

以 Mann-Kendall 及 Theil-Sen 檢定法評估臺灣地區長期河川流量長期時空趨勢變化

葉振峰^[1*] 葉信富^[2] 李振誥^[3]

摘要 近年來全球受到氣候變遷影響使得降雨型態發生改變，造成降雨時空分佈不均且逐漸出現降雨兩極化的現象。臺灣位於亞熱帶氣候區，屬乾濕季分明之地區，因此降雨兩極化的現象更加的明顯，而河川流量受到降雨量影響甚巨，使得河川流量於豐水期及枯水期流量的差異更加的擴大，因此對於流量的趨勢及變異性的探討是極為重要的。本研究挑選出臺灣地區四個水資源分區內，流量記錄時間達 30 年以上共 34 個河川流量站，以 Mann-Kendall 檢定法進行年平均流量的趨勢分析，並以 Theil-Sen 斜率推估法進行趨勢斜率的評估，最後計算各個河川流量站長時間之變化量。臺灣四個分區結果顯示，南部區域並無顯著趨勢結果；北部地區 8 個流量站中僅蘭陽溪流域的西門橋站及淡水河流域的福山站具有顯著趨勢；中部地區 6 個流量站中，後龍溪流域的打鹿坑站及大甲流域的松茂站皆為顯著上升之趨勢；東部地區 11 個河川流量站中，知本溪流域的知本(3)站及花蓮溪流域的馬鞍溪站為顯著上升趨勢，而卑南溪流域的延平站為顯著下降趨勢。本研究之評估結果可以提供區域水文研究做為水資源規劃參考。

關鍵詞：河川流量、趨勢分析、Mann-Kendall 檢定法、Theil-Sen 斜率推估法。

Mann-Kendall test and Theil-Sen estimator for long term spatial and temporal trends of streamflow in Taiwan

Chen-Feng Yeh ^[1*] Hsin-Fu Yeh ^[2] Cheng-Haw Lee ^[2]

ABSTRACT In recent years, global climate change has altered precipitation patterns, causing uneven spatial and tem-poral distribution of precipitation that gradually induces precipitation polarization phenomena. Taiwan is located in the subtropical climate zone, with distinct wet and dry seasons, which makes the polarization phenomenon more obvious; this has also led to a large difference between river flows during the wet and dry seasons, which is significantly influenced by precipitation. In this study, the long-term streamflow data which recorded over 30 years are analyzed using the Mann-Kendall test and the slope trend is calculated using the Theil-Sen estimator. Finally, after the trend slope has been obtained, the amount of change in the data series of the average annual streamflow are calculated. The results show that of the four water resource region, only the southern region don't show significant trend. In Northern Taiwan, the Ximen Bridge Station in the Lanyang River basin has a significant downward trend, and the Fu-Shan Station in the Tamsui River basin has a significant upward trend. In central Taiwan, the Ta-Lu-Keng Station in the Houlong River basin and Sung-Mao Stations in the Dajia River basin have significant up-ward trend. In eastern Taiwan, the Chih-Pen Station in the Chih-Pen River basin and Ma-An-Chi Bridge Station in the Hualien River basin have significant upward trend, and the Yen Ping Station in the Beinan River basin has a significant downward trend. This distribution pattern provides valuable information for regional hydrological studies.

-
- [1] 國立成功大學資源工程學系博士生(通訊作者 E-mail: darkkid7799@gmail.com)
Doctoral Student, Dept. of Resources Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 70101, Taiwan
- [2] 國立中興大學水土保持學系博士後研究員 (* 通訊作者 E-mail: chwu@email.nchu.edu.tw)
Post-Doctoral Researcher, Dept. of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan
- [3] 國立成功大學資源工程學系教授
Professor, Dept. of Resources Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 70101, Taiwan

一、前 言

全球水資源中，海洋佔 97.5%而淡水資源為 2.5%，而淡水資源大部分為兩極的冰及高山積雪(約 68.7%)，其中可利用之地表淡水資源僅 1.4%。河川流量為水資源利用中重要的一環，但其僅佔地表淡水資源的 0.26%，雖然河川流量在淡水資源中比例較低，但卻是人類倚賴的重要水資源(Rajendran and Kasthuri, 2013)。然而，近年來世界各國皆面臨可用水資源逐漸枯竭的問題，尤其發展中國家，其中人口快速成長、快速的城市化及高速發展的工業、農業及礦業等因素，更加劇了水資源短缺的嚴重性(Gao et al., 2012; Miao et al., 2012)。目前全球約 30 個國家被認為處於水資源缺乏的狀態，其中 20 個國家更被視為嚴重缺水，但研究指出至 2020 年時，上述之情況將趨於嚴重，水資源缺乏之國家將增加至 35 個(Rosegrant et al., 2002)。再加上近年來受到氣候變遷的影響，使得原本短缺之水資源受到更嚴峻的挑戰，由跨政府氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的報告指出，21 世紀中強降雨事件發生頻率與過去相比將增加 90%，且流量較大之地表逕流將可能增加 40%(IPCC, 2007)。河川流量在水循環的過程中為極為重要的考量因子，且在水資源的開發及利用上佔據重要之地位，因此為因應未來氣候變遷對於水資源之衝擊，河川流量的趨勢變化及變異性需投入更多的研究及關注。

