

# 以 Budyko 架構探討氣候變遷與人為活動造成臺灣北部逕流量之變化

EVALUATING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND HUMAN ACTIVITIES ON STREAMFLOW VARIATIONS BASED ON THE BUDYKO FRAMEWORK IN CATCHMENTS OF THE NORTHERN TAIWAN

國立成功大學  
資源工程學系  
大學部專題生

**李忠勳**  
Chung-Hsun Lee

國立成功大學  
資源工程學系  
副教授

**葉信富\***  
Hsin-Fu Yeh

## 摘要

近年來氣候變遷與人為活動對環境的影響受到廣大的重視，而水文環境與水資源的利用息息相關，因此重新評估水資源可利用性與其危機具有相當的必要性。本研究首先以統計方法分析臺灣北部流域河川逕流量的變化趨勢與轉折點，其中包括蘭陽溪、基隆河、大漢溪、鳳山溪、油羅溪以及上坪溪。另外本研究採用 Budyko-Fu 模式與 Budyko-Mezentsev-Choudhury-Yang 模式評估氣候與流域特徵之彈性係數，可提供逕流量對降雨量、潛勢能蒸發散量、流域特徵參數之敏感度分析，並區分氣候變遷人為活動對逕流量造成影響之改變百分比。結果顯示，蘭陽溪與基隆河流域之流量分別於 1993 年與 1990 年檢測出轉折點，由 Budyko 型彈性係數法評估其改變因子，蘭陽溪流域流量於變化期增加 32.50%，其中有約 109.00% 為非氣候因子造成；基隆河流域則於變化期減少 18.11% 之流量，主導因子為氣候變遷，約佔之 71.53% 減少量。敏感度分析結果指出臺灣北部分析的 6 個流域中流量皆以對降雨量變化的反應最大，每增加 1% 的降雨量，將使流域增加 1.05% 至 1.37% 之河川逕流量。本結果將可作為臺灣北部流域日後在擬定水資源及土地管理方針時定量化的參考。

**關鍵詞：**逕流量、Mann-Kendall 趨勢檢定、Budyko 架構、臺灣北部。

\* 通訊作者 · 國立成功大學資源工程學系副教授

701 台南市東區大學路 1 號 · hfych@mail.ncku.edu.tw

## EVALUATING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE AND HUMAN ACTIVITIES ON STREAMFLOW VARIATIONS BASED ON THE BUDYKO FRAMEWORK IN CATCHMENTS OF THE NORTHERN TAIWAN

**Chung-Hsun Lee**

National Cheng Kung University  
Department of Resources Engineering

**Hsin-Fu Yeh\***

National Cheng Kung University  
Department of Resources Engineering

### ABSTRACT

Recently, the influences of climate change and human activities on global environment have been widely concerned. As the hydrological environment is intimately related to the water resources, it is essential to evaluate the water availability and related issues. This study applies statistical methods to analysis the streamflow data trend and break point in the basins of the northern Taiwan, including Lanyang River, Keelung River, Dahan River, Fengshan River, Youluo River and Shangping River. Furthermore, the Budyko-Fu equation and the Budyko-Mezentsev-Choudhury-Yang equation are applied to evaluate the elasticity coefficient of climate and catchment characteristics parameter, which can provide sensitivity analysis of streamflow to rainfall, potential evapotranspiration and catchment characteristic parameter, and quantifying the streamflow change due to the impact of climate change and human activities. The results show that the break points of streamflow data in Lanyang River and Keelung River were detected in 1993 and 1990 respectively. The streamflow of Lanyang River increased by 32.50% during the impacted period, about 109.00% of the variation was caused by non-climate factors; the Keelung River was reduced by 18.11% during the impacted period, and the dominant factor was climate change, accounting for 71.53% of reduction. Result of Sensitivity analysis showed that precipitation changes was the most sensitive factor of streamflow variation. For every 1% increase in precipitation, the streamflow would increase by 1.05% to 1.37%. These results could serve as reference for the sustainable development of water resources and territorial policies in the northern Taiwan.

**Keywords:** Runoff, Mann-kendall trend test, Budyko framework, Northern taiwan.

## 一、前言

水資源為人類社會發展的重要的資產，然而近年來水文環境在氣候變遷與人為活動影響下所發生的變遷，不僅牽連生態環境，亦造成許多區域水資源的開發與使用改變，以及伴隨事件極端降雨、澇災與旱災等極端天氣的發生 (Huntington, 2006; Parry, 2009; IPCC, 2014)。在水循環變遷的趨勢下，許多區域的生態、民生與經濟面臨更大的挑戰，流域的水文反應與水資源可利用性變化因此成為了至關重要的議題之一。

河川逕流量的變動被視為流域水文循環之重要指標，是故若可透過定量方法，區別造成流量變化的因子與其機制，方可於流域的管理上提供相當的助益(Li *et al.*, 2016)。由於環境地表過程快速，人為活動與其它地質地貌變遷因素的影響應一併考量，造成河川逕流量改變的原因可依來源區分為氣候變遷以及非氣候因子，氣候變遷中包含降雨與潛勢能蒸發散型態的時空變遷(Trenberth and Shea, 2005; Wentz *et al.*, 2007)；而非降雨因子則包括人為活動與地貌變動對流域水文特徵造成的影響，如農林活動、建置堰壩、水土保持政策的實施等 (Huntington, 2014; Wang *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2017)。

近年由於許多水資源變遷引發的生態、民生與災害問題日益頻繁，許多學者開始從不同的角度著手探討氣候變遷與人為活動造成水文的反應。常用於評估氣候與人為因子影響河川逕流量變化的方法有水文模式、經驗統計法以及彈性法(elasticity method)，其他方式還包括成對集水區法(paired catchments approach) (Brown *et al.*, 2005)、生態水文法(ecohydrology method) (Tomer and Schilling, 2009)、以及分解法(decomposition method) (Wang and Hejazi, 2011)。成對集水區法在森林與水文學中是一種常用於評估土地變遷對逕流影響的方法，然而成對集水區法僅適合用於小型的集水區，在中大型區域的流域較難以實用(Brown *et al.*, 2005; Li, 2017)。生態水文法由 Tomer and Schilling (2009)所提出，為考量流域長期水能消耗速率的模式，此方法可區分人為活動與土地變遷對流域水文造成的影響，但僅能提供定性的評估(Gao, 2016)。分解法為 Wang and Hejazi (2011)基於俄國科學家 Budyko 對大氣水能平衡的假設理論所提出的方法，其結果時常與同樣基於 Budyko 假說的彈性參數解析法共同比較。

