

應用趨勢分析探討氣候變遷下太麻里流域的水文變化

Application of Trend Analysis to Explore Hydrological Change under Climate Change in the Taimali Stream Basin

宋健豪^a

廖學誠^b

Jian-Hao Sung Shyue-Cherng Liaw

Abstract

Due to the climate change and the extreme weather events, the precipitation in Taiwan has changed very dramatically. The hydrological conditions in a basin are highly related to the weather. In order to identify the effect of the climate change, we assess annual, seasonal and monthly trends of precipitation from 1981 to 2012, stream runoff from August in 1983 to July in 2009, and sediment load from 1984 to 2008 in the Taimali stream basin using the Mann-Kendall trend test and the Theil-Sen slope test. The results show that the precipitations of annual, wet period, autumn season, and in August have significant increasing trends. The τ values are 0.29, 0.27, 0.25, and 0.23, respectively. The stream runoffs of annual and autumn season also have significant increasing trends. The τ values are 0.27 and 0.24, respectively. In addition, the sediment loads of annual, wet period, and autumn season also have significant increasing trends. The τ values are 0.27, 0.25, and 0.25, respectively. Through the trend analysis, we can identify that the hydrological conditions in the Taimali stream basin are strongly affected by the climate change. It causes the annual precipitation, stream runoff, and sediment load significantly increasing, especially for the autumn season and wet period with obvious increasing trend.

Keywords: Climate Change, Sediment Load, Mann-Kendall test, Theil-Sen Slope test

摘要

受到氣候變遷與極端氣象事件所影響，近年來臺灣地區的降雨量變化趨勢有顯著的改變。河流域內之水文條件與氣候息息相關，為了探討氣候變遷對於水文條件之影響，本研究應用 M-K

^a 國立臺灣師範大學地理學系博士班研究生，通訊作者（E-mail: janhow07@gmail.com）

PhD Student, Department of Geography, National Taiwan Normal University. Corresponding Author.

^b 國立臺灣師範大學地理學系教授

Professor, Department of Geography, National Taiwan Normal University.

趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定，探討太麻里溪流域內 1981 年至 2012 年之降雨量、1983 年 8 月至 2009 年 7 月之逕流量及 1984 年至 2008 年之輸砂量的變化趨勢。研究結果顯示，年降雨量、秋季降雨量、豐水期降雨量以及八月降雨量皆呈現顯著增加之趨勢，其 τ 值分別為：0.29、0.25、0.27 以及 0.23；年逕流量及秋季逕流量亦呈現顯著增加，其 τ 值分別為：0.27 與 0.24；此外，年輸砂量、秋季輸砂量以及豐水期輸砂量也呈現顯著增加，其 τ 值分別為：0.28、0.25 與 0.25。透過趨勢檢定可以發現，氣候變遷對於太麻里溪流域之水文變化具有相當影響力，造成年降雨量、年逕流量與年輸砂量皆呈現顯著增加趨勢，尤其是集中於秋季及豐水期期間，增加趨勢更是明顯。

關鍵詞：氣候變遷、輸砂量、Mann-Kendall 趨勢檢定、Theil-Sen 斜率檢定

前言

近年來受到氣候變遷的影響，臺灣的降雨型態已略有改變，河川的逕流量與輸砂量也有相當程度的劇烈變化。根據政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告指出（IPCC, 2014），東亞地區受到氣候變遷影響，降雨量在未來有越加集中的變化趨勢，強降雨事件發生頻率亦有可能增加。氣候變遷對環境之影響，不僅限於大氣，對於流域內的水文特性亦具有相當顯著的衝擊，尤其是降雨型態的改變會影響到流域的逕流量及輸砂量（Shirazi *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2017）。Gao and Xie（2016）指出，降雨量是影響逕流量變化的主要原因。此外，許多研究也顯示出，氣候變遷已經明顯地影響到河川的輸砂量（Jiang *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2017）。綜上所述得知，地表流域水文特性如降雨量、逕流量及輸砂量深受氣候變遷所影響。

一般而言，探討水文特性的變化狀況時，Mann-Kendall 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定是最被廣泛使用的方法之一，因為相較於其他趨勢檢定，M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定皆具備較不受極端值影響之特性，因此，被普遍應用於各種時間序列分析上，包括降雨量、逕流量及輸砂量等資料。

首先，在降雨量方面，Gao and Xie（2016）透過 M-K 趨勢檢定分析長江流域內 140 個氣候站，資料為 1960 年至 2011 年之每年 1 日最大降雨量、7 日最大降雨量、30 日最大降雨量及年降雨量，並將 1960 年至 1980 年定義為前氣候變遷期，1981 年至 2011 年定義為後氣候變遷期，研究結果指出，在後氣候變遷期整體降雨量呈現顯著的增加趨勢，極端降雨事件也呈現顯著的增加趨勢，此現象可能會導致洪水災害事件。此外，Pakalidou and Karacosta（2017）應用 M-K 趨勢檢定分析希臘 Thessaloniki 地區 1892 年至 2015 年之月降雨量、季節性降雨量以及年降雨量，透過分析長時間的降雨觀測資料，找出希臘地區因氣候變遷而造成的降雨變化趨勢，得知在 Thessaloniki 地區觀測期間，雖然月降雨量、季節性降雨量及年降雨量之 Z 值皆未達 95% 信心區間，未呈現顯著的變化趨勢，但透過降雨事件分析則發現，近年來在 Thessaloniki 地區的極端降雨事件較以往多出許多。另外，Yang *et al.*（2017）透過連續小波轉換、M-K 趨勢檢定以及 Theil-Sen 斜率分析，探討中國西北部 96 個氣象站從 1960 年至 2013 年之降雨資料，透過長期區域性的降雨量趨勢分析，找出氣候變遷下中國西北部的降雨量的時空變化，發現中國西北部整體之降雨量呈現顯著的增加變化趨勢，降雨量變化主要始於 1980 年代中期以及 1990 年代中期，除研究區之西北部降雨量呈現減少趨勢外，其他多數測站之降雨量皆呈現顯著增加趨勢。

其次，在逕流量方面，Wu *et al.* (2017) 應用 M-K 趨勢檢定以及 Theil-Sen 斜率檢定，探討中國長江流域喀斯特地區 1984 年至 2015 年之逕流量變化趨勢，研究結果指出，在 1984 年至 2015 年間研究區域內之降雨量及逕流量無顯著的變化趨勢，但流域內的蒸散量卻明顯的減少，此外，研究區域內降雨量對於逕流量變化的影響相當大，相較於氣候，人為活動對研究區域內逕流量的影響反而較弱。另外，Shirazi *et al.* (2016) 應用 SCS-CN 模式，建立馬來西亞 Melaka Tengah 地區內，五個主要河川流域 2006 年至 2012 年之逕流量，並透過 M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定，探討其變化趨勢，得知所有流域內的逕流量並無顯著的變化趨勢，不過逕流量的空間變化趨勢與流域內的土壤水分空間分布則呈現顯著的空間自相關。Garcia *et al.* (2017) 應用 M-K 趨勢檢定探討西班牙 Mallorca 島嶼臨時型河川 1977 年至 2009 年之逕流量變化趨勢，顯示出逕流量呈現減少之變化趨勢，其中又以春季及夏季的減少幅度最為顯著，分別為 4% 及 17%，逕流量減少主要是受到降雨量減少及降雨日數減少所致，但人為土地利用以及近年來較高的氣溫也導致了研究區域之蒸散量有顯著的增加，因此，造成 Mallorca 島嶼臨時型河川逕流量顯著減少。

最後，在輸砂量方面，Jiang *et al.* (2017) 應用 M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定，探討中國黃河流域及長江流域 1956 年至 2012 年之逕流量與輸砂量之變化趨勢，得知黃河之逕流量呈現不顯著的減少趨勢，輸砂量則是呈現顯著的增加趨勢，而長江流域則是逕流量與輸砂量均呈現增加趨勢，兩流域主要輸砂量均集中在雨季，除此之外，1990 年至 2012 年之逕流量較 1956 年至 1989 年少，主要是受到降雨量減少所影響。另外，Zhao *et al.* (2017) 透過 M-K 趨勢檢定，探討長江流域 1953 至 2013 年之逕流量與輸砂量變化趨勢，長江整體逕流量並未呈現顯著的變化趨勢，但在洞庭湖及岷江區域卻呈現顯著的減少趨勢，整體而言，全流域之輸砂量均呈現顯著的減少趨勢，此外，逕流量的變化主要是受到流域內降雨量所影響，而輸砂量的改變則是受到氣候變遷及人為活動所影響，但人為活動之影響較大，占整體變遷的 70%。此外，Buendia *et al.* (2015) 透過水文模式，重建西班牙地區 Ribera Salada 流域 1971 年至 2014 年之逕流量與輸砂量，並使用 2009 年至 2013 年之實際觀測資料進行校正及驗證，最後透過 M-K 趨勢檢定探討 1971 年至 2014 年之逕流量與輸砂量之變化趨勢，當模式背景以人為造林活動作為情境背景時，年逕流量與輸砂量皆呈現減少趨勢，但輸砂量變化趨勢並未達顯著水準；當模式不考慮造林活動時，逕流量並未呈現顯著的變化，但輸砂量則是呈現增加的趨勢。

根據許晃雄等 (2012) 研究指出，近年來受到氣候變遷影響，歷年侵臺颱風相較於以往更為頻繁，且侵臺颱風之生命歷程達到強颱風的比例明顯增加，此外臺灣地區的小雨日數大幅度的減少，近 30 年呈現每 10 年減少 4 天，且大雨日數在近 30 年有顯著增加的變化趨勢，而不論是短延時降雨強度或長延時降雨強度均呈現增加的趨勢。鍾侑達等 (2009) 則認為，整體而言臺灣地區的年總降雨日數逐漸減少，而大雨日數與極端降雨事件在全臺灣均有增加的變化趨勢，此外，全臺的年最大二日暴雨亦呈現增加的趨勢。錢滄海等 (2010) 則指出，近年來臺北地區降雨有明顯的改變，透過 M-K 其趨勢分析之結果發現，臺北地區的年降雨量、年均降雨強度皆呈現顯著的增加，而年降雨日數卻顯著的減少，此外連續無降雨日數亦呈現顯著的增加，此現象代表單次降雨之降雨量有增強的變化趨勢。汪中和 (2004) 則認為，近年來臺灣地區的豐水期降雨量呈現增加的趨勢，且變化速率相當快速，並指出在 1947 年十年降水日為 195 日，但與 2003 年時年降水日僅 117 日相去甚遠，此外自 1940 年起至 2003 年之間，臺灣地區的平均降水日呈現持續性的遞減，並指