河川流量趨勢在世界各國皆有廣泛的研究，美國與加拿大學者蒐集國內河川流量資料分析河川流量的趨勢及空間特性。研究結果顯示，低流量普遍有增加的趨勢(Burn and Hag Elnur, 2002; Bassiouni and Oki, 2013)。Sagarika et al. (2014)蒐集美國地區 240 個河川流量站資料進行河川流量趨勢特性評估。研究結果顯示，美國中西部、中部及南部河川流量呈現顯著上升之趨勢。Sadri et al. (2015)蒐集美國 508 個記錄時間達 50 年之河川流量資料，利用 Mann-Kendall 檢定法分析低流量資料。研究結果顯示，東北部的低流量呈現增加的趨勢，但東南部的低流量有明顯的下降趨勢出現。過去十年間，歐洲各國學者分析不同國家與區域之河川流量趨勢特性，如：瑞士(Schmocker-Fackel and Naef, 2010)、法國(Renard et al., 2008)、英國(Morris et al., 2011; Hannaford and Buys, 2012)、冰島(Jónsdóttir et al., 2006)、北歐國家(Wilson et al., 2010)、捷克(Fiala, 2008)、斯洛伐克(Demetrova and Skoda, 2009)、羅馬尼亞(Birsan, 2015)、葡萄牙(Da Silva et al., 2015)及西班牙(Lorenzo-Lacruz et al., 2012)等國家，並發表了大量相關之研究成果。近年來中國學者蒐集中國各區域之河川流量資料進行區域性河川流量趨勢分析，分析結果顯示由於河川流量呈現下降趨勢，造成水資源可利用量亦逐漸降低。(Liu and McVicar, 2012; Chen et al., 2013; Gao et al., 2015)。Wang et al. (2015)以長時間日平均河川流量資料分析塔里木盆地季節性和極端河川流量之趨勢並結合氣候條件如北極振盪(Arctic Oscillation)，結果顯示北極振盪對河川流量趨勢具有顯著的影響。

臺灣地區年平均降雨量約為 2,500 公釐，約為世界平均值的 2.6 倍，雖然臺灣地區單位面積降雨量高，但因國土狹小且人口眾多，每個人每年所分配到的降雨量僅為全球平均值的七分之一(鍾侑達等人, 2009)，由環境永續指標(Environment Sustainability Index, ESI)分析結果亦顯示，臺灣每人平均有效之水資源量為 1,740 立方公尺，為全球 146 個國家中排名第 18 位的缺水國家(Esty et al., 2005)。近年來由於氣候變遷影響，隨著溫度的升高，臺灣地區出現多雨期間的雨量增加但少雨季節

雨量減少的現象，造成乾季更乾濕季越濕的現象(許晃雄等人，2011)，河川流量受此原因影響造成豐枯水期河川流量差異越加擴大，因此為了有效管理臺灣日益短缺之水資源，河川流量特性之探討及評估為當前之要務。

本研究以臺灣地區河川流量資料為基礎，以 Mann-Kendall 檢定法進行長時間河川流量趨勢分析，但 Mann-Kendall 檢定法主要是判定數列本身是否具有顯著趨勢的特性，其本身無法計算出趨勢上升或下降的程度，因此往往需要結合趨勢斜率推估方法。Theil-Sen 斜率推估法為常用之趨勢斜率計算法，尤其在水文因子趨勢分析中常與其他趨勢分析法結合，進行趨勢顯著性定量分析(Martino et al., 2013; Pingale et al., 2014; Yeh et al., 2015)。因此，本研究利用 Theil-Sen 斜率推估法進行趨勢斜率的計算，以求得趨勢變化的程度。在進行水文因子長時間尺度趨勢分析時，所求出之趨勢代表整體變化之特性，但由於世界氣候的變動，造成不同時間段有著相異之水文趨勢出現。存在兩相異趨勢之處稱作改變點(change point)，因此為探討長時間資料中是否具有改變點的存在，本研究以 Mann-Whitney-Pettit 和 Cumulative Deviation 檢定法做為尋找改變點之方法，上述兩檢定法常使用於尋找水文因子改變點相關之研究(Rouge et al., 2013; Goyal, 2014; Halmova et al., 2015)。

本研究為探討臺灣地區河川流量的變化，挑選出臺灣地區記錄河川流量資料時間達 30 以上且上游無人工水利設施(如：水庫、攔河堰等)之 34 個流量站，利用 Mann-Kendall 檢定法分析年平均之趨勢，並探討顯著趨勢變化及空間分佈變異性，並以 Theil-Sen 斜率推估法進行趨勢斜率的計算，求得趨勢之變化量。最後利用 Mann-Whitney-Pettit 和 Cumulative Deviation 檢定法尋找長時間時間序列中之改變點，並探討改變點前後河川流量之變化特性，經由上述研究方法可得知，臺灣地區河川流量長時間之趨勢變化是否有顯著的改變及趨勢變化在臺灣區域的空間變異性。

二、研究方法

1. Mann-Kendall 趨勢檢定法

Mann-Kendall 檢定法(Mann, 1945; Kendall, 1975)為一無母數的檢定方法，可利用連續資料間的大小關係來檢定趨勢是否明顯，其優點是其可以處理序列中極值及資料缺漏的問題，其方法簡述如下。假設有一時間序列 t_1, t_2, \dots, t_n ，其對應之資料序列為 x_1, x_2, \dots, x_n ，Mann-Kendall 檢定統計值 S 為：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j), \quad \text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (1)$$

當 $n \geq 10$ 時，Mann-Kendall 檢定統計值 S 為近似常態分佈且平均值為 0，其變異數為：

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

可藉由下式 Z 值來判斷時序資料是否具有顯著性趨勢，其定義為：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

當 $|Z| > Z_{\alpha/2}$ 時，時序資料具有顯著的趨勢，正的 S 值表示有顯著上升的趨勢，而負的 S 值則有顯著下降的趨勢。 α 稱為顯著水準，不同的顯著水準對應到不同之 $Z_{\alpha/2}$ 表示在統計上對於顯著趨勢的認定門檻不同。本文所選定之顯著水準為 5%，即 $Z_{\alpha/2} = 1.96$ ，因此時序資料之 $Z > 1.96$ ，為具有顯著性趨勢，反之 $Z < 1.96$ 則表示其不存在有統計意義上顯著的上升或下降之趨勢。

2. Theil-Sen 斜率推估法

本研究利用 Theil-Sen 斜率推估法進行趨勢斜率之計算，此法是 Sen 於 1968 年提出計算時間序列真實趨勢斜率的方法，其研究提到當一時間序列表現出具有線性趨勢的特性下，其真實斜率可利用簡易之計算方程是求出。Theil-Sen 推估法其優點為不易受極端值所影響，由於時間序列中若存在極端值，一般線性迴歸方法受此極端值所影響而產生高估或低估的斜率，而 Theil-Sen 推估法取時間序列任兩點斜率中之中位數做為真實斜率，故不受極端值所影響。計算時間序列之真實斜率公式如下：