水文模式法為透過物理模式與數學模擬水文循環的方法，可透過輸入設定參數評估流域的水文反應。然而，水文模式的運算時常需要大量的輸入資料而耗費

時間。Chang *et al.* (2015)分析中國渭河流域於 1956 年至 2006 年之降雨量、溫度及逕流量長年趨勢，並以數值水文模型 VIC (Variable Infiltration Capacity)模擬 1971 年至 2006 年之逕流情形。經分析結果指出，渭河流域自 1970 年開始，每十年之改變量中受人為活動影響之百分比依序為 64%、72%、47%以及 90%，表示人為活動為影響該流域水文的主要來源。Ashofteh *et al.* (2016)以 IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation, and Streamflow data)模式評估伊朗 Aidoghmoush 流域 1971 至 2000 年間逕流量之變化因子，結果指出氣候變遷與人為活動分別造成該流域逕流量減少 79%與 27%，同樣得到人為活動對其流域具有較大影響之結論。經驗統計法用於評估流域水文量時，常用方法包括時間趨勢分析、雙累積曲線及線性迴歸等，以長年數據評估目標因子(例如:逕流量對降雨量)間的變異與一致性(Gao *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017a)。經驗統計法的特性為計算方法簡單且快速，然而其評估原理缺乏物理背景的支持，使其需要大量的長期資料以確保準確度。Pirnia *et al.* (2018)以 Mann-Kendall 趨勢檢定與雙累積曲線法評估伊朗 Tajan 河流域於 1971 年至 2010 年間的逕流量變化，所得結果指出該流域於 1999 年建置水壩後，濕季流量減少 116.55 釐米，其中 75.32%之減少為人為活動所造成；而旱季流量則增加 41.45 釐米，其中人為活動影響占增加量的 130.68%，表示建壩對流域流量具有明確的影響。Sun *et al.* (2019)針對 1961 年至 2010 年中國洮兒河流域內 4 個流量站進行分析，其研究結果表示該流域於 1998 年檢測到的轉折點後，4 個流量站流量皆為減少。經由雙累積曲線分析指出，人為活動分別在該流域內造成 58.31%、17.81%、37.17%與 47.66%之影響百分比，且其影響程度於改變期內仍持續加深。

彈性法為 Schaake (1990)所提出，透過彈性係數評估逕流量對影響因子的敏感度，並可藉氣候因子的彈性係數求取氣候變遷造成逕流量變化的百分比。根據 Schaake(1990)的定義，逕流量對目標因子的彈性係數為逕流量變化率與變數  $x$  變化率之比值：

$$\epsilon_x = \lim_{\frac{\Delta x}{x} \rightarrow 0} \left[ \frac{\frac{\Delta Q}{Q}}{\frac{\Delta x}{x}} \right] = \frac{\partial Q}{\partial x} \times \frac{x}{Q} \dots\dots\dots(1)$$

其中  $Q$  為逕流量； $x$  為影響逕流量的因子，例如：降水量( $P$ )、潛勢能蒸發散量( $E_0$ )。彈性法根據不同參數計算方式，主要分為無母數法(Sankarasubramanian *et al.*, 2001)以及 Budyko 型解析法(Schaake, 1990; Dooge, 1992; Arora, 2002; Roderick and Farquhar, 2011; Yang and

Yang, 2011)。其差別在於無母數法使用分析時間內每年的氣象與水文觀測資料做計算並取其中位數，解析法則使用基於 Budyko 假說的水能量平衡方程式進行計算。

Budyko (1948, 1971)假設一區域內的年均蒸發散量與逕流速率主要受到大氣中可用能量(需求，常以淨輻射量( $R_n$ )或潛勢能蒸發散量( $E_0$ )的形式表現)與可用水分(供給，以降水量代表)控制，在長期的時間尺度下，此關係可以一水能量平衡方程式表示之：

$$\frac{E}{P} = F\left(\frac{E_0}{P}\right) = F(\phi) \dots\dots\dots (2)$$

其中  $F(\phi)$ 為水能量平衡方程式； $E$  為蒸發散量； $\phi$  為 Budyko 架構的乾旱指數(定義為  $\phi = E_0/P$ ，若  $\phi < 1$  代表為乾燥氣候； $\phi > 1$  則表示為潮濕氣候)。根據不同學者的發展與推導，本研究將不同的水能量平衡方程式整理於表 1，表中前四者屬於無參數法，其模式以評估氣候變遷的干擾情形為主，Fu、Mezentsev-Choudhury-Yang、Milly-Porporato、Zhang 以及 Wang-Tang 模式則

屬於有參數法，其方程式中的流域特徵參數可反應流域特徵，如土地覆蓋、植被、土壤性質、地貌等因子。

在 Budyko 的假設下，若一流域非常乾燥(降水遠小於潛勢能蒸發散量)，其可用能量遠大於蒸發散所需能量，此狀況下年蒸發散將受可用水分限制而逼近降水量。反之，若流域非常潮濕(降水量遠大於潛勢能蒸發散量)，可用能量遠小於蒸發散能量需求，年蒸發散量受可用能量限制並逼近潛勢能蒸發量(Arora, 2002; Wang *et al.*, 2016; Freund and Kirchner, 2017)。極乾燥與極潮濕環境之數學表式分別如式(3.1)與式(3.2)所示：

$$\frac{E}{P} \rightarrow 1 \quad \frac{R_n}{P} \rightarrow \infty \dots\dots\dots (3.1)$$

$$E \rightarrow R_n \quad \frac{R_n}{P} \rightarrow 0 \dots\dots\dots (3.2)$$

此兩項假設可在 Budyko 曲線上形成邊界，如圖 1 所示(Liang *et al.*, 2015)。圖 1 中可見水分限制與能量限制二條邊界，所有 Budyko 型模式所呈現之曲線皆能符合此條件限制。

表 1 常用 Budyko 型方程式整理

模式	年平均水能量平衡方程式	參數	參考
Budyko-Schreiber	$F(\phi) = 1 - e^{-\phi}$	無	Schreiber (1904)
Budyko-Ol'dekop	$F(\phi) = \phi \tanh(\phi^{-1})$	無	Ol'dekop (1911)
Budyko	$F(\phi) = [\phi \tanh(\phi^{-1})(1 - e^{-\phi})]^{1/2}$	無	Budyko (1948)
Budyko-Turc-Pike	$F(\phi) = 1 / \sqrt{1 + \phi^{-2}}$	無	Turc (1954); Pike (1964)
Budyko-Fu	$F(\phi) = 1 + \phi - (1 + \phi^m)^{1/m}$	$m$	Fu (1981)
Budyko-Mezentsev-Choudhury-Yang	$F(\phi) = 1 / [\phi^{-n} + 1]^{1/n}$	$n$	Mezentsev (1955); Choudhury (1999); Yang <i>et al.</i> (2008)
Budyko-Milly- Porporato	$F(\phi) = \frac{\exp[\gamma(1 - \phi^{-1})]^{-1}}{\exp[\gamma(1 - \phi^{-1})] - \phi^{-1}}$	$\gamma$	Milly (1993); Porporato <i>et al.</i> (2004)
Budyko-Zhang	$F(\phi) = (1 + \omega\phi) / (1 + \omega\phi + \phi^{-1})$	$\omega$	Zhang <i>et al.</i> (2001)
Budyko-Wang	$F(\phi) = \frac{1 + \phi - \sqrt{(1 + \phi)^{\delta} - 4\delta(2 - \delta)\phi}}{2\delta(2 - \delta)}$	$\delta$	Wang and Tang (2014)