出在臺灣的西南部與東部均呈現快速地減少。除此之外，汪中和（2007）亦指出，不同地區的降雨型態以及降雨強度均呈現重大的改變，就降雨量而言自 1940 至 2006 年間雖無顯著的變化趨勢，但降雨帶有北移的變化趨勢，且整體之降雨日數呈現持續的遞減，尤其以西南部與東南部之減少速率相對較其他區域快。周佳、劉紹臣（2012）則認為，在氣候變遷下全球性的降雨量並無顯著的變化趨勢，但可以發現在北亞與中亞降雨量呈現顯著的增加，近幾年強降雨的情形也有增加，此外，在颱風強度的變化上則是較具爭議，主要是受到觀測資料仍不足以判斷氣候變遷對於颱風強度的影響。

根據國家災害防救科技中心（NCDR）災情報告、災損報告以及聯合知識庫之相關資料可以發現，近年來臺東太麻里溪流域災情不斷，2005 年 7 月 18 日海棠颱風豪雨造成太麻里溪上游土石崩塌，洪水夾帶土石造成沿岸居民房舍倒塌、土地流失及防洪設施破壞，威脅民眾財產安全，災情相當慘重。2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風來襲，造成太麻里溪多處坍方，沿岸潰堤，導致農田及房舍嚴重受災，影響農戶約 500 戶，沖刷流失農地約 300 ha 以上。2010 年 9 月 19 日凡那比颱風再次侵襲臺東，高強度降雨致使太麻里溪河水暴漲，讓 88 風災後勉強應急的土堤再次潰堤，臺九線嚴重淹水，道路中斷，嘉蘭村民也緊急撤村，南迴鐵路太麻里段路基被淘空 200 m，無法通車。2012 年 8 月 28 日天秤颱風在大武降下超過 300 mm 的雨量，造成太麻里鄉眾多房屋毀損，申請屋損住戶計有 214 戶，農產物災害損失金額達 1 億多元，太麻里溪旁堤防的疏濬砂石堆也被沖流入海。2013 年 9 月 21 日強烈颱風天兔帶來強風豪雨，造成臺東縣 6 千多戶停電，大都集中在太麻里和大武地區，太麻里溪流域內的洛神葵及釋迦農作物受損嚴重，數百公頃農地受到重創。顯然地，在氣候變遷下，極端降雨事件已造成臺灣災情嚴重，太麻里溪流域只是其中一例，因此，如何面對氣候變遷的威脅，瞭解河川降雨量、逕流量及輸砂量的變化趨勢，提供災害潛勢評估，並強化當地救災體系的因應措施，已成為當前防災工作的重要課題。基於上述，本研究以太麻里溪流域作為案例，透過 M-K 趨勢檢定與 Theil-Sen 斜率檢定，探討在氣候變遷下，太麻里溪流域內降雨量、逕流量與輸砂量之變化趨勢，期能提供政府相關單位未來在防災施政上之參考。

研究區域與研究方法

（一）研究區域

本研究區域為臺東縣太麻里溪流域（圖 1），太麻里溪發源自北大武山東側，流域範圍包括臺東縣太麻里鄉及金峰鄉，由西向東匯入太平洋，太麻里溪全長 36.27 km，整體流域面積面積為 211.5 km²，流域內西部為山地區域，平均高度大於 3000 m；流域整體平均高度為 935 m，流域內有 34.6% 的面積高於 1000 m，地勢相當陡峭，河川坡降劇烈（Yeh and Liaw, 2015）。太麻里溪流域超過八成以上為森林所覆蓋，且部份屬於大武山自然保留區，人為開發利用情況甚少。

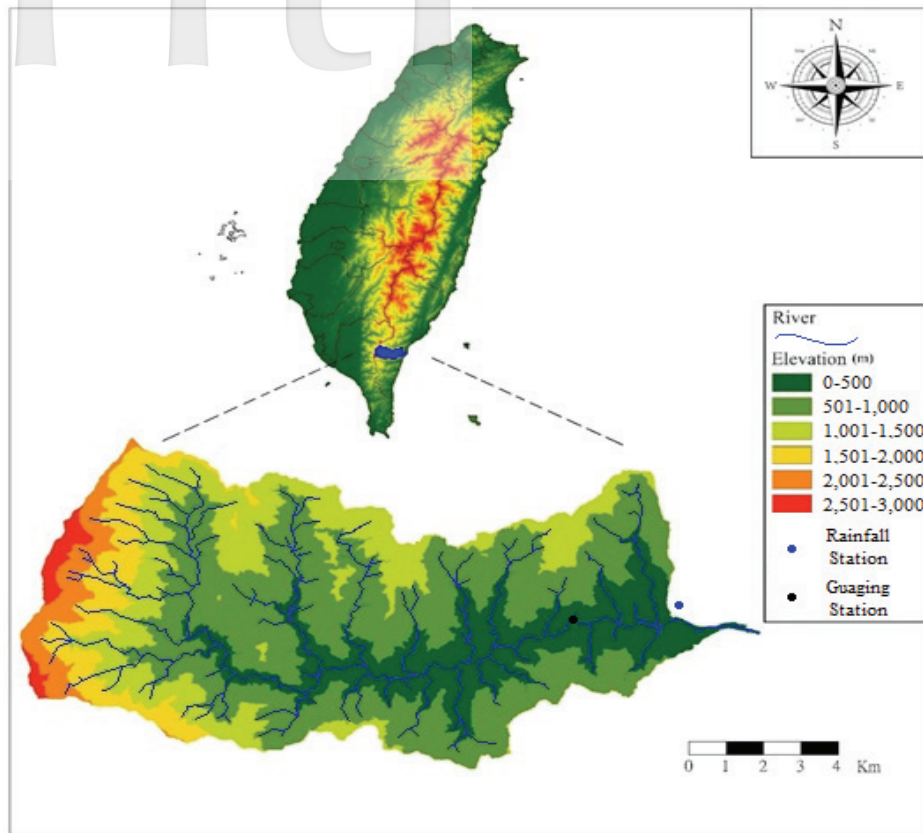


圖 1 研究區域圖

(二) M-K 趨勢檢定

M-K 趨勢檢定為無母數趨勢檢定，根據時間序列資料之間的相對關係所進行的趨勢檢，僅考慮連續資料之間的大小關係，故可忽略資料中因極端值所造成的影響，適用於水文、氣象與氣候等各種不同時間序列資料 (Shirazi *et al.*, 2016; Pakalidou and Karacosta, 2017)。M-K 趨勢檢定計算公式如下 (Mann, 1945; Kendall, 1975)：

假設一組數列 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n\}$ ，則令下列公式 (1)：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(X_j - X_i), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, i+1 \quad (1)$$

當 $\text{Sgn}(X_j - X_i)$ 所得之數值大於 0 時之 S 值為 1，反之相減所得之值小於 1 時則 S 值為 -1，當相減之值為 0 時，則 S 值為 0，不考慮資料之間相差之數值，計算方式如下列公式 (2) 所示：

$$\text{Sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

計算所得之 S 值與時間序列中的樣本數 (n) 進一步計算 M-K 趨勢檢定之判斷係數 τ 值，計算方式如 (3) 所示：

$$\tau = \frac{S}{N} = \frac{S}{n(n-1)/2} \quad (3)$$

當 τ 為正值時，表示時間序列資料有漸增的趨勢，反之，當 τ 為負值時，則表示時間序列資料有漸減的趨勢。根據 Mann (1945) 與 Kendall (1975) 之研究，當 $n \geq 8$ 時，統計量 S 則近似於標準常態分布，可以透過下列公式 (4) 之標準常態統計量 Z 值，間接表示樣本序列在統計上的增加或遞減之趨勢顯著性。

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 1 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中變異數 $\text{Var}(S)$ 為：

$$\text{Var}(S) = \left(\frac{1}{18}\right)[(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m T_i(T_i-1)(2T_i+5)] \quad (5)$$

公式 (5) 中， m 為樣本序列中數值相等的組數，而 T_i 表示數值相等的第 i 組內所含的數值數目。本研究分別採用顯著水準 $\alpha = 0.1$ 及 $\alpha = 0.05$ 作為 M-K 趨勢分析顯著性判斷標準，當 $|Z| \geq 1.645$ 時達到顯著水準 ($\alpha = 0.1$)，當 $|Z| \geq 1.96$ 時則達到非常顯著水準 ($\alpha = 0.05$)。