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right), \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, j - 1 \quad (4)$$

其中， β 為時間序列中兩資料點間之斜率； x_j 和 x_k 為時間序列中 j 與 k 時間點 ($j > k$) 所對應之資料值。計算完趨勢斜率後，以原本資料序列為基礎，求出趨勢斜率所代表之方程式如下：

$$Y_t = \beta \times t + X_t \quad (5)$$

其中， 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。求得趨勢斜率所代表之方程式後，本研究利用 Petrow and Merz (2009) 計算資料序列改變量公式，以求得年平均流量、逐月月平均流量及高低流量之改變量，改變量公式如下：

$$\Delta X_R = \frac{X_{end}^* - X_{first}^*}{\bar{X}} \quad (6)$$

其中， ΔX_R 為資料序列之變化量， X_{end}^* 為趨勢斜率線中最後一筆資料， X_{first}^* 為趨勢斜率線中第一筆資料。

3. Mann-Whitney-Pettit 改變點檢定法

Mann-Whitney-Pettit 檢定法 (Pettit, 1979) 主要用於評估數列中存在的顯著改變點，其定義為當數列 $\{X_1, X_2, \dots, X_T\}$ 於 X_n 存在改變點時，使得 $F_1(X) = \{X_1, X_2, \dots, X_T\} \neq F_2(X) = \{X_{n+1}, X_{n+2}, \dots, X_T\}$ 。如果數列不存在改變點時， $|U_{t,n}|$ 將會持續上升不具有轉折出現；如果數列中存在改變點， $|U_{t,n}|$ 將具有下降的轉折，於同一數列中若發生多次轉折，則此數列可能不只存在一改變點，計算方程式如下所示：

$$\text{Sign}(X_i - X_j) = \begin{cases} +1 & X_i - X_j > 0 \\ 0 & X_i - X_j = 0 \\ -1 & X_i - X_j < 0 \end{cases}, \quad U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{Sign}(X_i - X_j) \quad (7)$$

$$K_n = \text{Max}|U_{t,n}|, \quad 1 \leq t < n \quad (8)$$

若要確認改變點是否存在，可使用式(8)之 K_n 即 $|U_{t,n}|$ 的極值，利用式(9)計算此改變點之機率 P ，本研究將 $P = 0.9$ 設定為檢定標準，即 $P > 0.9$ 時則判定該點為此數列之改變點。

$$P = 1 - \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^2 + n^3}\right) \quad (9)$$

然而，某些數列於檢定結束後存在多個改變點，此時可利用下式計算每一年之 $P(t)$ 值，將 $P(t)$ 值大於檢定標準的區間計算出。

$$P(t) = 1 - \exp\left(\frac{-6|U_{t,n}|^2}{n^2 + n^3}\right) \quad (10)$$

4. Cumulative Deviation 檢定法

Cumulative deviation 檢定法 (Buishand, 1982)，又稱為累積偏差檢定法，主要用於判斷數列是否具有均一性，首先計算數列各資料值 X_i 和此數列平均值之差值 S_k ，若該數列具有均一性則 S_k 將於 0 處震盪，公式如下所示：

$$S_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}), \quad 1 \leq k < n \quad (11)$$

其中， n 為資料值數量。計算完 S_k 後，接著利用標準差 D_y 修正 S_k 得到 S_k^* 數列，並找出 S_k^* 數列之最大值以求出統計檢定值 Q/\sqrt{n} 。

$$S_k^* = \frac{S_k}{D_y}, \quad 0 \leq k \leq n \quad (12)$$

$$D_y^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (13)$$

$$Q = \text{Max} |S_k^*| \quad (14)$$

若 Q/\sqrt{n} 大於統計臨界值，則表示該數列並不具有均一性，統計臨界值隨著資料紀錄年數而有所不同，本研究參考 Buishand (1982) 所使用之臨界值表計算各年之統計臨界值。

三、研究區域概述

臺灣地區受季風影響且地形複雜，大部分地區雖屬亞熱帶氣候區；然從平地至高山，由於氣溫遞減率，實際可涵括熱、溫及寒等三帶氣候區。臺灣主要山系為南北走向，構成本島脊樑，與盛行季風相斜交，形成東北部與西南部氣候之差異。冬季受蒙古高壓控制，形成東北季風型天氣，每遇到寒潮爆發時寒冷氣流奔竄南下，帶來持久性低溫；春夏之交受滯留鋒徘徊影響，造成陰雨連綿之梅雨型天氣；夏秋季節受颱風不定期之侵襲，加以春季在東北季風與西南季風交替期間之乾旱，故臺灣面積雖小，各地區氣候變化實際上卻十分複雜。臺灣地區所有河川悉由中央山脈或其鄰近山區發源，向東西注入太平洋或臺灣海峽，計有中央管河川 24 水系、跨省市河川 2 水系及縣管河川 92 水系。各河流均短且陡，暴雨時水流湍急，挾帶大量泥沙，河川流量並隨降雨迅速漲落。受到氣候及地形影響，臺灣可利用水資源有限，自民國 38 至 103 年臺灣地區之平均雨量約為 2,501 釐米，而平均年總逕流量約為 647.24 億立方公尺，但估水期(11 月至翌年 4 月)僅約 150.01 億立方公尺，僅佔平均年總逕流量的 23.18% (經濟部水利署，2015)。

本研究蒐集經濟部水利署公告之臺灣地區長時間之連續河川流量資料進行趨勢特性分析，本研究篩選臺灣地區共 34 個不受人工水利設施(水庫、堰及壩等)且記錄連續河川流量資料長達 30 年之河川流量站，如圖 1 所示。其中，北部區域共 8 個流量站，分佈於蘭陽溪、淡水河、鳳山溪及頭前河流域；中部區域共 6 個河川流量站，分佈於後龍溪、大甲溪、烏溪及北港河流域；南部區域共 9 個河川流量站，分佈於八掌溪、曾文溪、鹽水溪、二仁溪、高屏溪、東港溪及林邊溪；東部區域共 11 個河川流量站，分佈於知本溪、利嘉溪、卑南溪、秀姑巒溪、花蓮溪及立霧溪，河川流量站詳細資訊如表 1 所示。