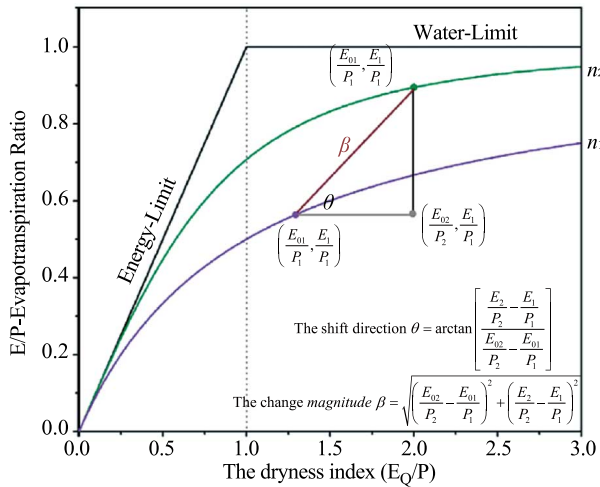


圖 1 Budyko 曲線與其軌跡分析(Liang et al., 2015)

Budyko 架構發展出的模式經過長久的推展與應用，至今仍有許多人陸續提出新的 Budyko 架構模式來評估流域的水文反應(Wang et al., 2015; Greve et al., 2015; Lintner et al., 2015; Wang et al., 2016)。在評估水文環境對外界的衝擊時，由於 Budyko 型的解析法不需要大量的資料同時具有物理背景的假設等優點，此類型方法亦持續受到應用與發展，包括 Sankarasubramanian et al. (2001)、Arora (2002)、Roderick and Farquhar (2011)、Yang and Yang (2011)以及其他人士皆提出進一步的分析與討論。Gao et al. (2016)透過 Budyko-Fu 方程式計算中國黃土高原 15 個流域 1961 年至 2009 年間受氣候變遷與人為活動影響的水文變遷，並指出人為活動占該區域流量減少中 64.75% 的影響百分比。Li et al. (2017) 同樣分析中國黃土高原流量減少之情勢，但該研究採用 Budyko-Zhang 方程式進行評估，其計算結果表示 38-58% 的流量減少量肇因於土地利用與覆蓋的變遷，與同區域先前的研究成果可互相映證。Wang et al. (2018) 以 Budyko-Mezentsev-Choudhury-Yang 方程式評估各項因子對黃河流域水源區青藏高原逕流量之影響，其結果指出於 1990 年至 2003 年間，氣候變遷影響佔流量減少百分比 55%，土地變遷則佔 45% (相對於 1965 年至 1989 年)；而 2004 年至 2015 年間，流量相對 1990 年至 2003 年間增加，氣候變遷影響佔百分比 126%，土地變遷則佔 26%。這些學者的結果皆指出 Budyko 模式為一合理且可信的評估方式，並且可提供與實際情況相符的結果。

臺灣本島面積約 36,000 平方公里，其中平原部分僅占總面積 37%，其餘皆為高程 100 公尺以上之台地與山地，而 1,000 公尺以上之山地占有 32% 之面積，顯見臺灣地形變化陡急。臺灣屬於亞熱帶氣候，春季主要

受到滯留鋒面系統之影響，主要降雨事件如每年二至四月的春雨與五、六月之梅雨；夏秋之際，熱帶氣旋與西南氣流常帶來短時間、高強度的降雨；冬季在蒙古高壓的影響之下，東北季風的吹拂會為北部引入低溫與水氣，而在春季的氣候交替期間，則常發生天候乾旱的情形。

儘管雨量充沛，但由於臺灣降雨型態具時空分布不均之特性，導致水資源分配仍然不足。臺灣平均年降雨量約達 2,510 公釐(經濟部水利署，2017)，長年資料顯示臺灣的總降雨量大致維持不變，空間分布上降雨量則由東北向西南遞減，但北部降雨量持續增加；而南部降雨量呈現減少情形，表示降雨帶發生北移的現象。此外，全年降雨量中約有 78% 集中於 5 至 10 月之濕季，如今長年資料顯現各地的平均降雨日數逐漸減少，導致降雨強度(取降雨量與降雨日數之比值)呈現增加趨勢，亦表示我們正面臨日趨極端化的氣候(汪中和，2015)。

臺灣平均年總逕流量為 650.03 億立方公尺，受限於山高地狹的特性，河川型態以長度短、坡度大及流速急為主，造就快速的地表逕流過程，使得水資源難以透過自然方式涵養於流域內。此外，每逢強大的降雨事件，臺灣河川水位便急劇漲落，並挾帶大量泥沙沖刷與沉積，衍伸出水質、水患、水庫開發與養護困難等課題。本研究選定之臺灣北部區域為臺灣人口密集區域，土地與水資源十分珍貴，因此評估其近年來氣候變遷與人為活動對其水文環境的影響有其必要性與價值，期許可做為日後在水資源管理、建設與水土保持等政策上之參考。

## 二、研究區域

臺灣北部區域之行政區包含宜蘭縣、基隆市、新北市、臺北市、桃園市以及新竹縣市，主要流域為蘭陽溪、淡水河、鳳山溪及頭前河流域，流域總面積分別為 978 平方公里、2,726 平方公里、250.1 平方公里及 565.9 平方公里，其中以淡水河流域覆蓋面積最廣大。自 1949 年至 2017 年，全區歷年平均逕流量約 151.45 億立方公尺，豐水期(5-10 月)年平均逕流量為 95.24 億立方公尺，枯水期(11-4 月)為 56.21 億立方公尺，總流量與豐枯差異相較其他區域皆為最低。該區域冬季之降雨來源主要為東北季風，夏季則以颱風帶來的降雨為主，1949 年至 2017 年歷年平均降雨量約 2933.90 毫米，相較臺灣中、南、東部地區為較豐沛之區域(經濟部水利署，2017)。

表 2 臺灣北部區域河川流量站與雨量站資訊(經濟部水利署 · 2017)

