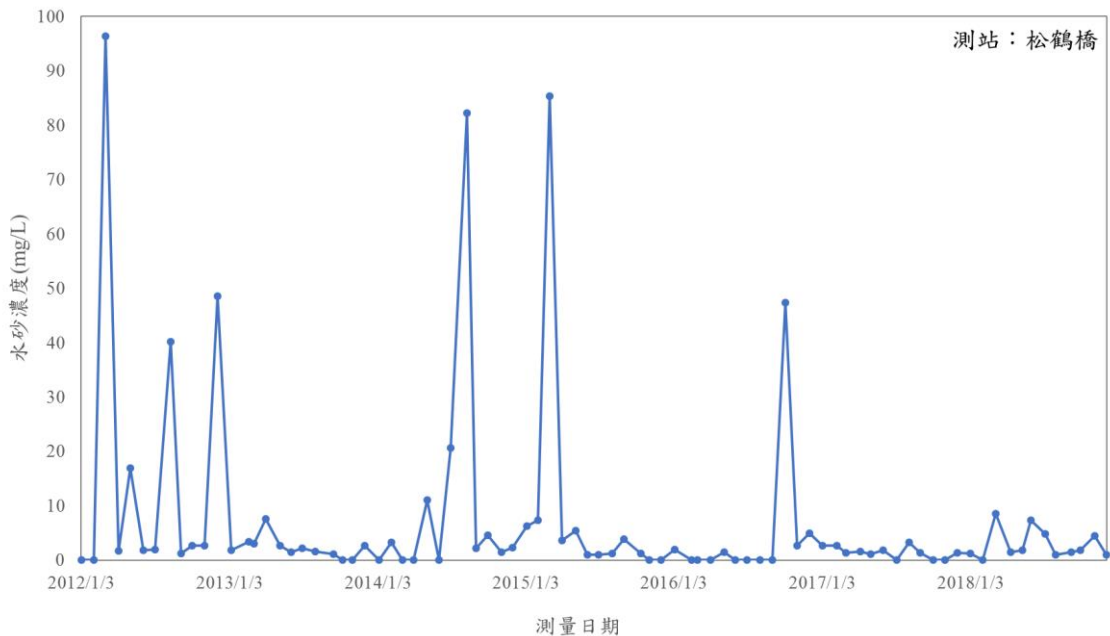
床裸露地懸浮微粒 PM_{10} 與風速之關係，輸入 FDM 中模擬河川揚塵因風特性影響而擴散之趨勢，利用模擬成果探討河川揚塵與風之擴散關係及對於鄰近地區影響程度。結果指出當風向與河段呈現正交情況，則該河段下風處之揚塵濃度會明顯較多。由河段揚塵貢獻量之分析結果顯示，各河段與各敏感區之相對位置，因風特性之影響產生不同之揚塵貢獻量，此結果可提供抑制揚塵工法之配置對策。

由文獻回顧與彙整，初步分析發生揚塵事件之因子可分為大氣、土壤、水文和人為等方面。大氣因子包括溫度、風速/起動風速、風向、日照、降雨事件/連續未降雨日數；土壤因子包括土壤類型/粒徑、地表覆蓋率/裸露地面積、土壤含水量、臨前降雨條件；水文因子包括河川流量/水位、河川灘地面積；人為因子包括土地利用、河川灘地耕種情況、防治措施等。

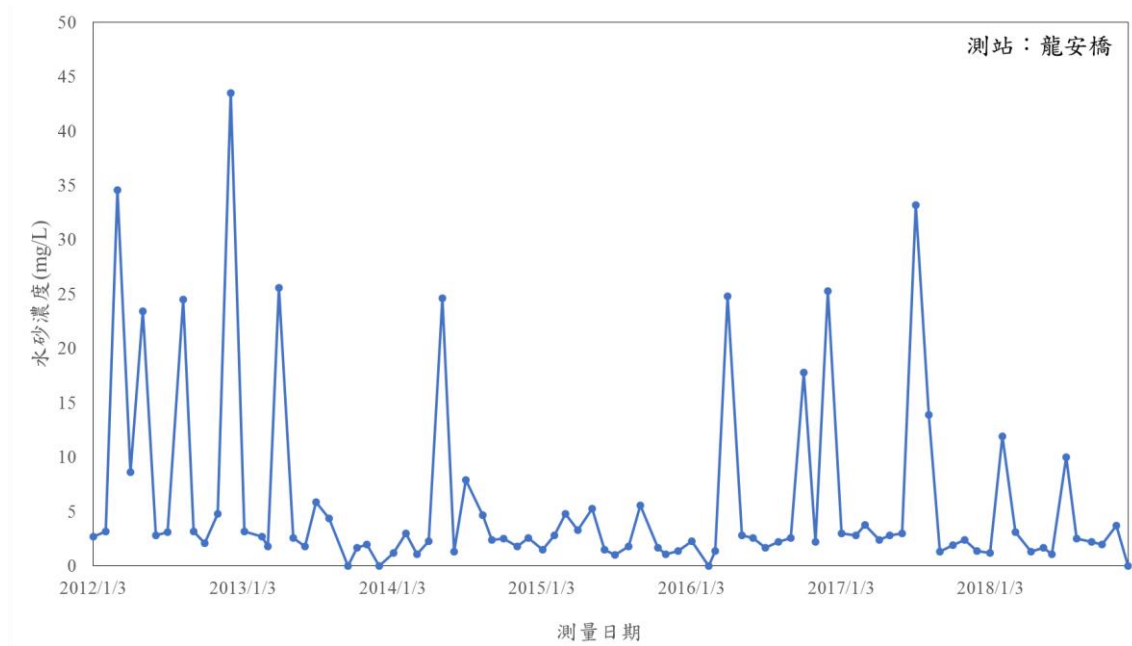
(二)研究資料趨勢圖

本節彙整研究資料，將測站資料以趨勢圖呈現，包含水砂監測資料、降雨量資料、 PM_{10} 濃度資料，和土壤分析場 HRLDAS 資料等。大甲溪流域中環保署水砂測站，自上游到下游分別為松鶴橋、龍安橋、東勢大橋、后豐大橋、大甲溪橋等五處(圖 2-5a)，

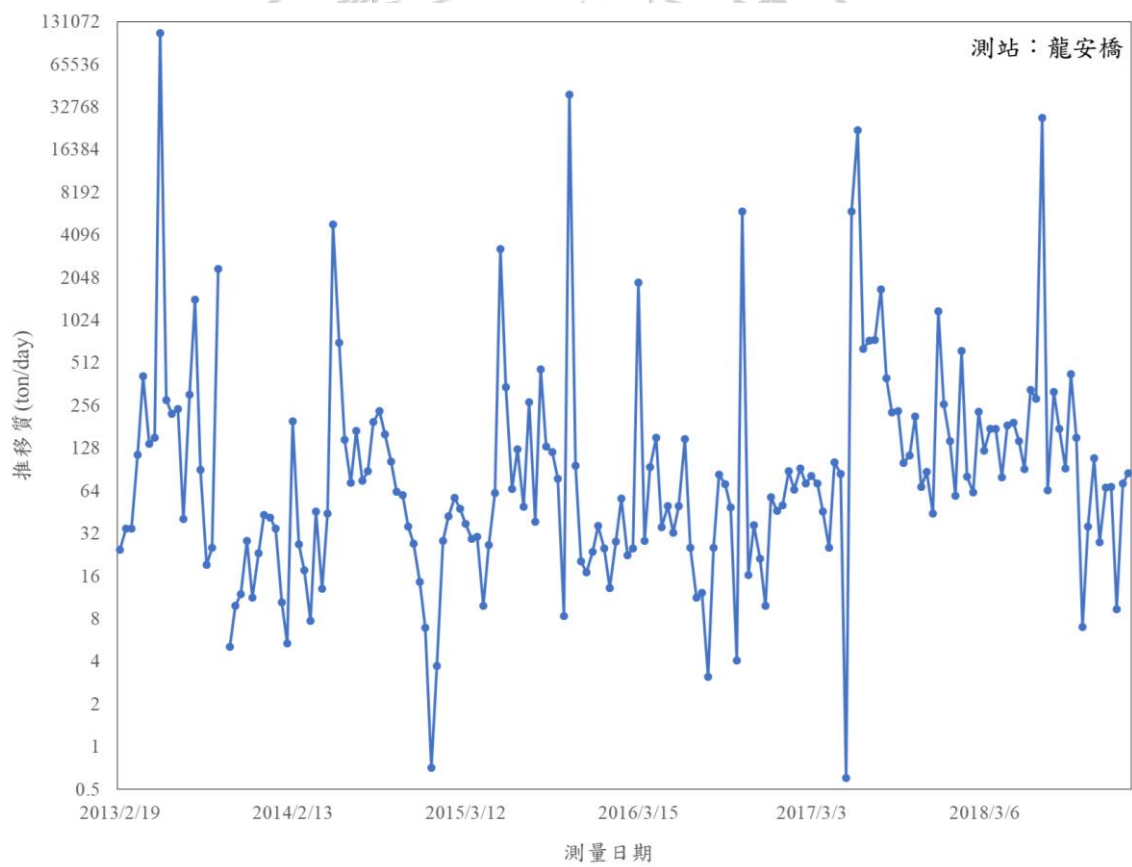
其中除龍安橋測量懸浮質與推移質外，其他測站之水砂監測資料僅測量懸浮質。資料趨勢如圖 3-1 所示：就空間分布而言，大甲溪流域河川含砂濃度極端值自上游到下游測站增加，差異顯著。本計畫考量 SWAT 模式中計算坡面產砂進入流道之計算方式與資料穩定性，以龍安橋測站之推移質作為水蝕模式中 SWAT 模式的率定與驗證資料。



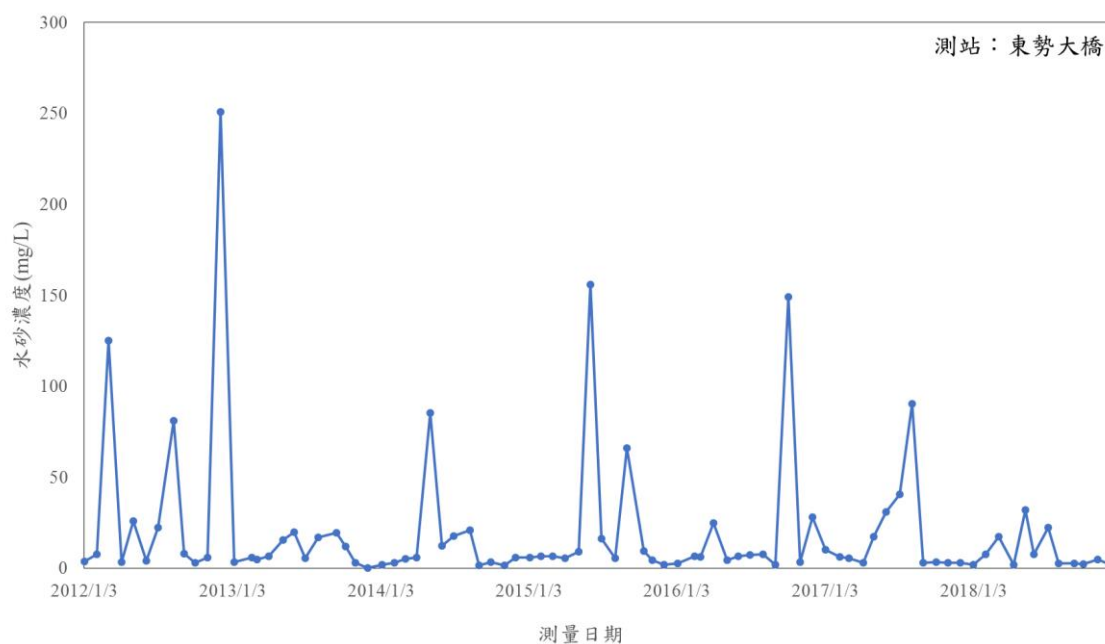
(a)



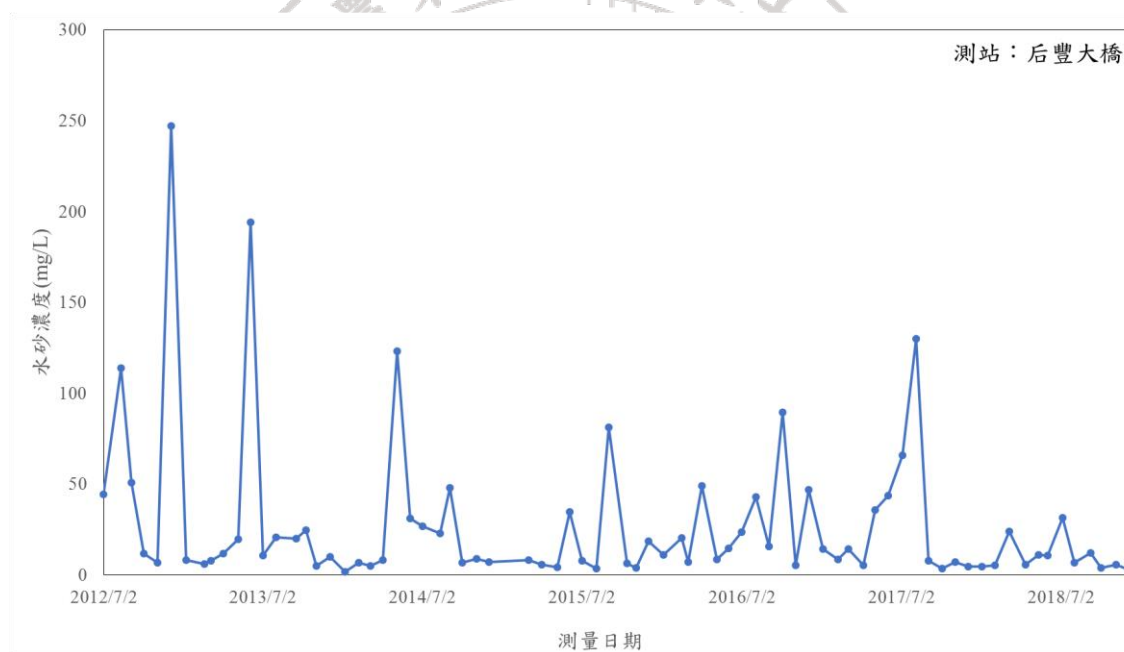
(b)



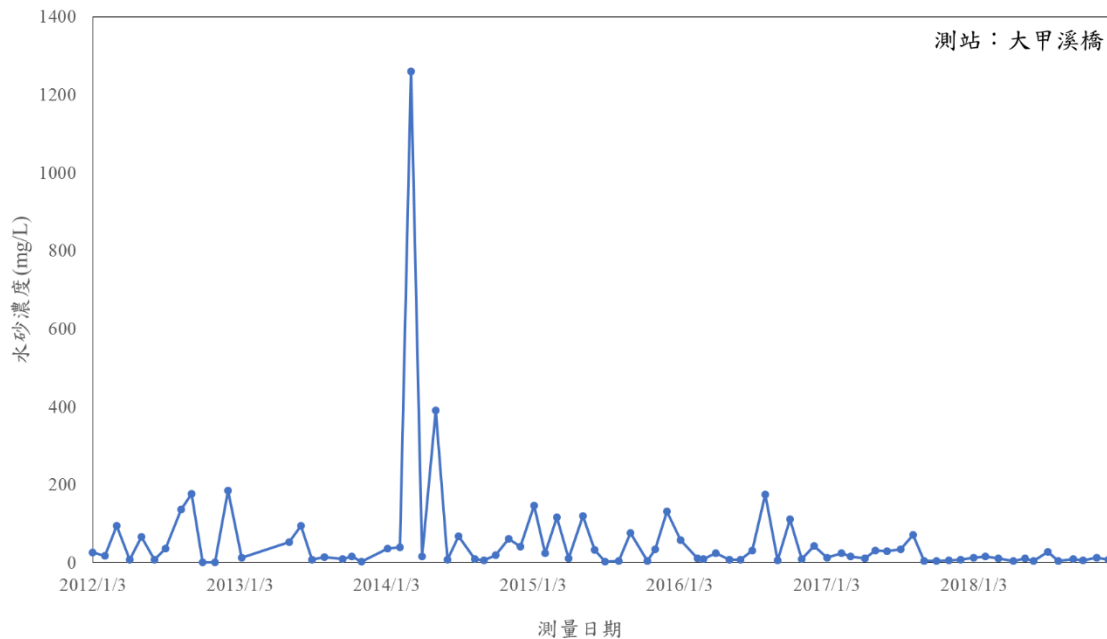
(c)



(d)



(e)

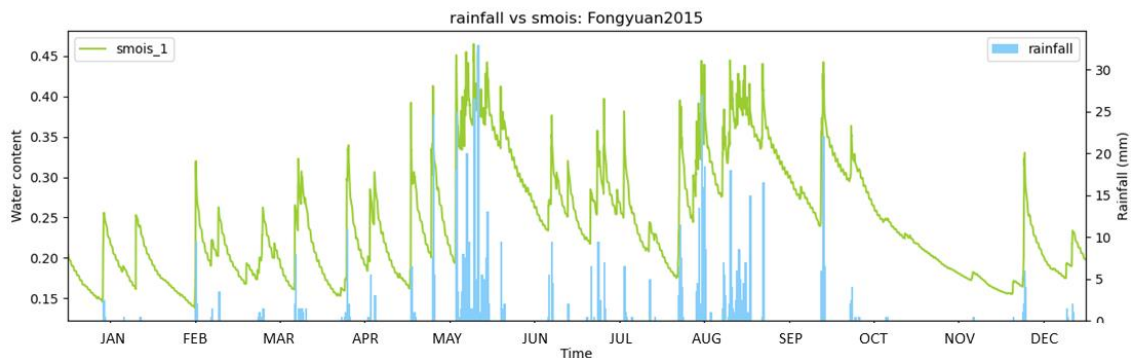


(f)

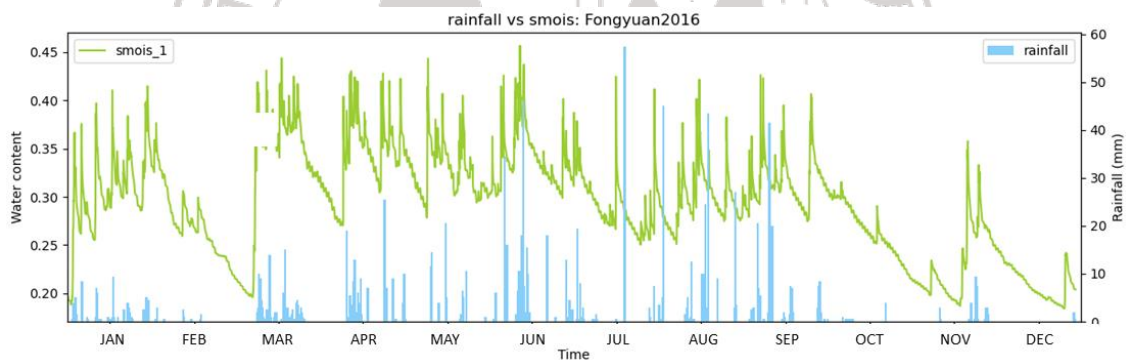
圖 3-1 本計畫採用輸砂測站(a)松鶴橋、(b)(c)龍安橋、(d)東勢大橋、(e)后豐大橋，和(f)大甲溪橋之水砂資料趨勢圖

考量表層土壤濕度為影響土砂揚起之主要因子之一，在風蝕模式中，採第一層土壤之濕度資料納入評估。為驗證 HRLDAS 分析的土壤濕度能否反應雨量觀測值變化，本計畫使用歷年(2015-2019)的逐時土壤濕度與雨量觀測資料繪製趨勢圖如圖 3-2 至圖 3-4 所示，觀察兩者在時間上的趨勢變化發現表層土壤濕度之峰值發生時間與降雨量大致吻合，但呈現些微時間差，且土壤濕度出現峰值後隨未降雨時數增加逐漸下降，直到下一次降雨發生。以卡方獨立性檢定(The Chi-Squared Test of Independence)分析各測站表層土壤濕度與降雨量逐時資料之關聯性，探討此兩

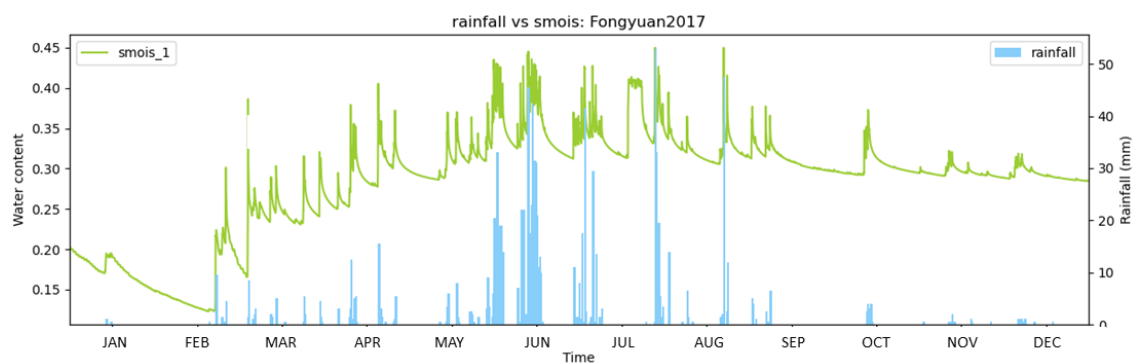
個變項(表層土壤濕度、降雨量)間是否具有相依關係。卡方檢定結果指出，於豐原、后里和大甲等地區之表層土壤濕度變化確實分別與該地區氣象測站之降雨量監測資料相關，且皆達顯著相關(Pearson 卡方值 < 0.01)。



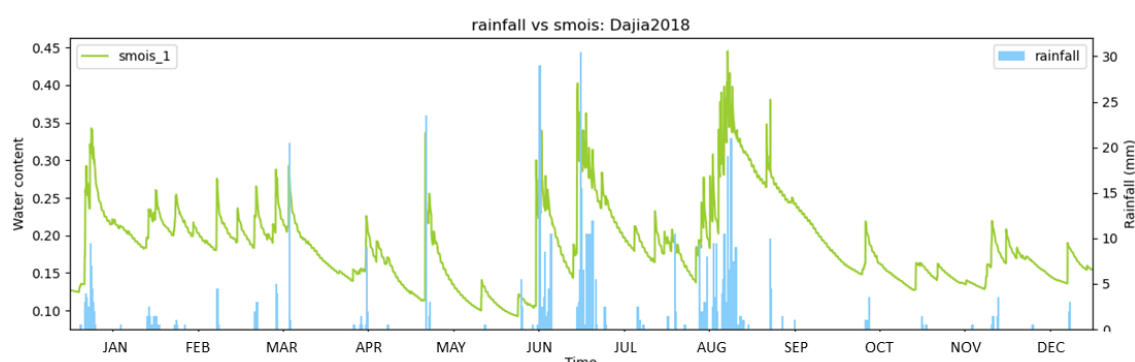
(a)



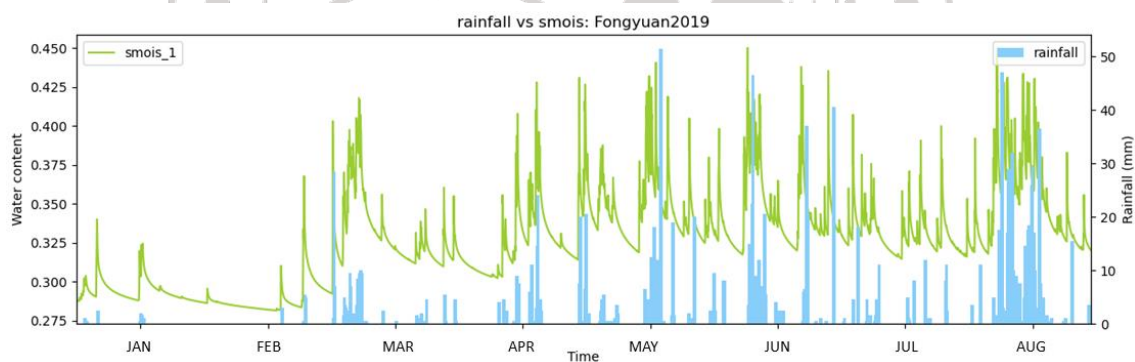
(b)



(c)

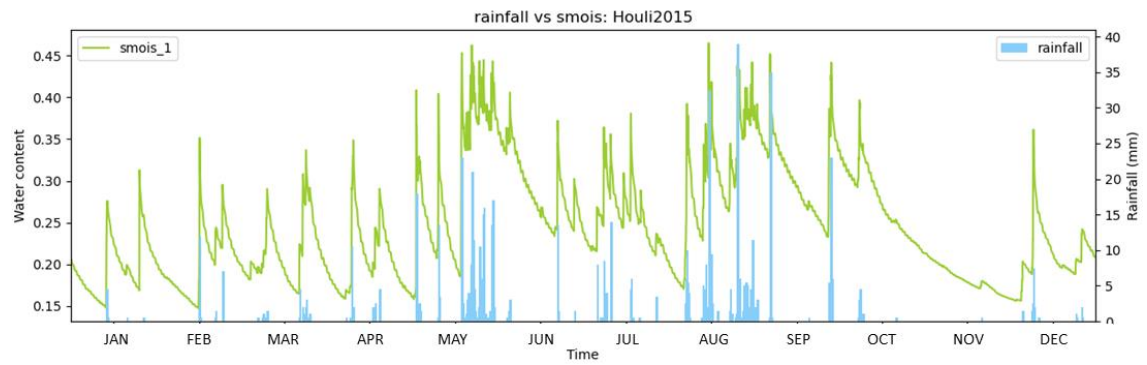


(d)