表 1 臺灣地區河川流量站資訊(經濟部水利署, 2015)

區域	編號	流域	站名	流域面積 (km ²)	TMX	TMY	使用資料區 間
北部 區域	1	蘭陽溪	牛鬥(1)	446.7	306388.4	2726321	1979-2014
	2		家源橋	273.5	298984.7	2719362	1975-2014
	3		西門橋	101.4	324454.8	2739377	1984-2014
	4	淡水河	福山	160.4	298991.3	2742949.3	1953-2014
	5		橫溪	52.9	289452.4	2758619.3	1958-2014
	6	鳳山溪	新埔(2)	208.1	255810.3	2746676	1970-2014
	7	頭前溪	內灣	139.1	267503.3	2733084	1971-2014
	8		上坪	221.7	260738.5	2729330	1971-2014
中部 區域	9	後龍溪	打鹿坑	247.3	235174.2	2706423	1956-2014
	10	大甲溪	南湖	125.6	279476.5	2689540.9	1958-2007
	11		七家灣	110.7	280274.8	2693428.7	1966-2014
	12		松茂	417.1	275573.8	2687359.4	1971-2008
	13	烏溪	觀音橋	338.0	240300.8	2653415	1981-2014
	14	北港溪	溪口	129.4	187866.2	2612026	1972-2014
南部 區域	15	八掌溪	觸口	83.1	209775.8	2592901.4	1967-2014
	16		常盤橋	101.1	193794.3	2591889.4	1970-2014
	17	曾文溪	左鎮	121.3	186554.1	2551818.6	1971-2014
	18	鹽水溪	新市	146.5	175903.5	2550924.6	1973-2014
	19	二仁溪	崇德橋	139.6	183217.2	2531714.6	1982-2014
	20	高屏溪	荖濃	812.0	216098.8	2549698.6	1959-2008
	21		三地門	408.5	213804.4	2512457.7	1964-2014
	22		東港溪	潮州	175.3	203071.1	2496579.8
	23	林邊溪	新埤	309.9	203708	2484782.9	1962-2013
東部 區域	24	知本溪	知本(3)	165.9	251423.7	2510676	1980-2010
	25	利嘉溪	利嘉(2)	148.6	254243.6	2518141	1962-2014
	26	卑南溪	延平	476.2	257848.7	2533238	1956-2014
	27		新武呂(4)	638.8	263620.7	2521408	1978-2011
	28		大崙	302.0	266748.4	2558617	1981-2011
	29	秀姑巒溪	立山	249.4	261354.5	2559233	1959-2014
	30		瑞穗大橋	1538.8	280960.2	2591852	1970-2014
	31		玉里大橋	1008.4	290507.5	2598252	1980-2014
	32	花蓮溪	馬鞍溪橋	136.5	282765.3	2580279	1980-2014
	33		萬里溪橋	242.2	300541.4	2650476	1980-2014
	34	立霧溪	綠水	434.6	310211.3	2646800	1960-2014

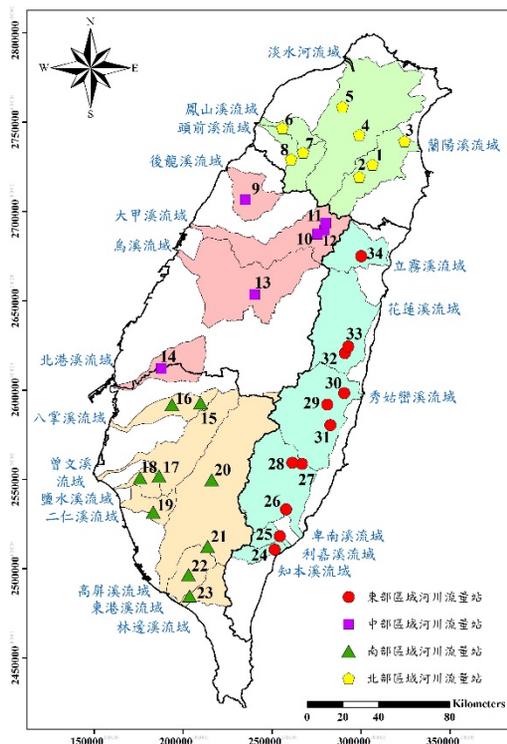


圖 1 臺灣地區河川流量站空間分佈示意圖

四、討論

本研究以 Mann-Kendall 檢定法分析臺灣地區 34 個河川流量站之年平均流量趨勢，另以 Theil-Sen 推估法進行趨勢斜率計算並求出長時間的改變量。最後以 Mann-Whitney-Pettit 和 cumulative deviation 檢定法分析是否具有改變點存在。臺灣地區 34 個流量站之年平均流量顯著趨勢、趨勢斜率、改變量及改變點結果，如表 2 和 3 所示，年平均流量趨勢分區空間分佈圖如圖 2 所示。本研究於各小節分別探討北部、中部、南部及東部四的水資源分區之年平均流量趨勢分析結果，最後探討臺灣地區整體之特性。