流域	流域面積(km <sup>2</sup> )	平均高程(m)	編號	類型	測站	TMX (TWD67)	TMY (TWD67)
蘭陽溪	820.69	955.2	1	河川流量站	蘭陽大橋	327262.2	2734754
			2		南山	287634	2703687
			3		留茂安	294890	2714194
			4	雨量站	土場(1)	299456	2718763.39
			5		梵梵(2)	302389	2723226
			6		新北城	324950	2730841
大漢溪	622.80	1614.81	7	河川流量站	霞雲	285813.3	2740336.8
			8		秀巒	278034.4	2723777.7
			9	雨量站	鞍部	277705.5	2729116.5
			10		三光	286273.5	2729607.8
基隆河	204.41	251.78	11	河川流量站	五堵	319419.4	2774923.7
			12		火燒寮	324813.7	2764092.9
			13	雨量站	瑞芳(2)	330186.2	2778442.8
			14		五堵	319447.5	2774911.4
鳳山溪	208.06	258.84	15	河川流量站	新埔(2)	255810.3	2746676
			16	雨量站	關西(3)	267417.1	2741651.3
			17		新埔(1)	256388.7	2747090.2
油羅溪	139.07	977.80	18	河川流量站	內灣	267503.3	2733084
			19	雨量站	鳥嘴山	277875.8	2734904.7
			20		梅花	270281.7	2730286.1
上坪溪	221.73	1251.48	21	河川流量站	上坪	260738.5	2729330
			22	雨量站	太閣南	264159.4	2724487.3
			23		清泉	259655.8	2718705.8

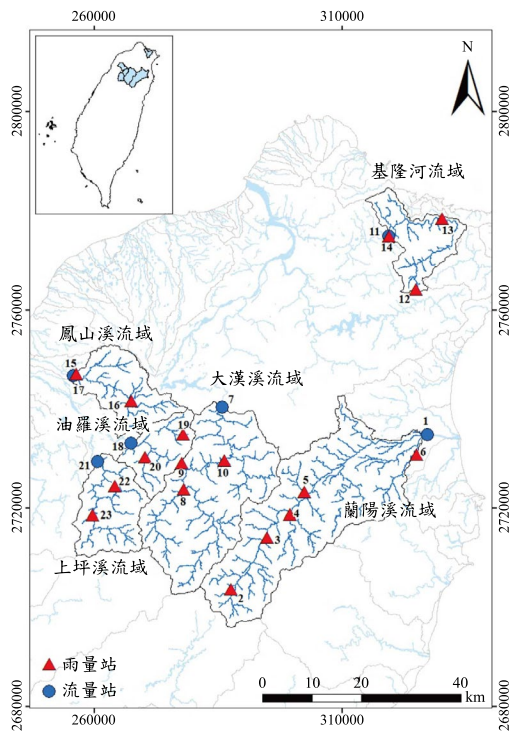


圖 2 流域空間分布圖

本研究選取臺灣北部區域之蘭陽溪、大漢溪、基隆河、鳳山溪、油羅溪及上坪溪流域作為分析對象，其中大漢溪與基隆河流域為淡水河流域之子流域，油羅溪及上坪溪則屬於頭前河流域上游之子流域。本研究以水利署設置之河川流量測站進行流域劃分，其面積分別為 820.69、622.8、204.41、208.06、139.07 與 221.73 平方公里，平均高程為 955.20、1614.81、251.78、258.84、977.80 與 1251.48 公尺。流域空間分布圖如圖 2 所示。

### 三、研究方法

為評估臺灣北部區域之降雨量與逕流量變異，本研究選取經濟部水利署設置之雨量站與河川流量測站資料進行分析，詳細資料整理如表 2 所示。各流域之平均雨量採用徐昇氏多邊形法計算，其中若流域內可用雨量站不足 3 站者，改以算術平均法計算平均雨量。潛勢蒸發散量為 Budyko 模式中的一項氣候參數，本研究採用 GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam

Model)提供之潛勢蒸發散量資料進行分析(Miralles *et al.*, 2011; Martens *et al.*, 2017)。GLEAM 為一基於衛星遙測資料個別計算各項土地蒸發散量之資料庫，提供全球 1980 年至 2017 年間解析度  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  之網格資料，其中包括蒸散量(Transpiration)、裸地蒸發量(Bare-soil evaporation)、截留損失量(Interception loss)、開闊水面蒸發量(Open-water evaporation)與昇華量(Sublimation)等，以及基於 Priestley-Taylor 方程式計算之潛勢蒸發散量。GLEAM 依據不同的衛星遙測資料來源，可分為 GLEAM v3.2a 與 GLEAM v3.2b 二項版本，由於 GLEAM v3.2a 版本提供資料長度為 1980 年至 2017 年，而 GLEAM v3.2b 版本僅提供 2003 年至 2017 年之資料，故本研究採用 GLEAM v3.2a 版本資料進行分析。

為了進一步評估臺灣北部流域水文資料之變化趨勢、轉折點以及外部變遷對流域之影響，本研究採用的數據分析方法包括 Mann-Kendall 趨勢檢定、Mann-Whitney-Pettit 檢定法以及 Budyko 型彈性法，詳細內容如下所示。

### 3.1 Mann-Kendall 趨勢檢定

Mann-Kendall 趨勢檢定(Mann, 1945; Kendal, 1975)為一廣泛用於各項水文學與氣象研究中之無母數分析法，可分析資料序列是否具有統計上的顯著趨勢。Mann-Kendall 趨勢檢定的優點是檢定力可信度高，而且對資料無假設任何特定分布形式，適合針對時間序列資料做趨勢檢定(Hamed and Rao, 1998; Amirataee and Montaseri, 2017)。其基礎原理為一雙尾檢定，虛無假設為資料序列不具顯著趨勢，若拒絕虛無假設則代表該資料序列具有顯著趨勢。在 Mann-Kendall 趨勢檢定中，定義一統計量  $S$  為：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) \begin{cases} +1 & \text{if}(x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if}(x_j - x_i) = 0 \dots\dots\dots (4.2) \\ -1 & \text{if}(x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

其中  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  為按時間排列的資料， $n$  為資料筆數。在  $n \geq 10$  的狀況下，統計量  $S$  將符合常態分布，使得變異數如下，並可進一步求出雙尾檢定的檢定統計量  $Z$ ：

$$\text{Var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5)]}{18} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \dots\dots\dots (5.2) \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

在 90% 的信賴水準之下，根據臨界值法，若  $Z$  值大(小)於正(負)1.65，則拒絕虛無假設，判定資料具有顯著趨勢。

### 3.2 Mann-Whitney-Pettit 檢定法

Mann-Whitney-Pettit 檢定法為 Pettit (1979)所提出，可用於檢定資料序列發生轉折時間點機率。假設資料序列  $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$  存在轉折點  $X_t$ ，則該數列可區分為兩不相等段落  $F_1(X) = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_t\}$  與  $F_2(X) = \{X_{t+1}, X_{t+2}, X_{t+3}, \dots, X_n\}$ ，並定義一統計量為：

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{Sign}(X_i - X_j) \dots\dots\dots (6.1)$$

$$\text{Sign}(X_i - X_j) \begin{cases} +1 & \text{if}(X_i - X_j) > 0 \\ 0 & \text{if}(X_i - X_j) = 0 \dots\dots\dots (6.2) \\ -1 & \text{if}(X_i - X_j) < 0 \end{cases}$$