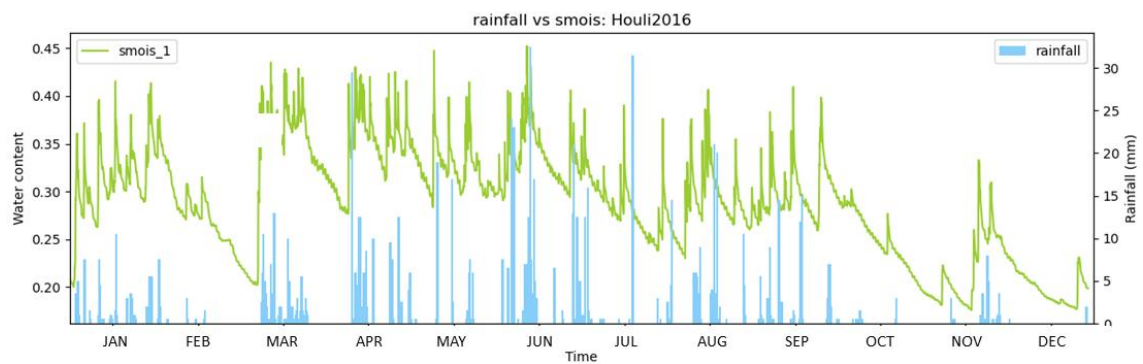


(e)

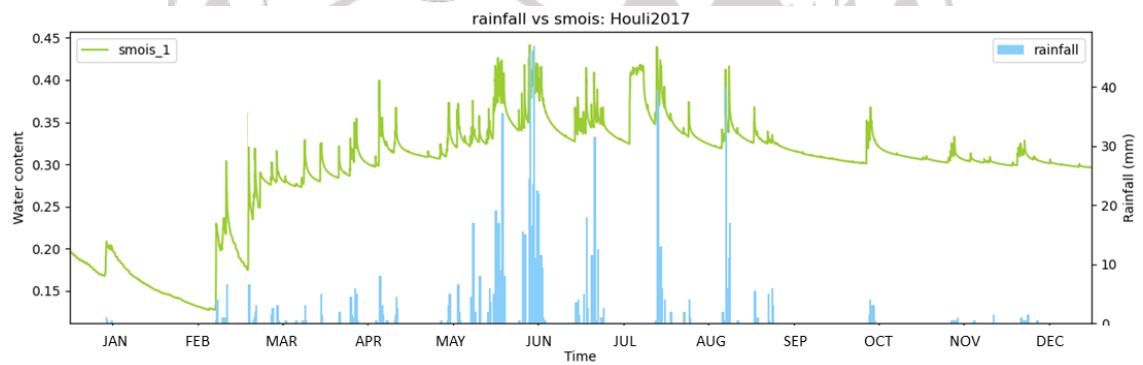
圖 3- 2 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與雨量觀測趨勢圖：豐原
(Fongyuan)測站(a)2015 年、(b)2016 年、(c)2017 年、(d)2018 年、
(e)2019 年資料



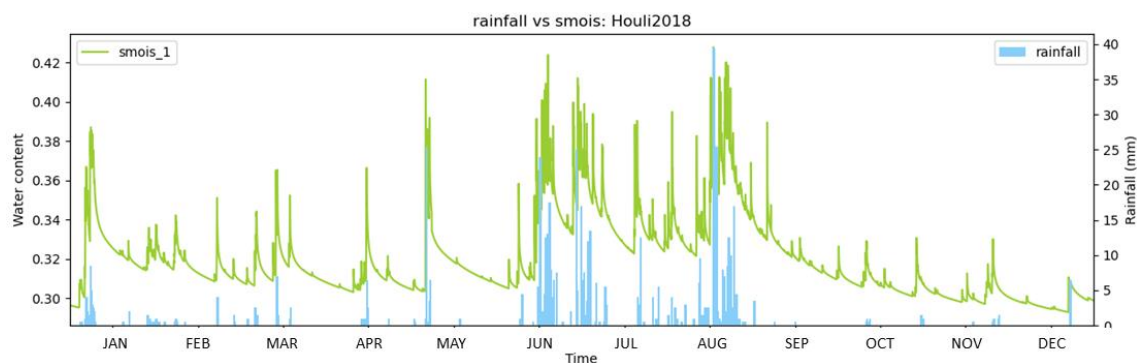
(a)



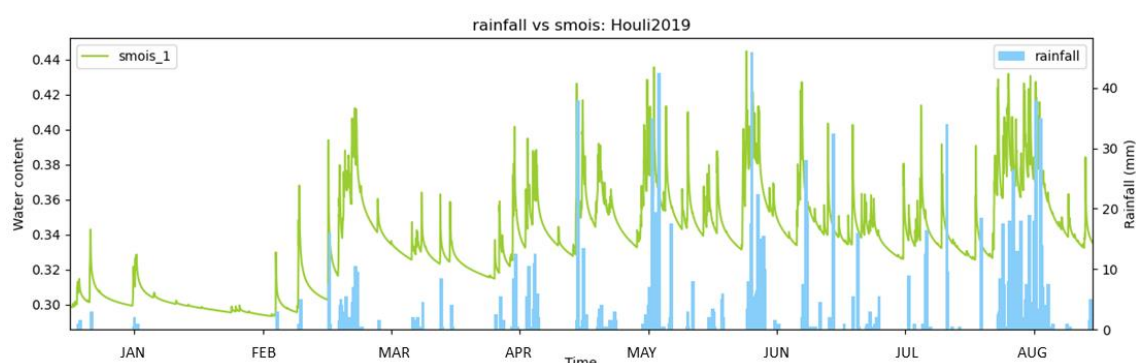
(b)



(c)

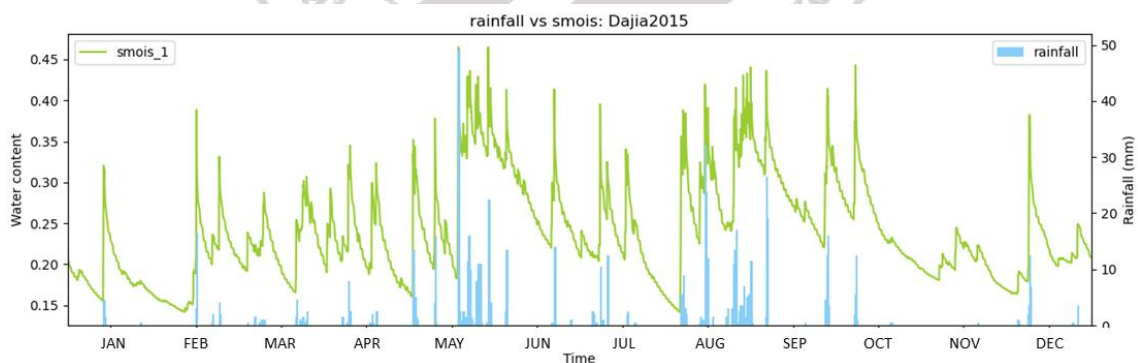


(d)

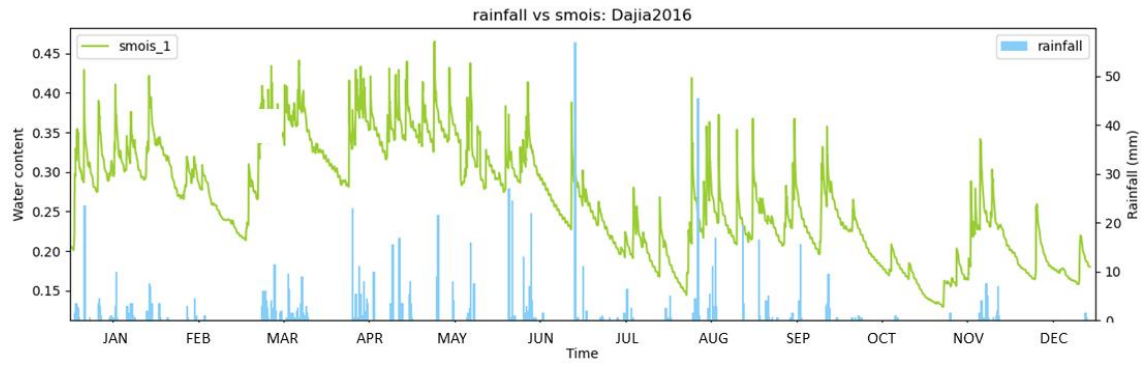


(e)

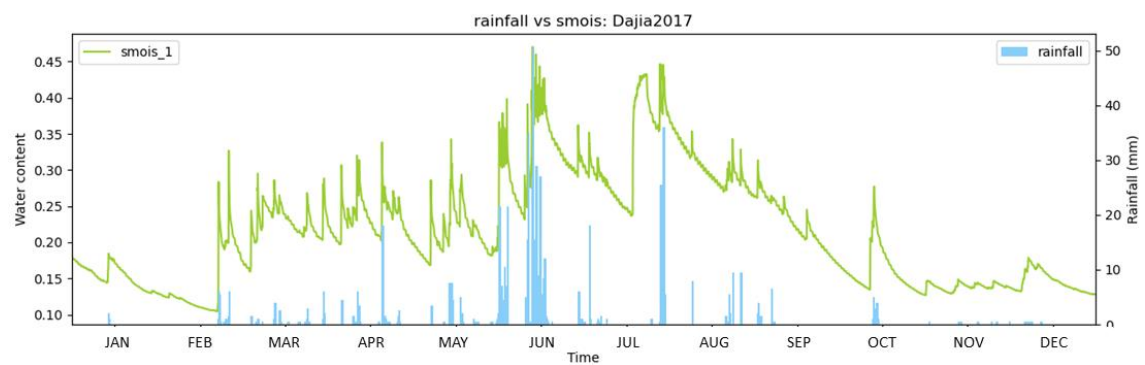
圖 3- 3 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與雨量觀測趨勢圖：后里
(Houli)測站(a)2015 年、(b)2016 年、(c)2017 年、(d)2018 年、(e)2019
年資料



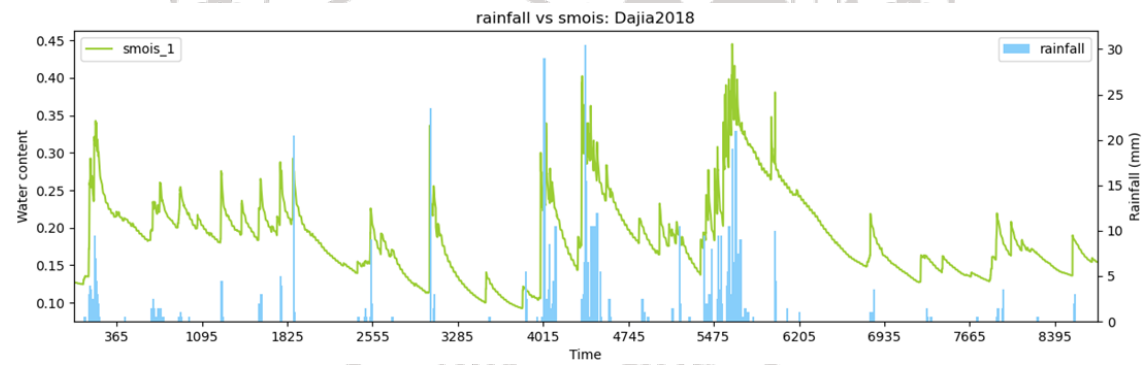
(a)



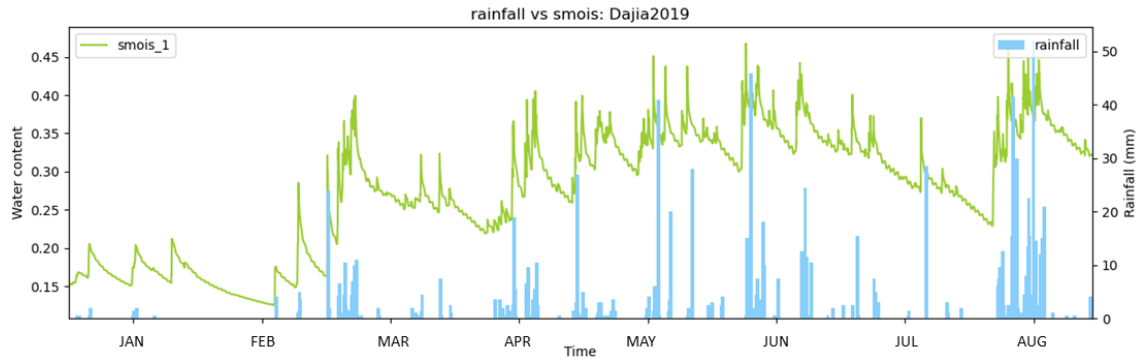
(b)



(c)



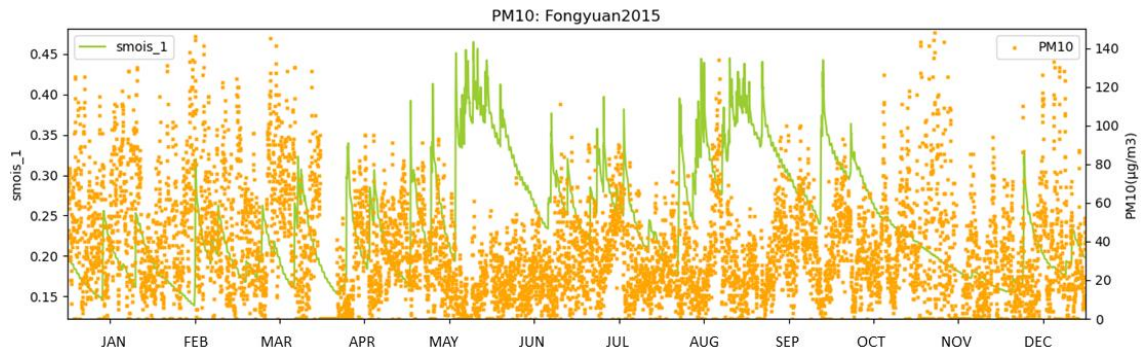
(d)



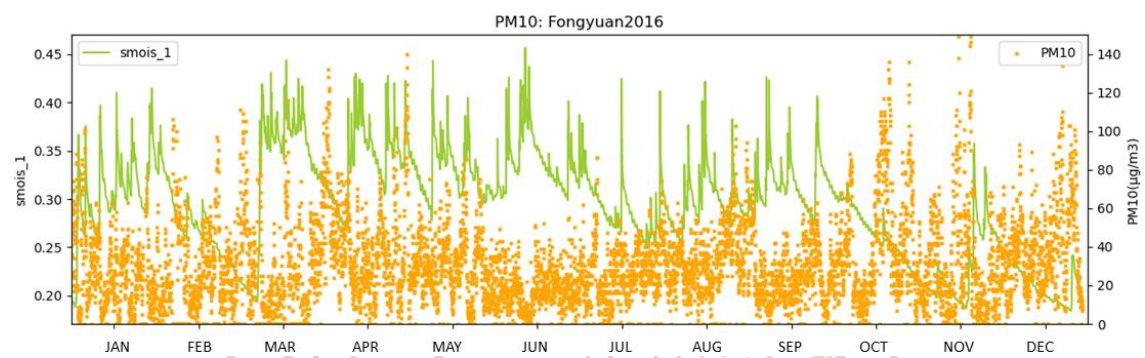
(e)

圖 3- 4 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與雨量觀測趨勢圖：大甲
(Dajia)測站(a)2015 年、(b)2016 年、(c)2017 年、(d)2018 年、(e)2019
年資料

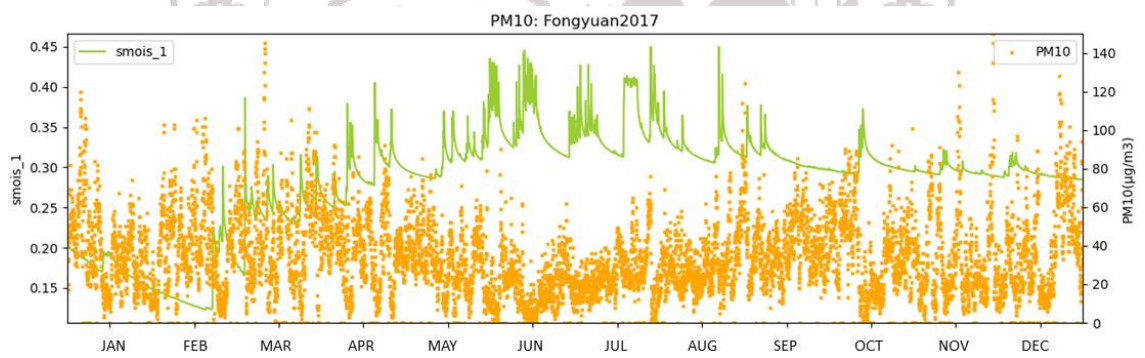
為探討 PM_{10} 濃度與表層土壤濕度相關性，繪製趨勢圖如圖 3- 5 至圖 3- 7 所示，觀察 PM_{10} 濃度與表層土壤濕度變化趨勢發現兩者在時間上的變化大致呈現相反趨勢，即土壤濕度高時 PM_{10} 濃度較低，反之亦然。以卡方獨立性檢定分析各測站 PM_{10} 濃度與表層土壤濕度逐時資料之關聯性，探討此兩個變項(PM_{10} 濃度、表層土壤濕度)間是否具有相依關係。卡方檢定結果指出，於豐原、后里和大甲等地區之 PM_{10} 濃度變化確實分別與該地區表層土壤濕度變化相關，且皆達顯著相關(Pearson 卡方值 <0.01)。



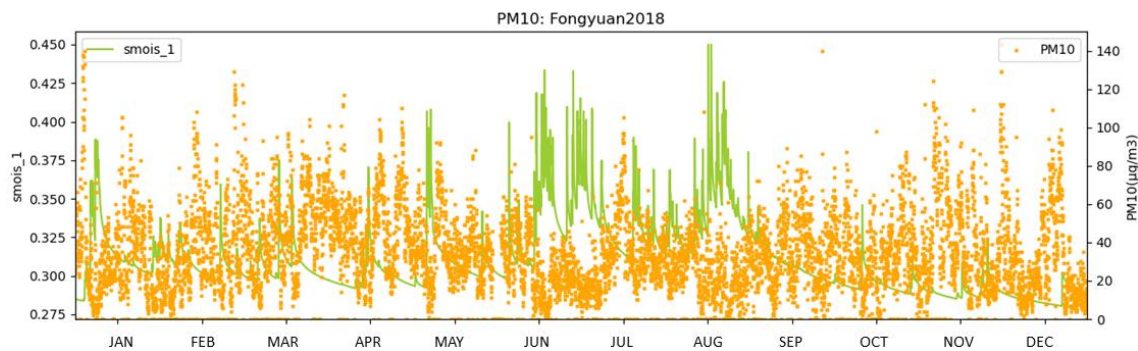
(a)



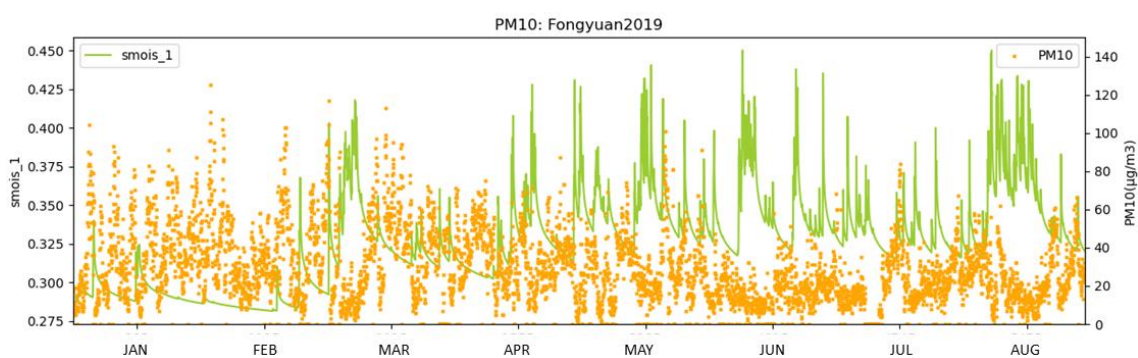
(b)



(c)



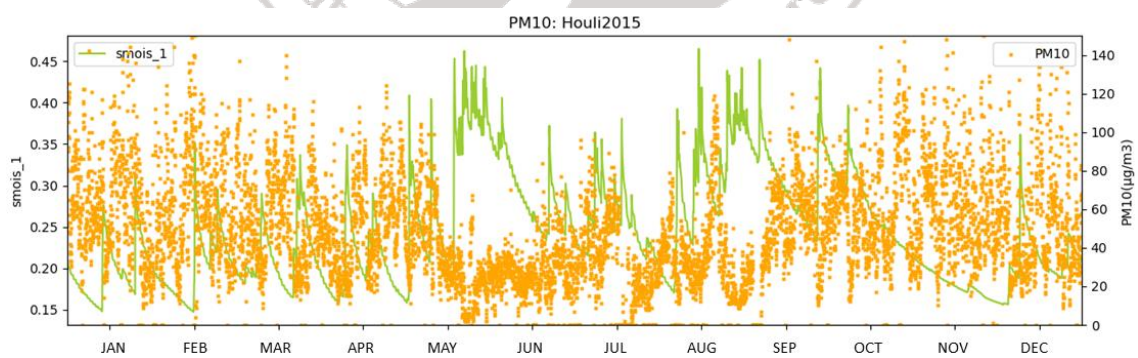
(d)



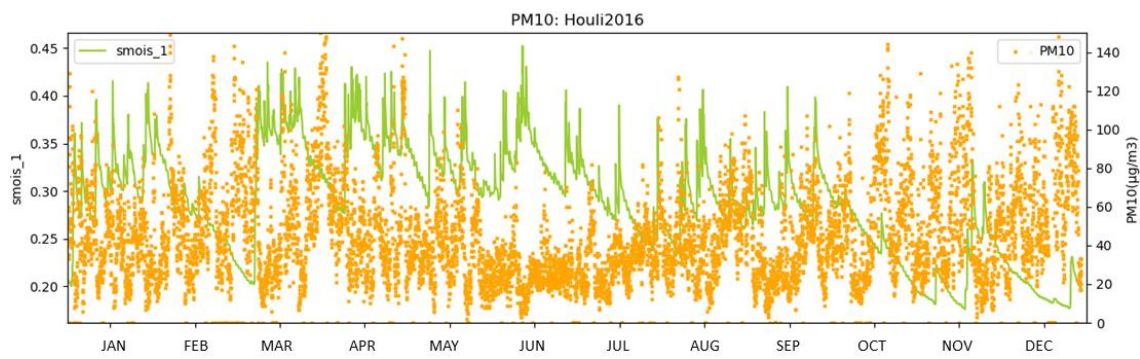
(e)

圖 3- 5 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與 PM₁₀ 濃度變化趨勢

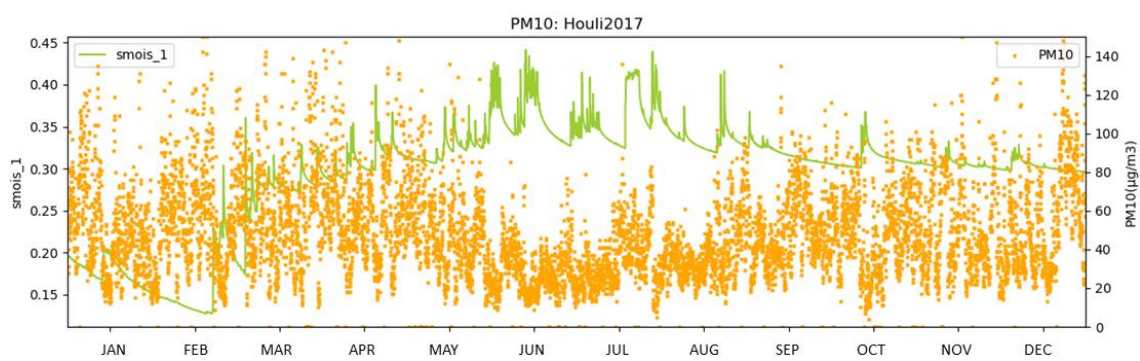
圖：豐原(Fongyuan)測站(a)2015 年、(b)2016 年、(c)2017 年、
(d)2018 年、(e)2019 年資料



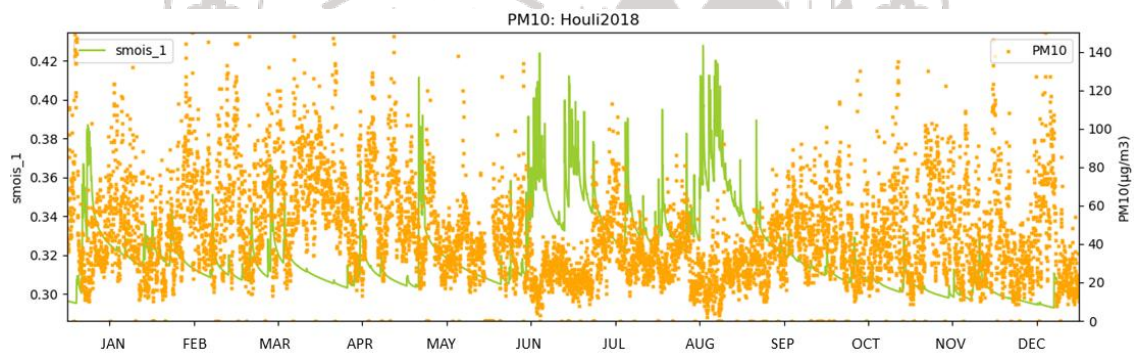
(a)



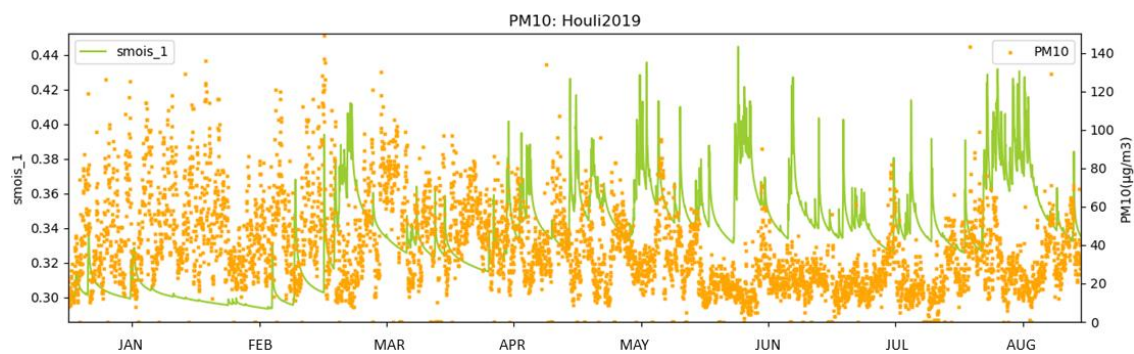
(b)