(三) Theil-Sen 斜率檢定

Theil-Sen 斜率檢定法是透過時間序列資料的變化斜率 (β) 探討時間序列的變化趨勢，也被

廣泛應用在各種不同的時間序列資料，其 β 值計算方式如公式 (6) 所示 (Theil, 1950; Sen, 1968)：

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, i + 1 \quad (6)$$

β 值為時間序列中兩點的斜率， X_j 以及 X_i 為時間序列中 j 以及 i 時間點 ($j > i$) 所對應之資料值，並透過計算之 β 建立時間序列之斜率方程式 (7)：

$$Y_t = \beta \times t + X_t \quad (7)$$

式 (7) 中， Y_t 為趨勢斜率方程式求出之資料值， t 為時間， X_t 為方程式之截距。

(四) 水文資料

本研究降雨量資料來自林業試驗所太麻里研究中心氣象資料 (陸象豫等, 2004)，逕流量與輸砂量資料則來自於經濟部水利署的水文年報及臺灣電力公司。林試所太麻里研究中心氣象站位於臺東縣太麻里鄉大王村東經 $120^\circ 58' 23''$ ，北緯 $22^\circ 36' 02''$ ，海拔高 90 m，降雨量資料自 1980 年 8 月開始觀測。由於部份降雨量資料有中斷或闕漏情況，本研究採用鄰近的知本雨量測站之降雨量資料，透過雙累計曲線 (Double mass curve) 對太麻里研究中心氣象站之降雨量進行補遺，降雨量分析期間從 1981 年至 2012 年止，共計 32 年。另外，逕流量與輸砂量資料則採自研究區中唯一測站金蘭站，由臺灣電力公司進行觀測，根據經濟部水利署水文年報，金蘭測站所涵蓋的流域面積為 189.6 km^2 。由於金蘭測站離出海口尚有一段距離，故其集水區面積比全部集水區面積 211.5 km^2 略小。本研究透過水文年報中 1983 年 8 月至 2009 年 7 月之逕流量與輸砂量實測資料，配合幕次 (Power) 率定曲線 (Rating curve)，建立金蘭測站 1983 年 8 月至 2009 年 7 月逕流量與輸砂量之關係式，經由試誤法 (Try and error) 分析高低流量門檻值，當以逕流量 20 cms 為門檻值時，高低流量與輸砂量之率定曲線 R^2 最高解釋能力最好，故將逕流量 20 cms 作為門檻值，20 cms 以上為高流量，20 cms 以下為低流量，並據此率定曲線分別計算輸砂量 (圖 2)。由於 2009 年莫拉克颱風造成金蘭測站損毀，觀測中斷，因此，本研究逕流量分析期間從 1983 年 8 月至 2009 年 7 月，輸砂量分析期間則自 1984 年至 2008 年止。另外，在時間尺度上，本研究分別探討月、季、豐水期、枯水期及年降雨量、逕流量及輸砂量之變化趨勢，並依據水利署劃分方法，將每年五至十月設定為豐水期，十一月至隔年四月設定為枯水期。

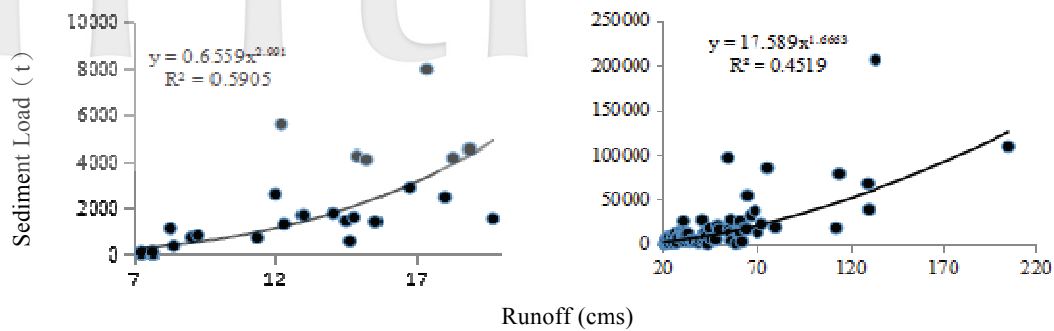


圖 2 低流量（左）及高流量（右）與輸砂量之率定曲線

結果與討論

（一）降雨量

研究區降雨量之 M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定分析結果如表 1 所示。首先，在月降雨量變化部份，由表 1 中得知，透過 M-K 趨勢檢定 τ 值可以發現，1 月至 3 月的降雨量 τ 值均為負值，顯示出降雨量有減少之趨勢，但 Z 值尚未到達顯著水準，而後的 4 月至 12 月之 τ 值均為正值，呈現降雨量有增加之趨勢，其中 8 月降雨量的 Z 值達 1.85 ($P < 0.1$)，顯示出太麻里流域 8 月的降雨量有明顯的增加趨勢。另外，Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定相似，不同月份的 Theil-Sen 斜率檢定圖如圖 3 及圖 4 所示。研究期間 1 月至 3 月之 Theil-Sen 斜率為負值，故降雨量呈現減少的變化趨勢，而 4 月至 12 月斜率均呈現正值，代表降雨量呈現增加的變化趨勢，其中又以 8 月之降雨量變化斜率最為顯著。透過 M-K 趨勢分析以及 Theil-Sen 斜率檢定可以發現，研究區 8 月降雨量較其他月份降雨量具有明顯的增加趨勢，透過圖 4 中 8 月降雨量的序列分析後發現，研究期間 8 月降雨量以 1984 年的 992.2 mm 最高，其次為 2007 年，再其次依序分別為 2009 年、2012 年及 2005 年，很明顯地，研究區內 8 月份高強度降雨量主要分布於 2005 年以後，而較為低降雨量的年份多為 1990 年以前，此現象與 M-K 趨勢檢定以及 Theil-Sen 斜率檢定之結果相符。

其次，在季節性降雨量變化部份，透過表 1 中季節降雨量 M-K 趨勢檢定之 τ 值正負值可以發現，除春季降雨量之 τ 值為負值，呈現降雨量減少之趨勢外，其餘季節之 τ 值均呈現正值，顯示出降雨量有增加之趨勢，其中又以秋季之 Z 值 1.99 及豐水期 Z 值 2.21 最為顯著 ($P < 0.05$)，已達非常顯著水準，表示出研究區秋季及豐水期的降雨量有明顯的增加趨勢。另外，季節性降雨量之 Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定相同，不同季節的 Theil-Sen 斜率檢定圖如圖 5 所示。研究期間春季降雨量的 Theil-Sen 斜率呈現負值，降雨量有減少之趨勢外，其餘季節之 Theil-Sen 斜率均呈現正值，其中又以秋季及豐水期的斜率變化最為顯著。相較於逐月降雨量分析，秋季降雨量以及豐水期降雨量分別代表 7 月至 9 月以及 5 月至 10 月間之降雨量，透過圖 5 之降雨量序列

分析得知，雖然秋季降雨量以及豐水期降雨量均以 1991 年為最高，但是在 2000 年後，研究區的秋季及豐水期降雨量則明顯地增加許多，後半段的降雨量較前半段多，此現象與 M-K 趨勢檢定以及 Theil-Sen 斜率檢定之結果雷同。

另外，在年降雨量變化部份，表 1 中 M-K 趨勢檢定結果 τ 值為正值，且 Z 值為 2.34 ($P < 0.05$)，已達非常顯著水準，顯示出研究區年降雨量呈現明顯的增加趨勢。此外，年降雨量之 Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定結果相符，Theil-Sen 斜率為正值，呈現年降雨量具有顯著的增加趨勢。透過圖 5 之年降雨量序列分析得知，研究期間年降雨量以 2011 年之 2938.5 mm 為最高，其次為 1991 年、2012 年、1998 年以及 2005 年，研究期間後半段之年降雨量明顯地較前半段高出許多，此現象與本研究所使用的兩項趨勢檢定結果相同。

太麻里研究中心在研究期間從 1981 年至 2012 年間，年均降雨量為 2069.4 mm，豐水期平均降雨量為 1698.6 mm，佔 82%，枯水期平均降雨量為 370.8 mm，佔 18%。豐水期期間以秋季降雨量為主，秋季降雨量為 1024.6 mm，佔豐水期降雨量之 60%，佔全年降雨量之 49%，很明顯地，研究區域內之降雨量超過半數集中於豐水期，而豐水期期間又以秋季降雨量最為主要。藉由趨勢檢定可以清楚的發現，近年來受到氣候變遷影響，流域內整體的降雨型態有所改變，呈現顯著的增加趨勢，此外，8 月份的降雨量、秋季降雨量以及豐水期降雨量均呈現顯著的增加趨勢，代表氣候變遷不僅造成流域內整體降雨量的變化，亦造成不同月份及季節的降雨量變化，透過本研究案例可以清楚地發現，近年來之降雨量不僅增加，且有集中於特定月份及季節的現象發生。鍾侑達等(2009)曾指出，臺灣的極端降雨有增加的變化趨勢，並推估極端降雨有造成洪峰流量增加的現象。因此，逕流量的變化分析，以及後續的輸砂量是否有增加之趨勢，相當值得進一步探究。

表 1 研究區降雨量趨勢分析結果

時間	τ 值	Z 值	P 值	斜率(β)
1 月	-0.18	-1.44	0.15	-0.49
2 月	-0.12	-0.92	0.36	-0.45
3 月	-0.09	-0.75	0.47	-0.36
4 月	0.14	1.09	0.28	0.85
5 月	0.03	0.28	0.80	0.59
6 月	0.10	0.79	0.44	2.49
7 月	0.08	0.68	0.51	2.40
8 月	0.23	1.85	0.07*	7.88
9 月	0.14	1.14	0.26	4.27
10 月	0.13	1.01	0.32	1.70
11 月	0.07	0.57	0.58	0.56
12 月	0.04	0.32	0.76	0.19
春季	-0.15	-1.17	0.25	-1.48
夏季	0.06	0.52	0.62	3.20
秋季	0.25	1.99	0.05**	16.15
冬季	0.13	1.04	0.31	3.55
豐水期	0.27	2.21	0.03**	21.77
枯水期	0.09	0.75	0.47	1.43
年度	0.29	2.34	0.02**	27.03