若  $|U_{t,n}|$  對時間  $t$  呈現持續上升，則代表檢測之數列不具有轉折點；反之，若  $|U_{t,n}|$  對時間  $t$  呈下降趨勢，表示數列中發生轉折點。通常若數列中發生多個相鄰之轉折點，則以數列中的最大值  $K_n$  作為轉折點：

$$K_n = \text{Max}|U_{t,n}|, 1 \leq t < n \dots\dots\dots (7)$$

計算轉折點發生機率的算式如下式所示：

$$P = 1 - \exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^2 + n^3}\right) \dots\dots\dots (8.1)$$

$$P(t) = 1 - \exp\left(\frac{-6|U_{t,n}|^2}{n^2 + n^3}\right) \dots\dots\dots (8.2)$$

由於某些數列具有多個轉折點，式(8.2)可用於進一步以計算該點發生轉折點之機率。

### 3.3 Budyko 型彈性法

在一理想流域中，水平衡方程式可以下式表示：

$$P = E + Q + \Delta S \dots\dots\dots (9)$$

其中  $P$  為降雨量； $E$  為真實蒸發散量； $Q$  為逕流量；

$\Delta S$  則為水儲存變化量，在長期的時間尺度下，流域之水儲存量的變化可以忽略。為計算流域的水文環境變異，本研究以河川逕流量作為指標，若一流域之河川逕流量發生變化且具有轉折點，則可以將時間區分為基準期與改變期，基準期代表該流域較原始或擾動較少的時期，改變期則代表流域受到擾動後流量變化的時期，並且可以下式表示逕流之改變量：

$$\Delta \bar{Q}_{total} = \bar{Q}_{variation} - \bar{Q}_{baseline} \dots\dots\dots (10)$$

$\Delta \bar{Q}_{total}$  代表平均年逕流總改變量， $\bar{Q}_{variation}$  為改變期之平均年觀測逕流量， $\bar{Q}_{baseline}$  為基準期之平均年觀測逕流量。河川逕流量之變異在此區分為受氣候因子與非氣候因子所影響之總和：

$$\Delta \bar{Q}_{total} = \Delta \bar{Q}_{climate} + \Delta \bar{Q}_{non-climate} \dots\dots\dots (11)$$

$\Delta \bar{Q}_{climate}$  為氣候變遷所造成的逕流改變量， $\Delta \bar{Q}_{non-climate}$  為非氣候因子造成的逕流改變量。計算出兩者數值之後，可進一步求取氣候變遷與非氣候因子對逕流量改變所造成的改變百分比：

$$\mu_{climate} = \frac{\Delta \bar{Q}_{climate}}{\Delta \bar{Q}_{total}} \times 100\% \dots\dots\dots (12.1)$$

$$\mu_{non-climate} = \frac{\Delta \bar{Q}_{non-climate}}{\Delta \bar{Q}_{total}} \times 100\% \dots\dots\dots (12.2)$$

其中  $\mu_{climate}$  為氣候變遷造成流量改變之百分， $\mu_{non-climate}$  為非氣候因子造成流量的改變百分比。根據式(2)，Budyko 型方程式可表達為  $E$ 、 $P$ 、 $N$  以及  $E_0$  的函數，其中  $N$  為模式之流域特徵參數，根據模式不同常調整為個別的代表方法。本研究採用同類型研究中常用的 Budyko-Fu 模式與 Budyko-Mezentsev-Choudhury-Yang 模式進行評估(Xu *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2014; Liang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2016; Wu, 2017a; Wu, 2017b)，其中 Budyko-Fu 模式將流域特徵參數表示為  $m$ ，Budyko-Mezentsev-Choudhury-Yang 模式則表示為  $n$ ，其方程式如表 1 所示。將式(2)與式(9)結合，可獲得下式關係：

$$Q = P - E = P[1 - F(\phi)] = f(P, E_0, N) \dots\dots\dots (13)$$

基於式(13)之函數形式，氣候變遷與流域特徵變化造成的逕流量變化可以下式表示：

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial P} dP + \frac{\partial Q}{\partial E_0} dE_0 + \frac{\partial Q}{\partial N} dN \dots\dots\dots (14)$$

根據彈性之定義(1)，可將式(14)改寫為：

$$\frac{dQ}{Q} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{E_0} \frac{dE_0}{E_0} + \varepsilon_N \frac{dN}{N} \dots\dots\dots (15)$$

其中， $\varepsilon_P$ 、 $\varepsilon_{E_0}$  以及  $\varepsilon_N$  分別為逕流對降雨、潛勢能蒸發散以及流域特徵參數之彈性係數，可以下列算式計算：

$$\varepsilon_P = \frac{\partial Q}{\partial P} \frac{P}{Q} \quad \varepsilon_{E_0} = \frac{\partial Q}{\partial E_0} \frac{E_0}{Q} \quad \varepsilon_N = \frac{\partial Q}{\partial N} \frac{N}{Q} \dots\dots\dots (16)$$

若彈性係數值為  $a$ ，其代表意義為當  $x$  因子增加 1% 時，逕流量會增加  $a\%$ 。並且，氣候因子所造成的逕流改變量可以此計算：

$$\Delta \bar{Q}_{climate} = \frac{\partial Q}{\partial P} dP + \frac{\partial Q}{\partial E_0} dE_0 = (\varepsilon_P \frac{\Delta P}{P} + \varepsilon_{E_0} \frac{\Delta E_0}{E_0}) \bar{Q} \dots\dots\dots (17)$$

其中  $Q$ 、 $E_0$  及  $\bar{P}$  為長期年均逕流量、降雨量與潛勢能蒸發散量。求出  $\Delta \bar{Q}_{climate}$  後，即可以式(10)求出  $\Delta \bar{Q}_{non-climate}$ ，得出氣候變遷與非氣候因子對逕流量造成之改變影響量。

## 四、結果與討論

### 4.1 趨勢分析結果

本研究以降雨量、河川逕流量以及潛勢能蒸發散量等水文資料，針對臺灣北部主要河川蘭陽溪、基隆河、大漢溪、鳳山溪、油羅溪以及上坪溪進行趨勢分析。圖 3 呈現各流域長年之年雨量趨勢圖，臺灣北部流域於 1980 至 2017 年之平均年雨量介於 2043.57mm 至 4298.96mm 間，其中長年雨量最豐沛者為基隆河流域，最低者為鳳山溪流域。在變化趨勢上，大漢溪與油羅溪流域長年雨量呈現上升趨勢，其中以油羅溪流域之上升斜率 5.578mm/year 為最高。蘭陽溪、基隆河、鳳山溪及上坪溪流域雨量呈現下降趨勢，其中以基隆河流域之斜率-13.72mm/year 為下降最快。以 Mann-Kendall 趨勢檢定分析年雨量變化之顯著性，結果指出蘭陽溪流域、基隆河流域、大漢溪流域、鳳山溪流域、油羅溪流域以及上坪溪流域年雨量之  $Z$  值依序為-0.05、-0.86、0.11、-0.14、0.38 及 0.23，如表 3 所示。根據顯著趨勢判定，分析流域之年雨量皆不具顯著變化趨勢。