(c)



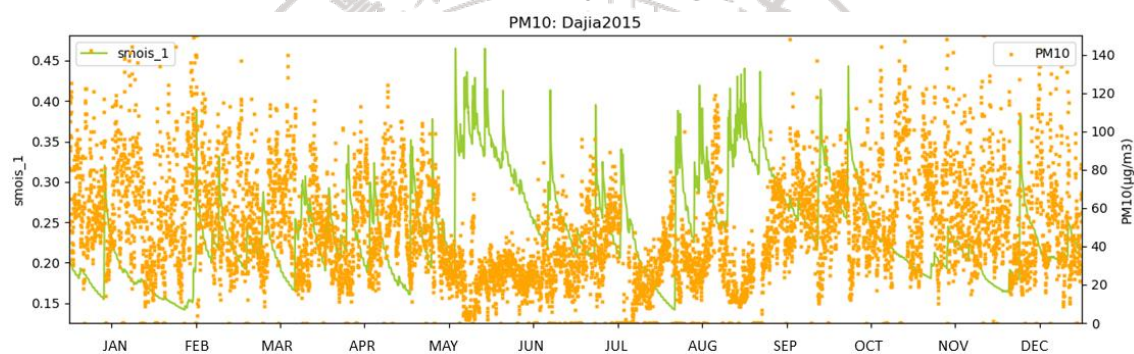
(d)



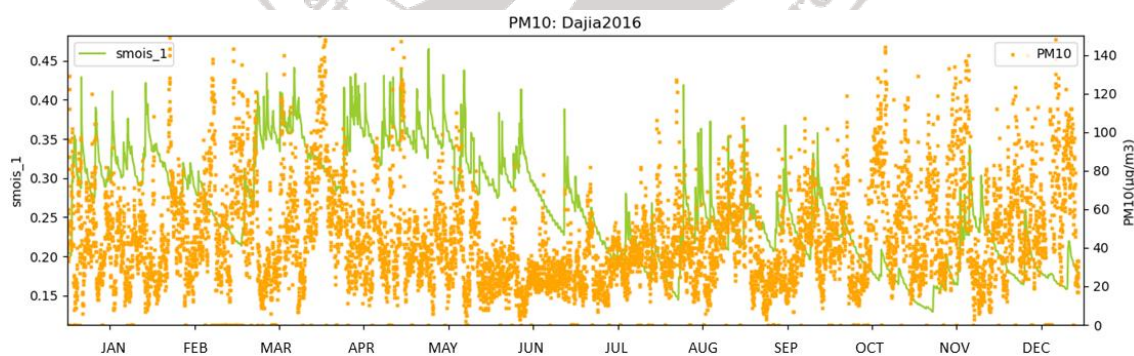
(e)

圖 3- 6 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與 PM₁₀ 濃度變化趨勢

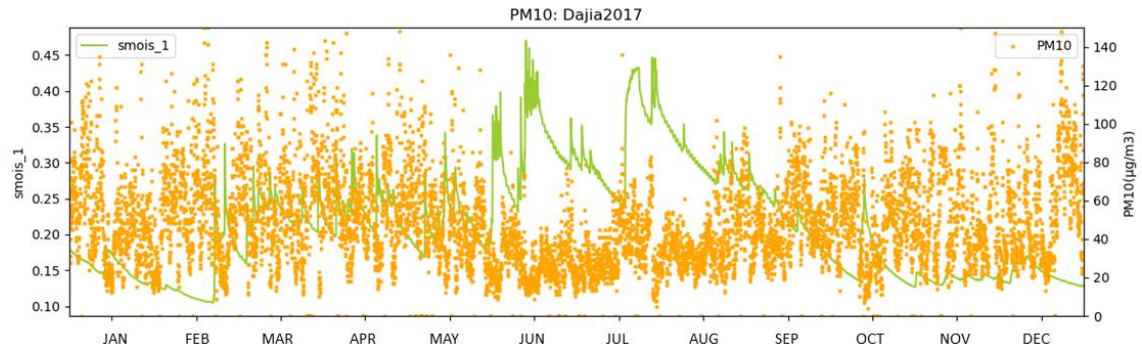
圖：后里(Houli)測站(a)2015 年、(b)2016 年、(c)2017 年、(d)2018 年、(e)2019 年資料



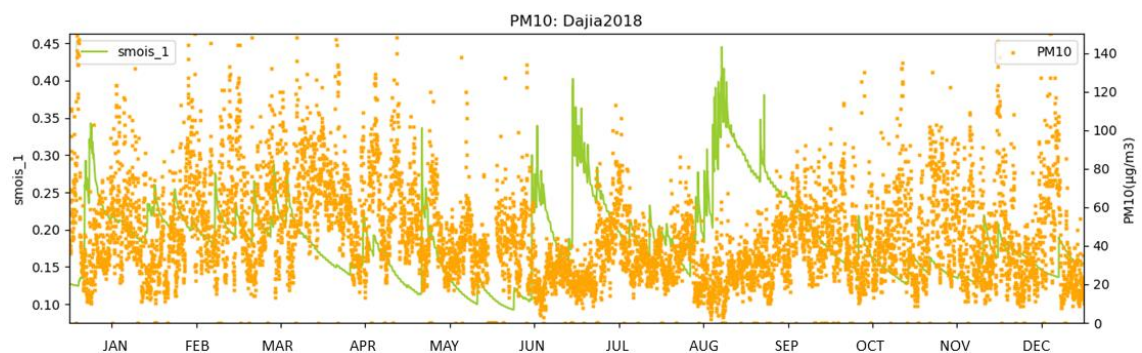
(a)



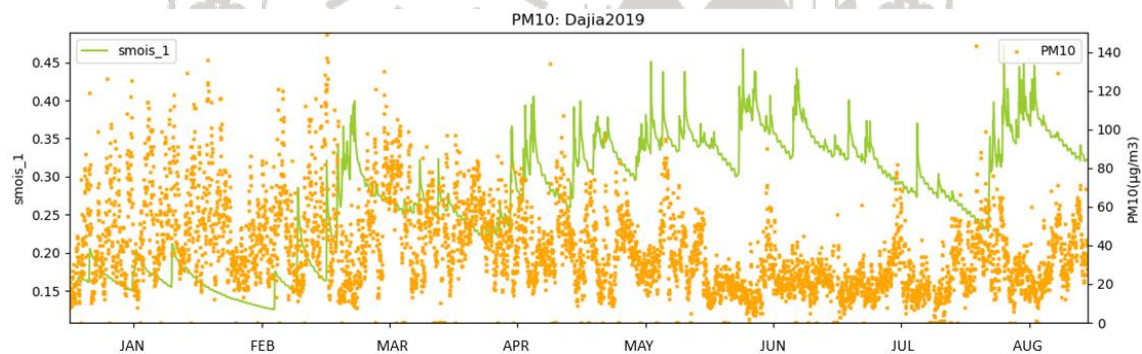
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 3- 7 歷年(2015/1 – 2019/8)逐時土壤濕度與 PM₁₀ 濃度變化趨勢

圖：大甲(Dajia)測站(a)2015 年、(b)2016 年、(c)2017 年、(d)2018 年、(e)2019 年資料

(三)水文模式 SWAT 建立與水文量模擬

本計畫採用四個水文測站，由上游至下游為位於德基水庫上游的七家灣、合歡站，和位於德基水庫下游的馬鞍後池、龍安橋站，自 2013 到 2018 年的日流量資料，並使用 SWAT 的水庫模組，加入德基水庫和石岡壩之流量操作資料(表 3- 2)，進行敏感參數分析、參數率定，和模式驗證；分別說明如下：

1. 敏感參數分析：模式輸入資料與建立完成後，進行全時段(2013 至 2018 年)四個測站之日流量模擬，作為基準點。選定使用手冊與文獻中建議之流量敏感參數，以分析模組 SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs)進行參數敏感度分析，最終選取敏感度 t -test 之 p 值 <0.05 者為敏感參數共 13 個(表 3- 3)。
2. 參數率定：找出敏感參數後，先檢核四個測站之流量與降雨量資料趨勢關係，即七家灣、合歡(流量)-梨山(雨量)，馬鞍後池、龍安橋(流量)-白冷(雨量)，由流量-雨量資料散步圖與初步線性迴歸分析指出七家灣-梨山、龍安橋-白冷之關係較顯著，水文量較能反應出降雨量之變化，故參數率定以七家灣、龍安橋等兩測站為主，採自 2013 至 2015 年的日流量資料進行，率定參數值如表 3- 3，率定期間日流量模擬結果如圖 3-

8 所示。

3. 模式驗證：參數率定完成後，進行大甲溪流域之流量模擬，

使用四個測站自 2016 至 2018 年的日流量資料進行模式驗證，

其結果如圖 3-9 所示。

表 3-2 水庫操作輸入參數

輸入參數	石岡壩	德基	單位	備註
最大蓄水面積	64.5	592	ha	
緊急溢洪道最大放流量	15	15	10 ⁴ m ³	水庫輸入限制最小值
主溢洪道最大放流量	10	10	10 ⁴ m ³	水庫輸入限制最小值
初始水庫流量	10	10	10 ⁴ m ³	水庫輸入限制最小值
初始懸浮質濃度	2.4	3.2	mg/l	
中值粒徑 D ₅₀	52.5	10	mm	
蒸發係數	0.7	0.7	--	
平均放流量	66.1	31.85	cms	
每月最大放流	5520	6400	cms	
每月最小放流	6.38	4.38	cms	生態基流量
每月消耗	8.1	8.1	cms	

表 3-3 大甲溪流域日流量敏感參數表

參數名稱	定義 (單位)	率定值 ^a	
		min	max
r__ESCO.hru	土壤蒸發散係數 (--)	-0.3	0.3
r__SURLAG.hru	逕流延遲係數 (--)	-0.2	0.2
r__OV_N.hru	坡面曼寧 n 值 (--)	-0.2	0.2
r__SLSUBBSN.hru	子集水區坡長 (m)	-0.1	0.1
v__CANMX.hru	冠層截流因子/天篷覆蓋因子 (--)	1	60
r__SOL_AWC().sol	土壤可含水量 (mmH ₂ O/mmSoil)	-0.2	0.2
v__GWQMN.gw	地下水淺水層發生回流的閾值深度(m)	0	5000
r__ALPHA_BF.gw	基流退水因子 (--)	-0.2	0.2
v__CH_K1.sub	支流水力傳導度 (mm/hr)	0	300
r__CH_N1.sub	支流曼寧 n 值 (--)	-0.2	0.2
v__CH_K2.rte	主流水力傳導度 (mm/hr)	0	500
r__EPCO.bsn	作物蒸發散因子 (--)	-0.2	0.2
r__CN2.mgt	SCS (--)	-0.3	0.3

^a r_XXX 調整方式為初始值增減比例；v_XXX 調整方式為初始值迭代數值。

本計畫使用 Nash 效率係數(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)作為評估模式模擬結果之主要統計量；根據 Moriasi et al.(2007), 偏差百分比(percent bias, $PBIAS$)和均方根誤差(RMSE)對測量值樣本標準差 ($STDEV_{obs}$) 的比值 (RMSE-observations standard deviation ratio, RSR)亦可作為判斷模式模擬效能之統計量；三者之定義計算公式如下所示：

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]$$

其中 Y_i^{obs} = 第 i 點測量值； Y_i^{sim} = 第 i 點模擬值； Y^{mean} = 測量值之平均； n = 測量值總數； NSE 範圍為 $-\infty$ 到 1，當 $NSE = 1$ 即為最佳之模擬效能。

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \times 100 \right]$$

$PBIAS$ 之最佳值為 0.0，其絕對值愈小表示模式模擬結果愈正確； $PBIAS$ 為正表示模式有低估之偏差， $PBIAS$ 為負則表模式有高估之偏差。

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]}$$

RSR 之最佳值為 0.0，其值愈小表示 $RMSE$ 愈小，則模式表現較佳。

模式模擬結果之 $NSE > 0.50$ 且 $RSR \leq 0.70$ ，且流量模擬

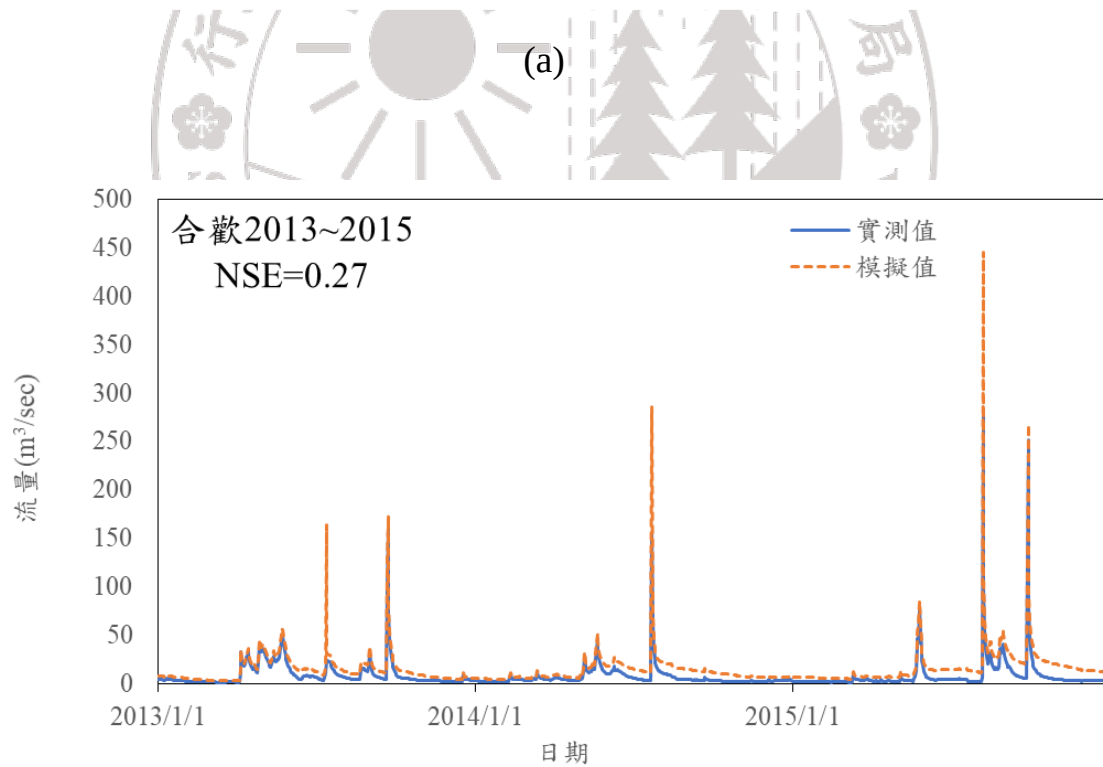
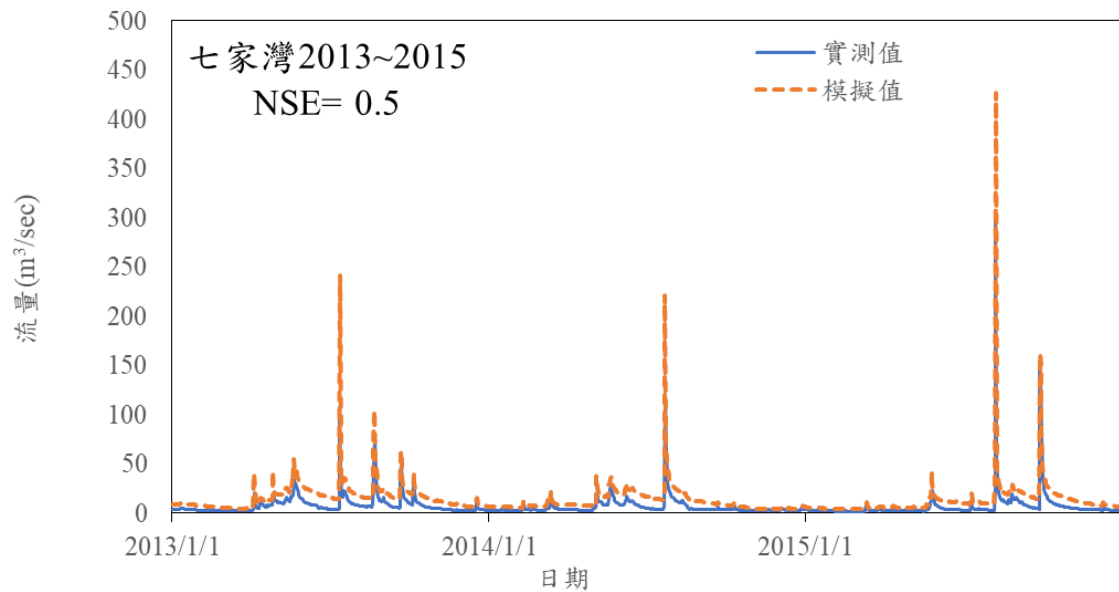
PBIAS 在 $\pm 25\%$ 內、含砂濃度模擬 PBIAS 在 $\pm 55\%$ 內為模擬結果達滿意之標準(Moriasi et al. 2007)。

由率定結果(圖 3- 8)，位於德基水庫上游之七家灣和合歡測站中日流量模擬結果之 NES 值分別為 0.50 和 0.27，模擬效能尚屬滿意。其中合歡之流量資料與鄰近雨量測站(梨山)之降雨量資料無明顯相關變化趨勢，為其模擬結果差於七家灣站之原因之一。位於水庫下游之馬鞍後池及龍安橋測站中日流量模擬結果之 NES 值分別為-0.38 和 0.23，模式表現較不佳，尤以位於德基水庫出流下游之馬鞍後池測站，其日流量變化趨勢相似，但模擬值均高估實測值。除水庫放流影響外，馬鞍後池之流量資料與鄰近雨量測站(白冷)之降雨量資料無明顯相關變化趨勢，為結果差異明顯原因之一。

由驗證結果(圖 3- 9)，位於德基水庫上游之七家灣和合歡測站中日流量模擬結果之 NES 值分別為 0.47 和-0.07，位於水庫下游之馬鞍後池及龍安橋測站中日流量模擬結果之 NES 值分別為-0.98 和-0.02，模擬效能較率定段(2013-2015 年)低，但模擬值流量趨勢變化與峰值皆大至與實測值相符，尚屬可接受之範圍。

綜觀而論，以 SWAT 模式中水庫模組將德基水庫與石岡壩流量操作資料加入大甲溪流域 SWAT 模式中，對原位於德基水

庫上游之測站(七家灣、合歡)之模擬結果影響不顯著，對於德基水庫上游之測站(馬鞍後池及龍安橋)之模擬結果雖有改善但仍未達滿意標準，為後續研究建議中模式修正主要方向。



(b)

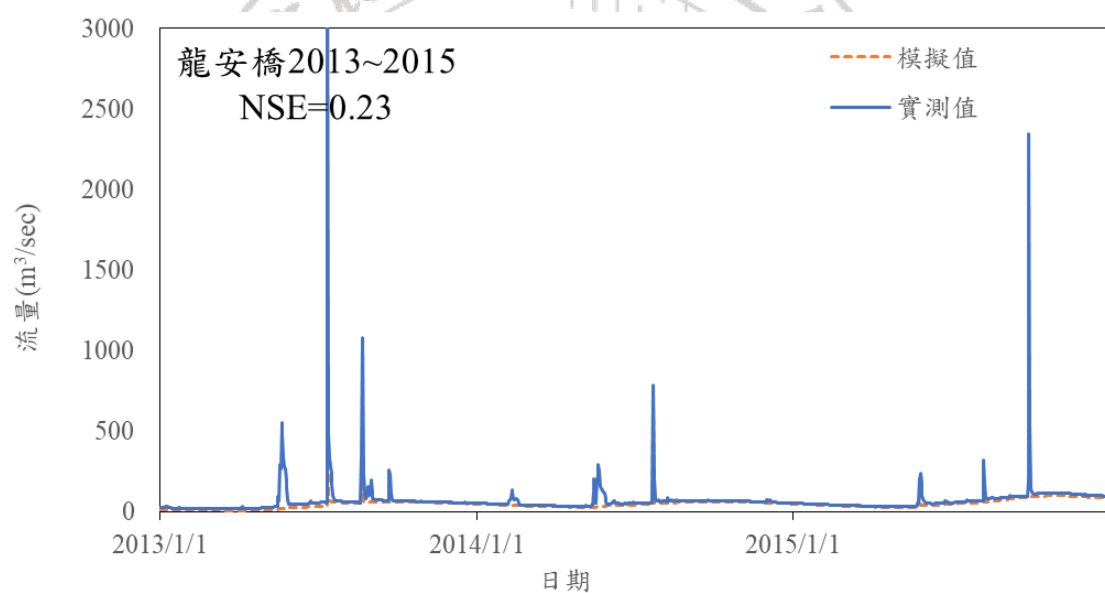
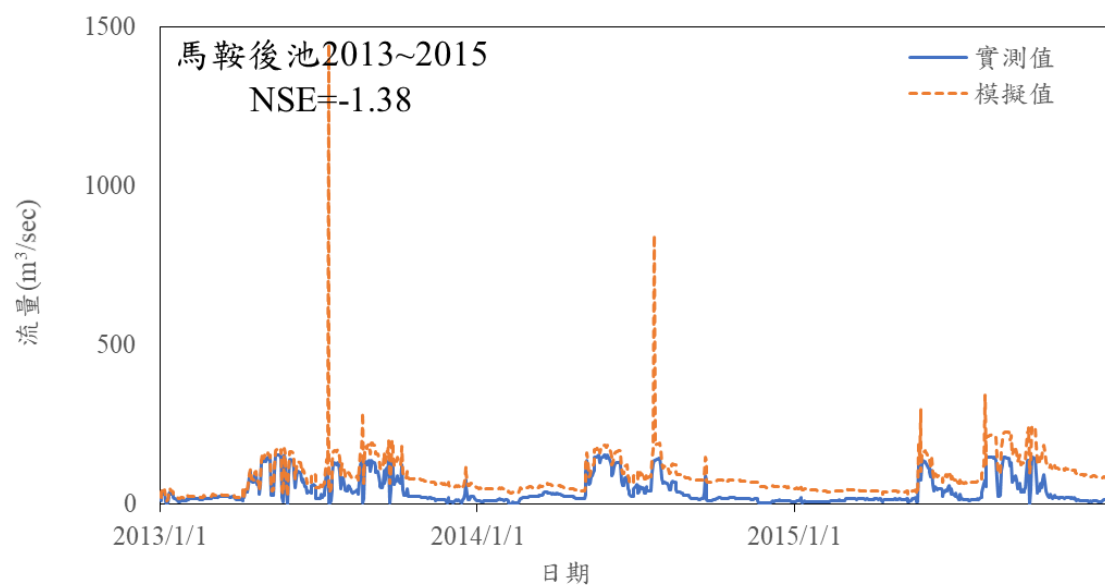
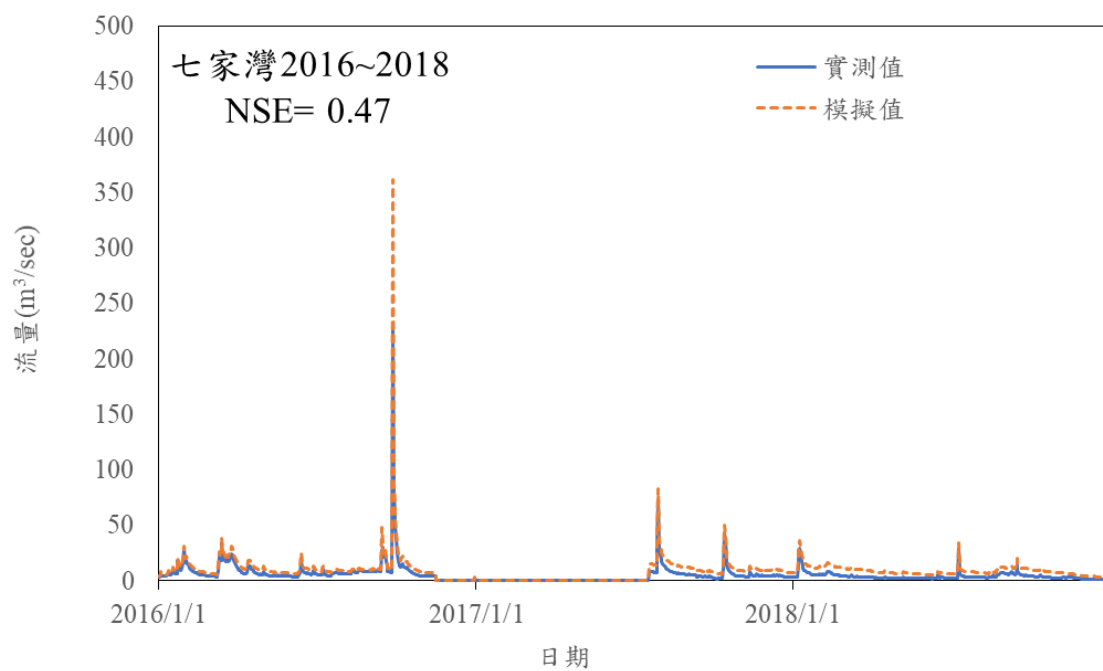
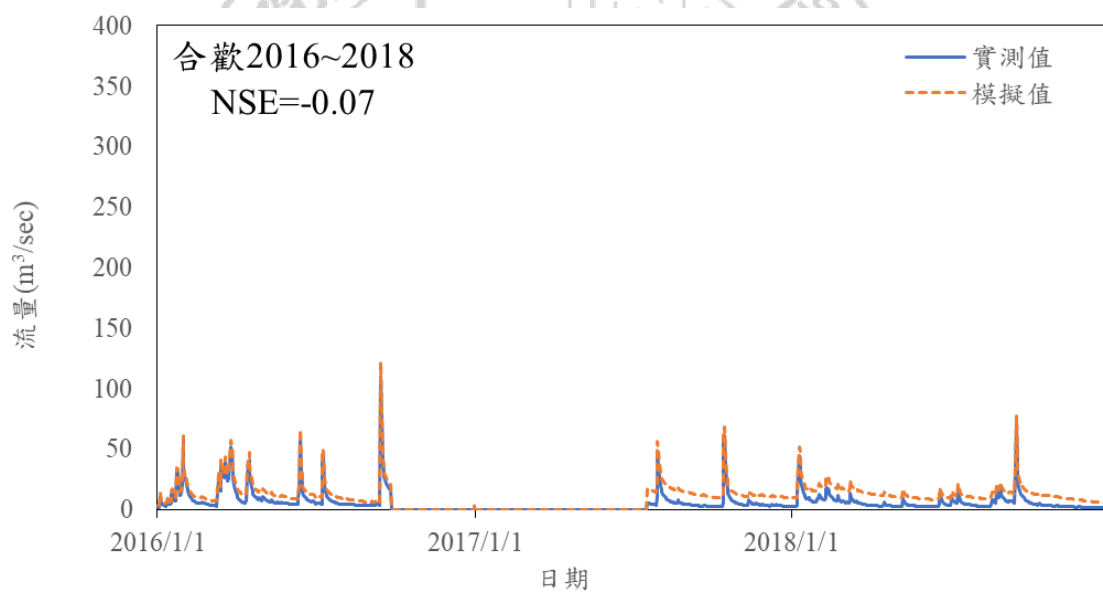