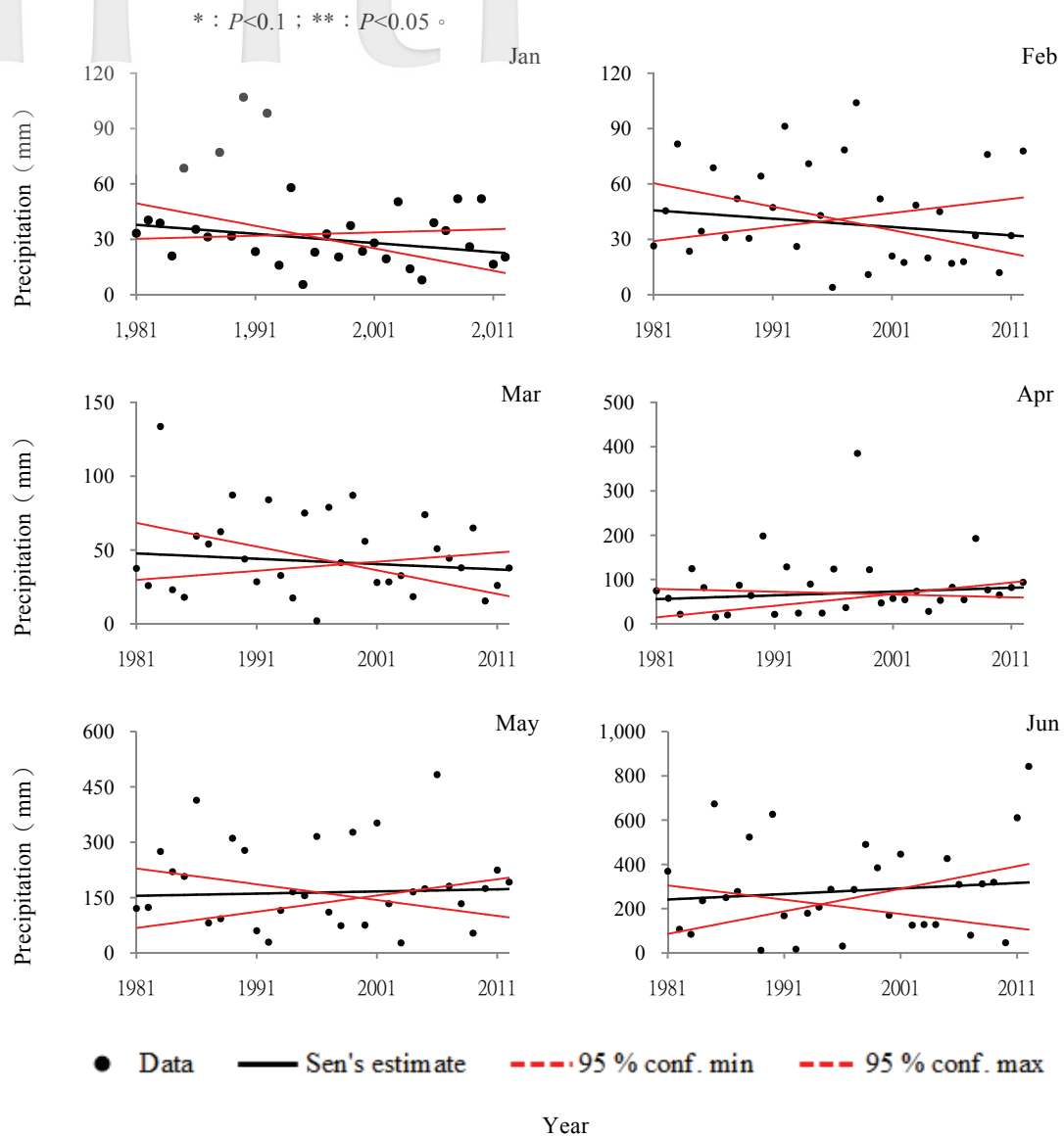


圖 3 1 月至 6 月降雨量 Theil-Sen 斜率圖

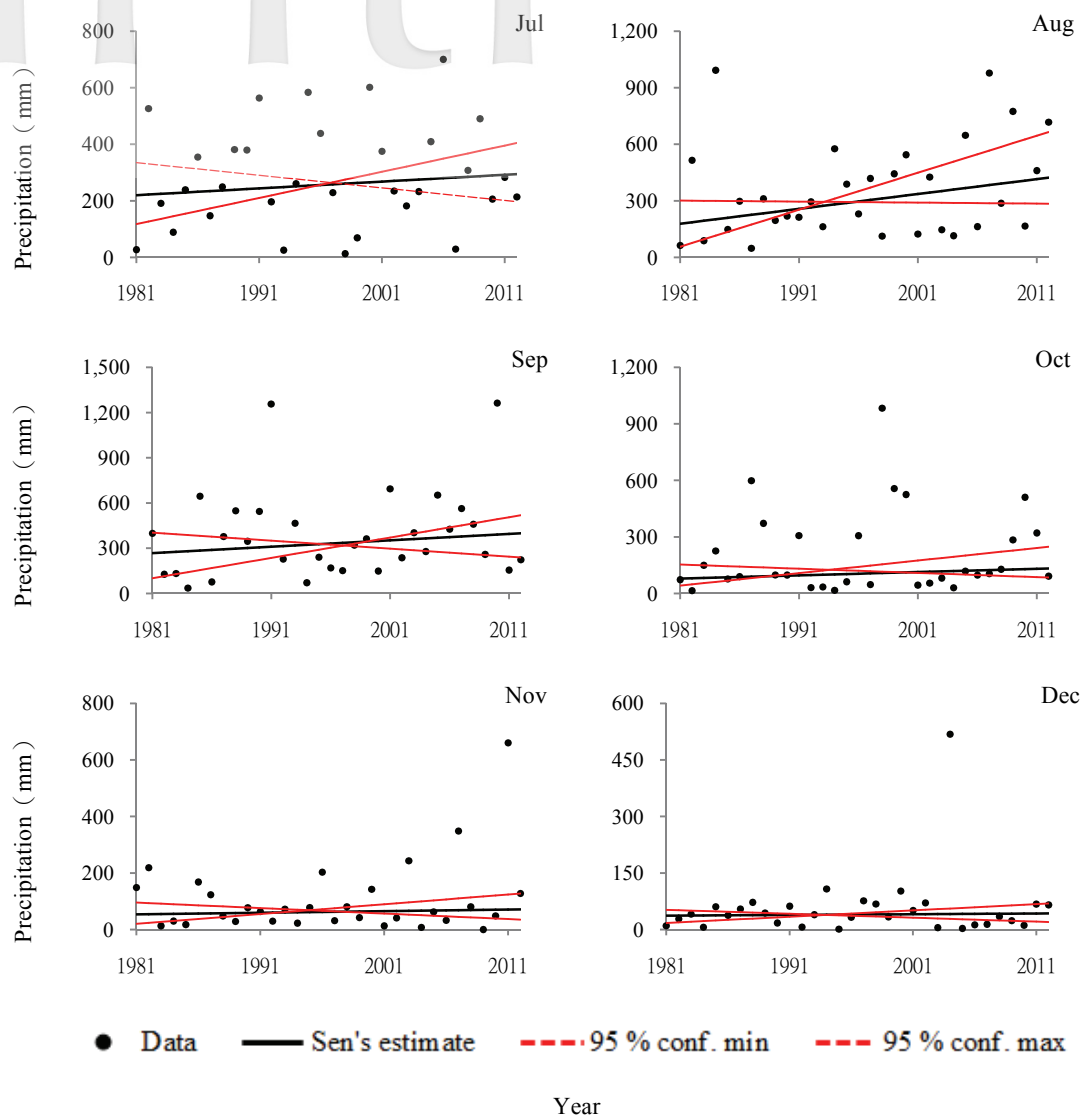


圖 4 7 月至 12 月降雨量 Theil-Sen 斜率圖

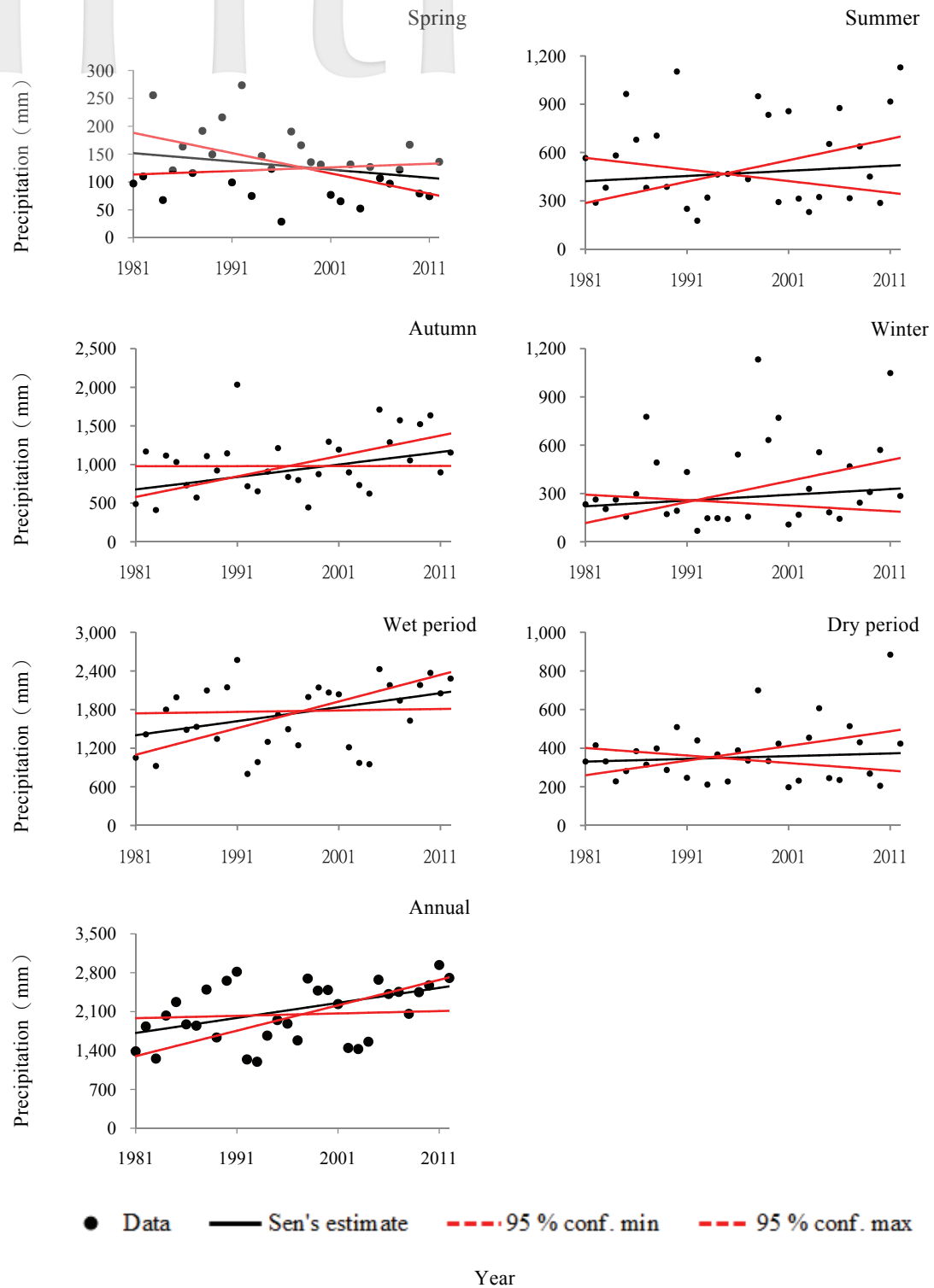


圖 5 不同季節與年降雨量 Theil-Sen 斜率圖

(二) 逕流量

研究區逕流量之 M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定分析結果如表 2 所示。首先，在月逕流量變化部份，由表 2 中得知，透過 M-K 趨勢檢定 τ 值可以發現，5 月及 11 月的逕流量 τ 值為負值，顯示出逕流量有減少之趨勢，但 Z 值尚未到達顯著水準，至於其他月份的逕流量 τ 值均為正值，呈現逕流量有增加之趨勢，但所有的 Z 值均未達顯著水準，其中僅有 3 月、8 月與 12 月之 Z 值大於 1，8 月 Z 值最高，10 月份之 Z 值則趨近於 0，為 0.02，顯示 10 月份之逕流量與研究期間之平均值相當接近。另外，Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定相似，不同月份的 Theil-Sen 斜率檢定圖如圖 6 及圖 7 所示。研究期間 5 月及 11 月之 Theil-Sen 斜率為負值，逕流量呈現減少的變化趨勢，10 月份之斜率趨近於 0，其餘月份之斜率則均為正值，代表逕流量呈現增加的變化趨勢，其中又以 8 月之逕流量變化斜率最為顯著。透過 M-K 趨勢分析以及 Theil-Sen 斜率檢定可以發現，研究區 8 月逕流量較其他月份逕流量具有明顯的增加趨勢，此乃由於 8 月的降雨量有顯著地增加趨勢，連帶提高 8 月份的逕流量，不過尚未到顯著水準。

其次，在季節性逕流量變化部份，透過表 2 中季節逕流量 M-K 趨勢檢定之 τ 值正負值可以發現，所有季節之 τ 值均呈現正值，顯示出逕流量有增加之趨勢，其中又以秋季之 Z 值 1.68 為最高 ($P < 0.1$)，已達顯著水準，表示出研究區秋季的逕流量有明顯的增加趨勢。另外，季節性逕流量之 Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定相同，不同季節的 Theil-Sen 斜率檢定圖如圖 8 所示。研究期間所有季節之 Theil-Sen 斜率均呈現正值，其中又以秋季的斜率變化最為顯著。整體而言，各個季節的逕流量均呈現增加之趨勢，但以秋季逕流量增加最為顯著。