表 2 臺灣地區年平均流量顯著趨勢、趨勢斜率及改變量分析結果

區域	流域	編號	站名	使用資料區間	趨勢檢定結果	趨勢斜率	改變量 (cms/year)
北部 區域	蘭陽溪	1	牛鬥(1)	1979-2014	0.286	0.039	8.7%
		2	家源橋	1974-2014	-0.804	-0.060	-10.0%
		3	西門橋	1984-2014	-2.726*	-0.315*	-102.5%*
	淡水河	4	福山	1953-2014	3.304*	0.101*	31.6%*
		5	橫溪	1958-2014	1.480	0.011	14.8%
	鳳山溪	6	新埔(2)	1970-2014	0.753	0.032	17.9%
	頭前溪	7	內灣	1971-2014	0.880	0.042	18.6%
		8	上坪	1971-2014	1.143	0.104	29.1%
中部 區域	後龍溪	9	打鹿坑	1956-2014	2.053*	0.084*	33.0%*
	大甲溪	10	南湖	1958-2007	0.669	0.014	10.0%
		11	七家灣	1966-2014	1.802	0.043	30.9%
		12	松茂	1971-2008	2.942*	0.366*	48.4%*
	烏溪	13	觀音橋	1981-2014	1.690	0.233	33.4%
	北港溪	14	溪口	1972-2014	1.821	0.057	44.1%
南部 區域	八掌溪	15	觸口	1967-2014	0.933	0.020	14.2%
		16	常盤橋	1970-2014	-0.010	0.000	0.0%
	曾文溪	17	左鎮	1971-2014	0.374	0.009	6.5%
	鹽水溪	18	新市	1973-2014	1.669	0.060	38.9%
	二仁溪	19	崇德橋	1982-2014	-0.077	-0.002	-1.0%
		高屏溪	20	荖濃	1959-2008	-1.322	-0.317
	21		三地門	1964-2014	-0.682	-0.105	-14.3%
	東港溪	22	潮州	1965-2014	-1.104	-0.055	-16.8%
林邊溪	23	新埤	1962-2013	1.113	0.083	17.2%	
東部 區域	知本溪	24	知本(3)	1980-2010	2.855*	0.339*	75.0%*
	利嘉溪	25	利嘉(2)	1962-2014	-1.112	-0.032	-16.9%
	卑南溪	26	延平	1956-2014	-2.276*	-0.229*	-38.4%*
		27	新武呂(4)	1978-2011	1.334	0.255	18.4%
	卑南溪	28	大崙	1981-2011	1.224	0.189	23.9%
	秀姑巒溪	29	立山	1959-2014	0.290	0.011	3.1%
	秀姑巒溪	30	瑞穗大橋	1970-2014	-0.029	-0.006	-0.3%
	秀姑巒溪	31	玉里大橋	1980-2014	1.079	0.365	22.3%
	花蓮溪	32	馬鞍溪橋	1980-2014	2.925*	0.251*	58.3%*
	花蓮溪	33	萬里溪橋	1980-2014	0.909	0.126	30.5%
立霧溪	34	綠水	1960-2014	-0.290	-0.030	-5.0%	

*表示檢定結果具有顯著趨勢，正號表示顯著上升趨勢；負號表示顯著下降趨勢。

表 3 臺灣地區各流量站年平均流量改變點分析結果

區域	流域	編號	站名	改變點 (年)	Q/\sqrt{n} (cumulative deviations)	p (Mann-Whin ey-Pettitt)	年平均流量 (cms)		改變點前 與後變化 量
							改變點前	改變點後	
北部 區域	蘭陽溪	1	牛門(1)	-	0.7860	0.9503	-	-	-
		2	家源橋	-	0.6491	0.6533	-	-	-
		3	西門橋	2001	0.9999	2.2236	11.75	5.55	-67.3%
	淡水河	4	福山	1997	0.9984	1.8311	17.86	23.95	31.2%
		5	橫溪	-	0.8718	0.9590	-	-	-
	鳳山溪	6	新埔(2)	-	0.3001	0.6170	-	-	-
	頭前溪	7	內灣	-	0.6591	1.0408	-	-	-
		8	上坪	-	0.8953	1.3884	-	-	-
中部 區域	後龍溪	9	打鹿坑	2004	1.2810	0.9884	13.23	22.32	61.7%
	大甲溪	10	南湖	-	0.5737	0.4048	-	-	-
		11	七家灣	-	0.5576	0.3090	-	-	-
		12	松茂	1999	1.2191	0.7952	24.98	37.92	46.3%
	烏溪	13	觀音橋	-	1.3227	0.8640	-	-	-
	北港溪	14	溪口	-	0.9780	0.8982	-	-	-
南部 區域	八掌溪	15	觸口	-	1.2951	0.9544	-	-	-
		16	常盤橋	-	0.7666	0.6226	-	-	-
	曾文溪	17	左鎮	-	0.7122	0.7255	-	-	-
	鹽水溪	18	新市	-	1.5544	0.9934	-	-	-
	二仁溪	19	崇德橋	-	0.8481	0.8690	-	-	-
	高屏溪	20	荖濃	-	0.9613	0.7266	-	-	-
		21	三地門	-	0.9165	0.8877	-	-	-
	東港溪	22	潮州	-	1.0786	0.9037	-	-	-
林邊溪	23	新埤	-	1.4004	0.9960	-	-	-	
中部 區域	知本溪	24	知本(3)	2004	1.4118	0.9782	11.71	21.63	73.0%
	利嘉溪	25	利嘉(2)	-	0.8415	0.5496	-	-	-
	卑南溪	26	延平	1991	0.7075	0.9207	36.51	31.80	-13.6%
	卑南溪	27	新武呂(4)	-	0.7677	0.7522	-	-	-
	卑南溪	28	大崙	-	0.7481	0.5276	-	-	-
	秀姑巒溪	29	立山	-	0.6217	0.5014	-	-	-
	秀姑巒溪	30	瑞穗大橋	-	1.1179	0.8513	-	-	-
	秀姑巒溪	31	玉里大橋	-	1.0905	0.9251	-	-	-
	花蓮溪	32	馬鞍溪橋	1997	1.6421	0.9981	11.76	17.93	42.2%
	花蓮溪	33	萬里溪橋	-	1.4208	0.9665	-	-	-
立霧溪	34	綠水	-	0.7730	0.6826	-	-	-	