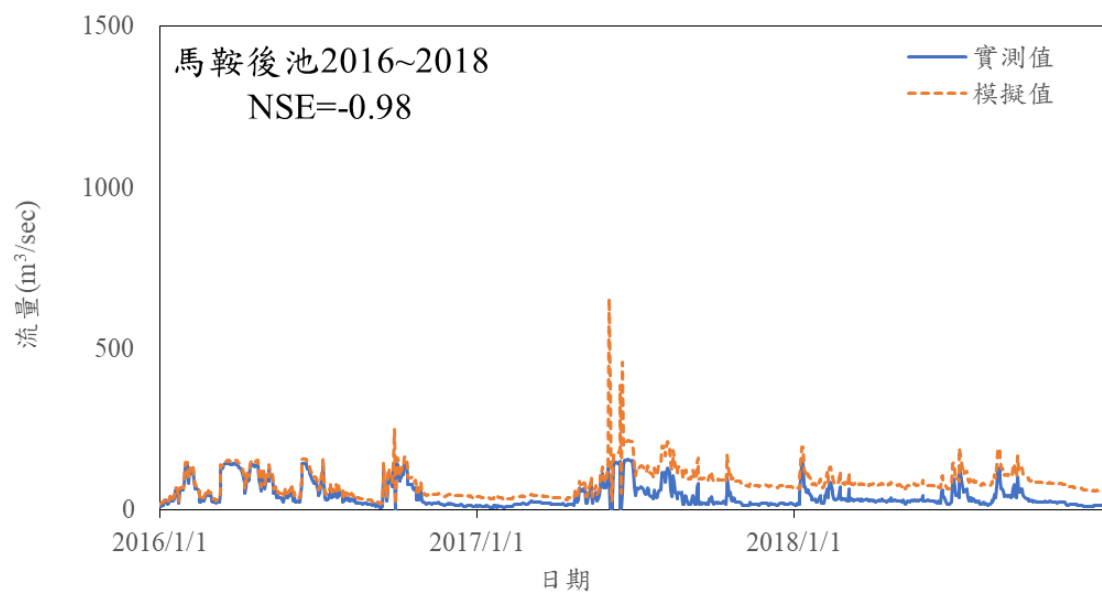
圖 3- 8 大甲溪流域多測站日流量率定結果：(a)七家灣、(b)合歡、
(c)馬鞍後池、(d)龍安橋測站



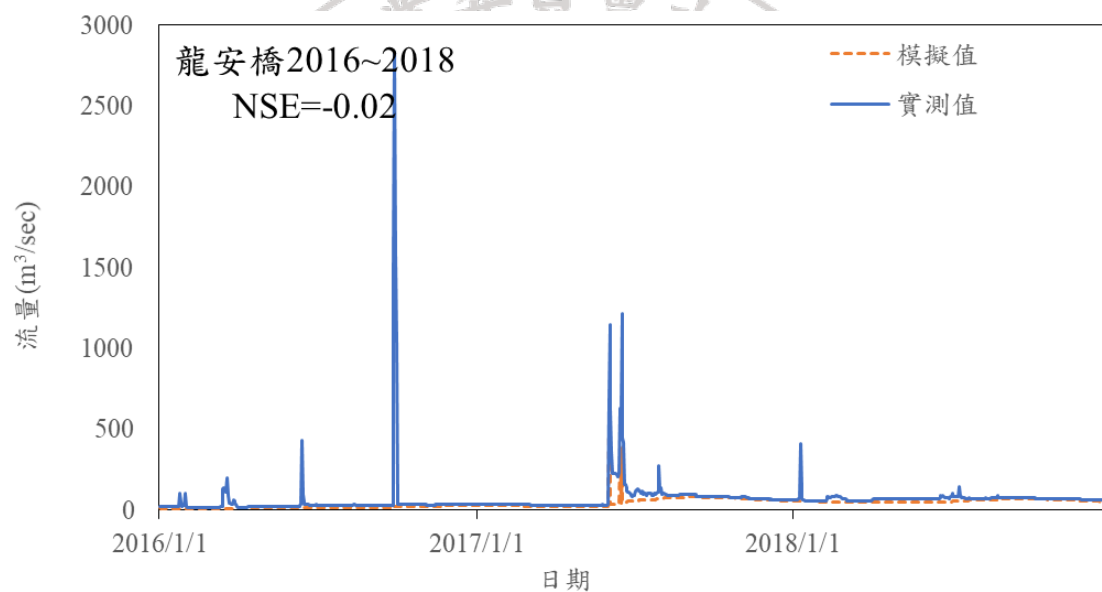
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3- 9 大甲溪流域多測站日流量驗證結果：(a)七家灣、(b)合歡、(c)馬鞍後池、(d)龍安橋測站

本計畫以 SWAT 模式進行水文量擬與水蝕評估，其中水蝕

評估之模擬效率以水體含砂量作為評判標準，且因影響水體含砂量與影響流量的敏感參數不盡相同，故先進行流量率定後，再加入含砂量資料率定土砂相關參數。SWAT 模式對於流量與含砂濃度之模擬皆以日為時間尺度，因含砂濃度測站資料平均頻度為每月一筆，進行資料擬合時依測量日期當日之含砂濃度為準。

1. 敏感參數分析：以流量敏感參數分析結果為基礎，進行全時段(2013 至 2018 年)龍安橋測站每日推移質模擬，作為基準點。選定使用手冊與文獻中建議之土砂敏感參數，以分析模組 SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs)進行參數敏感度分析，最終選取敏感度 t -test 之 p 值 <0.05 者為敏感參數共 17 個(包含 13 個流量敏感參數)(表 3-4)。
2. 參數率定：考量 SWAT 模式中計算坡面產砂進入流道之計算方式與資料穩定性，以龍安橋測站之推移質作為水蝕模式中 SWAT 模式的率定與驗證資料。採自 2013 至 2015 年的測量資料進行，率定參數值如表 3-4，率定期間推移質模擬結果如圖 3-10a 所示。
3. 模式驗證：參數率定完成後，進行龍安橋測站之推移質模擬，使用該測站自 2016 至 2018 年的日監測資料進行水砂量驗證，其結果如圖 3-10b 所示。

由龍安橋測站輸砂量(推移質)率定及驗證結果(圖 3- 10)，
SWAT 模式之輸砂量模擬對於推移質大的峰值及大於 10 ton/day
情況之能合理估計，惟輸砂量低之情況有高估情形。以評估降雨
及洪峰流量事件中的輸砂量為目標時，結果尚可應用。

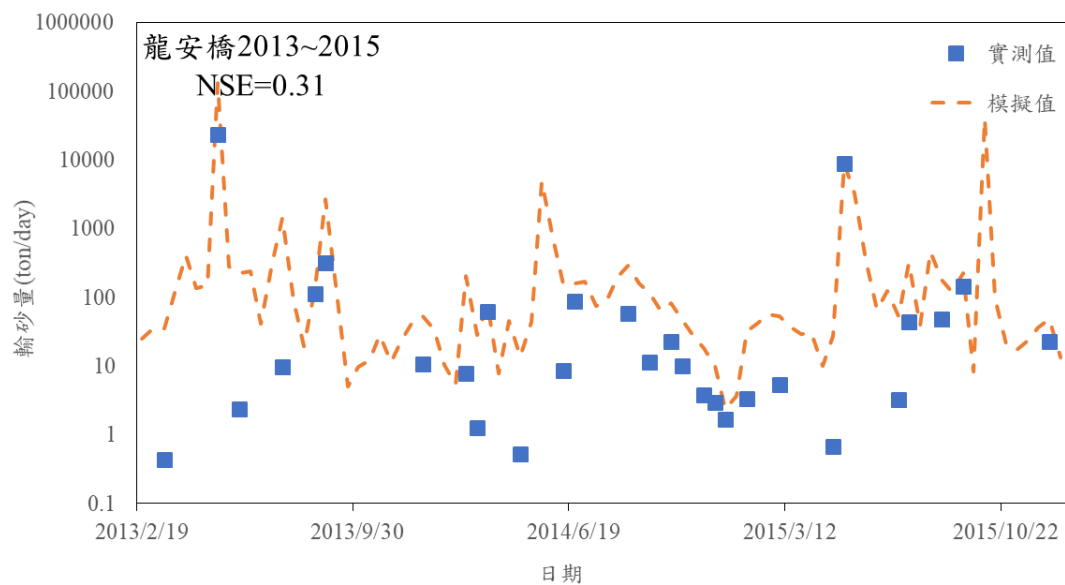
表 3-4 大甲溪流域土砂量敏感參數表

參數名稱	定義 (單位)	率定值 ^a	
		min	max
r__ESCO.hru	土壤蒸發散係數 (--)	-0.3	0.3
r__SURLAG.hru	逕流延遲係數 (--)	-0.2	0.2
r__OV_N.hru	坡面曼寧 n 值 (--)	-0.2	0.2
r__SLSUBBSN.hru	子集水區坡長 (m)	-0.1	0.1
v__CANMX.hru	冠層截流因子/天篷覆蓋因子 (--)	1	60
r__SOL_AWC().sol	土壤可含水量 (mmH ₂ O/mmSoil)	-0.2	0.2
v__GWQMN.gw	地下水淺水層發生回流的閾值深度(m)	0	5000
r__ALPHA_BF.gw	基流退水因子 (--)	-0.2	0.2
v__CH_K1.sub	支流水力傳導度 (mm/hr)	0	300
r__CH_N1.sub	支流曼寧 n 值 (--)	-0.2	0.2
v__CH_K2.rte	主流水力傳導度 (mm/hr)	0	500

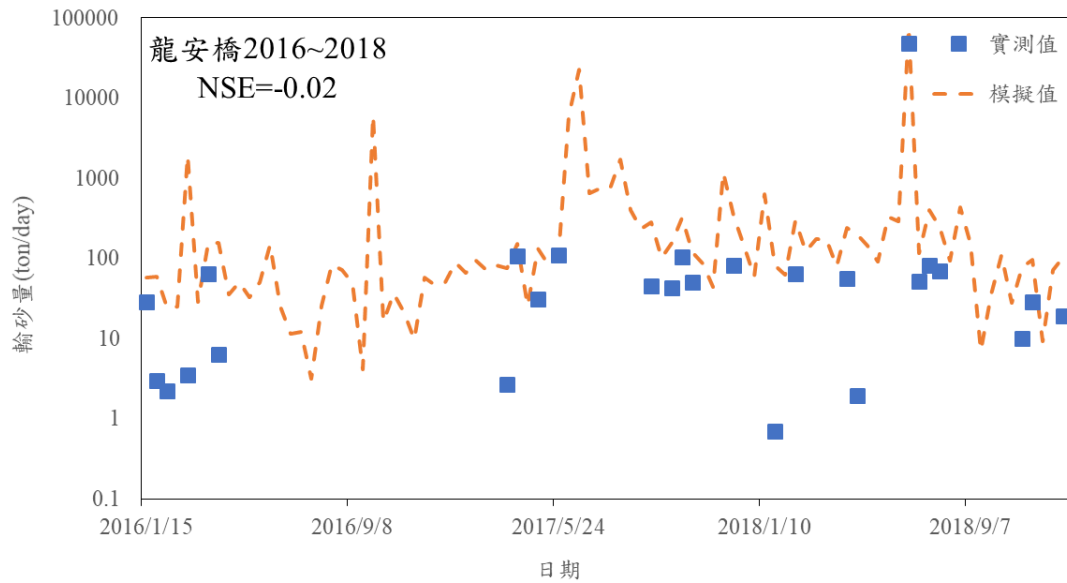
r__EPCO.bsn	作物蒸發散因子 (--)	-0.2	0.2
r__CN2.mgt	SCS (--)	-0.3	0.3
r__SOL_BD().sol	土壤統體密度 (g/cm^3)	-0.1	0.1
r__USLE_K().sol	USLE-Km 值 (--)	-0.2	0.2
v__CH_COV1.rte	河道侵蝕因子 (--)	0	1
v__LAT_SED.hru	橫向和地下水沉積物濃度 (mg/l)	0	2000

^a r_XXX 調整方式為初始值增減比例；v_XXX 調整方式為初始值迭

代數值。



(a)



(b)

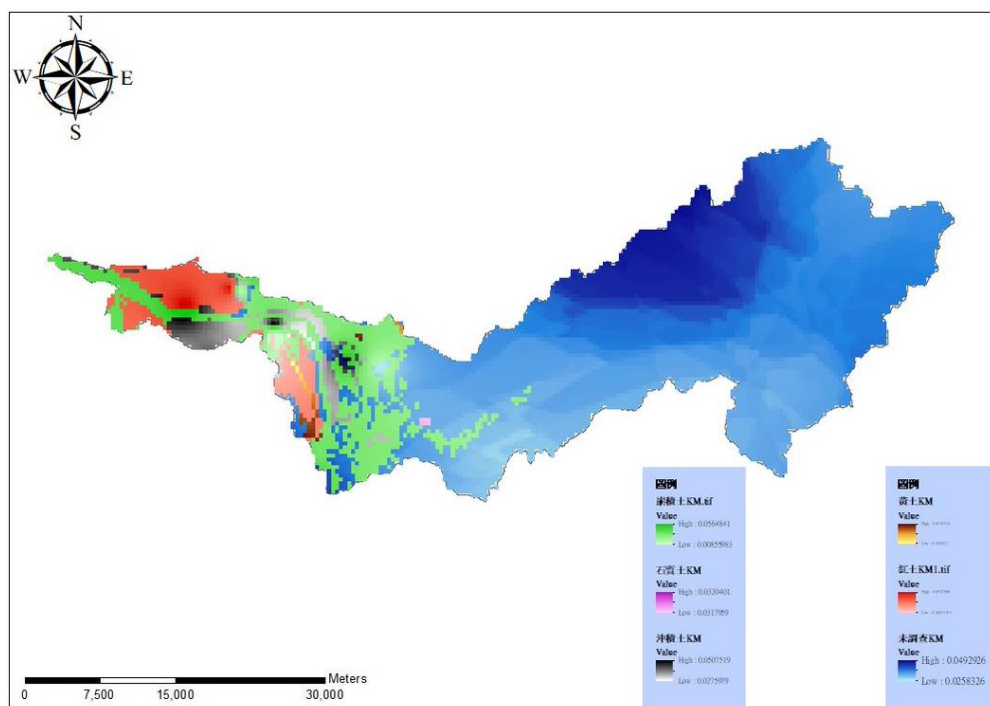
圖 3- 10 大甲溪流域龍安橋測站水砂(推移質)模擬結果：(a)率定階段、(b)驗證階段

(四)土壤可蝕性係數 K_m 值比較

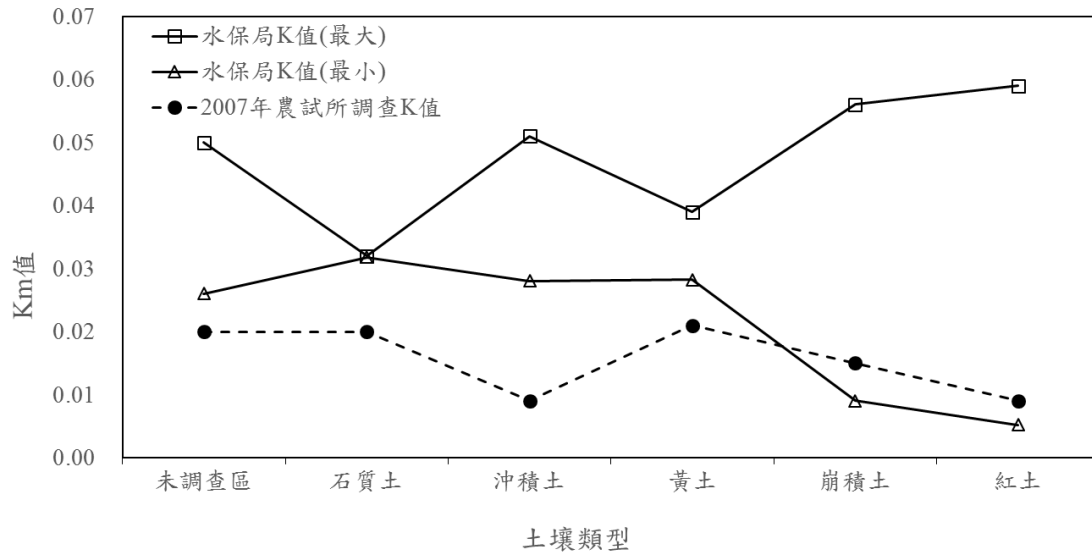
本計畫對 MUSLE 公式中土壤可蝕性係數 K_m 值進行比較討論，說明如下：(1) 建立 SWAT 模式時，坡面土壤沖蝕與流失量計算採 MUSLE 公式，其中的 K_m 值係依大甲溪流域之土壤圖，對應 SWAT 資料庫中的土壤類型決定，並進行後續計算。(2) 使用水保局最新率定的 K_m 值，乃依 K_m 值分布地區與土壤圖之土壤類型套疊，因屬相同土壤類型之區域範圍內可能有數個 K_m 值，將以權重平均計算不同土壤類型的代表 K_m 值，把 SWAT 資料庫中土壤類型的 K_m 值更改為依水保局率定結果的代表 K_m 值，並進行比較。

上述兩種方式決定之不同土壤類型 Km 值如圖 3- 11 所示；

在 SWAT 模式中設定 Km 值後，將計算坡面土壤流失量，並依龍安橋測站輸砂量進行參數率定；故 Km 值之比較討論僅影響坡面土壤流失量，作為河道土砂之來源，而河道中的沖蝕和土砂運移，則使用 SWAT 模式中的 Yang's 方程式進行計算。



(a)



(b)

圖 3-11 水保局率定 K_m 值與農試所調查 K_m 值：(a) 大甲溪流域土

壤類型 K_m 值分布圖、(b) 不同土壤類型 K_m 值比較

(五)坡面產砂量計算結果

本計畫使用 SWAT 模式中，對於流域內坡面產砂量之評估以 HRU 為運算單元，使用 MUSLE 公式計算單場降雨事件土壤沖蝕量，以估計各子集水區內進入河道之土砂量，MUSLE 公式及相關輸入參數說明如下及表 3-5 所示：

$$Q_s = 11.8(V_{eff} \times Q_p)^{0.56} K_m \times L \times S \times C \times P$$

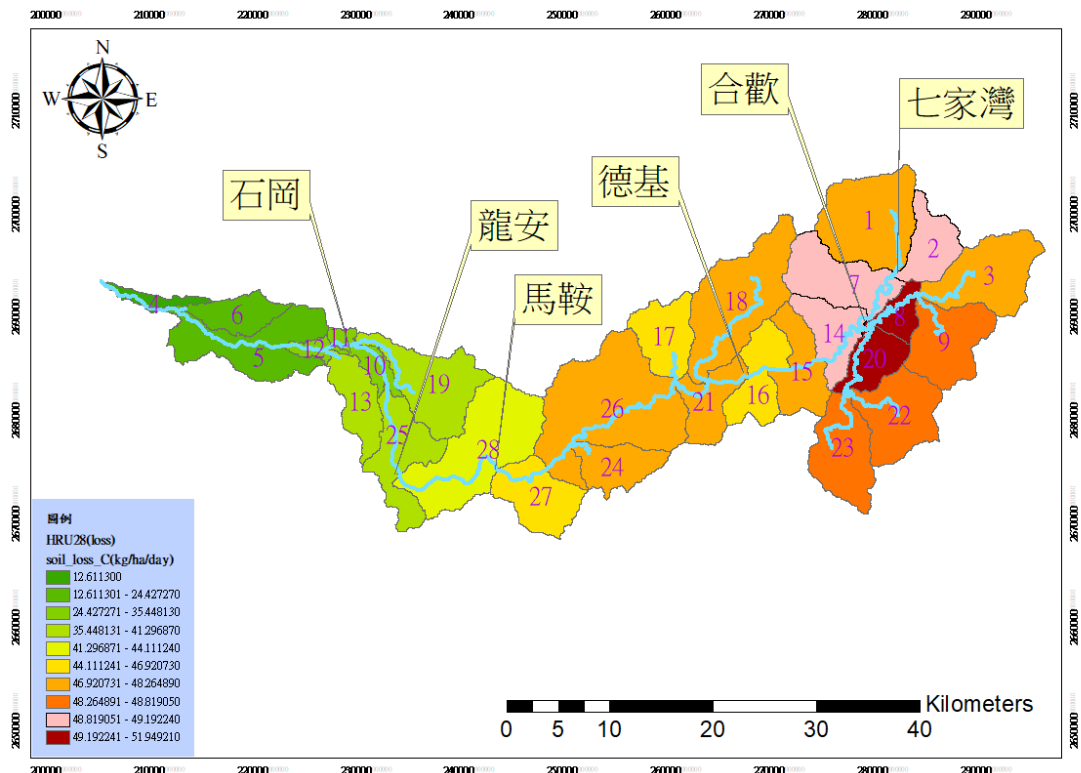
式中， Q_s = 土壤沖蝕量(ton)； V_{eff} = 有效降雨量(m)； Q_p = 洪峰逕流量(m^3/s)； K_m = 土壤可蝕性係數； L = 坡長因子； S = 坡度因子； C = 植生覆蓋因子； P = 水土保持處理因子。

表 3- 5 MUSLE 公式使用因子計算說明與資料來源

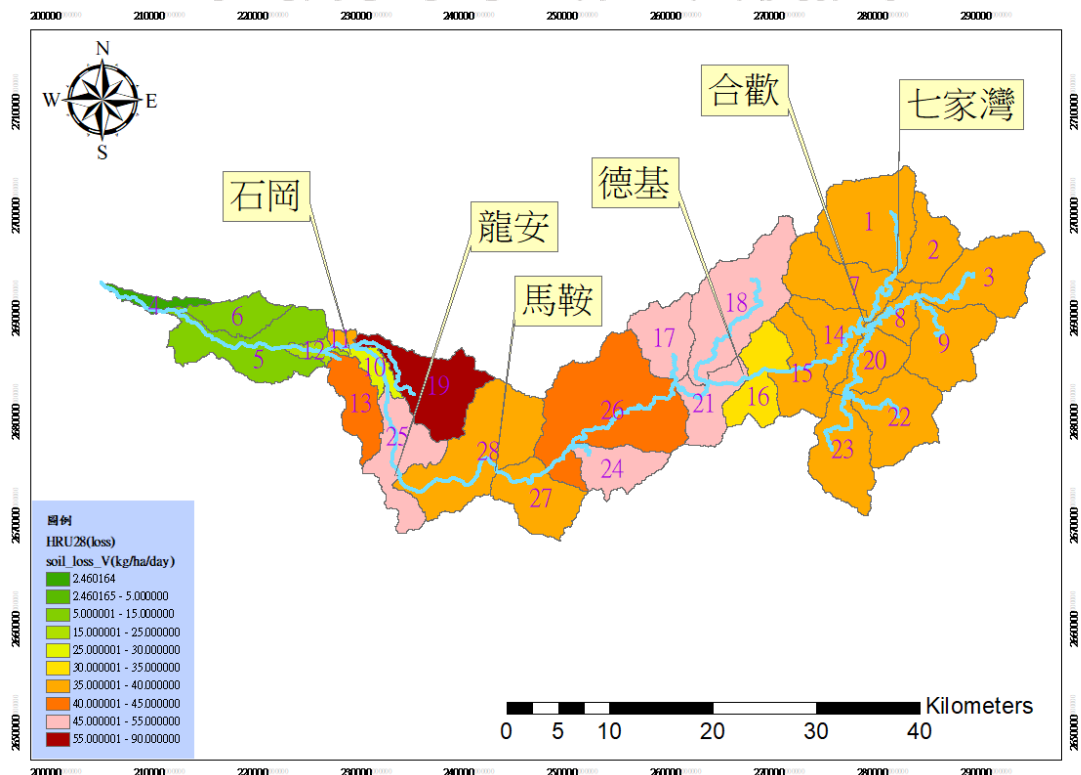
因子	計算方式	參考資料
V_{eff}	以 SCS 逕流曲線計算得出逕流體積與洪峰	2012-2018 年 中央氣象局每日累積雨量資料 2012-2018
Q_p		
K_m	依土壤類型對照 SWAT 內建資料庫給定如下：未調查區($K_m = 0.02$)、石質土($K_m = 0.02$)、沖積土($K_m = 0.009$)、黃土($K_m = 0.021$)、崩積土($K_m = 0.015$)、紅土($K_m = 0.009$)	2007 年農試所土壤調查資料
L	利用網格數值計算 HRU 坡長及坡度	2016 年內政部 20×20m 數值高層模式資料
S		
C	以土地利用類型與 SWAT 內定義之土地利用類型對照如下：農業AGRLC=0.2, 森林FRSTC=0.001, 交通UTRNX, 水利WATRC=0, 遊憩WETL C=0.003, 礦岩BARRC=1, 其他PASTC=0.003	2008 年國土調查資料