表 2 逕流量趨勢分析結果

時間	τ 值	Z 值	P 值	斜率(β)
1 月	0.13	0.95	0.35	1.90
2 月	0.10	0.73	0.48	1.50
3 月	0.15	1.08	0.29	1.65
4 月	0.13	0.93	0.36	1.89
5 月	-0.05	-0.37	0.72	-0.97
6 月	0.10	0.68	0.51	7.80
7 月	0.05	0.37	0.72	5.03
8 月	0.22	1.61	0.11	18.79
9 月	0.10	0.68	0.51	5.38
10 月	0.00	0.02	1.00	0.00
11 月	-0.01	-0.07	0.96	-0.05
12 月	0.14	1.04	0.31	2.47
春季	0.11	0.77	0.45	4.23
夏季	0.11	0.82	0.43	11.45
秋季	0.24	1.68*	0.10*	45.94
冬季	0.06	0.42	0.69	4.89
豐水期	0.19	1.31	0.20	76.78
枯水期	0.17	1.17	0.25	18.78
年度	0.27	1.87*	0.07*	84.94

* : $P < 0.1$ 。

另外，在年逕流量變化部份，表 2 中 M-K 趨勢檢定結果 τ 值為正值，且 Z 值為 1.87 ($P < 0.1$)，已達顯著水準，顯示出研究區年逕流量呈現明顯的增加趨勢。此外，年逕流量之 Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定結果相符，Theil-Sen 斜率為正值，呈現年逕流量具有顯著的增加趨勢。透過圖 8 之年逕流量序列分析得知，研究期間年逕流量以 2005 為最高，其次為 2007 年，研究期間後半段之年逕流量明顯地較前半段高出許多，此現象與本研究所使用的兩項趨勢檢定結果相同。

透過 M-K 趨勢分析以及 Theil-Sen 斜率檢定後得知，研究區在月逕流量方面並沒有呈現顯著的變化狀況，但可以發現 8 月的逕流量變化較其他月份顯著，雖未達顯著水準，但卻有明顯的增加，另外，在季節及年的時間尺度中，秋季逕流量及年逕流量變化趨勢呈現顯著的增加。