註：粗體表示統計行為上顯著變異處。

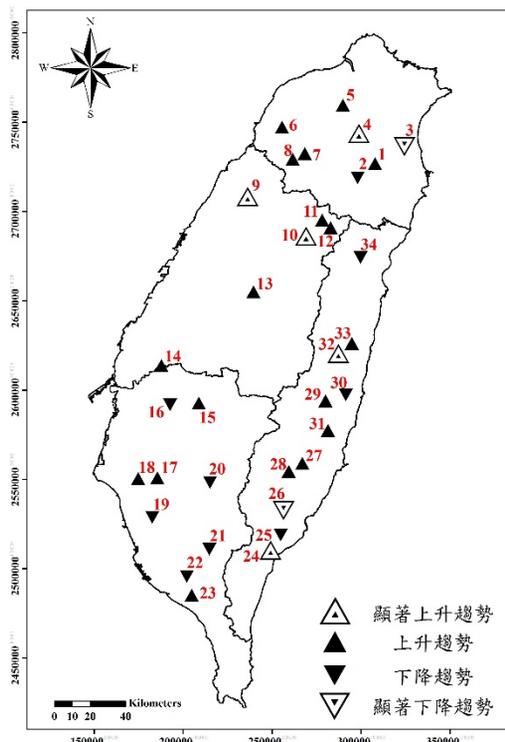


圖 2 臺灣區域年平均流量趨勢分析結果空間分佈圖

1. 北部區域分析結果

本研究首先以 Mann-Kendall 檢定法採用顯著水準 $\alpha = 5\%$ 之標準，即 $Z_{\alpha/2} = 1.96$ 進行趨勢顯著性檢定，並探討年平均流量顯著趨勢空間變化，檢定結果如表 2 所示。年平均流量趨勢結果顯示，北部區域共 8 個流量站中，僅淡水河流域的福山站及蘭陽溪流域的西門橋站具有顯著趨勢結果，福山站及西門橋站之檢定值分別為 3.304 及 -2.726，即福山站具有顯著上升趨勢而西門橋站則為顯著下降趨勢。由整體趨勢分佈結果可知(圖 2)，北部區域 8 個河川流量站幾乎為上升趨勢，僅有蘭陽溪流域 2 個流量站為下降趨勢，分別為蘭陽溪流域的家源橋站及西門橋站。接著本研究以 Theil-Sen 推估法進行趨勢斜率計算，趨勢斜率值大於零為上升趨勢而小於零則為下降趨勢，並利用趨勢斜率值求出趨勢線，計算出各年份代表之河川流量值後利用式(6)計算出長年改變量，計算結果如表 2 所示。由分析結果顯示，改變量較大者為具有顯著趨勢結果之流量站，如福山站及西門橋站之改變量分別為 31.6% 和 -102.5%。

本研究另以 Mann-Whitney-Pettit 及 Cumulative Deviation 檢定法進行北部區域河川流量站之改變點分析，本研究將兩方法之結果進行比較，取改變點位於共同年份之結果視為本研究之河川流量改變點，分析結果如表 3 所示。由改變點結果可知，北部區域僅淡水河流域的福山站及蘭陽溪流域的西門橋站具有改變點。福山站之改變點位於 1997 年，改變點前與後之年平均流量分別為 17.86 cms 和 23.95 cms，年平均流量於 1997 年後呈現上升之趨勢，增加幅度為 31.2%。西門橋站之改變點為 2001 年，其改變點前與後之年平均流量分別為 11.75 cms 和 5.55 cms，年平均流量於 2001 年後為下降之趨勢，其降低幅度為 67.3%，為北部區域變化程度最大者。

2. 中部區域分析結果

本研究選取中部區域 6 個河川流量站進行趨勢特性分析(表 1)，流量站分佈於後龍溪、大甲溪、烏

溪及北港河流域。顯著趨勢、趨勢斜率及改變量結果如表 2 所示，結果顯示，中部地區 6 個河川流量站中，後龍河流域的打鹿坑站及大甲流域的松茂站具有顯著上升之趨勢，且兩者之改變量分別為 33.0% 及 48.4%。中部區域趨勢空間分佈結果如圖 2 所示，由圖中可知，中部區域全部之流量站皆呈現上升之趨勢。中部區域各流量站之改變點結果如表 3 所示，由結果中可知，中部區域僅後龍河流域的打鹿坑站及大甲流域的松茂站具有改變點。打鹿坑站之改變點位於 2004 年，其改變點前與後之年平均流量分別為 13.23 cms 及 22.32 cms，於改變點後之上升比率為 61.7%；松茂站之改變點為 1999 年，其改變點前與後之年平均流量為 24.98 cms 與 37.92 cms，年平均流量於 1999 年後之上升比率為 46.3%。

3. 南部區域分析結果

本研究挑選南部區域記錄資料長度達 30 年以上之河川流量站共 9 個流量站(表 1)，其分別位於八掌溪、曾文溪、鹽水溪、二仁溪、高屏溪、東港溪及林邊溪流域。南部區域各流量站年平均流量的顯著趨勢、趨勢斜率及改變量結果如表 2 所示，由結果顯示，南部區域無流量站於年平均流量檢定出顯著趨勢。為南部區域 9 個流量站年平均流量趨勢結果空間分佈圖如圖 2 所示，由圖中可知，曾文溪、鹽水溪及林邊溪流域之年平均流量趨勢為上升趨勢；二仁溪、高屏溪及東港溪之年平均流量趨勢呈現下降趨勢。由改變量結果可知，南部區域 9 個流量站之年平均流量改變量，以鹽水溪流域的新市站改變量最大，其上升比率為 38.9%；八掌溪流域的常盤橋站則無改變量。南部區域各流量站之年平均流量改變點如表 3 所示，由表中結果可知，南部區域並無改變點存在。