P	依照坡度及最大坡長給定：			2016 年內政部 20 × 20m 數值 高層模式資料
	Land slope (%)	P_{USLE}	Maximum length (m)	
	1 to 2	0.60	122	
	3 to 5	0.50	91	
	6 to 8	0.50	61	
	9 to 12	0.60	37	
	13 to 16	0.70	24	
	17 to 20	0.80	18	
	21 to 25	0.90	15	

依 SWAT 模式流量及輸砂量參數率定值，計算各子集水區坡面土砂產量，分為率定階段(2012-2015 年)與驗證階段(2016-2018 年)，計算平均每日土砂產量如圖 3-12 所示。結果顯示各子集水區土砂產量平均值在率定階段為 12.6 至 55 (kg/ha/day)、驗證階段為 2.5 至 90 (kg/ha/day)。以空間分布來看，率定階段中各子集水區之平均坡面土壤流失量由上游至中、下游遞減，位於上游七家灣測站附近之 No.8 和 No.20 子集水區沖蝕作用最為顯著，其坡面產砂作用強，為土壤流失高風險區域。在驗證階段，各子集水區之平均坡面土壤流失量以德基水庫至石岡壩之間者最高、上游地區次之、下游最少；靠近龍安橋測站之 No.19 子集水區沖蝕作用最為顯著，其坡面產砂作用強，為土壤流失高風險區域。



(a)



(b)

圖 3- 12 大甲溪流域各子集水區坡面平均每日土砂產量：(a)率定階

段(2012-2015 年)、(b)驗證階段(2016-2018 年)

(六)揚塵事件日篩選

本計畫彙整文獻資料中，對於揚塵事件發生定義與描述，如表 3-6 所示。

表 3-6 揚塵事件發生定定義與描述

文獻名稱	定義與描述
高屏溪河川揚塵預警及通報	(1)河川揚塵事件：係指於河川地上有粉塵捲揚且逸散之情事。 (2)事件日：係指當日有河川揚塵事件或空氣品質污染指標(AQI 值)大於 100。 (3)蒲福風級：風力的等級，可由地面或海面物體被風吹動之情形加以估計之。 $V = 0.836 \times B^{3/2}$ V：風速(m/s)；B：蒲福風級數
水利署 e 河川知識服務網 卑南溪河口段	(1)卑南溪河口段風沙問題可分為風吹沙、揚塵兩部份，風吹沙主要分佈在高度約 1.5m 至 2m 間之空域，粒徑多大於 $100 \mu m$ 以上，揚

風吹沙治理策略-2014/9/9	塵粒徑則多在 $100\mu\text{m}$ 以下，以微粒型態懸浮。 (2)風沙起動機制，地表風速 2.5m/s (2.5m 高空處風速達 $7.5\text{--}10\text{ m/s}$，蒲福風級數 5 級)以上就能引起塵揚。
100 年度「環保署/國科會空污防制科研合作計畫」	於西部河川揚塵之研究，河川揚塵之微粒濃度均以粗微粒為主，其 $\text{PM}_{2.5-10}/\text{PM}_{10}$ 平均比例為 $91.52\%\sim 96.83\%$。
濁水溪下游段河川裸露地揚塵改善策略研究	我國係將空氣污染物分為氣狀污染物，粒狀污染物、二次污染物及其它空氣污染物等，其中粒狀污染物若以粒徑區分，則分成五類為：(1)總懸浮微粒(total suspended particulate matters, TSP)：所有空氣中之懸浮微粒；(2)懸浮微粒(particulate matters, PM_{10})：粒徑在 $10\mu\text{m}$ 以下之粒子；(3)落塵(dust fall)：粒徑超過 $10\mu\text{m}$；(4)粗懸浮微粒($\text{PM}_{2.5-10}$)：氣動粒徑介於 $2.5\text{--}10\mu\text{m}$，簡稱粗微粒；及(5)細懸

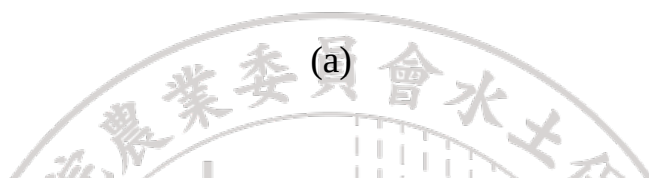
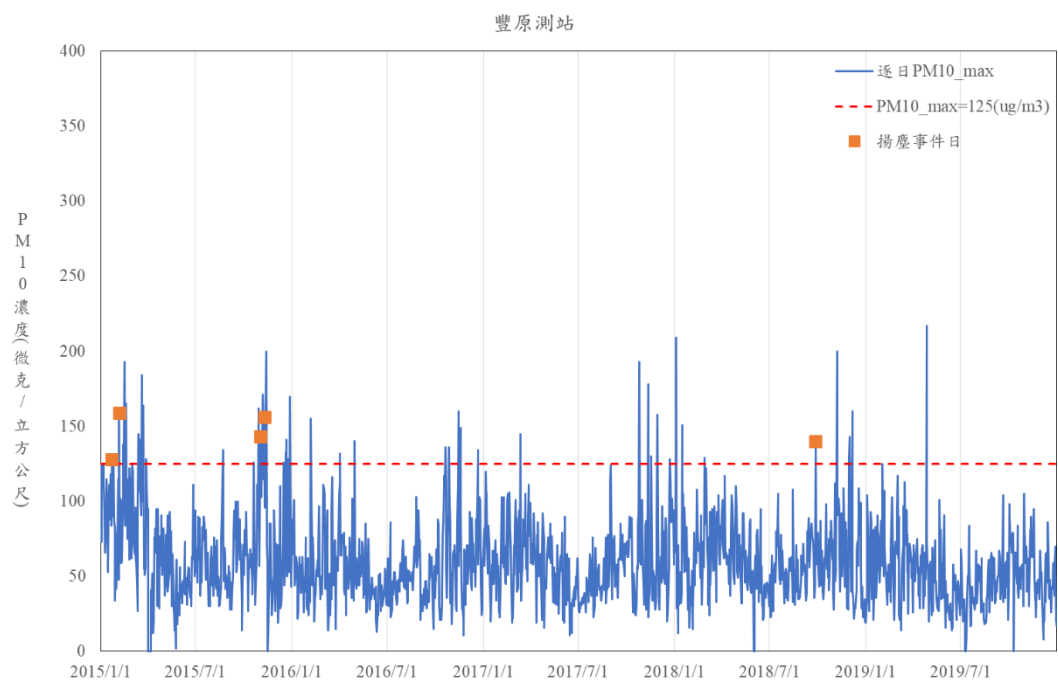
	浮微粒(PM_{2.5})：氣動粒徑小於 2.5 μm，簡稱細微粒，亦稱為可吸入懸浮微粒(RSP)等。
臺灣西海岸河口揚塵改善與經營對策	所謂揚塵，是指強風將地面的沙塵帶起，使空氣呈現混濁狀態，能見度低於 10 km 的一種天氣現象；因構成揚塵的沙粒，主要是粒徑小於 10 μm 的懸浮微粒(suspended particulates, PM₁₀)，當其濃度過高時，不僅降低空氣之能見度，亦會對人體的呼吸器官造成相當之危害。
雲林地區河川揚塵及沙塵暴事件懸浮微粒之化學組成特性	當揚塵發生後帶至高層產生分離留在大氣中的粒徑多小於 10μm 以下，不易藉由重力沉降。

為探討降雨量對揚塵事件發生之影響性，以卡方獨立性檢定分析各測站 PM₁₀ 濃度與降雨量逐時資料之關聯性，檢定結果指出，於豐原、后里和大甲等地區之 PM₁₀ 濃度變化分別與該地區降雨量相關，且皆達顯著相關(Pearson 卡方值< 0.01)，即降雨量

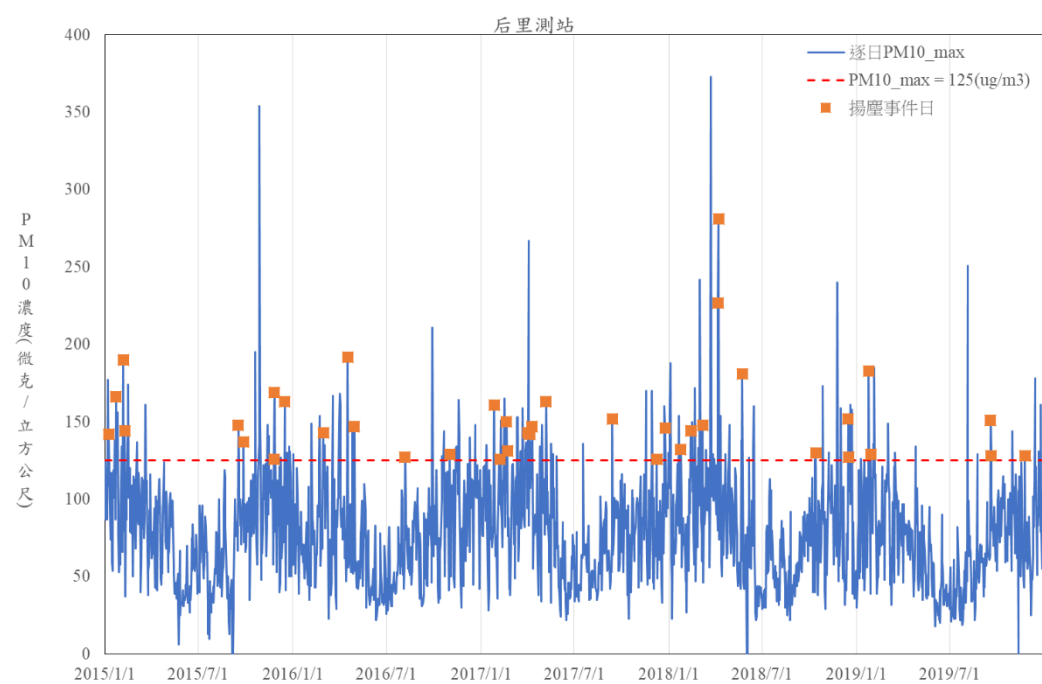
為揚塵事件發生之重要影響因子。

為探討流量/水位對揚塵事件發生之影響性，進行下列資料檢定：因揚塵事件好發區域主要為大甲溪下游地區，以篩選揚塵事件日使用的空品測站(大甲、后里、豐原)為參考點，其附近的水文測站(大甲、后豐橋)無流量監測資料，故以水位監測資料為參考。將水位資料依是否為揚塵事件日者分群，並將揚塵事件日之水位資料與非揚塵事件日之水位資料進行統計檢定(t -檢定)，檢定結果並無顯著差異(p 值皆 >0.05)。因此，經前述驗證，本計畫仍優先採用保護署 2008 年所提出揚塵事件發生日篩選基準，進行後續研究分析。

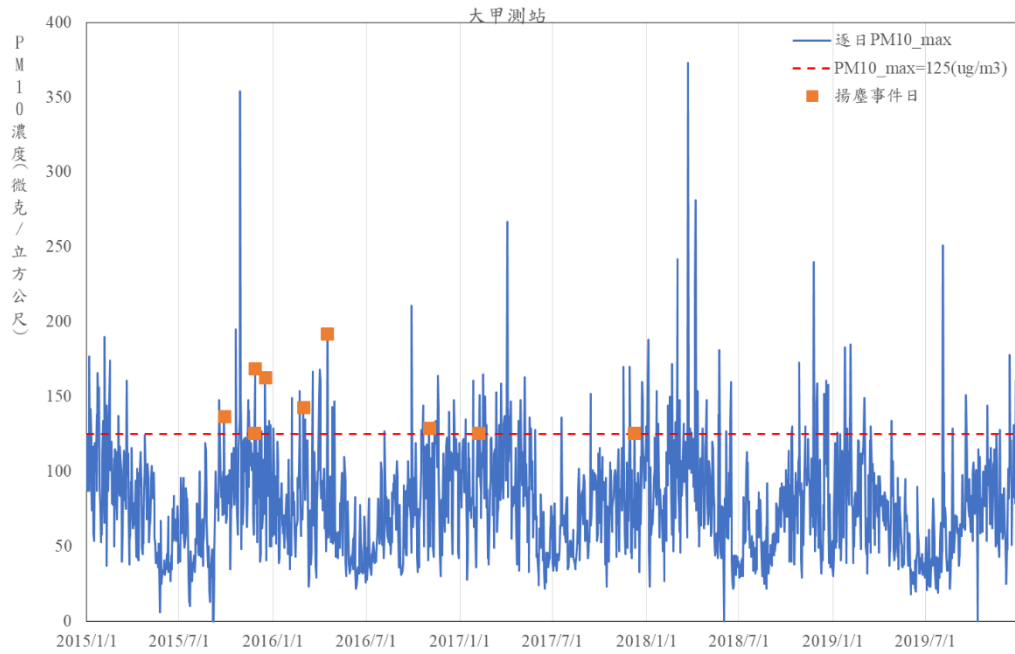
本計畫以氣象空品測站(圖 2- 5)2015 至 2019 年之資料，參考行政院環境保護署(2008)計畫成果提出的河川揚塵事件日篩選步驟(圖 2- 7)，進行大甲溪流域下游灘地揚塵事件日篩選，其結果如圖 3- 13 所示：測站位置自上至下游依豐原、后里和大甲和測站，揚塵事件日之發生以后里最為頻繁，其次依序為大甲和豐原。大甲溪流域下游測站揚塵事件日次數統計如圖 3- 14 所示，整體而言，揚塵事件日自 2015 年至 2019 年逐漸減少，近年事件日多發生於后里測站。



(a)

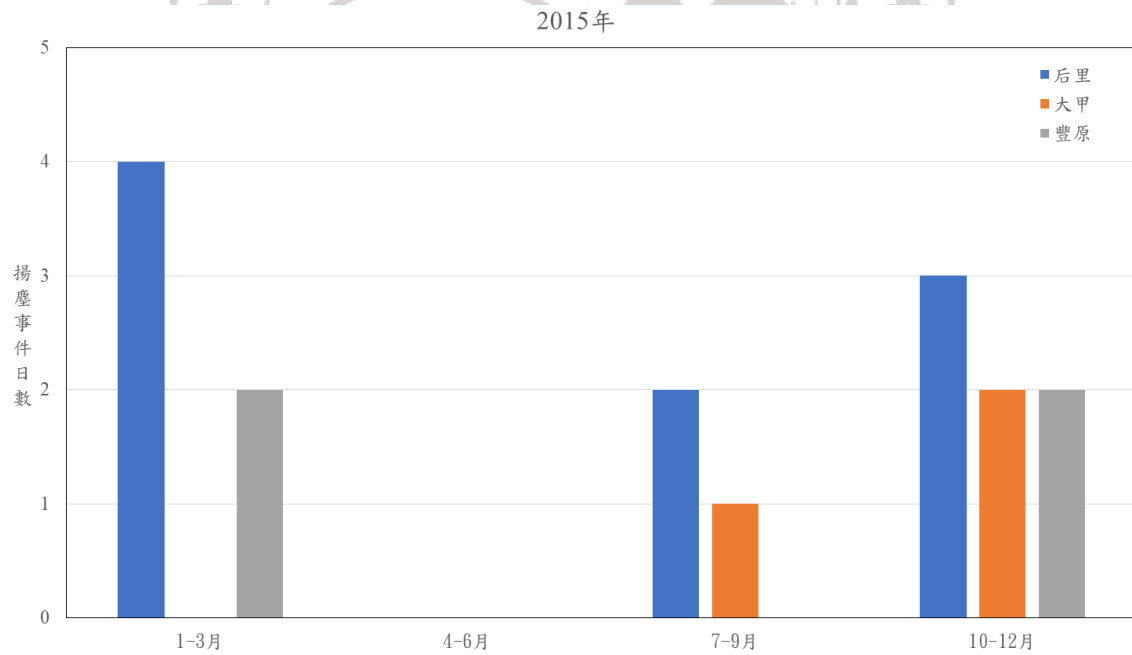


(b)



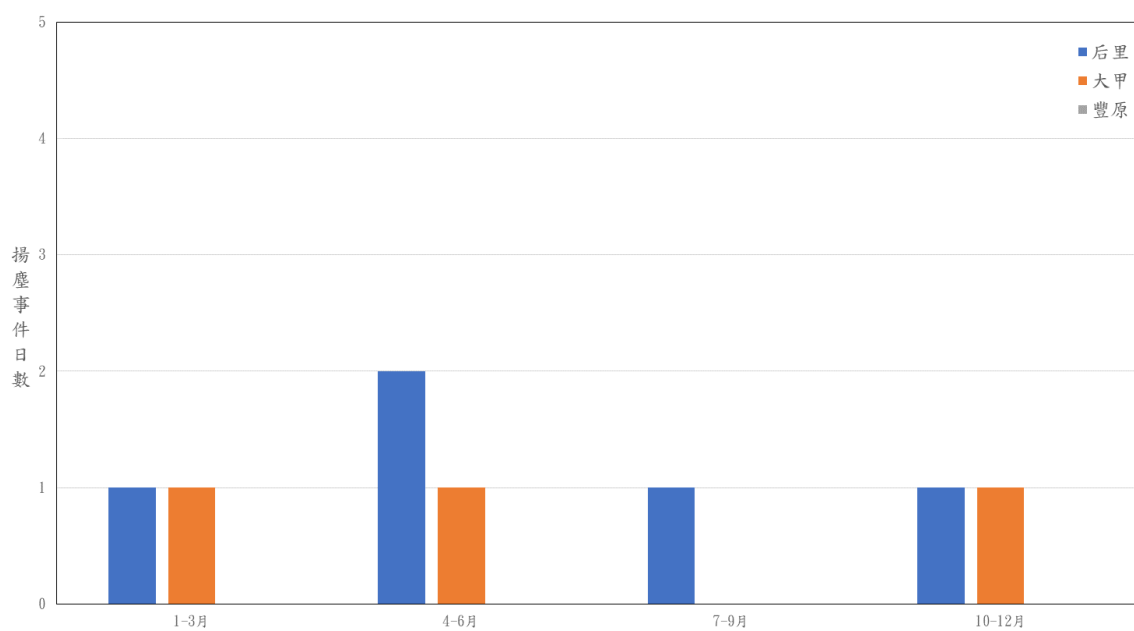
(c)

圖 3-13 大甲溪流域下游測站 PM₁₀ 濃度變化及揚塵事件日：(a)豐原、(b)后里、(c)大甲測站



(a)

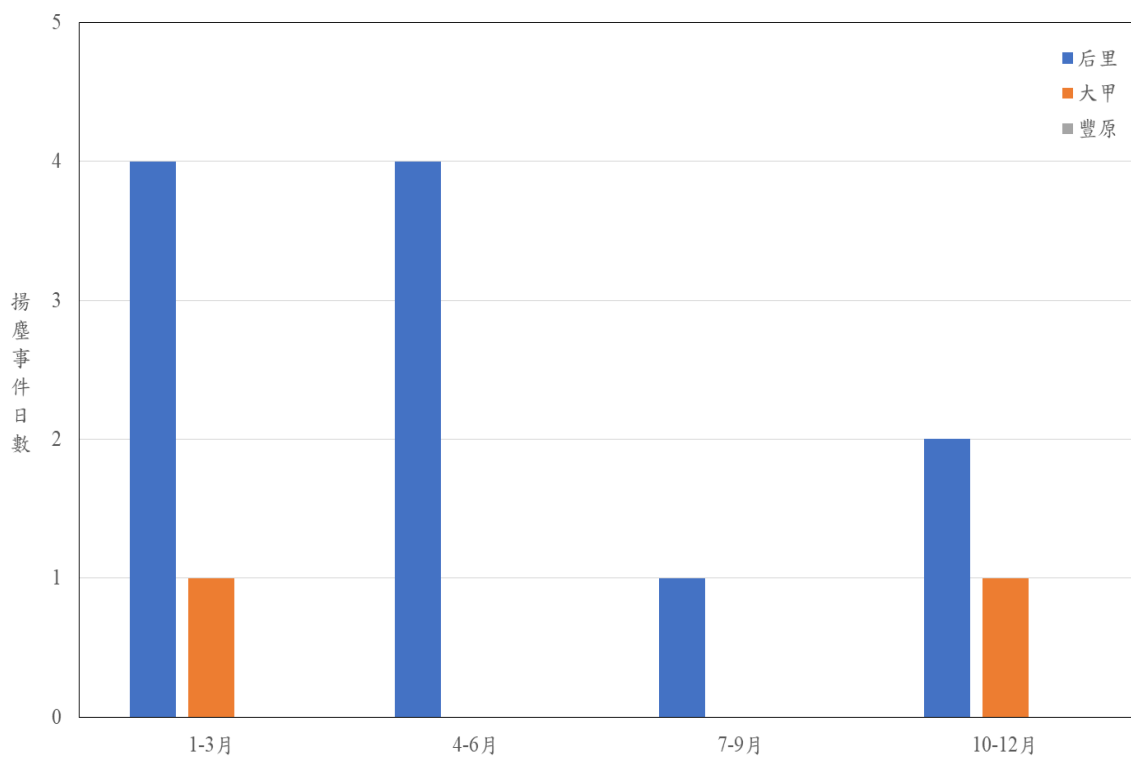
2016年



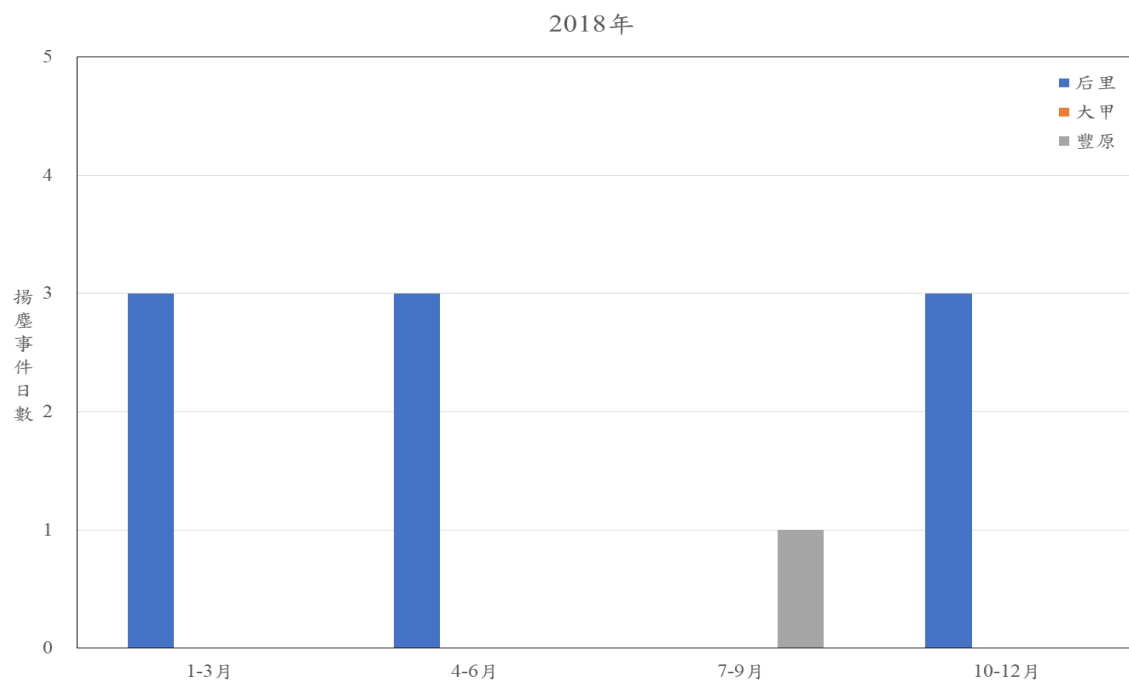
(b)



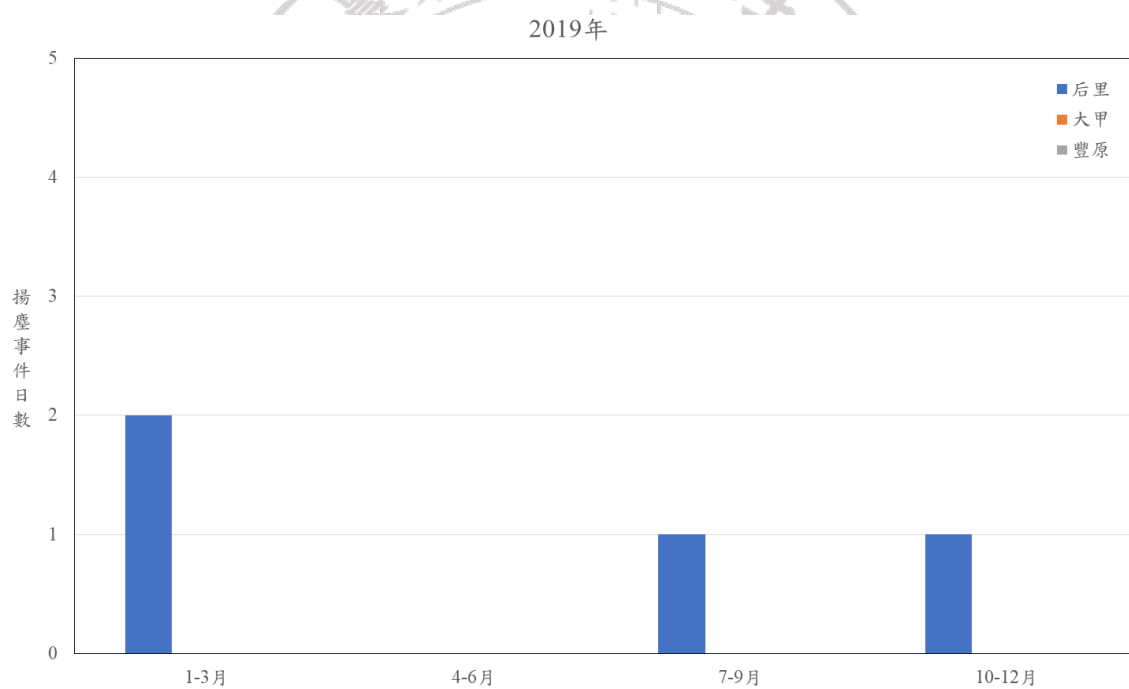
2017年



(c)



(d)



(e)