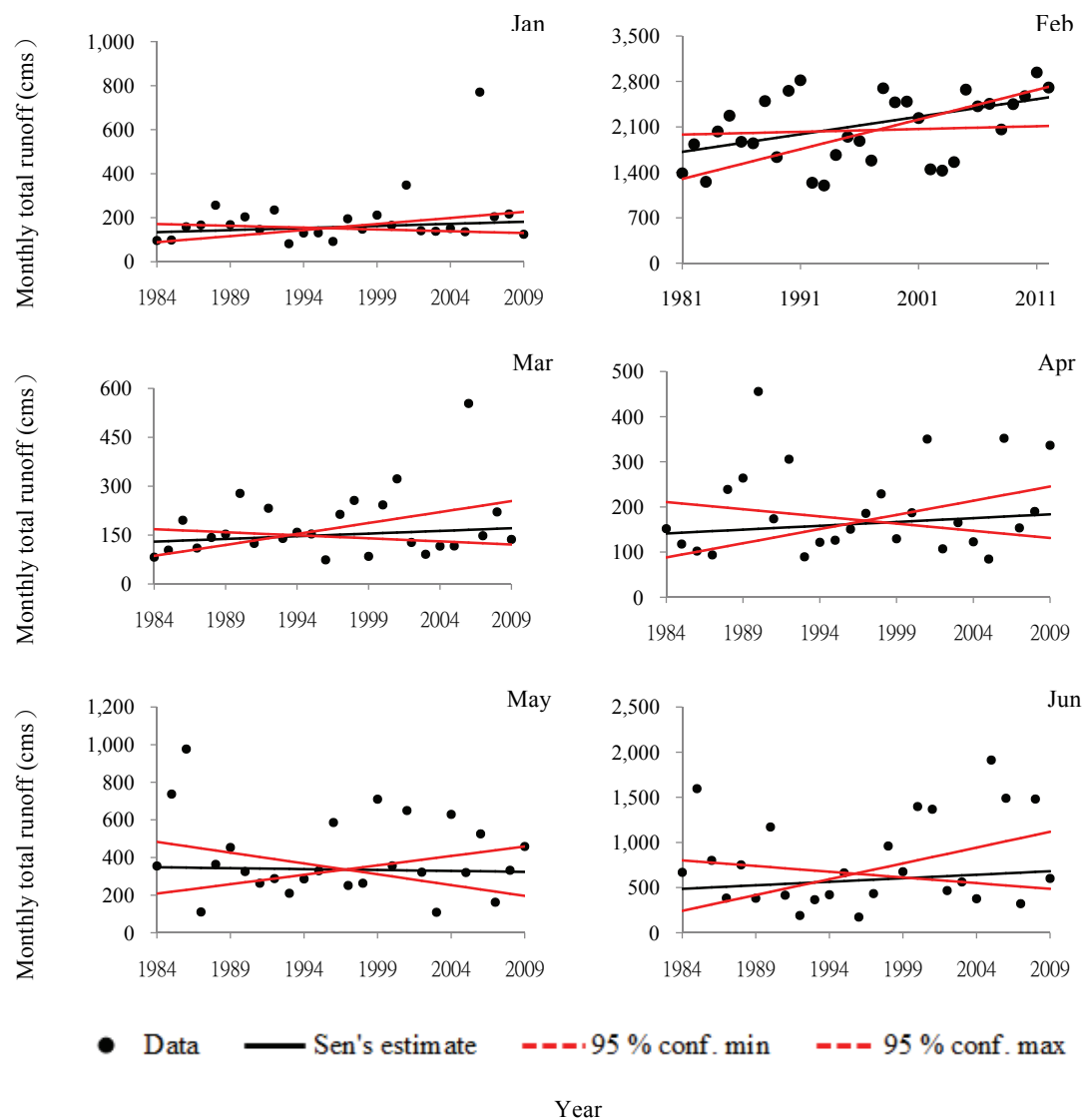


圖 6 1 月至 6 月逕流量 Theil-Sen 斜率圖

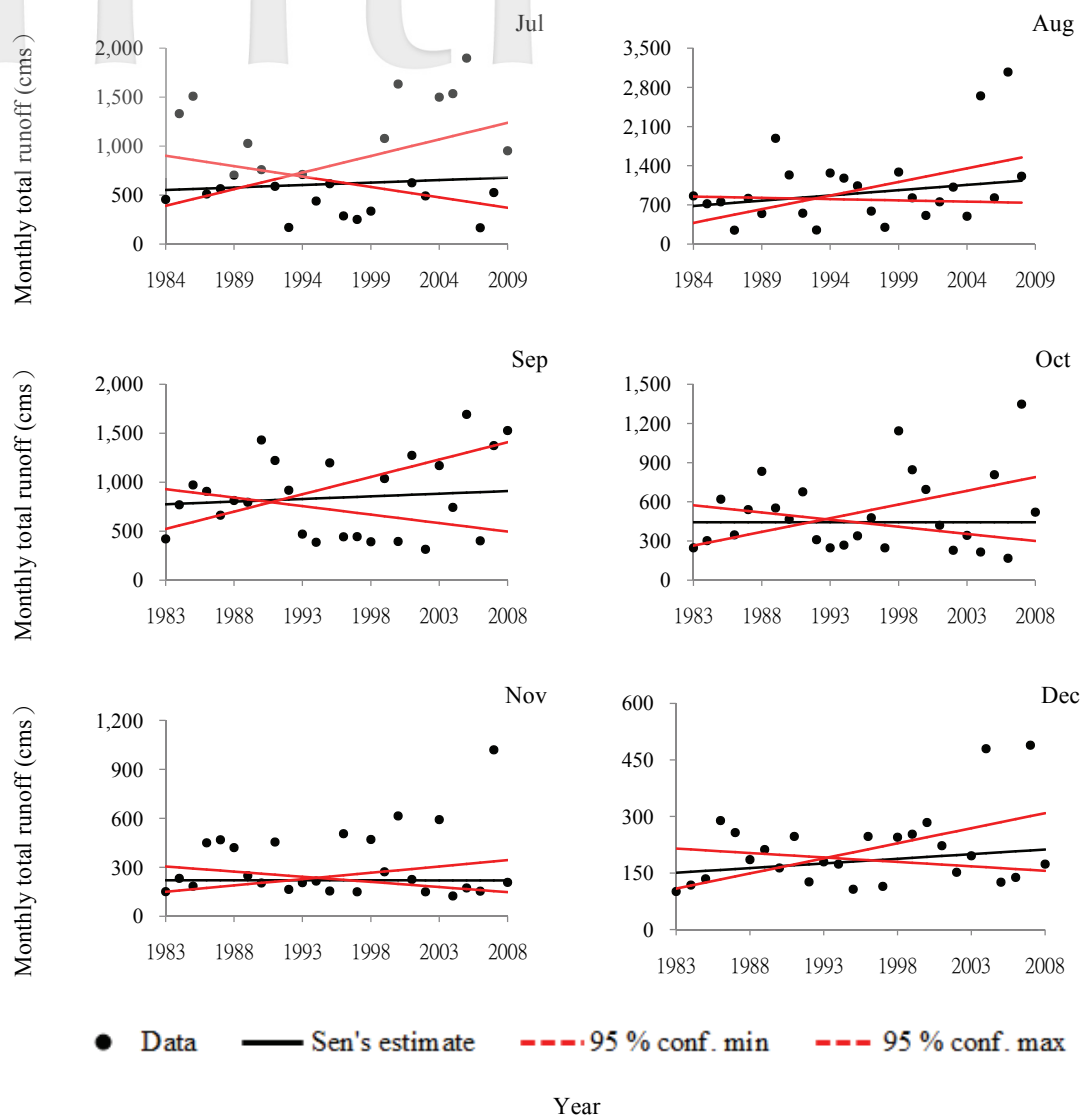


圖 7 7 月至 12 月逕流量 Theil-Sen 斜率圖

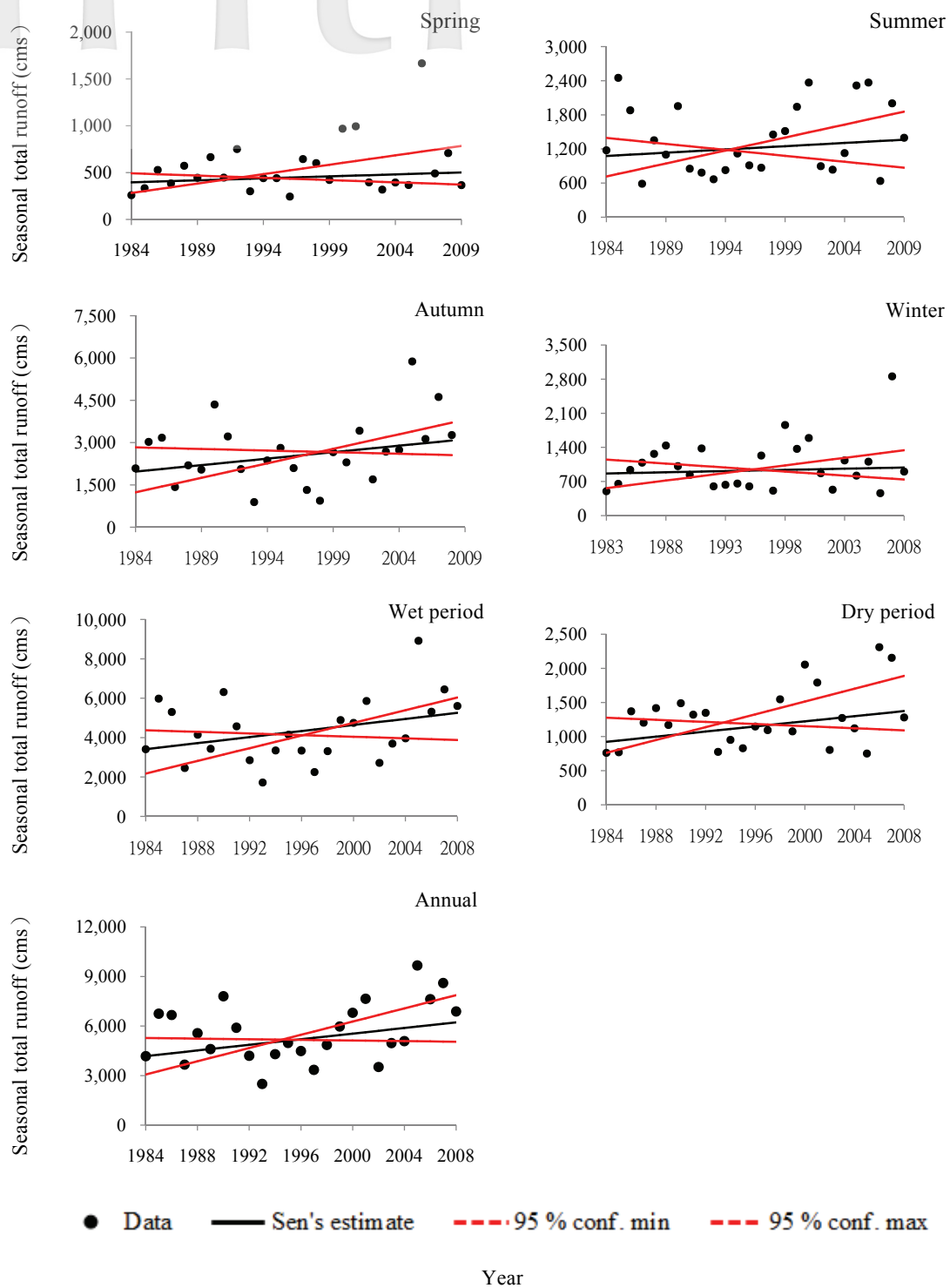


圖 8 不同季節與年逕流量 Theil-Sen 斜率圖

(三) 輸砂量

研究區輸砂量之 M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定分析結果如表 3 所示。首先，在月輸砂量變化部份，由表 3 中得知，透過 M-K 趨勢檢定 τ 值可以發現，4 月、5 月、10 月及 11 月的輸砂量 τ 值均為負值，顯示出輸砂量有減少之趨勢，但 Z 值尚未到達顯著水準，至於其他月份的 τ 值均為正值，呈現輸砂量有增加之趨勢，其中 8 月輸砂量的增加趨勢較為明顯，但 Z 值也尚未到達顯著水準。另外，Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定相似，不同月份的 Theil-Sen 斜率檢定圖如圖 9 及圖 10 所示。研究期間 4 月、5 月、10 月及 11 月的之 Theil-Sen 斜率為負值，輸砂量呈現減少的變化趨勢，其他月份斜率均呈現正值，代表輸砂量呈現增加的變化趨勢，其中又以 8 月之輸砂量變化斜率最為顯著，但未達顯著水準。透過 M-K 趨勢分析以及 Theil-Sen 斜率檢定可以發現，研究區 8 月輸砂量較其他月份輸砂量具有明顯的增加趨勢，此現象可能和研究區中降雨型態有關，透過之前的降雨量趨勢分析得知，太麻里溪流域的降雨量主要集中於豐水期及秋季，尤其是 8 月份，降雨量增加趨勢最為顯著，降雨強度的增強對於地表之沖蝕能力也相對增加，因此在 8 月時，太麻里溪流域的輸砂量變化幅度相對較大。

表 3 輸砂量趨勢分析結果

時間	τ 值	Z 值	P 值	斜率(β)
1 月	0.18	1.31	0.20	0.00
2 月	0.15	1.07	0.29	0.01
3 月	0.11	0.75	0.47	0.00
4 月	-0.06	-0.42	0.69	0.00
5 月	-0.12	-0.84	0.41	-0.26
6 月	0.09	0.65	0.53	1.35
7 月	0.03	0.23	0.83	0.35
8 月	0.15	1.07	0.29	2.98
9 月	0.06	0.42	0.69	1.36
10 月	-0.09	-0.65	0.53	-0.04
11 月	-0.12	-0.84	0.41	-0.01
12 月	0.15	1.07	0.29	0.00
春季	0.17	1.21	0.23	0.01
夏季	0.11	0.79	0.44	3.14
秋季	0.25	1.77*	0.08*	12.41
冬季	0.05	0.37	0.73	0.40
豐水期	0.25	1.77*	0.08*	19.82
枯水期	0.13	0.93	0.36	0.24
年度	0.28	1.96**	0.05*	22.70