各流域潛勢能蒸發散量如圖 4 所示。蘭陽溪流域、基隆河流域、大漢溪流域、鳳山溪流域、油羅溪流域以及上坪溪流域於 1980 至 2017 年之平均年潛勢能蒸發散介於 1049.77mm 至 1138.40mm 間，斜率介於 0.27mm/year 至



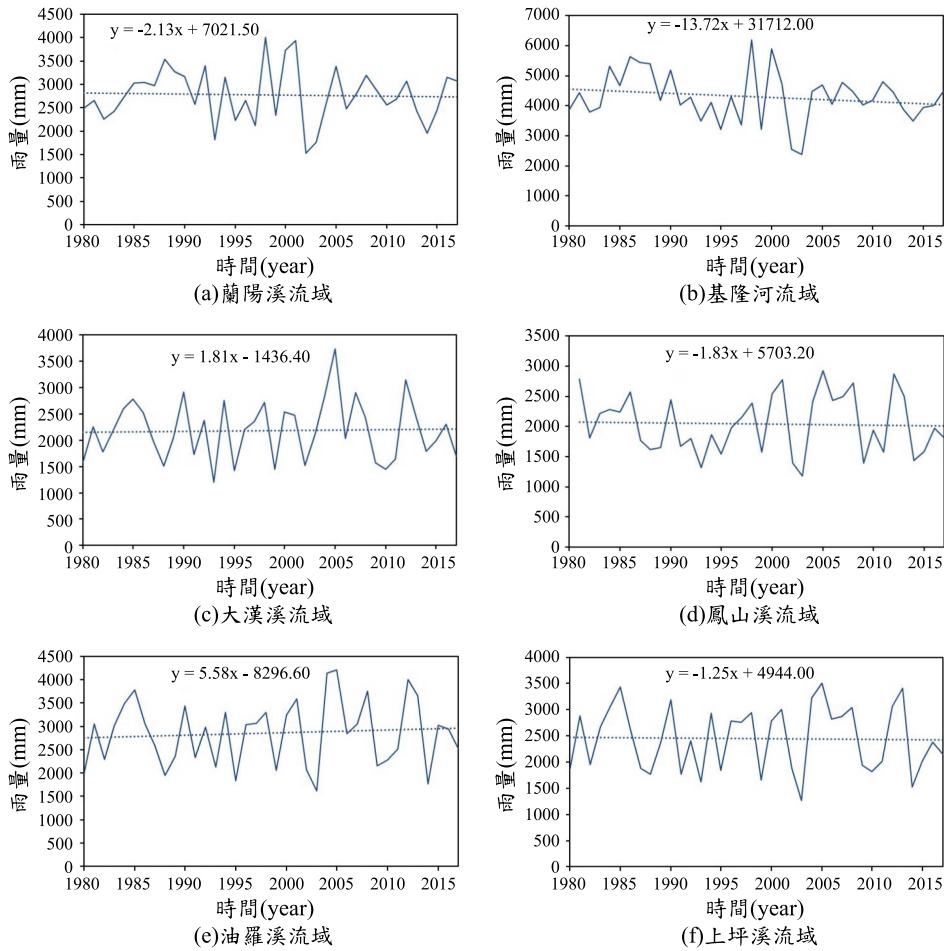


圖 3 臺灣北部流域雨量趨勢圖

表 3 趨勢分析與轉折點分析結果

流域	時間	變數	Z	顯著趨勢 ( $\alpha=10\%$ )	$P_{MAX}$	轉折機率 最高點
蘭陽溪	1980-2017	雨量	-0.05	無	0.41	2001
	1980-2017	潛勢能蒸發散量	0.55	無	0.54	1990
	1980-2017	流量	2.01	有	0.97	1993
基隆河	1980-2017	雨量	-0.86	無	0.66	1990
	1980-2017	潛勢能蒸發散量	1.51	無	0.89	1990
	1980-2017	流量	-1.31	無	0.94	1990
大漢溪	1980-2017	雨量	0.11	無	0.36	2008
	1980-2017	潛勢能蒸發散量	1.11	無	0.73	1990
	1980-2017	流量	-0.40	無	0.75	2008
鳳山溪	1981-2017	雨量	-0.14	無	0.49	1986
	1980-2017	潛勢能蒸發散量	1.58	無	0.86	2001
	1980-2017	流量	-0.54	無	0.73	1990
油羅溪	1980-2017	雨量	0.38	無	0.42	2003
	1980-2017	潛勢能蒸發散量	1.38	無	0.82	2001
	1980-2017	流量	0.58	無	0.78	2003
上坪溪	1980-2017	雨量	0.23	無	0.41	2003
	1980-2017	潛勢能蒸發散量	1.38	無	0.83	2001
	1980-2017	流量	0.48	無	0.76	2003