圖 3- 14 大甲溪流域下游測站揚塵事件日次數：(a)2015、(b)2016、
(c)2017、(d)2018、(e)2019 年事件日數

(七)風蝕因子影響層級分析

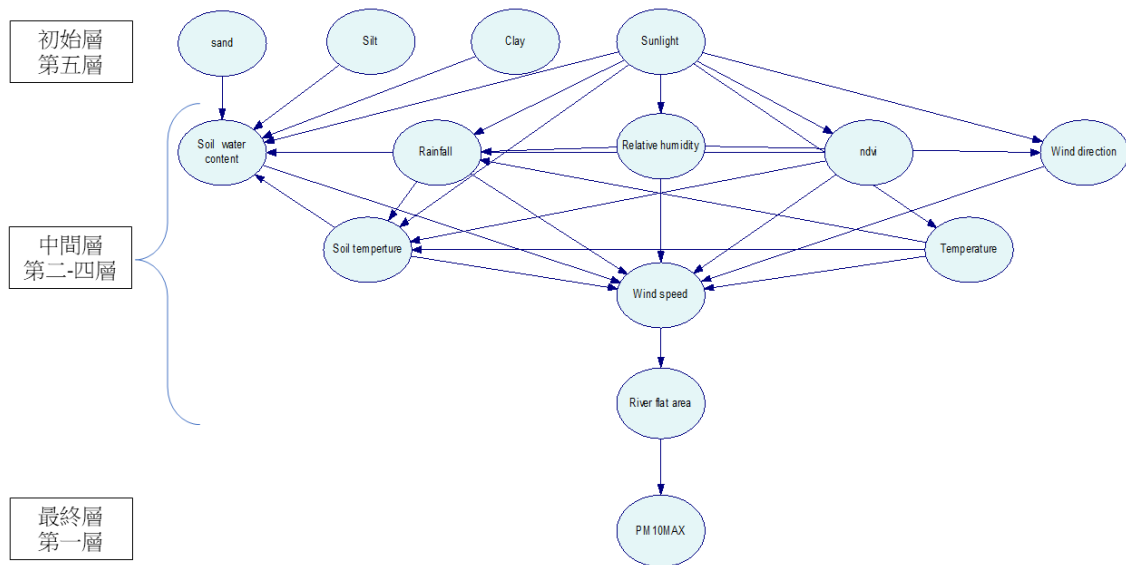
本計畫收集文獻中進行風蝕和揚塵事評估與預測模式研究中，使用之影響因子及因子相關性討論，選擇 13 項影響因子(表 3-7)，以明示結構法進行分析，使用二元矩陣表示因子之間的關聯性，並將影響因子分級，其結果如圖 3-15a 所示；分析先行集合和可達集合以找出因子間之影響分層：屬層級五者為土壤質地分類(S_1)、日照時數(S_7)；層級四者為土壤含水量(S_2)、土壤溫度(S_3)、河灘地植生覆蓋度(S_4)、相對溼度(S_5)、氣溫(S_8)、風向(S_9)、降雨量(S_{10})、預防管理措施(S_{12})；層級三者為風速(S_6)；層級二者為裸露灘地面積(S_{11})；層級一者為揚塵事件(最大 PM_{10} 濃度)(S_{13})。層級間之影響關係為第 n 層直接受第 $n+1$ 層影響，且 $n \geq 1$ 。

此外，僅考量輸入因子在資料變化趨勢之關聯性，在不預設各因子間的物理機制與因果關係下，以輸入資料間的相依性產生貝氏信賴網絡因子層級結構如圖 3-15b 所示。

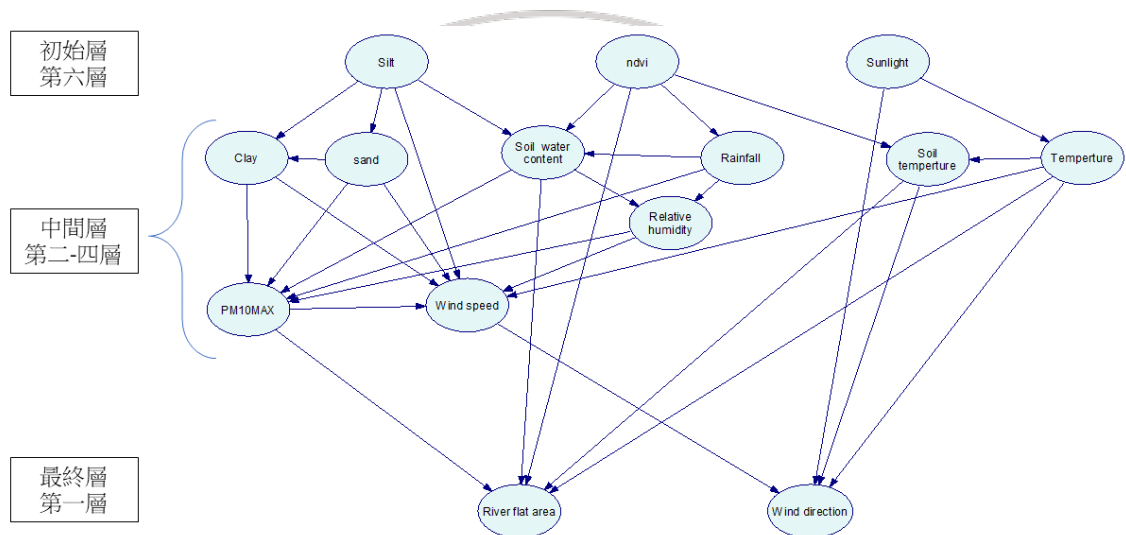
表 3-7 本計畫採用之揚塵事件發生影響因子與輸入資料

因子代碼	影響因子	輸入資料
S_1	土壤質地分類 Soil type	2007 年農試所土壤調查

	註：細分為砂、粉、黏粒百分比	資料
S ₂	土壤含水量 Soil water content	中央氣象局 2-15-2019 年 HRLDAS 分析結果
S ₃	土壤溫度 Soil temperature	
S ₄	河灘地植生覆蓋度 NDVI	太遙中心 2015-2019 年 SPOT6, SPOT7 衛星影像
S ₅	相對溼度 Relative humidity	中央氣象局氣象與空氣 品質測站 2015-2019 年監 測資料
S ₆	風速 Wind speed	
S ₇	日照時數 Sunlight	
S ₈	氣溫 Air temperature	
S ₉	風向 Wind direction	
S ₁₀	降雨量 Rainfall	太遙中心 2015-2019 年 SPOT6, SPOT7 衛星影像
S ₁₁	裸露灘地面積 River flat area	
S ₁₂	預防管理措施 Prevention	大甲溪流域河川揚塵治 理相關計畫報告 (未放入分析)
S ₁₃	揚塵事件(PM ₁₀ 濃度) Dust event	中央氣象局空氣品質測 站 2015-2019 年監測資料



(a)



(b)

圖 3- 15 風蝕事件(最大 PM₁₀ 濃度)影響因子層級結構圖：(a)明示結構法分析結果；(b) 資料相依性分析結果

(八)河川灘地植生覆蓋度與裸露地分析

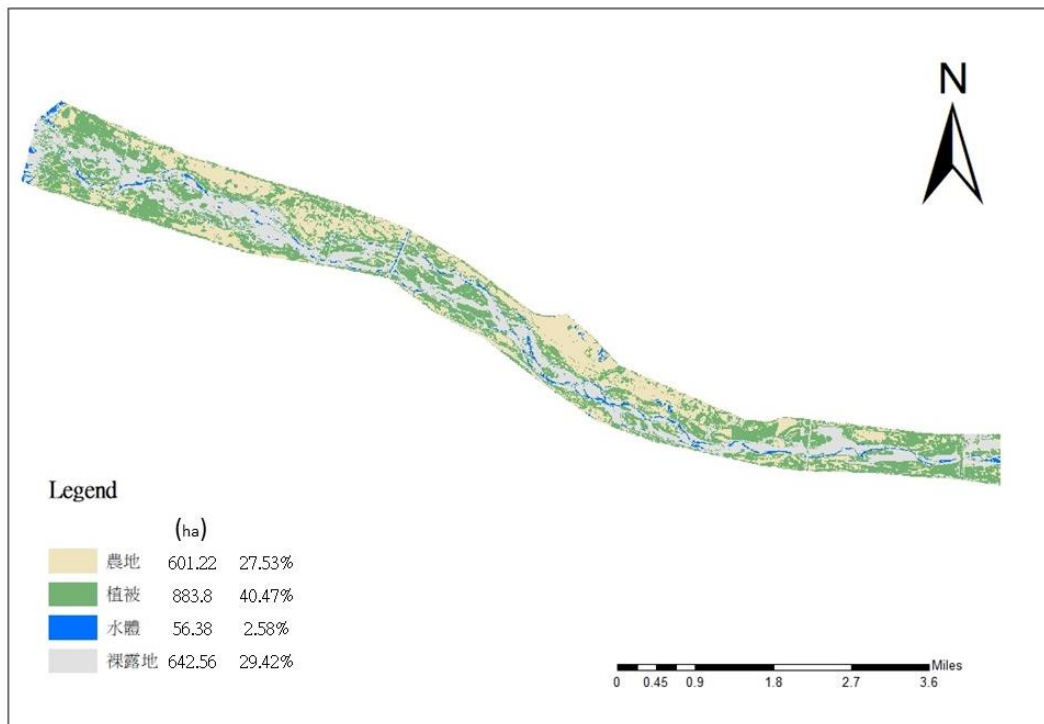
本計畫使用國立中央大學太空及遙測研究中心資源衛星接收站法國衛星 SPOT-6/7，空間解析度為 6m×6m 網格之衛星影像，

進行大甲溪流域河川灘地植生覆蓋度與裸露地分析，說明如下：

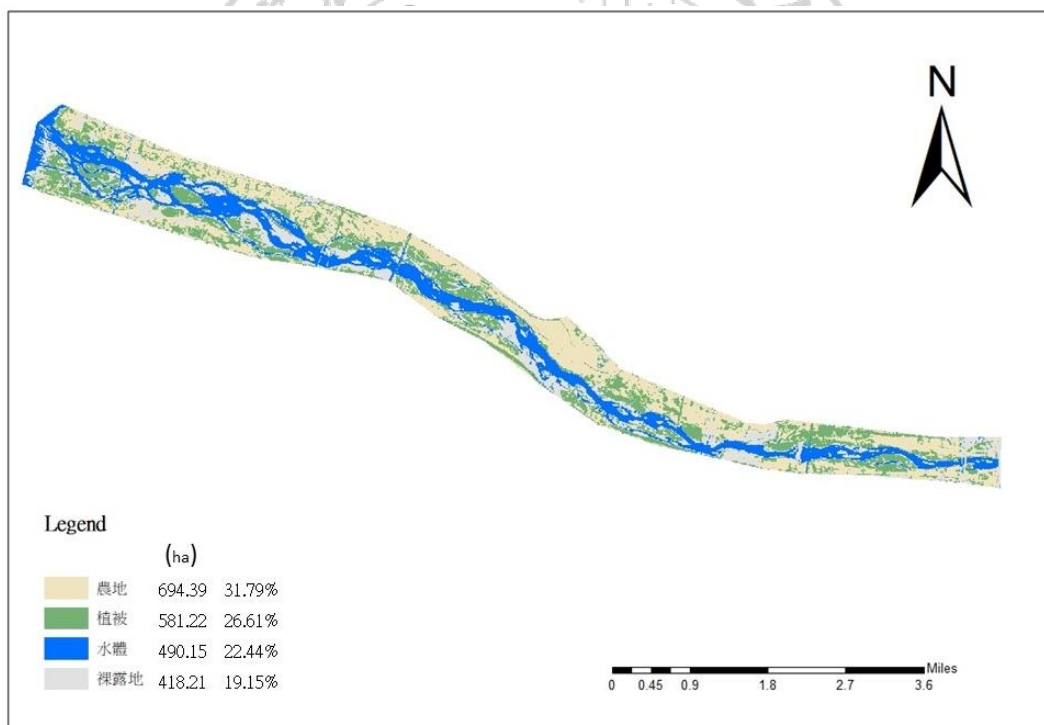
1. 利用影像分析軟體 ERDAS IMAGINE 2014 進行大甲溪下游河川灘地的常態化差異植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 計算，代表 2015-2019 年該地區乾、濕季之植生覆蓋程度；計算結果統計資料如表 3-8 所示。
2. 河灘地判釋分別使用 2016/11/07 與 2019/06/15 這兩天作為乾、濕季的河灘地面積做基準，其結果如所示。

表 3-8 大甲溪下游河川灘地 2015-2019 年 NDVI 值

NDVI 日期	最小值	最大值	平均值	中位數	眾數	標準差
2015/4/7	-0.367	0.790	0.177	0.121	0.039	0.184
2015/10/13	-0.377	0.759	0.277	0.271	0.014	0.232
2016/1/25	-0.331	0.763	0.199	0.182	0.092	0.221
2016/7/24	-0.348	0.812	0.325	0.287	0.237	0.216
2016/11/7	-0.280	0.768	0.280	0.273	0.060	0.191
2017/3/28	-0.204	0.603	0.136	0.108	0.048	0.120
2017/4/30	-0.354	0.791	0.299	0.295	0.040	0.231
2018/2/17	-0.331	0.746	0.139	0.085	-0.001	0.175
2018/9/25	-0.377	0.827	0.354	0.352	0.691	0.276
2019/5/12	-0.198	0.693	0.338	0.349	0.540	0.175
2019/6/15	-0.097	0.799	0.413	0.470	0.060	0.214
2019/9/18	-0.404	0.825	0.395	0.408	0.072	0.252



(a)



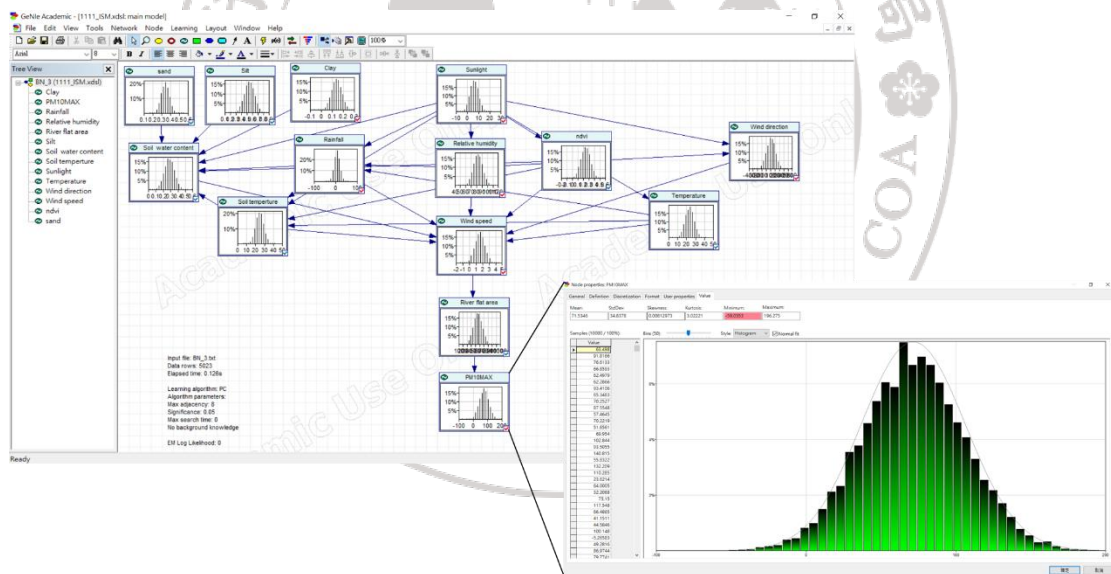
(b)

圖 3- 16 大甲溪下游河川灘地土地覆蓋分類：(a)乾季(2016/11/07)、

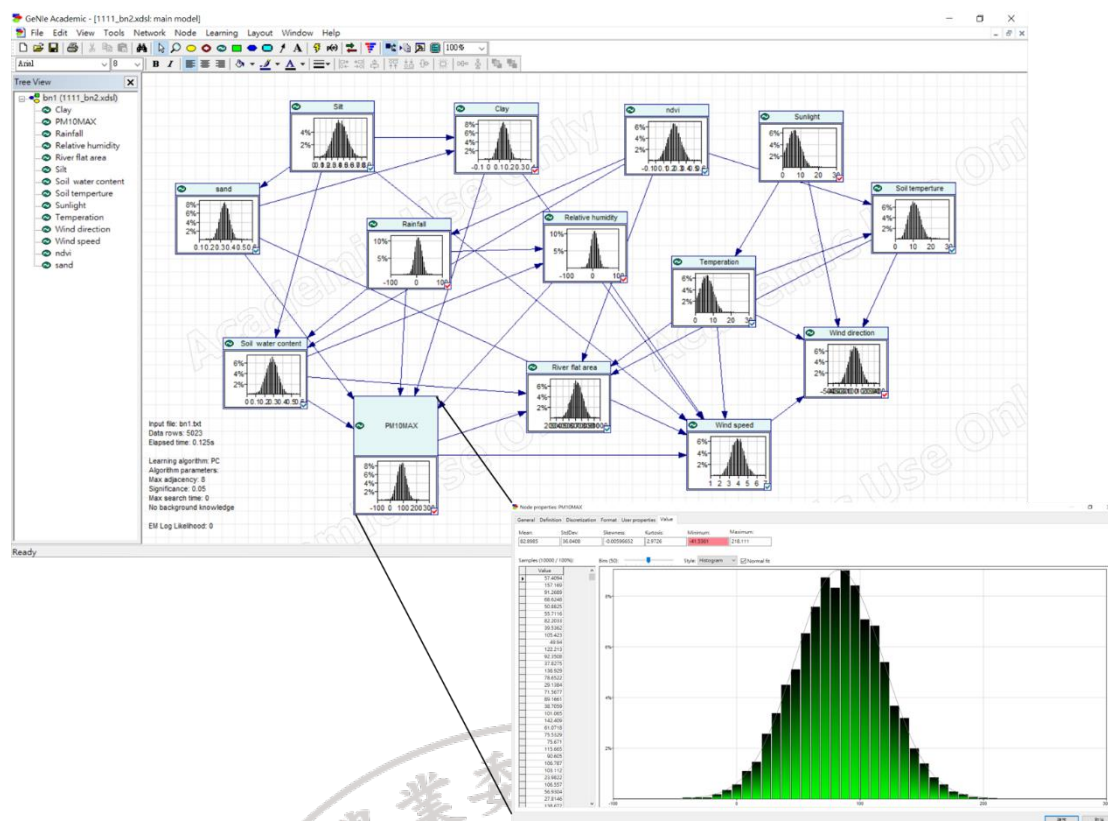
(b) 濕季(2019/06/15)

(九)貝氏信賴網絡風蝕評估模式

本計畫使用貝氏信賴網絡建模與分析軟體 GeNIe Modeler (Version 3.0.R2, BayesFusion, LLC, 2020)，依明示結構法進行之風蝕因子影響層級分析結果，建立貝氏信賴網絡風蝕評估模式(圖 3-17a，簡稱「貝氏風蝕模式-ISM」)，以當日最大 PM₁₀ 濃度為最終評估項目，作為風蝕災害-揚塵事件發生之判斷依據。此外，考量輸入因子資料之關聯性，在不預設各因子間的物理機制與因果關係下，以輸入資料間的相依性產生貝氏信賴網絡模式(圖 3-17b，簡稱「貝氏風蝕模式-Dep」)。



(a)



(b)

圖 3-17 大甲溪下游貝氏信賴網絡風蝕評估模式：(a)以明示結構法建立影響因子層級，貝氏風蝕模式-ISM、(b)以資料相依性建立影響因子層級，貝氏風蝕模式-Dep

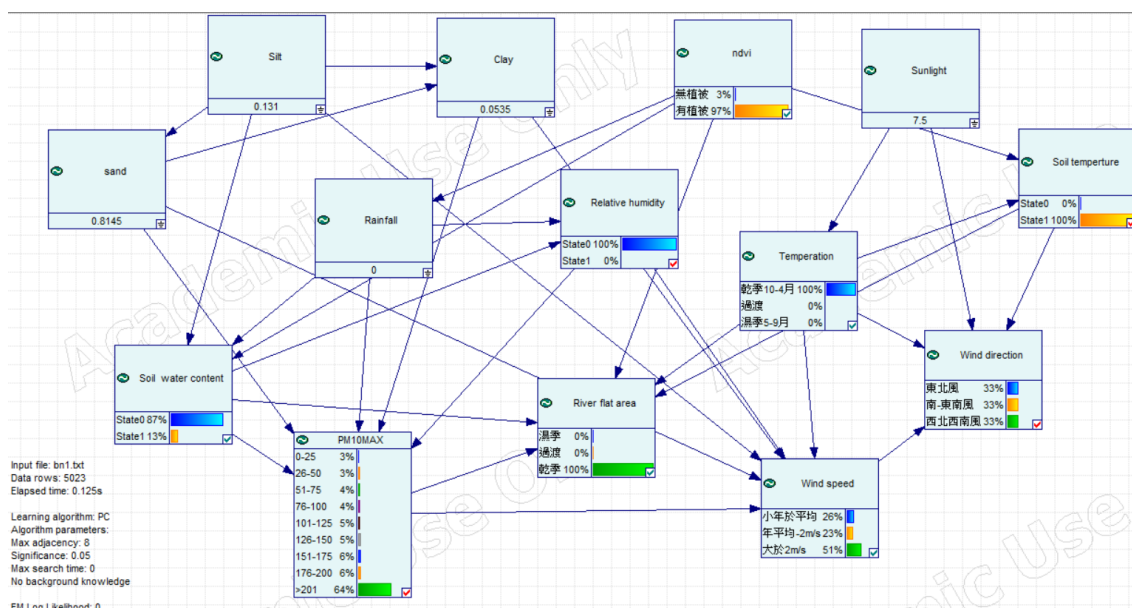
(十)大甲溪流域水蝕與風蝕評估綜合討論

本計畫以大甲溪流域為研究區域，使用 SWAT 水文模式與貝氏信賴網絡分別進行水蝕評估與風蝕評估。SWAT 模式使用之資料收集年度為 2012 至 2018 年，貝氏信賴網絡使用之資料收集年度為 2015 至 2019 年，以 2015 至 2018 年的評估結果進行綜合討論，其他年份結果作為參考。

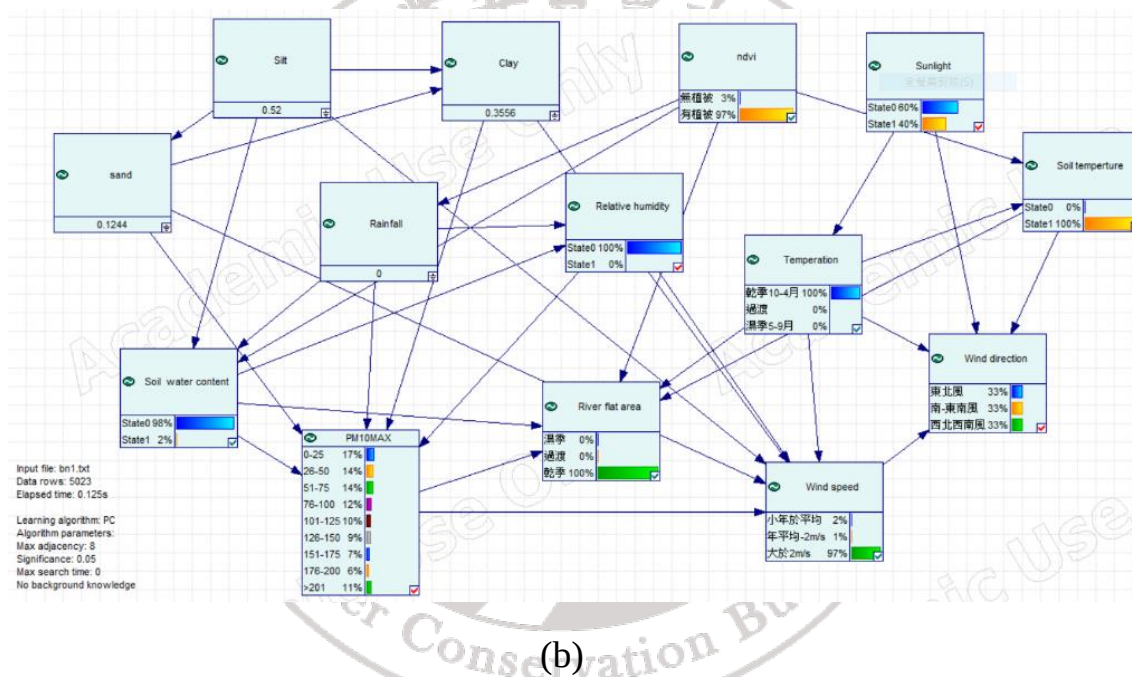
綜合討論中，水蝕評估採 SWAT 模式 2015-2018 年每日平均坡面產砂量計算結果，風蝕評估因貝氏風蝕模式-ISM 中資料變化趨勢相依性不顯著，不同土壤條件情境下，無法反應日最大 PM₁₀ 濃度值出現機率變化，故採貝氏風蝕模式-Dep 模擬之日最大 PM₁₀ 濃度值進行討論。為估算大甲溪下游地區日最大 PM₁₀ 濃度值空間分布，依土壤圖選取下游地區不同土壤類型之點位 4 點，輸入其砂、粉、黏粒百比(表 3-9)，以貝氏風蝕模式-Dep 模擬在不降雨的情況下，日最大 PM₁₀ 濃度值機率分布，如圖 3-18 所示；依其機率分布直方圖計算權重平均，作為不同土壤類型之日最大 PM₁₀ 濃度之代表值(表 3-9)。