* : $P < 0.1$; ** : $P < 0.05$ 。

其次，在季節性輸砂量變化部份，透過表 3 中季節輸砂量 M-K 趨勢檢定之 τ 值正負值可以發現，所有季節之 τ 值均呈現正值，顯示出輸砂量有增加之趨勢，其中又以秋季之 Z 值 1.77 及豐水期 Z 值 1.77 最為顯著 ($P < 0.1$)，已達顯著水準，表示出研究區秋季及豐水期的輸砂量有明顯的增加趨勢。另外，季節性輸砂量之 Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定相似，不同季節的 Theil-Sen 斜率檢定圖如圖 11 所示。研究期間所有季節的 Theil-Sen 斜率均呈現正值，其中又以秋季及豐水期的斜率變化最為顯著。透過圖 11 之輸砂量序列分析得知，大約在 2000 年後，研究區的秋季及豐水期輸砂量則明顯地增加許多，後半段的輸砂量明顯地較前半段高，變化幅度也較大。

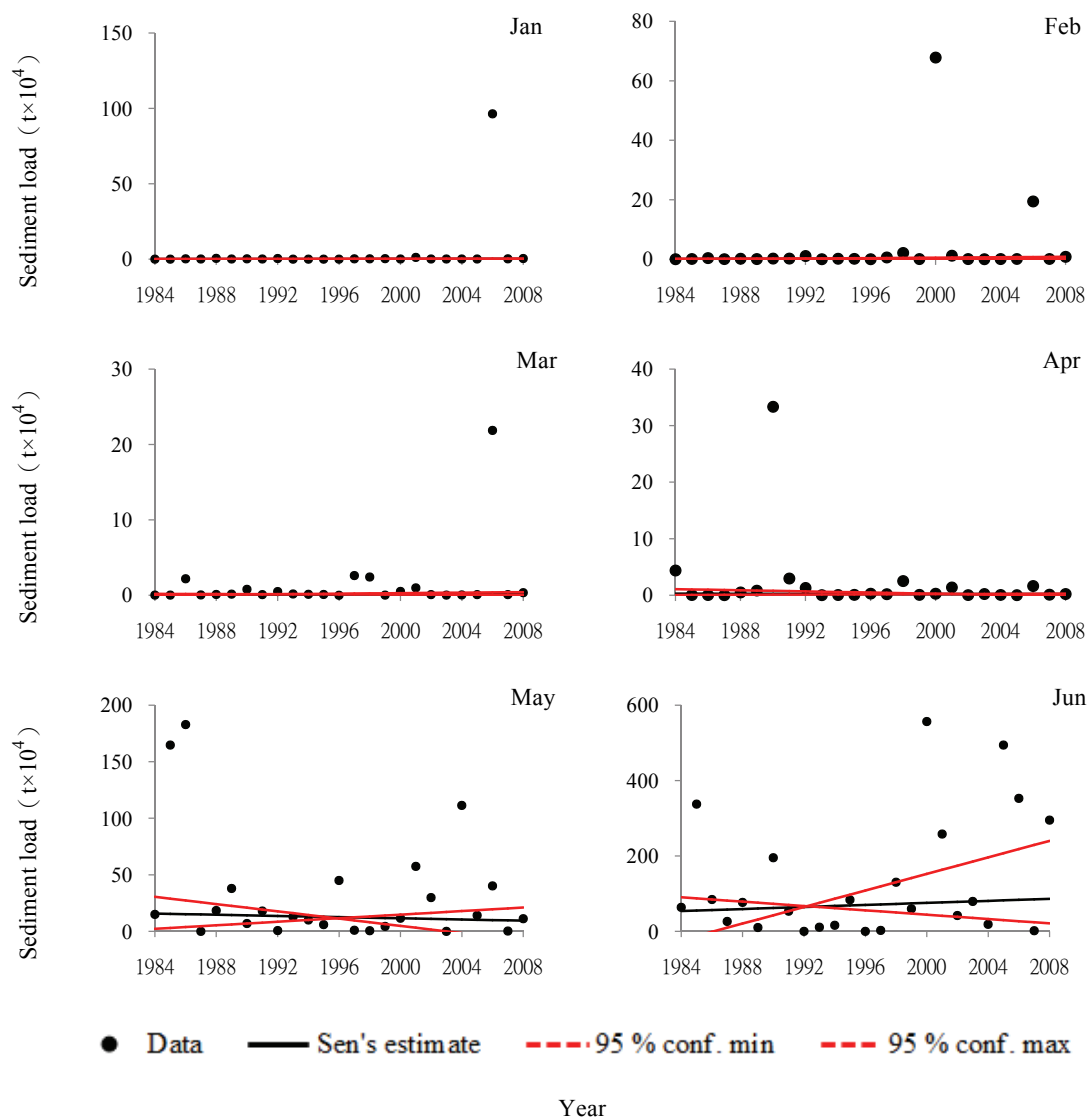


圖 9 1 月至 6 月輸砂量 Theil-Sen 斜率圖

另外，在年輸砂量變化部份，表 3 中 M-K 趨勢檢定結果 τ 值為正值，且 Z 值為 1.96 ($P < 0.05$)，已達非常顯著水準，顯示出研究區年輸砂量呈現明顯的增加趨勢。此外，年輸砂量之 Theil-Sen 斜率檢定結果與 M-K 趨勢檢定結果相符，Theil-Sen 斜率為正值，呈現年輸砂量具有顯著的增加趨勢。透過圖 11 之年輸砂量序列分析得知，研究期間年輸砂量以 2005 年最高，其次為 2007 年，研究期間後半段之年輸砂量明顯地較前半段高出許多，此現象與本研究所使用的兩項趨勢檢定結果相同。