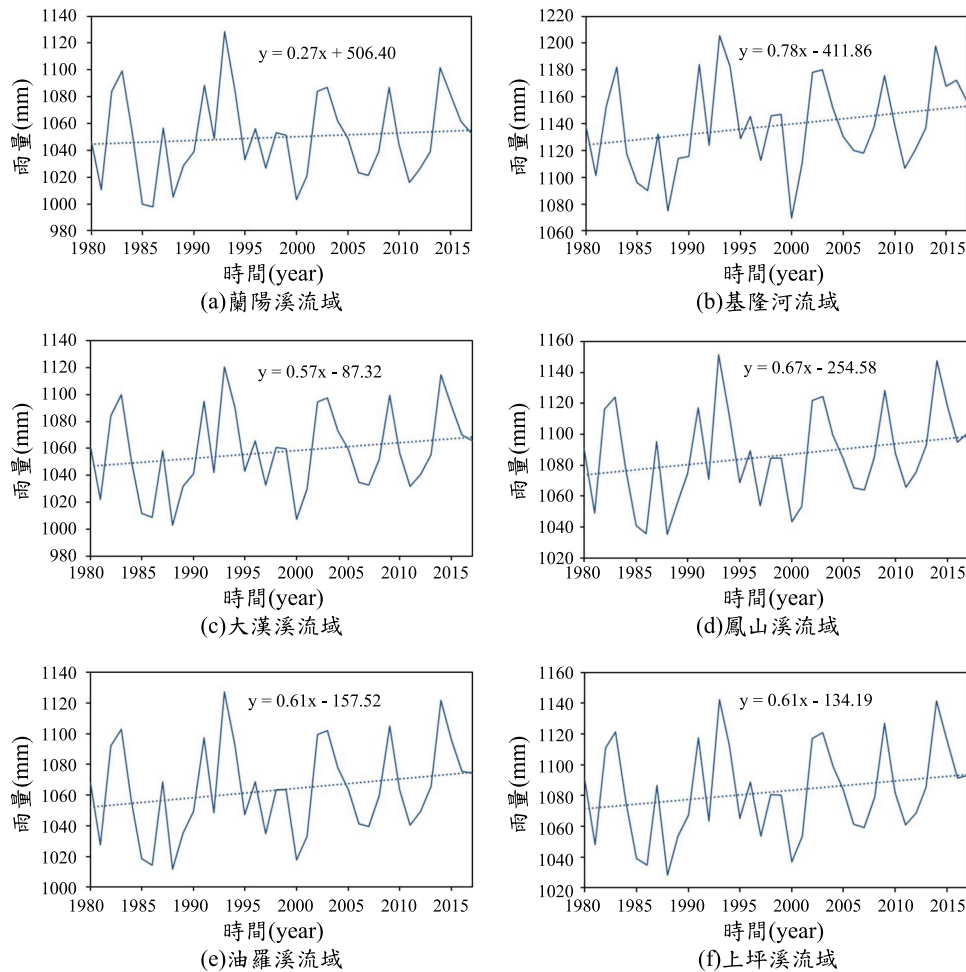


圖 4 臺灣北部流域潛勢能蒸發散趨勢圖

0.78 mm/year 間，並且其變化趨勢皆為增加。其中平均年潛勢能蒸發散量最高與斜率最高者皆為基隆河流域，而兩者最低者皆為蘭陽溪流域。經由 Mann-Kendall 趨勢檢定分析潛勢能蒸發散變化趨勢之結果如表 3 所示，指出蘭陽溪流域、基隆河流域、大漢溪流域、鳳山溪流域、油羅溪流域以及上坪溪流域潛勢能蒸發散量之 Z 值依序為 0.55、1.51、1.11、1.58、1.38 及 1.38，表示分析流域之潛勢能蒸發散變化趨勢不顯著。

圖 5 為各流域流量趨勢圖。蘭陽溪流域之蘭陽大橋站、基隆河流域之五堵站、大漢溪流域之霞雲站、鳳山溪流域之新埔站、油羅溪流域之內灣站以及上坪溪流域之上坪站之平均年逕流量中，最高者為基隆河流域之 3813.72mm，最低者為鳳山溪流域之 1559.83mm。變化趨勢上，蘭陽溪、上坪溪及油羅溪流域之流量呈現上升趨勢，其中斜率最高者為蘭陽溪流域之 21.11mm/year。基隆河、大漢溪及鳳山溪流域之流量則呈現下降趨勢，其中下降斜率最高者為基隆河之 -12.98mm/year。6 個河川流量站中，Mann-Kendall 趨勢

檢定 Z 值之結果依序為 2.01、-1.31、-0.40、-0.54、0.58 及 0.48，該結果顯示蘭陽溪流域之蘭陽大橋站具有顯著上升趨勢。

本研究以 Mann-Whitney-Pettit 檢定法判定水文資料時間序列中發生轉折機率最高之時間點，取  $P=0.90$  為判定值，結果如表 3 所示。據其結果顯示，蘭陽溪流域與基隆河流域之流量分別於 1993 ( $P=0.97$ ) 年及 1990 ( $P=0.94$ ) 年發生轉折點，而其它變量則沒有顯著的轉折點。本研究依據流量轉折點將分析時間依前後區分為基準期與變化期，並探討以基準期為基準比較變化期所發生的水文改變量。

#### 4.2 氣候變遷與非氣候因子對河川逕流量之影響

本研究以 Budyko-Fu 與 Budyko-Mezentsev-Choundhury-Yang 模式評估蘭陽溪流域與基隆河流域流量轉折之水文變量，結果如表 4 所示。相較於基準