4. 東部區域分析結果

選定東部區域共 11 個河川流量站進行分析(表 1)，流量站分佈於知本溪、利嘉溪、卑南溪、秀姑巒溪、花蓮溪及立霧溪流域。東部區域各流量站年平均流量的顯著趨勢、趨勢斜率及改變量分析結果如表 2 所示，表中結果顯示，東部區域具有顯著趨勢之流量站分別為位於知本溪流域的知本(3)站、卑南溪流域的延平站及花蓮溪流域的馬鞍溪橋站，其中，知本(3)和馬鞍溪橋站為顯著上升趨勢，而延平站為顯著下降趨勢。東部區域各流量站年平均流量趨勢檢定結果空間分佈圖，如圖 2 所示。由圖中可知，立霧溪及利嘉溪流域、卑南溪流域的延平站及秀姑巒溪流域的瑞穗大橋站之年平均流量為下降趨勢；花蓮溪及知本溪流域、卑南溪流域的新武呂(4)和大崙站、秀姑巒溪流域的立山和玉里大橋站呈現上升趨勢。改變量分析結果顯示，知本溪流域的知本(3)站年平均流量改變量上升程度最大，其上升比率為 75.0%；卑南溪流域的延平站年平均流量改變量下降程度最大，其下降比率為 38.4%。東部區域各流量站年平均流量之改變點結果如表 3 所示，表中結果顯示，東部區域 11 個流量站中僅知本溪流域的知本(3)站、卑南溪流域的延平站及花蓮溪流域的馬鞍溪橋站具有改變點，其中知本(3)站的改變點位於 2004 年，其改變點前與後之年平均流量為 11.71 cms 和 21.63 cms，改變點後之年平均流量上升比率為 73.0%；延平站的改變點為 1991 年，其年平均流量於改變點前與後之值為 36.51 cms 與 31.80 cms，年平均流量於改變點後下降比率為 13.6%；馬鞍溪橋站之改變點位於 1997 年，其改變點前與後之年平均流量分別為 11.76 cms 與 17.93 cms，改變點後之年平均流量上升比率為 42.2%。

5. 臺灣區域結果討論

本研究將 4 個水資源分區之分析結果進行共同探討，由圖 2 臺灣區域 34 個流量站年平均流量趨勢分析結果空間分佈圖，由圖中可觀察出，年平均流量的顯著趨勢變化主要出現在北部、中部及東部地區，其中北部區域為蘭陽河流域的西門橋站和淡水河流域的福山站；中部區域為後龍河流域的打鹿坑站和大甲流域的松茂站；東部區域為知本溪流域的知本(3)站、卑南溪流域的延平站及花蓮溪流域的馬鞍溪橋站，西門橋與延平站為顯著下降趨勢，而福山、打鹿坑、松茂、知本(3)及馬鞍溪橋站為顯著上升趨勢。由整體趨勢變化可知，臺灣整體年平均流量之趨勢主要為上升趨勢，全臺灣區域 34 個流量站中，24 個流量站為上升趨勢，其中在 4 個水資源分區中，北部、中部及東部區域主要為上升趨勢。河川流量易受到降雨量影響，由近 30 年降雨量分析結果可觀察出，北部、中部及東部皆呈現上升的趨

勢，其中中部區域於近 30 年之降雨量有明顯的上升，此結果與中部區域年平均流量結果相同(許晃雄等人，2011)。

年平均流量改變量結果顯示，改變量上升程度最大者位於東部區域知本流域的知本(3)站，其上升比率為 75.0%，而改變量下降程度最大者為北部區域蘭陽流域的西門橋站，其下降比率達 102.5%。年平均流量改變點結果顯示，改變點所在年份大部分介於 1995 至 2005 年之間，而改變點後之年平均流量上升程度最大者為知本流域的知本(3)站，其上升比率為 73.0%；改變點後下降程度最大者為蘭陽流域的西門橋站，其下降比率為 67.3%。由過去降雨量變化研究可知(許晃雄等人，2011)，1980 至 2000 年之間降雨量發生 3 次上下振盪，直至 2000 年之後的振動才趨於緩和，維持在正距平的情況，此結果與本研究之改變點結果吻合。

五、結 論

本研究評估年平均流量顯著趨勢結果顯示，年平均流量在 34 個流量站中僅 7 個流量站呈現顯著上升趨勢，而年平均流量表示為河川流量在單年內的平均狀態，因此顯著趨勢結果表示臺灣區域之流量幾乎無發生劇烈的改變，僅在少數區域有明顯之變動。本研究所計算之改變量為資料記錄區間內，流量平均狀態下之變化程度。由年平均流量改變量結果可知，年平均流量上升程度最大之流量站為位於東部區域知本流域的知本(3)站，而年平均流量下降程度最大的流量站為位於北部區域的蘭陽流域的西門橋站。由年平均流量改變點分析結果可知，年平均流量所分析出之改變點多落在 1995 至 2005 年之間。而年平均流量於改變點後上升程度最大者為東部區域知本流域的知本(3)站，而下降程度最大者為北部區域蘭陽流域的西門橋站。本研究經由 Mann-Kendall 檢定法、Theil-Sen 斜率推估法、Mann-Whitney-Pettit 和 cumulative deviation 改變點檢定法分析臺灣區域之年平均流量趨勢特性，在年平均流量方面，整體上大部分區域並無發生流量重大的變化，僅少數區域有明顯的改變，因此在進行水資源的開發及分配時，需特別對於具有顯著趨勢變化的區域進行更進一步的瞭解。

參考文獻

1. 許晃雄、陳正達、盧孟明、陳永明、周佳、吳宜昭(2011)，「臺灣氣候變遷科學報告」，國家災害防救科技中心。
2. 鍾侑達、郭峻菘、陳昶憲(2009)，「臺灣區域降雨之趨勢」，農業工程學報，55(4): 1-18。
3. 經濟部水利署(2015)，「中華民國一零三年臺灣水文年報」，經濟部水利署，臺北。
4. Bassiouni, M., and D.S. Oki(2013), "Trends and shifts in streamflow in Hawai'i, 1913-2008," *Hydrological Processes*, 27:1484-1500.
5. Birsan, M.V.(2015), "Trends in monthly natural streamflow in Romania and linkages to atmospheric circulation in the North Atlantic," *Water Resources Management*, 29(9):3305-3313.
6. Buishand, T.A.(1982), "Some methods for testing the homogeneity of rainfall records," *Journal of Hydrology*, 314:312-329.
7. Burn, D.H., and M.A. Hag Elnur(2002), "Detection of hydrologic trends and variability," *Journal of Hydrology*, 255:107-122.
8. Chen, Z., Y. Chen, and B. Li(2013), "Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of northwest China," *Theoretical and Applied Climatology*, 111:537-545.
9. Da Silva, R.M., C.A.G. Santos, M. Moreira, J. Corte-Real, V.C.L. Silva, and I.C. Medeiros(2015), "Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin," *Nat Hazards*, 77(2):1205-1221.
10. Demeterova, B. and P. Skoda(2009), "Low flows in selected streams of Slovakia," *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 57:55-69.
11. Esty, D. et al.(2005), "Environmental sustainability index: benchmarking national environmental