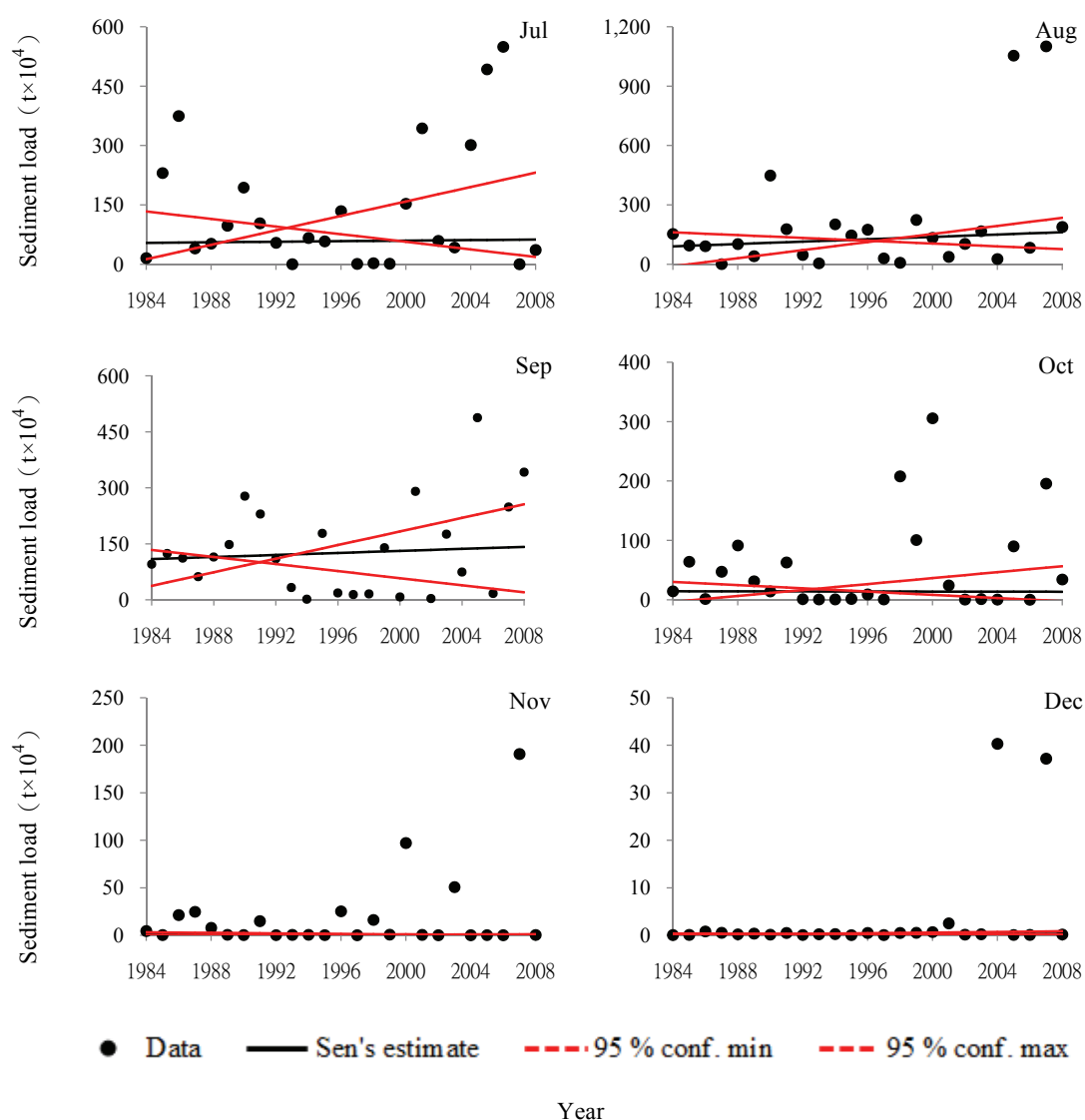


圖 10 7 月至 12 月輸砂量 Theil-Sen 斜率圖

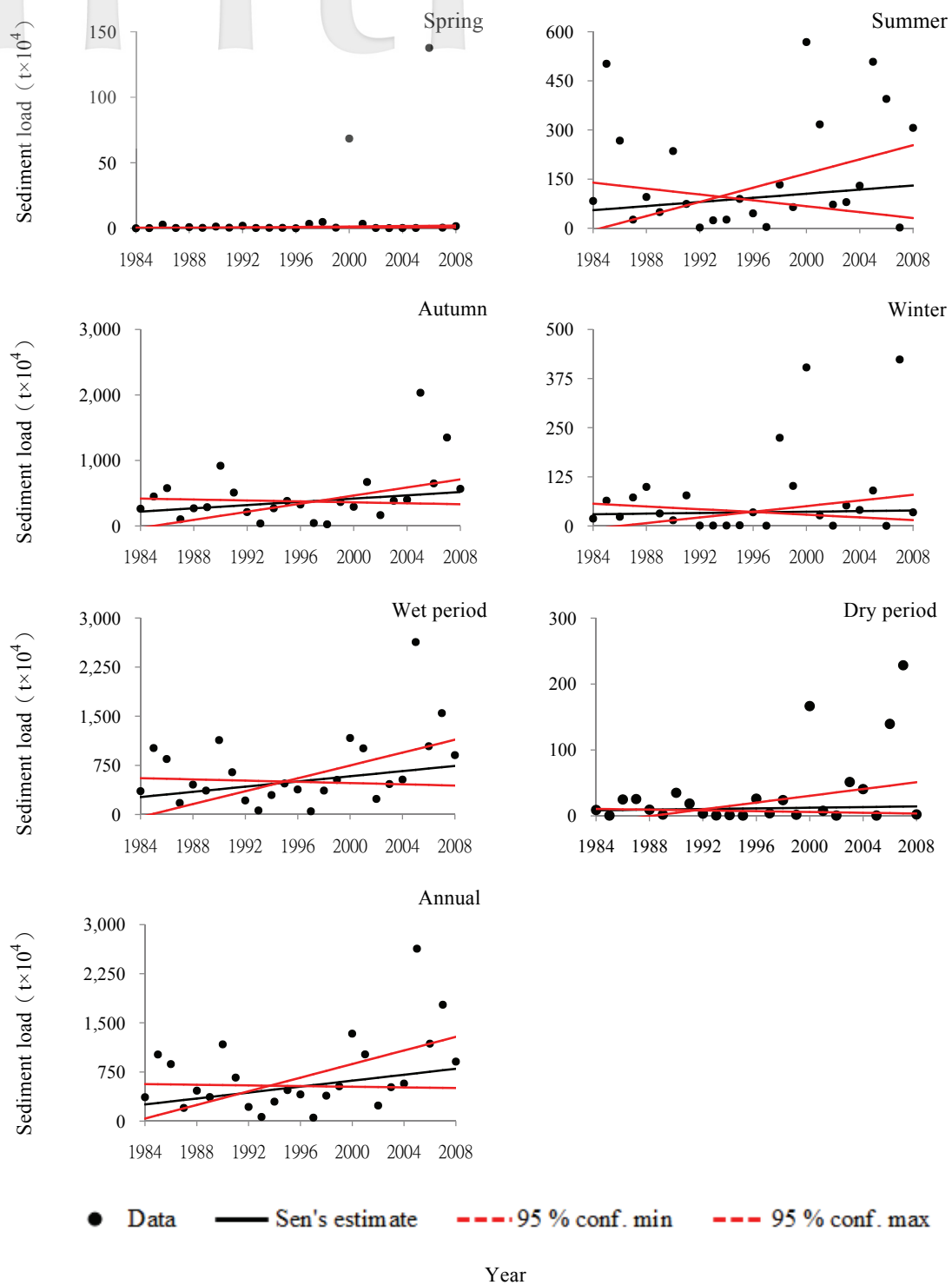


圖 11 季節與年輸砂量 Theil-Sen 斜率圖

透過趨勢檢定可以發現，研究區域中，月尺度的輸砂量變化無顯著的變化趨勢，相關統計檢定亦未達顯著水準，而秋季輸砂量、豐水期輸砂量及年輸砂量均呈現顯著的增加趨勢，此現象和降雨量之變化趨勢相同，太麻里流域之輸砂量變化可能是受到降雨量增加所產生的較高的地表沖蝕量，進而造成河川輸砂量的增加。

結 論

本研究探討臺東太麻里流域的降雨量、逕流量及輸砂量之變化趨勢，透過 M-K 趨勢檢定及 Theil-Sen 斜率檢定後得知，研究區年降雨量之變化趨勢呈現顯著的增加，豐水期及秋季降雨量亦都呈現增加趨勢，其中以 8 月份的降雨量增加情況最為顯著，至於春季降雨量則呈現減少之變化趨勢。另外，逕流量會影響到流域內沉積物的傳遞及輸出，逕流量的變化也與降雨量密切相關。研究結果顯示，太麻里流域的年逕流量呈現顯著的增加趨勢，豐水期及秋季的逕流量亦呈現顯著增加，至於各月份的變化趨勢則未達顯著水準。在輸砂量部份，太麻里流域的輸砂量變化趨勢與逕流量相似，年、秋季及豐水期之輸砂量均呈現顯著的增加趨勢，月輸砂量變化趨勢則未達顯著水準。透過上述趨勢分析後可知，很明顯地，氣候變遷顯著地影響到太麻里流域的降雨量，進而衝擊到逕流量及輸砂量的增加，降雨量的增加主要來自 8 月份的高強度降雨颱風事件。在氣候變遷下，極端降雨事件出現頻率及強度有增加之趨勢，因此，流域內的防災準備也應該提高標準，不論是防洪水利設施或救災資源調度，都應該考量突發性的極端氣候事件所造成之衝擊。

謝 辭

本研究感謝林業試驗所太麻里研究中心提供降雨量資料，感謝臺灣電力公司提供太麻里溪逕流量及輸砂量資料，另外，也感謝國立臺灣師範大學地理學系林辰毓及林冠州同學協助整理資料。

引用文獻

- 汪中和（2004）：〈臺灣降雨的長期變化及對環境的衝擊〉，《自然與文化研討會論文集》。臺北市：行政院農業委員會林業試驗所。
- 【Wang, C.H. (2004). The change and impact of long-term precipitations in Taiwan. *Proceedings of Natural and Cultural conference*. Taipei: Taiwan Forestry Research Institute.】
- 汪中和（2007）：〈氣候變化對臺灣地下水文環境的衝擊：回顧與前瞻〉，《經濟部中央地質調查所特刊》，18：243-259。
- 【Wang, C.H. (2007). The impact of climate change on the groundwater environment of Taiwan: retrospective and prospective views. *Special Publication of the Central Geological Survey*, 18:243-259.】
- 周佳、劉紹臣（2012）：〈全球氣候變遷觀測〉，《大氣科學》，40(3)：185-213。
- 【Chou, C., and Liu, S.C. (2012). Observations of global climate changes. *Atmospheric Sciences*,

許晃雄、周佳、吳宜昭、虞孟明、陳正達、陳永明（2012）：〈臺灣氣候變遷的關鍵議題〉，《臺灣醫學》，16(5)：459-470。

【Hsu, H.H., Chou, C., Wu, T.C., Lu, M.M., Chen, C.T., and Chen, Y.M. (2012). Critical Issues of Taiwan's Climate Change. *Formosan Journal of Medicine*, 16(5):459-470.】

陸象豫、黃良鑫、周玉奇、黃惠雪（2005）：《林業試驗所太麻里研究中新氣象資料》。臺北市：行政院農業委員會林業試驗所。

【Lu, H.Y., Huang, L.X., Chou, Y.C., and Huang, H.H. (2005). Meteorological data of Taiwan forestry research institute Taimali station. Taipei: Taiwan Forestry Research Institute.】

錢滄海、楊孟勸、曹舜評、李汴軍（2010）：〈臺北測站長時間降雨之趨勢檢定〉，《水土保持學報》，42(3)：285-304。

【Chien, C.H., Yang, M.J., Tsao, S.P., and Li, B.C. (2010). Trend test based on long-term rainfall in Taipei station. *Journal of Soil and Water Conservation*, 42(3):285-304.】

鍾侑達、郭峻菖、陳昶憲（2009）：〈臺灣區域降雨趨勢分析〉，《農業工程學報》，55(4)：1-18。

【Jhong, Y.D., Kuo, C.C., and Chen, C.S. (2009). The temporal variation of regional rainfall characteristics in Taiwan. *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 55(4):1-18.】

Buendia, C., Bussi, G., Tuset, J., Vericat, D., Sabater, S., Palau, A., and Batalla, R.J. (2016). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of The Total Environment*, 540:144-157.

Gao, T., and Xie, L. (2016). Spatiotemporal changes in precipitation extremes over Yangtze River basin, China, considering the rainfall shift in the late 1970s. *Global and Planetary Change*, 147:106-124.

Garcia, C., Amengua, A., Homar, V., and Zamora, A. (2017). Losing water in temporary streams on a Mediterranean island: Effects of climate and land-cover changes. *Global and Planetary Change*, 148:139-152.

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jiang, C., Zhang, L., and Tang, Z. (2017). Multi-temporal scale changes of streamflow and sediment discharge in the headwaters of Yellow River and Yangtze River on the Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, 102:240-254.

Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*, London: Charles Griffin.

Mann, H.B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13:245-259.

Pakalidou, N., and Karacosta, P. (2017). Study of very long-period extreme precipitation records in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, In Press, Corrected Proof.

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379-1389.

Shirazi, S.M., Adham, M.D.I., Othman, F., Zardari, N.H., and Ismail, Z. (2016). Runoff trend and

- potentiality in Melaka Tengah catchment of Malaysia using SCS-CN and statistical technique. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 24(4):245-257.
- Theil, H. (1950). A rank invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. *Netherlands Akademie van Wetenschappen, Proceedings*, 53: 1397-1412.
- Wu, L., Wang, S., Bai, X., Luo, W., Tian, Y., Zeng, C., Luo, G., and He, S. (2017). Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*, 601-602:1449-1465.
- Yang, P., Xia, J., Zhang, Y., and Hong, S. (2017). Temporal and spatial variations of precipitation in Northwest China during 1960-2013. *Atmospheric Research*, 183:283-295.
- Yeh, C.K., and Liaw, S.C. (2015). Application of landscape metrics and a Markov chain model to assess land cover changes within a forested watershed, Taiwan. *Hydrological Processes*, 29:5031-5043.
- Zhao, Y., Zou, X., Liu, Q., Yao, Y., Li, Y., Wu, X., Wang, C., Yu, W., and Wang, T. (2017). Assessing natural and anthropogenic influences on water discharge and sediment load in the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 607-608:920-932.

投稿日期：106 年 11 月 28 日

修正日期：107 年 01 月 23 日

接受日期：107 年 05 月 21 日