表 3-9 大甲溪流域不同土壤類型質地資料

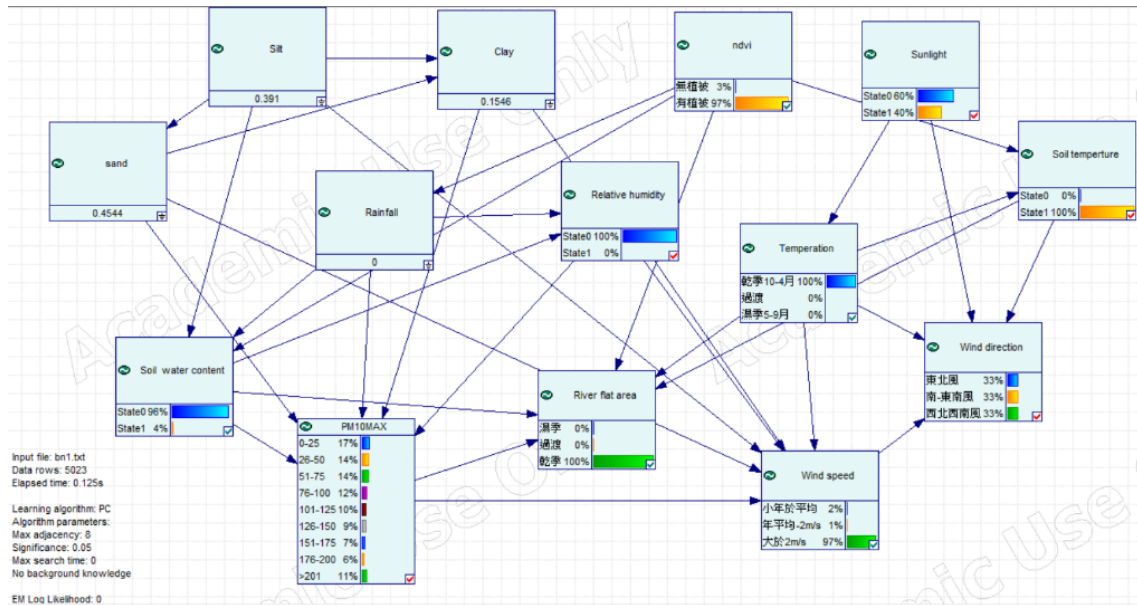
土壤類型	黏粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	砂粒含量 (%)	日最大 PM ₁₀ 濃度 代表值($\mu\text{g}/\text{m}^2$)
沖積土	5.35	13.1	81.45	212.055
黃壤	35.56	52	12.44	82.57
崩積土	15.46	39.1	45.44	82.57
紅壤	4.96	13.6	81.46	190.605



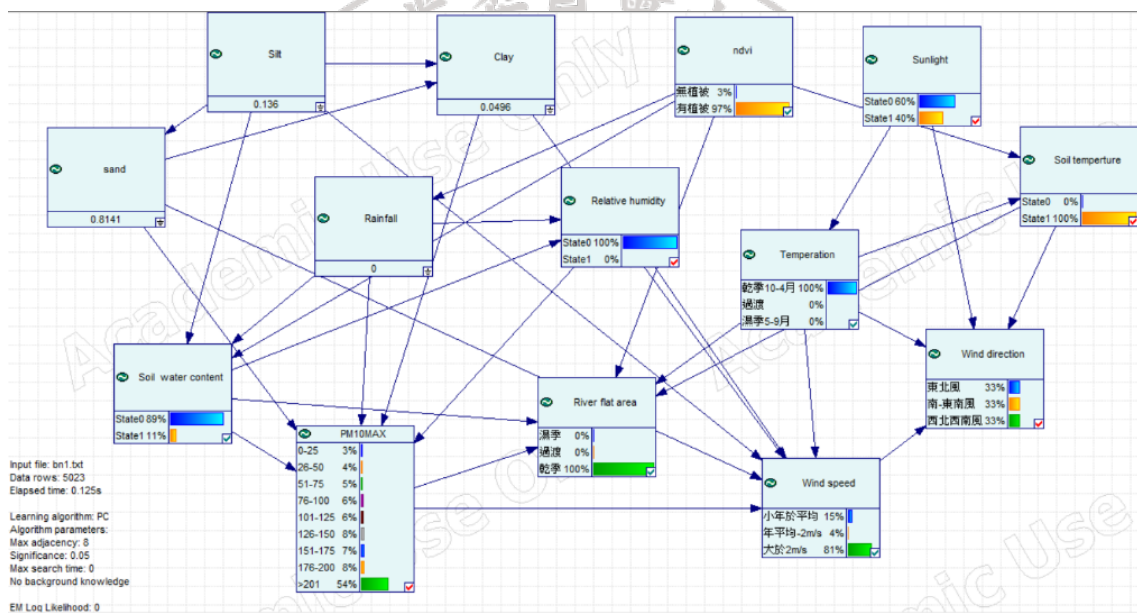
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 3-18 大甲溪下游日最大 PM₁₀ 濃度值機率分布：貝氏風蝕模式-

Dep 模擬結果：(a)沖積土、(b)黃壤、(c)崩積土、(d)紅壤

以上述 4 個點位之日最大 PM₁₀ 濃度值中出現機率最高者為

代表，輸入 ArcGIS 界面之大甲溪流域圖層，使用空間統計運算，以反距加權(或克利金法)進行日最大 PM_{10} 濃度空間分布，並與 SWAT 模式 2015-2018 每各子集水區日平均坡面產砂量分布圖套疊，如圖 3- 19 所示，分別以坡面產砂量高和 PM_{10} 濃度 $>125 \mu g/m^2$ 之區域表示大甲溪流域中水蝕和風蝕作用旺盛，災害風險高之區位，作為規劃土壤保護措施與水砂治理設施之參考依據。

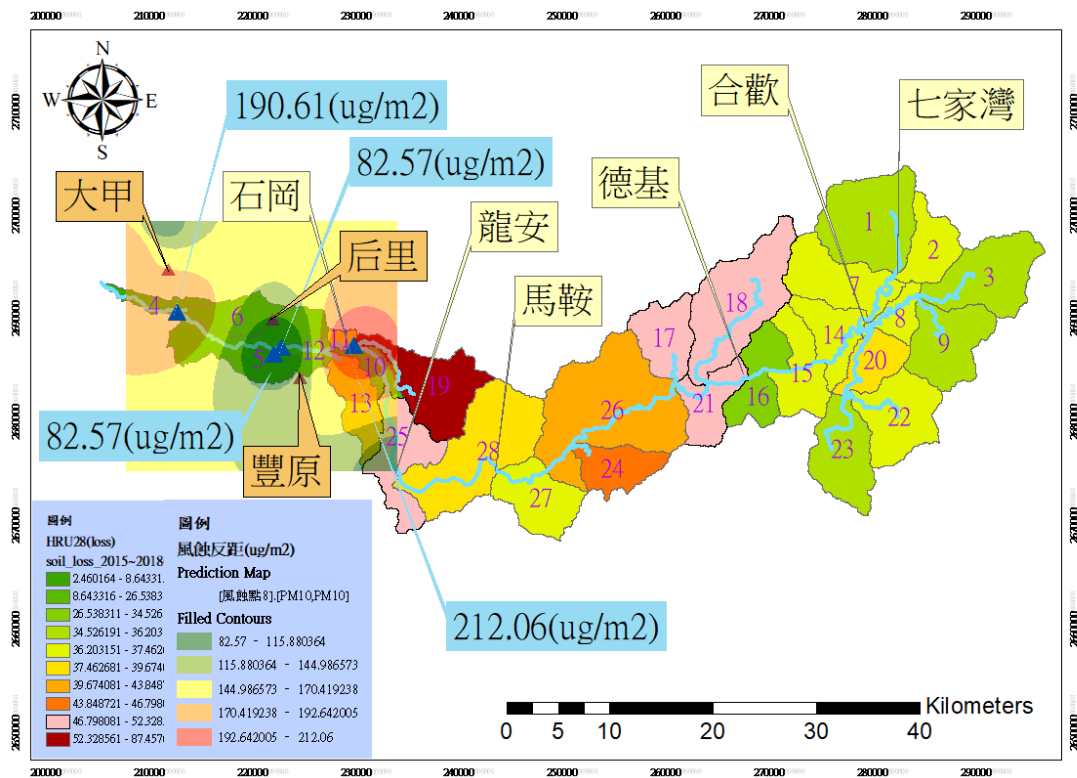


圖 3- 19 大甲溪流域水蝕與風蝕作用量化評估：SWAT 模式和貝氏風蝕模式-Dep 模擬結果

為與後續治理方面結合，本計畫模擬結果得到之水蝕及風蝕和度

分級地區可先與目前已實施的治理工程及其區位套疊，並提出水蝕及風蝕作用較強、但尚無積極治理措施的區位，作為後續分析、治理規劃之參考。以風蝕作用為例(圖 3-20)，目前已實施的治理措施主要位於大甲溪下游大甲溪橋、西濱公路橋等地區；依 2015-2019 年分析結果，揚塵事件日最頻繁者為后里測站，且東北風、北風為最多的風向來源，其揚塵砂源除考量大甲溪外，亦應考量北方之大安溪。

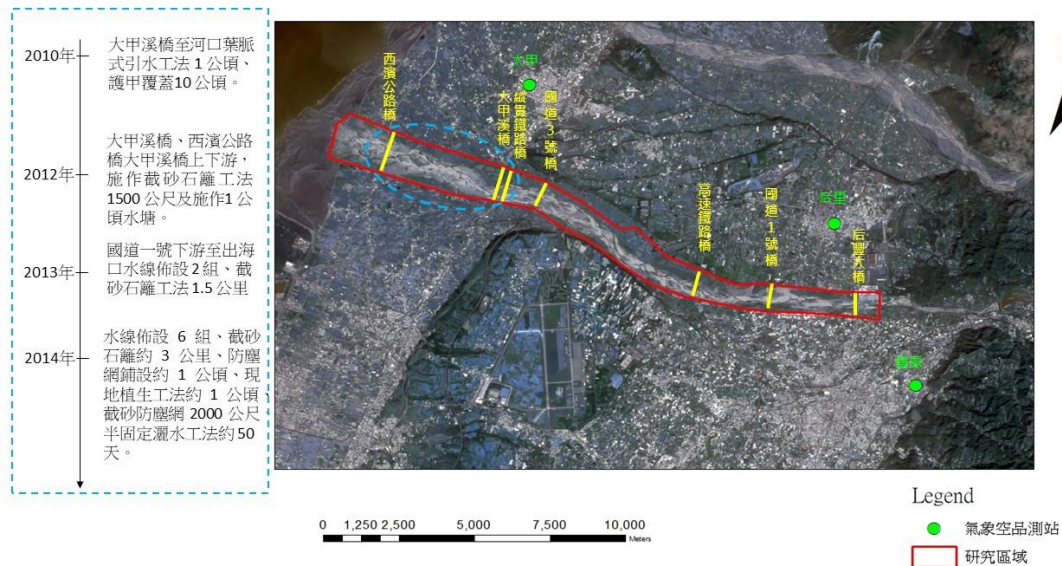


圖 3-20 大甲溪流域風蝕作用與治理措施區位圖

三、成果效益

(一)預期產生之學術成就包括：

1. 完成大甲溪流域水文模式 SWAT 模式建立。
2. 完成大甲溪流域 SWAT 模式率定與驗證，含流域測站流量與輸砂量參數敏感參數分析及率定驗證。

3. 完成以大甲溪流域 SWAT 模式分析該流域水蝕和土砂傳輸變化情形。
4. 完成大甲溪流域下游地區揚塵事件日篩選。
5. 完成大甲溪流域風蝕評估模式建立。
6. 完成大甲溪流域風蝕評估模式率定與驗證，提出敏感參數。
7. 完成大氣土壤分析場於揚塵事件評估之應用。
8. 完成以大甲溪流域風蝕評估模式分析該流域揚塵事件發生機率評估。
9. 完成「整合大氣土壤分析場資訊建構集水區水蝕與風蝕評估模式」成果報告書。
10. 完成國內/國際相關學術研討會論文至少 1 篇。
11. 完成相關學術期刊論文至少 1 篇。

(二)預期產生之促進跨域技術整合效益為：

整合大氣土壤分析場資訊、空氣品質資料於集水區土砂收支與災害評估。

(三)預期產生之促進基礎科學發展效益為：

提出水蝕與風蝕在時間與空間上的關聯性與交互作用，及其對集水區土砂收支的影響。

(四)預期產生之促進前瞻策略擬訂效益為：

提供土壤侵蝕與災害事件評估、預測，及治理對策研擬之參考。

(五)預期產生之研發人才培育效益為：

培育碩士班研究生 2 位。





第四章 結論與建議

第一節 結論

本計畫以台灣中部地區大甲溪流域為研究區域，整合氣象、水文測站監測資料、土壤調查資料、大氣土壤分析場產生的土壤狀態資訊(土壤溫度、濕度)，建構集水區水蝕與風蝕評估模式。研究方法主要使用水文模式 SWAT 進行大甲溪流量與輸砂量之模擬，探討該流域的水蝕情形；在風蝕評估方面，應用氣象、土壤分析場，和空氣品質監測資料進行揚塵事件評估模式建立，分析該流域下游風蝕事件發生機率。計畫成果與結論列述如下：

(一) 由研究資料趨勢圖及統計分析結果發現：水砂監測資料空間分布指出大甲溪流域河川含砂濃度極端值自上游到下游測站增加且差異顯著；表層土壤濕度與雨量觀測資料在時間上的趨勢變化相符，但峰值發生點具些微時間差，且經卡方檢定兩者達顯著相關；PM₁₀濃度與表層土壤濕度在時間上的變化大致呈現相反趨勢，且經統計檢定兩者達顯著相關。

(二) 近年國內應用 SWAT 模式進行之集水區模擬之研究主要針對集水區中上游和水庫上游之區域進行模擬，多未考量水庫操作之影響。本研究將德基水庫與石岡壩流量操作資

料納入大甲溪流域 SWAT 模式建立，並進行多點測站流量敏感參數分析、參數率定及模式驗證結果指出位於德基水庫上游之測站七家灣站模擬結果達滿意程度，合歡站之流量資料與鄰近雨量測站(梨山)降雨量資料無明顯相關變化趨勢，為其模擬結果較不佳之可能原因。德基水庫下游測站中，馬鞍後池及龍安橋的模擬結果較未加入水庫操作資料時為佳，其模擬效率係數值較上游測站為低，但模擬值流量趨勢變化與峰值皆大至與實測值相符，尚屬可接受之範圍，惟峰值較低，基流量較高問題須改善。

(三) 以流量敏感參數與率定結果為基礎，以龍安橋測站輸砂量(推移質)測量資料件為河道輸砂量之模擬目標，其參數敏感度分析、率定及驗證結果指出，SWAT 模式之輸砂量模擬對於推移質大的峰值及大於 10 ton/day 情況之能合理估計，惟輸砂量低之情況有高估情形。以評估降雨及洪峰流量之高流量事件中的輸砂量為目標時，結果尚可應用。

(四) 初步比較農試所(2007)與水保局(2019)的土壤可蝕性係數 K_m 值結果指出，不同土壤類型之可蝕性係數中，水保局率定之 K_m 值大多高於農試所之 K_m 值；由 K_m 值分布地區與土壤圖之土壤類型套疊，屬相同土壤類型之區域範圍內可

能有數個水保局率定 K_m 值，需以權重平均找出代表值，進行後續分析。在 SWAT 模式中設定 K_m 值後，計算坡面土壤流失量，並依龍安橋測站輸砂量進行參數率定與驗證。 K_m 值之比較討論主要影響坡面土壤流失量，作為河道土砂之來源，而河道中的沖蝕和土砂運移，則使用 SWAT 模式中的 Yang' s 方程式進行計算。

- (五) 依 SWAT 模式流量及輸砂量參數率定值，計算各子集水區坡面土砂產量，其結果指率定階段以位於上游七家灣測站附近之 No.8 和 No.20 子集水區、驗證階段以靠近龍安橋測站之 No.19 子集水區，沖蝕作用最為顯著，其坡面產砂作用強，為土壤流失高風險區域。
- (六) 大甲溪流域下游揚塵事件日篩選結果指出，揚塵事件日之發生以后里最為頻繁，其次依序為大甲和豐原；整體而言，揚塵事件日自 2015 年至 2019 年逐漸減少，近年事件日多發生於后里測站。
- (七) 本計畫彙整風蝕事件影響因子共 13 項，包括土壤質地分類、土壤含水量、土壤溫度、河灘地植生覆蓋度、相對溼度、風速、日照時數、氣溫、風向、降雨量、裸露灘地面積、預防管理措施(未放入分析)，和日最大 PM_{10} 濃度等。

分析風蝕和揚塵事件發生機制，探討因果關係並建立因子影響層級；另依各因子監測資料之相依性建立影響層級與關聯性，並分別建立貝氏信賴網絡模式。

(八) 綜整大甲溪流域水蝕與風蝕模擬結果，採 SWAT 模式 2015-2018 年每日平均坡面產砂量計算結果與貝氏風蝕模式-Dep 模擬之日最大 PM_{10} 濃度值模擬結果，繪製坡面產砂量與日最大 PM_{10} 濃度分級地圖，利用圖像熱點，呈現大甲溪流域水蝕和風蝕作用強度區位，作為後續規劃土壤保護措施與水砂治理設施之參考依據。

第二節 建議

本計畫以大甲溪流域為研究範圍，提出集水區坡面沖蝕與河灘地風蝕作用之量化評估方法與模式模擬結果。依計畫成果提出相關建議如下：

- (一) 本計畫假設環保單位檢測值高度(以採樣口高度為代表)已考量該地區風蝕最大濃度高度後設置。進行風蝕模擬時，應檢核採樣口與 PM_{10} 濃度最大值的出現高度最否一致，並考量土地利用進行權重調整。
- (二) 本計畫以貝氏信賴網絡建立之風蝕評估模式著重於評估

因子層級分析與方法論之建立，模式之模擬效率分析與結果驗證為後續研究方向。

(三) 本計畫研究區域為大甲溪流域，水蝕場範圍可依流域劃分；

然就風蝕場而言，流域下游分水嶺界線較不明顯且大安溪緊鄰大甲溪，亦有風蝕現象。惟本計畫中風蝕場分析資料皆採自大甲溪流域內測站，作為該流域風蝕模式建立基礎，未來建議探討風蝕場分析之跨流域影響。

(四) 因水蝕與風蝕在作用力、發生過程、物理機制、土砂粒徑

與土壤狀態等方面之差異，尚未找到完整分析水蝕與風蝕關聯性之文獻，本研究以區域熱點作為分析，對侵蝕熱點以空間圖面展示，未來建議加強對於兩者空間與時間之發生關聯性，利用模擬數據對水蝕與風蝕之濃度進行回歸，並對照相關文獻探討進行探討。

(五) 下游揚塵區之砂源應受其附近坡面之產砂量與河道輸砂

量影響。本計畫初步將空間區位涵蓋下游揚塵區三測站(大甲、后里、豐原)之子集水區(No.4, 5, 6, 11, 12, 13)的坡面產砂量與日最大 PM_{10} 濃度值 2015 至 2018 年之資料進行卡方獨立性檢定，結果指出在有限的資料下，兩者之資料變化趨勢未呈顯著相關，尚需對於二者之物理機制關係

進一步研析。



參考文獻

1. 民生公共物聯網 - 資料服務平台網站，網址：
<https://ci.taiwan.gov.tw/dsp/>
2. 行政院環境保護署，“河川揚塵對中部大氣懸浮微粒影響程度之評估專案工作”，2008。
3. 吳蕙雯，碩士論文，應用 SWAT 模式模擬來社溪集水區土砂與逕流之產出，國立中興大學水土保持學系，2016。
4. 林冠州，碩士論文，應用非點源污染模式 SWAT 模擬翡翠水庫上游集水區流量及氮素之輸出與移動，國立臺灣師範大學地理學系，2017。
5. 林昭遠、蔡淑芬、莊智瑋，“河川揚塵潛在區位之劃定與管理”，中華水土保持學報，39(4)，367-377，2008。
6. 林昭遠、林政侑，“濁水溪下游河段揚塵發生之影響因素”，中華水土保持學報，43(4)，323-331，2012。
7. 林德貴、劉昱麟、黃隆明、劉文宗，“利用 FDM 模式分析河床揚塵-以大甲溪為例”，中華水土保持學報，43(3)，239-258，2011。
8. 施品智，碩士論文，非點源污染與氣候變遷對集水區水質之影響評估，國立聯合大學土木與防災工程學系，2018。

9. 洪于琄、洪景山、蔡佳伶，“高解析土壤資料同化系統之效能評估”，大氣科學，42(1)，29-48，2014。
10. 張君葳，碩士論文，氣候變遷情境下於翡翠水庫集水區之總最大日負荷規劃，國立臺北科技大學土木工程系土木與防災碩士班，2018。
11. 張揚祺、吳韋興、楊振峰，“貝氏網路應用於海底管線風險評析”，台灣海事安全與保安研究學刊，3(6)，19-38，2012。
12. 張寧，”從複雜到結構：詮釋結構模式法之應用”，公共事務評論，8(1)，1-28，2007。
13. 張耀茂，”決策分析與應用方法”，529-540 頁，2019，五南出版社。
14. 郭石柱，碩士論文，揚塵懸浮微粒(PM₁₀)與氣象因子相關性分析-以台東縣關山鎮空氣品質監測站為例，國立中興大學水土保持學系，2009。
15. 陳立宗，碩士論文，翡翠水庫集水區水文暨水質模擬，國立台北科技大學土木與防災研究所，2009。
16. 陳昱愷，碩士論文，中港溪集水區之水庫操作模式與非點源污染影響評估，國立聯合大學土木與防災工程學系，2020。

17. 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪，“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”，中華水土保持學報，40(2)，185-197，2009。
18. 曾筱倩，碩士論文，以貝氏網路為基礎之適性測驗選題策略演算法，國立臺中教育大學教育測驗統計研究所，2008。
19. 黃隆明、蔡易衡，“砂粒運移特性與含水率關係之研究”，中華水土保持學報，47(1)，1259-1272，2015。
20. 經濟部水利署，“河川揚塵防治工法探討與策略評估”，12 月，逢甲大學，2014。
21. 經濟部水利署水利規劃試驗所，“大甲溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究計畫”，12 月，中興工程顧問股份有限公司，2014。
22. 廖啟鈞，碩士論文，SWAT 修正模式應用於台灣多流域之輸砂模擬適宜性評估，國立聯合大學土木與防災工程學系，2020。
23. 盧至美，碩士論文，整合 TUSLE 於 SWAT 模式於小型山區集水區之輸砂模擬-以陳有蘭溪為例，國立聯合大學土木與防災工程學系，2018。
24. Abbaspour, K.C., Johnson, C.A. and van Genuchten, M.T. “Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure,” Vadose Zone Journal, 3, 1340-1352, 2004.

25. Abeyou, W.W., Ayana, E.K., Yen, H., Jeong, J., MacAlister, C., Taylor, R., Gerik, T.J., Steenhuis, T.S. “Evaluating hydrologic responses to soil characteristics using SWAT model in a paired-watersheds in the Upper Blue Nile Basin,” *Catena*, 163, 332–341, 2018.
26. Arias, M.E., Cochrane, T.A., Lawrence, K.S., Killeen, T.J., Farrell, T.A. “Paying the forest for electricity: a modelling framework to market forest conservation as payment for ecosystem services benefiting hydropower generation,” *Environmental Conservation*, 38, 473–484, 2011.
27. Blanco, H. and R. Lal. “Principles of Soil Conservation and Management,” Springer Science, 2018.
28. Chang, C.-T., Harrison, J.F., Huang, Y.-C. “Modeling Typhoon-Induced Alterations on River Sediment Transport and Turbidity Based on Dynamic Landslide Inventories: Gaoping River Basin,” *Taiwan. Water*, 7, 6910-6930, 2015.
29. Fei Chen, Kevin W. Manning, Margaret A. LeMone, Stanley B. Trier, Joseph G. Alfieri, Rita Roberts, Mukul Tewari, Dev Niyogi, Thomas W. Horst, Steven P. Oncley, Jeffrey B. Basara, and Peter D. Blanken, “Description and Evaluation of the Characteristics of the NCAR High-Resolution Land Data Assimilation System,” *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 694–713, 2007.
30. Gassman, Philip W., Reyes, Manuel R., Green, Colleen H., Arnold, Jeffrey G., “The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions,” *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250, 2007.

31. GeNIe Modeler, BayesFusion, LLC, <https://www.bayesfusion.com/>.
32. Li S., Wei H., Liu Y., Ma W.C., Gu Y.W., Peng Y., Li C.X. “Runoff prediction for Ningxia Qingshui River Basin under scenarios of climate and land use changes,” *Acta Ecologica Sinica*, 37(4), 1252-1260, 2017.
33. Li Wei, Chen Xiaohong, He Yanhu, Zhang Lilan, “Modification of Reservoir Module in SWAT Model and its Application of Runoff Simulation in Highly Regulated Basin,” *Tropical Geography*, 38(2), 226-235, 2018.
34. Licciardello, F., Toscano, A., Cirelli, G. L., Consoli, S., and Barbagallo, S. “Evaluation of Sediment Deposition in a Mediterranean Reservoir: Comparison of Long Term Bathymetric Measurements and SWAT Estimations,” *Land Degradation and Development*, 28, 566– 578, 2017.
35. Lin Kairong, Wei Xinping, Huang Shuxian, He Yanhu, “Application of SWAT Model in Dongjiang River Basin,” *Hydrology*, (4), 32-36, 2013.
36. Lu Le-ting, Peng Qiu-zhi, Guo Yuan-yuan, Liu Yinghui , Jiang Yuan, “Runoff Simulation of Dongjiang River Basin Based on the Soil and Water Assessment Tool,” *Journal of Natural Resources*, (10), 1746-1757, 2014.
37. Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R.D., Veith, T. “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.” *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900, 2007.