- stewardship,” Yale Center for Environmental Law & Policy, New Haven.
12. Fiala, T.(2008), “Statistical characteristics and trends of mean annual and monthly discharges of Czech rivers in the period 1961-2005,” *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56:133-140.
 13. Gao, Y., B. Zhu, T. Wang, and Y.F. Wang(2012), “Seasonal change of non-point source pollution-induced bioavailable phosphorus loss: a case study of Southwestern China,” *Journal of Hydrology*, 420-421:373-379.
 14. Gao, G.Y., B.J. Fu, Y. Ma(2015), “Temporal variations of streamflow, sediment load and flow–sediment relationship in the Yanhe watershed of the Chinese Loess Plateau,” *Hydrological Processes*, 29:2402-2413.
 15. Goyal, M.K.(2014), “Statistical Analysis of Long Term Trends of Rainfall During 1901–2002 at Assam, India,” *Water Resources Management*, 28:1501-1515.
 16. Halmova, D., P. Pekarova, J. Olbrimek, P. Miklanek, and J. Pekar(2015), “Precipitation Regime and Temporal Changes in the Central Danubian Lowland Region,” *Advances in Meteorology*, Article ID 715830:1-12.
 17. Hannaford, J. and G. Buys(2012), “Trends in seasonal river flow regimes in the UK,” *Journal of Hydrology*, 475:158-174.
 18. Intergovernmental Panel on Climate Change(2007), “Observations: Surface and Atmospheric Climate Change, In Climate Change 2007: The Physical Science Basis,” Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC: Geneva, Switzerland.
 19. Jónsdóttir, J.F., P. Jónsson, and C.B. Uvo(2006), “Trend analysis of Icelandic discharge, precipitation and temperature series,” *Nordic Hydrology*, 37(4-5):365-376.
 20. Kemdall, M.G.(1975), “Rank correlation methods,” Charles Griffin, London.
 21. Liu, Q. and T.R. McVicar(2012), “Assessing climate change induced modification of Penman potential evaporation and runoff sensitivity in a large waterlimited basin,” *Journal of Hydrology*, 464-465:352-362.
 22. Lorenzo-Lacruz, J., S.M. Vicente-Serrano, J.I. Lopez-Moreno, E. Moran-Tejeda, and J. Zabalza(2012), “Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005),” *Journal of Hydrology*, 414-415:463-475.
 23. Mann, H.B.(1945), “Non-parametric test against trend,” *Econometrica*, 13:245-259.
 24. Martino, et al.(2013), “Variability and Trend in Seasonal Precipitation in the Continental United States,” *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(6):630-640.
 25. Miao, C.Y., W. Shi, X.H. Chen, and L. Yang(2012), “Spatiotemporal variability of streamflow in the Yellow River: possible causes and implications,” *Hydrological Sciences Journal*, 57(7),1355-1367.
 26. Morris, S.E., D.C. Cobby, and B. Donovan(2011), “Developing indicators to detect changes in the seasonality, frequency and duration of medium and high river flows,” *Water and Environment Journal*, 26:38-46.
 27. Petrow, T. and B. Merz(2009), “Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002,” *Journal of Hydrology*, 371:129-141.
 28. Pettit, A.N.(1979), “A non-parametric approach to the change point problem,” *Journal of Applied Statistics*, 28(2):126-135.
 29. Pingale, S., D. Khare, M. Jat, and J. Adamowski(2014), “Spatial and temporal trends of mean and extreme rainfall and temperature for the 33 urban centres of the arid and semi-arid state of Rajasthan, India,” *Atmospheric Research*, 138:73-90.
 30. Rajendran, R. and R. Kasthuri(2013), “Inequality in ground water access among the farmers – Challenges to sustainable agriculture,” *International Journal of Current Trends in Research*, 2(1):372-377.
 31. Renard, B., M. Lang, P. Bois, A. Dupeyrat, O. Mestre, H. Niel, E. Sauquet, C. Prudhomme, S. Parey, E. Paquet, L. Neppel, and J. Gailhard(2008), “Regional methods for trend detection: assessing field significance and regional consistency,” *Water Resources Research*, 44:W08419.

32. Rosegrant, M.W., X. Cai, and S.A. Cline(2002), "Averting an impending crisis, global water outlook to 2025 Food Policy Report," Colombo: International Water Management Institute (IWMI).
33. Rouge, C., Y. Ge, and X. Cai(2013), "Detecting gradual and abrupt changes in hydrological records," *Advances in Water Resources*, 53:33-44.
34. Sadri S., J. Kam, and J. Sheffield(2015), "Nonstationarity of low flows and their timing in the eastern United States," *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12:2761-2798.
35. Sagarika, S., A. Kalva, S. Ahmad(2014), "Evaluating the effect of persistence on long-term trends and analyzing step changes in streamflows of the continental United States," *Journal of Hydrology*, 517:36-53
36. Schmocker-Fackel, P. and F. Naef(2010), "More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850," *Journal of Hydrology*, 381:1-8.
37. Sen, P.K.(1968), "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau," *Journal of the American Statistical Association*, 63:1379-1389.
38. Wang, H., Y. Chen, and W. Li(2015), "Characteristics in streamflow and extremes in the Tarim River, China: trends, distribution and climate linkage," *International Journal of Climatology*, 35:761-776.
39. Wilson, D., H. Hisdal, and D. Lawrence(2010), "Has streamflow changed in the Nordic countries? Recent trends and comparisons to hydrological projections," *Journal of Hydrology*, 394(3-4):334-346.
40. Yeh, C.F., J. Wang, H.F. Yeh, and C.H. Lee(2015), "Spatial and Temporal Streamflow Trends in Northern Taiwan," *Water*, 7:634-651.