38. NCAR & UCAR Research Applications Laboratory :
<https://ral.ucar.edu/solutions/products/unified-noah-lsm>
39. Neapolitan, R.E. "Learning Bayesian Networks." Prentice Hall, 2003.
40. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. "Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation," Version 2009, Agricultural Research Service and Blackland Research Centre, Texas A&M University, College Station, TX, 2009.
41. Reich, P., Eswaran, H., Beinroth, F. "Global dimensions of vulnerability to wind and water erosion. In Sustaining the global farm," Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, 1999, 838-846, 2001.
42. Spiegelhalter, D. J., Dawid, A. P., Lauritzen, S. L., Cowell, R. G. "Bayesian analysis in expert systems (with discussion)," Statistical Science, 8, 219-283, 1993.
43. Tamburino V, Barbagallo S, Vella P. "Evaluation of sediment deposition in Sicilian artificial reservoirs," In Hydrology in Mountainous Regions II: Artificial Reservoirs, Water and Slopes, Sinniger RO, Monbaron M (eds). IAHS Publication 194, Lausanne, 113-120, 1990.
44. Tan, M.L., Gassman, P.W., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Yang, X. "A Review of SWAT Studies in Southeast Asia: Applications, Challenges and Future Directions," Water, 11, 914, 2019.
45. Tássia Mattos Brighenti, Nadia Bernardi Bonumá, Fernando Grison, Aline de Almeida Mota, Masato Kobiyama, Pedro Luiz Borges Chaffe, "Two calibration methods for modeling streamflow and

- suspended sediment with the swat model,” *Ecological Engineering*, 127, 103-113, 2019.
46. Wim M. Cornelis, “Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiarid environments,” *Dryland Ecohydrology*, 141-159, 2006.
47. Wu, Y., Chen, J. “Science of the Total Environment Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River Basin in southern China,” *Science of the Total Environment*, 441, 159–168, 2012.
48. Yang Hongwei, Xu Chongyu, “Effect of LUCC on runoff of three representative watersheds in Dongjiang River Basin,” *Journal of Lake Sciences*, 23(6), 991-996, 2012.





附錄

附錄一、計畫提審審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	本研究擬結合SWAT模式與HRLDAS模式及風蝕評估模式，進行集水區水蝕與風蝕評估，建議詳細探討如何決定或檢定模式中所需要的參數。	水蝕評估部分，本計畫將於工作項目 3.(2)小節探討如何決定 SWAT 模式中之需要參數，並說明參數率定方法及結果；風蝕評估部分，本計畫將 HRLDAS 模式產出之土壤分析場資料視為已知輸入值，配合其他氣象與空氣品質監測資料建立風蝕評估模式，相關參數之決定或檢定將於工作項目 4.(2)、4.(3)等小節說明。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	進行SWAT模式推估土砂收支時，有關土壤沖蝕相關參數，建議可利用水保局最新律定之R值與K值進行交互律定與驗證。	建立 SWAT 模式之土壤沖蝕相關參數中的 K 值之決定係配合土系與其他土壤特性，依不同土系分群輸入，再依各地區之土壤圖決定土系並使相關土壤參數(包含 K 值)；本計畫將先以農業試驗所土壤資料供應查詢平台獲得之土壤資料作為輸入值，建立 SWAT 模式並進行模式率定後，於工作項目 3.(3)小節與使用水保局最新率定之 K 值的 SWAT 模式模擬結果進行比較討論。在 R 值部分，因 SWAT 模式使用修正土壤流失公式(MUSLE)計算土砂流失量，其原 USLE 公式之 R 值已取代為與逕流量

項次	審查意見	回覆辦理情形
		Q 相關之參數，不宜直接與最新率定的 R 值比較；將納入後續研究參考方向之一。



附錄二、期初審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	本計畫擬結合 SWAT 模式，大氣土壤分析場 (HRLDAS) 模式以及風蝕評估模式來探討大甲溪流域之水蝕和風蝕之評估。研究議題、方法新穎，值得肯定。	謝謝委員意見。
二	本計畫所使用之模式，都源自美國，這些模式在研發時，採用了美國的參數。這些模式若使用在臺灣(特別是在大甲溪流域)，建議先評估適用性，並建立本土參數。	本計畫主要使用水文模式SWAT進行大甲溪流量與輸砂量之模擬，參考近年國內應用SWAT模式進行之相關研究如《氣候變遷情境下於翡翠水庫集水區之總最大日負荷規劃》(張君葳，2019)、《整合TUSLE於SWAT模式於小型山區集水區之輸砂模擬-以陳有蘭溪為例》(盧至美，2018)、《應用非點源污染模式SWAT模擬翡

項次	審查意見	回覆辦理情形
		翠水庫上游集水區流量及氮素之輸出與移動》(林冠州，2017)，和《應用SWAT模式模擬來社溪集水區土砂與逕流之產出》(吳蕙雯，2016)等，評估該模式在臺灣的適用性。且在SWAT模式中，使用的土壤相關參數使用(如土壤圖等)和土地利用資料皆由國內相關單位調查之資料輸入；而氣象因子、坡度等使用本土實測資料，並參考國內研究的參數範圍進行率定，故模式建立以本土資料和參數為基礎，經適當參數率定與模式驗證後，應能反應大甲溪流域流量及輸砂之變化，進行評估。(詳如2-9至2-11頁)
三	本計畫選擇大甲溪流域為研究場址。請考量大	本計畫參考近年國內應用 SWAT 模式相關研究和國際對 SWAT 模

項次	審查意見	回覆辦理情形
	甲溪流域的特殊性，例如流域面積大、高差大、上游至下游水庫(或壩體)多、坡度陡、大型塊石多(未必全是土壤)、逕流模式複雜(未必遵循層流，Laminar Flow之行為，曼寧公式未必適用).....等。因此，如何處理這些問題，請納入計畫說明。	式應用案例的回顧文獻，如 Gassman et al. (2007)和 Tan et al. (2019)等，評估 SWAT 模式應用於大甲溪流域的適宜性和限制，並納入計畫說明，如下所示： 流域面積大-大甲溪流域面積約為 1244km²，於國內應用 SWAT 模式進行分析的流域案例中，面積較大；根據 Gassman et al. (2007)之 SWAT 模式應用回顧文獻，使用該模式進行分析的流域面積範圍由小於 1km² 至 491,700km²；根據 Tan et al. (2019)對東南亞地區 SWAT 模式應用的回顧文獻，流域面積範圍由小於 100km² 至大於 100,000km²，其中流域面積為 1001km² 至 5000km² 的案例高達 30%以上，大甲溪流

項次	審查意見	回覆辦理情形
		域(面積 1244km²)就面積大小而言屬 SWAT 模式合理應用範圍。 高差大、坡度陡-在 SWAT 模式中，水文反應單元(hydrologic response unit, HRU)為子集水區內的最小計算單元，以土地利用、土壤、坡度等資料套疊後的特定組合分割而成，因此高差大的因素在分割 HRU 時即有考慮；尤其在以 MUSLE 公式計算時能反應坡度變化對土壤流失的影響。 大型塊石多-在 SWAT 模式中，可輸入含石量比例，本計畫中無實際調查資料，目前不考慮大型石塊，只考慮坡面土壤流失及河道中土砂傳輸過程。 壩體多-本計畫考慮主要影響模式模擬結果之水工構造物，即德

項次	審查意見	回覆辦理情形
		基水庫和石岡壩，使用 SWAT 模式中的水庫模組建立模式，探討其對流量與輸砂之影響。 逕流與流量模擬：考量集水區流況特性，SWAT 模式在坡面使用 SCS 逕流曲線，在河道內採用曼寧公式進行逕流與流量模擬，其結果在德基水庫上游地區尚屬滿意(日流量 NS 值達 0.5 以上)，下游測站結果稍不理想，為未來改善方向之一。(詳如 2-9 至 2-11 頁)
四	有關研究成果的驗證，例如，大甲溪流域之流量及含砂量之驗證，應考量其時空關係。例如流量和含砂量，在空間上和時間上，其變異可能甚大，建議納入考量。	本計畫以數個流量測站(分布於德基水庫上、下游與石岡壩之間)資料進行模式率定與驗證，其成果可探討流量及含砂量在空間上的變化與關係；流量與含砂濃度變化採用自 2013 至 2018 年資料，模擬日流量、月流量，以及月含砂

項次	審查意見	回覆辦理情形
		濃度的變化情形，可進行時間變化的探討；綜整兩者結果可探討大甲溪流域流量與含砂量的時空關係。(詳如 4-3 頁)
五	在建議(三)中(工作執行計畫書 4-2 頁)，未來想利用 SWAT 模式完成後之結果與水保局最新率定之 K 值的 SWAT 模式模擬結果進行比較。請考量水保局最新率定之 K 值，主要是反應坡面沖蝕之土壤性質參數，於渠道或河道的沖蝕是否適用，請說明。	本計畫中對於 K 值之比較方法說明如下： (1) 建立 SWAT 模式時，坡面土壤沖蝕與流失量計算採用 MUSLE 公式，其中的 K 值係依大甲溪流域之土壤圖，對應 SWAT 資料庫中的土壤類型決定，並進行後續計算。 (2) 使用水保局最新率定的 K 值，乃依 K 值分布地區與土壤圖之土壤類型套疊，計算不同土壤類型的代表 K 值，將 SWAT 資料庫中土壤類型的 K 值更改為依水保局率定

項次	審查意見	回覆辦理情形
		結果的代表 K 值，並進行後續計算。 以上述兩種方式設定 K 值後，計算坡面土壤流失量，並進行結果比較；故 K 值之比較討論僅影響坡面土壤流失量，作為河道土砂之來源，而河道中的沖蝕和土砂運移，則使用 SWAT 模式中的 Bagnold 或 Yang 方程式進行計算。(詳如 3-35 至 3-37 頁)
六	針對SWAT 模式中，水庫操作可能影響流量率定結果之問題，後續擬如何改善，請提出說明。	本計畫考慮主要影響模式模擬結果之水工構造物，即德基水庫和石岡壩，使用 SWAT 模式中的水庫模組建立模式，探討其對流量與輸砂之影響。
七	目前風蝕與水蝕模式二者係為分別模擬與評估，後續二者如何整併	本計畫主要使用水文模式 SWAT 進行大甲溪流量與輸砂量之模擬，探討該流域的水蝕情形；使用

項次	審查意見	回覆辦理情形
	或串聯其成果，宜提出構想。	HRLDAS 模式產出之土壤濕度資料和其他風蝕影響因子，以揚塵事件發生機率作為大甲溪流域下游地區風蝕情形之評估目標。在評估揚塵事件發生機率時，已將水蝕相關因子，如流量、河灘地面積等納入，進行整體評估。二者之整併與成果串聯將依據評估結果，繪製水蝕程度分級(土壤流失量、含砂量)與風蝕分級(揚塵事件發生機率)地圖，進行時空分析討論。(詳如 4-3 頁)
八	本計畫所採水蝕模式為小流域適用，若應用於大甲溪，因其條件複雜，恐較難評估。	本計畫係採用 SWAT 建立大甲溪流域水蝕模式，經回顧近年應用 SWAT 模式之相關案例及成果。例如：Gassman et al. (2007) 之 SWAT 模式應用回顧文獻，使用該模式進行分析的流域面積範圍

項次	審查意見	回覆辦理情形
		由小於 1km² 至 491,700km²；根據 Tan et al. (2019)對東南亞地區 SWAT 模式應用的回顧文獻，流域面積範圍由小於 100km² 至大於 100,000km²，其中流域面積為 1001km² 至 5000km² 的案例高達 30% 以上，大甲溪流域(面積 1244km²)就面積大小而言，應屬 SWAT 模式適用範圍。 在 SWAT 模式中，藉由土地利用、土壤、坡度等資料套疊後的特定組合，將集水區分割為多個水文反應單元 (hydrologic response unit, HRU)，作為最小單元進行計算，應可反應集水區複雜條件。 (詳如 2-9 至 2-11 頁)

項次	審查意見	回覆辦理情形
九	水蝕模式所擬採用之相關大氣參數及率定情形，仍不明確；請加強說明。	SWAT 模式採用實測氣象資料，如降雨量(mm/day)、平均風速(m/s)、日最高溫度及最低溫度(攝氏)、日照強度(MJ/m ²)，和平均相對濕度(%)等計算天氣資料相關統計量，未涉及大氣參數使用及率定；其中使用降雨量資料計算逕流量，影響計算坡面土壤流失量的 MUSLE 公式中流量峰值，其他氣象因子則屬作物生長模擬之必要資料。(詳如 2-9 至 2-11 頁)

項次	審查意見	回覆辦理情形
十	研究區域資料收集包括衛星影像資料、水砂監測資料、雨量資料、土壤分析場HRLDAS 資料，資料內容稍嫌不足，建議補充測站資料趨勢圖等更多參考資料，及研究區域與使用相關測站的示意圖。	已將研究域區收集之水砂監測資料、雨量資料、土壤分析場HRLDAS 資料及其變化趨勢以圖表呈現，如圖 2-9 至圖 2-14、圖 3-1 至圖 3-7 所示，使用測站示意圖如圖 2-5 所示。
十一	建議補充說明本研究使用的檢定方式，與其數值大小反應模擬結果所代表的成效為何？	本計畫使用 Nash 效率係數(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)作為評估模式模擬結果之主要統計量；根據文獻(Moriasi et al. 2007), 偏差百分比(percent bias, PBIAS)和均方根誤差對測量值樣本標準差的比值(RSR)亦可作為判斷模式模擬效能之統計量；三者之定義計算公式如 3-29 至 3-30 頁所示。

項次	審查意見	回覆辦理情形
		模式模擬結果之 $NSE > 0.50$ 且 $RSR \leq 0.70$，且流量模擬 PBIAS 在$\pm 25\%$內、含砂濃度模擬 PBIAS 在$\pm 55\%$內為模擬結果達滿意之標準(Moriasi et al. 2007)。(詳如 3-29 至 3-35 頁)
十二	建議將揚塵發生日與降雨或流量較小發生日共同比對篩選，先針對較有可能發生揚塵的情境做模擬。	本計畫揚塵事件發生日之篩選基準係參考行政院環境保護署(2008)計畫成果，詳如圖 2-7。 主要考量 PM10 濃度、沙塵暴事件、降雨日、平均風速、揚塵粒徑比例等；降雨因子已納入。 為探討流量/水位對揚塵事件發生之影響性，進行下列資料檢定： 因揚塵事件好發區域主要為大甲溪下游地區，以篩選揚塵事件日使用的空品測站(大甲、后里、豐原)為參考點，其附近的水文測站

項次	審查意見	回覆辦理情形
		(大甲、后豐橋)無流量監測資料，故以水位監測資料為參考。將水位資料依是否為揚塵事件日者分群，並將揚塵事件日之水位資料與非揚塵事件日之水位資料進行統計檢定(t-檢定)，檢定結果並無顯著差異。因此，經前述驗證，本計畫仍優先採用保護署 2008 年所提出揚塵事件發生日篩選基準，進行後續研究分析。(詳如 3-39 至 3-40 頁)
十三	建議嘗試不同時間尺度，並以各項影響顯著的參數比對，來提升模擬結果。	本計畫中，SWAT 模式對研究區域流量與含砂濃度模擬採用自 2013 至 2018 年資料，模式建立後進行全時段(2013 至 2018 年)初步參數率定及敏感度分析，找出影響顯著之敏感參數，續進行模式參數率定與模式驗證。考量監

項次	審查意見	回覆辦理情形
		測資料採樣頻率，流量模擬以月和日等兩種時間尺度進行；含砂濃度以月作為模擬的時間尺度，探討其變化。(詳如 4-3 頁)



附錄三、期中審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	本期中報告於各項背景資料、風蝕模式、水蝕模式之資料收集年度、期間不一，未來整合及對照時衍生困擾。	本計畫以大甲溪流域為研究區域，使用 SWAT 水文模式與貝氏信賴網絡分別進行水蝕評估與風蝕評估。SWAT 模式使用之資料收集年度為 2012 至 2018 年，貝氏信賴網絡使用之資料收集年度為 2015 至 2019 年，以 2015 至 2018 年的評估結果進行綜合討論，其他年份結果作為參考。
二	SWAT 文獻仍多為大陸及國外，土地利用及氣象均差異大，參考性較不佳。	已新增國內使用 SWAT 模式相關研究之文獻，詳如 3-11 至 3-14 頁。
三	大甲溪上、中、下游坡度差異大，沖蝕土砂粒徑亦隨之變化，且塊石未納入，影響分析成果。	對於大甲溪流域的 SWAT 模式適宜性和限制評估，已納入計畫說明，簡述如下： 上、中、下游坡度差異大，沖蝕土

項次	審查意見	回覆辦理情形
		砂粒徑隨之變化-在 SWAT 模式中，以水文反應單元(hydrologic response unit, HRU)為子集水區內的最小計算單元，使用土地利用、土壤、坡度等資料套疊後的特定組合分割而成，因此高差大與土壤相關參數在分割 HRU 時即有考慮；尤其在以 MUSLE 公式計算時能反應坡度變化對土壤流失的影響。 塊石未納入-在 SWAT 模式中，可輸入含石量比例，本計畫中無實際調查資料，目前不考慮大型石塊，只考慮坡面土壤流失及河道中土砂傳輸過程。塊石之影響納入誤差討論之可能原因。 (詳如 2-9 至 2-11 頁)

項次	審查意見	回覆辦理情形
四	目前水庫僅納入德基及石岡，恐因此導致德基下游兩測站所得結果差異明顯。	考量資料取得與完整性，本計畫中 SWAT 模式中，以德基及石岡為主要之水資源設施；使用之下游兩測站為馬鞍後池、龍安橋，皆位於德基水庫與石岡壩之間，其水文量受水庫操作影響。此外，馬鞍後池之流量資料與鄰近雨量測站(白冷)之降雨量資料無明顯相關變化趨勢，為結果差異明顯原因之一。
五	風蝕區域已在相當下游區域，且考量之粒徑與水蝕差異大，未來之整合方式宜予考量。	考量水蝕與風蝕模式發生區域、資料測站位置，和土砂粒徑等方面方差異，本計畫使用 SWAT 水文模式與貝氏信賴網絡分別進行水蝕評估與風蝕評估，並針對評估結果年份相同之期間(2015 至 2018 年)進行綜合討論。詳如 3-64 至 3-68 頁。

項次	審查意見	回覆辦理情形
六	HRLDAS 模式分析結果有四層土壤，其中圖 3-1 至 3-4 僅觀察最表層 5cm 的第一層土壤濕度與降雨量之關係，不知其他三層之趨勢如何？且後續係採那幾層土壤之濕度資料進行風蝕評估？	本計畫中，彙整 HRLDAS 模式分析結果之四層土壤的溫度與濕度變化時間序列如圖 2-9 至圖 2-14 所示。由土壤濕度時間序列(圖 2-12 至圖 2-14)看來，前三層土壤濕度(smois_1、smois_2、smois_3)隨時間之變化趨勢一致，但表層土壤濕度(smois_1)之變化幅度最大，且濕度變化幅度隨土壤深度增加而減少；第四層土壤濕度(smois_4)隨時間之變化較前三層穩定，且受降雨影響小，但亦可能與前三層之變化趨勢相當。考量表層土壤濕度為影響土砂揚起之主要因子之一，在風蝕模式中，採第一層土壤之濕度資料納入評估。
七	目前水蝕模式係採	風蝕模式之貝氏信賴網絡及其量

項次	審查意見	回覆辦理情形
	SWAT模式進行量化計算，風蝕模式是否能有量化之數值，且最終成果風蝕及水蝕之量化成果如何串接，期待期末報告時能有較明確之成果。	化評估成果詳見 3-63 至 3-64 頁，水蝕與風蝕評估成果之綜合討論詳見 3-64 至 3-68 頁。
八	SWAT 模式最後率定成果較佳之參數,請附註於附錄供參。	已將 SWAT 模式最後率定成果較佳之參數表列如表 3-3 和表 3-4 所示。
九	P3-31 SWAT 模式對於七家灣及合歡站模擬成果不佳，可能的原因為何？	SWAT 模式對於七家灣站之水文量模擬NSE值於率定及驗證期間達 0.5 及 0.47，為合理之模擬成果；合歡站之之水文量模擬較不佳，其流量資料與鄰近雨量測站(梨山)之降雨量資料無明顯相關

項次	審查意見	回覆辦理情形
		變化趨勢，為主要原因之一。
十	P4-2如採用水保局率定之K值，是否可直接使用以空間位置查得或平差之結果，而無需再去區分土壤類型？	在 SWAT 模式中，土壤相關之參數(如質地、可蝕性係數 K 值、透水性等)，係以土壤類型為區分；坡面土壤沖蝕與流失量計算採用 MUSLE 公式，其中的 K 值依大甲溪流域之土壤圖，對應 SWAT 資料庫中的土壤類型決定，故使用水保局最新率定的 K 值時，仍需依 K 值分布地區與土壤圖之土壤類型套疊，以權重平均計算不同土壤類型的代表 K 值，取代 SWAT 資料庫中土壤類型的 K 值，進行後續計算。

項次	審查意見	回覆辦理情形
十一	目前SWAT模式僅用流量來率定參數，是否需要再以含砂量來率定參數？	本計畫以 SWAT 模式進行水文量擬與水蝕評估，其中水蝕評估之模擬效率以水體含砂量作為評判標準，且因影響水體含砂量與影響流量的敏感參數不盡相同，故先進行流量率定後，再加入含砂量資料率定土砂相關參數。
十二	P4-3 所述，流量模式目前僅以月和日作為時間尺度，而含砂濃度係以月為模擬之時間尺度，對於實際應用而言，是否過於粗略？	本計畫中，SWAT 模式對於流量與含砂濃度之模擬皆以日為時間尺度，因含砂濃度測站資料平均頻度為每月一筆，進行資料擬合時依測量日期當日之含砂濃度為準。已修改內文說明如 3-41 頁所示。
十三	研究區域為大甲溪流域，一般而言可視為該流域地表水為水蝕場，不過對於風蝕場而言，	本研究以大甲溪流域為研究區域及範圍，進行其水蝕與風蝕評估。其中風蝕場分析資料皆採自大甲溪流域內之測站，作為該流域風

項次	審查意見	回覆辦理情形
	越往流域下游為西部沖積平原，分水嶺界線較不明顯，另大安溪也緊鄰大甲溪，風蝕場是否跨流域影響建議加強補充說明。	蝕模式建立基礎，已將風蝕場之跨流域影響納入後續研究建議(詳見 4-4 至 4-5 頁)。
十四	研究使用之SWAT模式運用MUSLE公式，建議於研究方法列出MUSLE 公式並說明，另建議製表加以說明各項輸入參數之參考來源與數值、和率定參數之參考來源與數值。	已增加 MUSLE 公式及相關輸入參數說明如表 3-6，詳見 3-46 至 3-48 頁。
十五	揚塵事件發生日之篩選流程圖所列之各項基準，建議加強說明。	揚塵事件發生日之篩選各項基準說明如下：(詳如 2-15 頁) 1. 找出各測站歷年 PM ₁₀ 事件日 (PM ₁₀ >125μg/m ³)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
		2. 扣除沙塵暴事件日及非沙塵暴長程傳輸事件日。由於是觀測河川揚塵事件，因此將因沙塵暴引起 PM_{10} 過高的情況刪去。 3. 扣除降雨天。 4. 所剩下事件日取各測站之年平均風速，將風速大於年平均風速者先歸類於河川揚塵事件日。 5. 被歸類為河川揚塵事件日只需再以 $PM_{10-2.5}/PM_{10}$ 之比值(此比值需大於 0.4)、日平均風速、午時平均風速(12:00~17:00)、風向及天氣型態來驗證、再刪除不含合理者。(日平均風速與午時平均風速兩者至少需有一項需大

項次	審查意見	回覆辦理情形
		於 2m/s;大部分南風及東南風不易形成河川揚塵亦予以刪除)。 6. 被歸類為非河川揚塵事件日者，若其 PM_{10-25}/PM_{10} 之比值大於 0.4，且日平均風速或午時平均風速兩者有一項需大於 3m/s 者，則移至河川揚塵事件日。
十六	研究擬探討水蝕與風蝕之時空間關聯性，及其對土砂收支的影響，是本研究的重點目標之一，但是文獻方面缺乏相關的回顧，研究方法中也是分開敘述水蝕與風蝕的部分，建議加強水蝕與風蝕關聯性探討	因水蝕與風蝕在作用力、發生過程、物理機制、土砂粒徑與土壤狀態等方面之差異，尚未找到完整探討水蝕與風蝕關聯性之文獻，對於兩者關聯性與研究方法之探討已納入後續研究建議(詳見 4-4 至 4-5 頁)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
	的文獻回顧與使用的研究方法。	



附錄四、期末審查意見回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
一	建議後續對坡面產砂量對下游揚塵區影響研究。	下游揚塵區之砂源應受其附近坡面之產砂量與河道輸砂量影響。 本計畫初步將空間區位涵蓋下游揚塵區三測站(大甲、后里、豐原)之子集水區(No.4, 5, 6, 11, 12, 13)的坡面產砂量與日最大PM₁₀濃度值2015至2018年之資料進行卡方獨立性檢定，探討坡面產砂量與日最大PM₁₀濃度值的時間序列資料是否具有相依關係，卡方檢定結果達顯著相關。然而，檢定結果僅代表在有限的資料下，兩者之資料變化趨勢未呈顯著相關，尚需對於二者之物理機制關係進一步研析，故納入後續研究建議。 (詳見4-4至4-5頁)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
二	風蝕最大濃度高度與環保單位檢測值高度需要先一致，不同監測點的土地利用分佈也不一樣，建議先做權重調整。	本計畫採用之三測站中，中央單位的豐原測站高度為12m，濃度採樣口高度為16.5m。大甲與豐原測站為台中市環保局所設置，依其設置原則，採樣口高度為距地面3~15m，且需考量採樣口與建築物或周圍障礙物之距離。測站附近之土地利用類型方面，后里和豐原測站為居住用地，大甲測站較靠近農業用地。依上述資料，本計畫假設環保單位檢測值高度(以採樣口高度為代表)已考量該地區風蝕最大濃度高度後設置。檢測採樣口與PM₁₀濃度最大值出現高度之檢核，以及土地利用之考量與權重調整納入後續研究建議。(詳見4-4至4-5頁)。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	模擬結果得到水蝕及風蝕作用較強區位，後續如何與治理方面結合？	為與後續治理方面結合，本計畫模擬結果得到之水蝕及風蝕和度分級地區宜先與目前已實施的治理工程及其區位套疊，並提出水蝕及風蝕作用較強、但尚無積極治理措施的區位，作為後續分析、治理規劃之參考。以風蝕作用為例，目前已實施的治理措施主要位於大甲溪下游大甲溪橋、西濱公路橋等地區；依 2015-2019 年分析結果，揚塵事件日最頻繁者為后里測站，且東北風、北風為最多的風向來源，其揚塵砂源除考量大甲溪外，亦應考量北方之大安溪，故已將風蝕場之跨流域影響納入後續研究建議(詳見 3-68 至 3-69 頁、4-4 至 4-5 頁)。