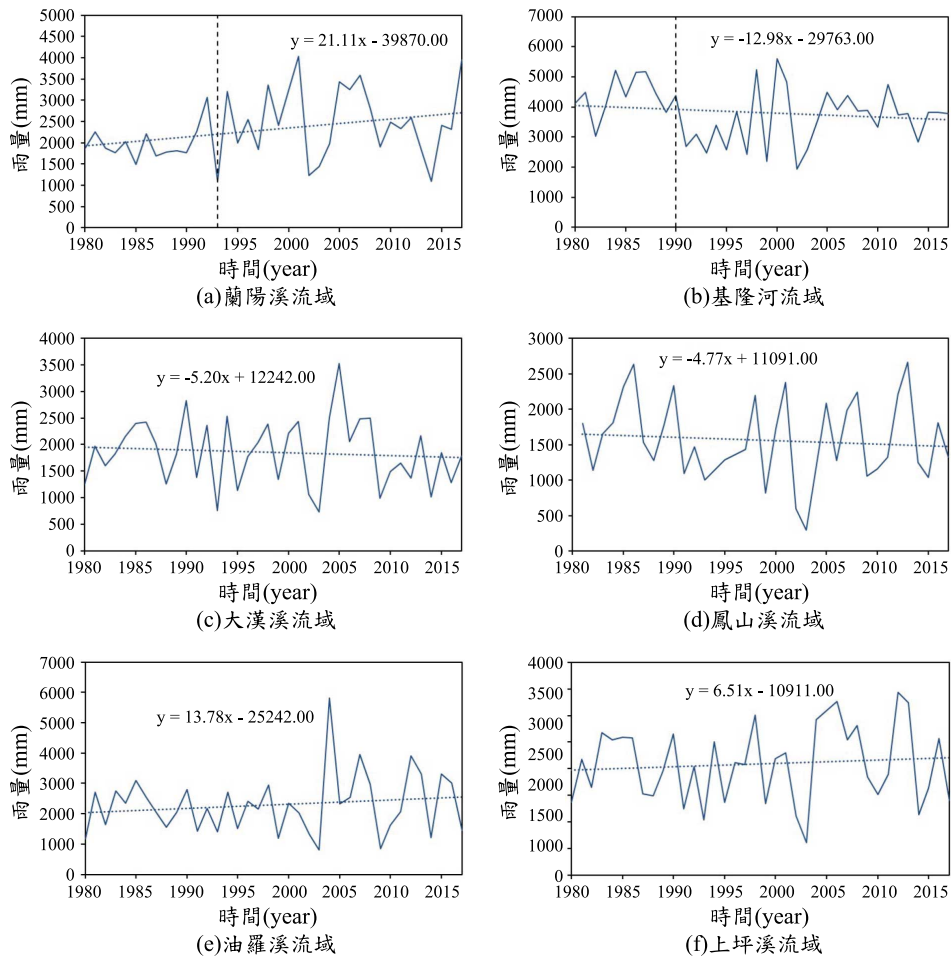


圖 5 臺灣北部流域流量趨勢圖

表 4 計算氣候變遷與非氣候因子影響之逕流量

流域	時間	$P$ (mm)	$Q$ (mm)	$E_0$ (mm)	$m$	$n$	$\Delta Q$		B-F		B-M-C-Y	
							mm	%	$\eta_{climate}$	$\eta_{non-climate}$	$\eta_{climate}$	$\eta_{non-climate}$
蘭陽溪	1980-1993	2810.38	1926.62	1049.09	2.07	1.33	-	-	-	-	-	-
	1994-2017	2752.51	2552.86	1050.16	1.10	0.32	626.24	32.50%	-9.01%	109.01%	-8.99%	108.99%
基隆河	1980-1990	4712.45	4376.79	1119.50	1.14	0.37	-	-	-	-	-	-
	1991-2017	4130.50	3584.32	1146.11	1.28	0.53	-792.47	-18.11%	71.75%	28.25%	71.30%	28.70%
大漢溪	1980-2017	2184.87	1850.40	1057.56	1.21	0.46	-	-	-	-	-	-
鳳山溪	1981-2017	2043.57	1559.83	1086.29	1.37	0.64	-	-	-	-	-	-
油羅溪	1980-2017	2851.03	2298.69	1063.48	1.37	0.64	-	-	-	-	-	-
上坪溪	1980-2017	2449.42	2089.31	1082.52	1.23	0.48	-	-	-	-	-	-

期，蘭陽溪流域於變化期流量增加 32.50%，以 Budyko 模式計算氣候變遷因子對流量之影響為-9.01%至-8.99%，非氣候因子之影響為 109.01%至 108.99%，顯示非氣候因子為流量增加的主控因子。基隆河流域之流量則於變化期減少 18.11%，其中氣候變遷的影響為造成流量轉折的主因，影響量為流量總改變量之 71.75%至

71.30%，非氣候因子之影響則佔 28.25%至 28.70%。

非氣候因子的影響包括地貌改變、植被變化與人為活動等。蘭陽地區於 1979 年執行「東部及蘭陽地區治山防洪整體治理計畫」，作業措施包括治山造林、坡地水土保持、防砂工程、防洪工程、崩塌地處理以及工程維護與突發性災害治理等。由於期間內蘭陽溪流域

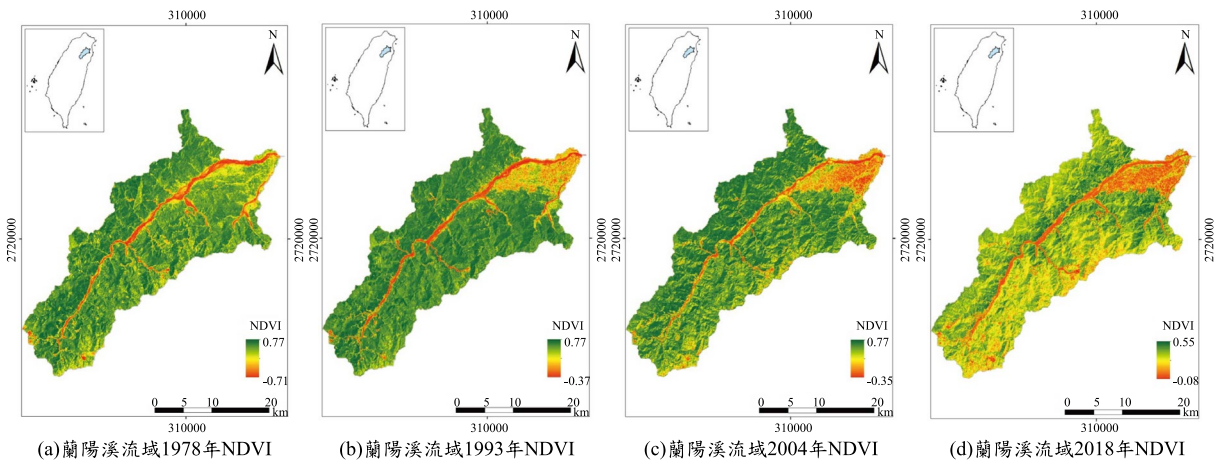


圖 6 蘭陽溪流域 NDVI 結果圖

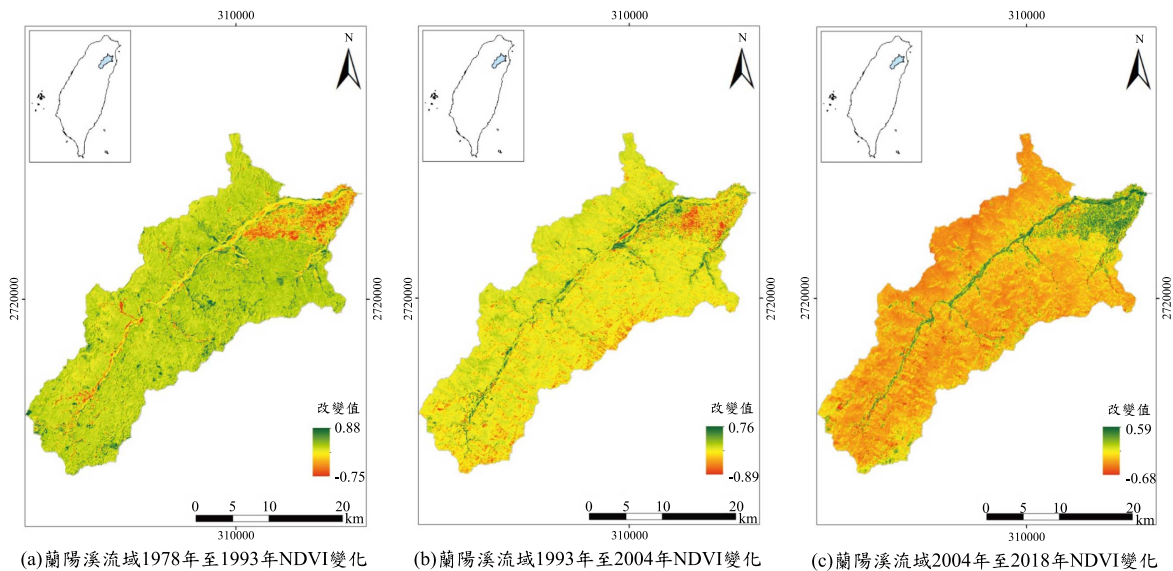


圖 7 蘭陽溪流域 NDVI 變化

進行大量水土保持與整治工程，推測將使得河川型態發生改變，進而影響逕流量反應。本研究以 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 常態化差異植被指數) 評估蘭陽溪流域於該計畫實施前後的植被覆蓋變化情形，考量歷史紀錄、季節、雲層以及日照角度，選取 Landsat2、Landsat5 與 Landsat8 衛星資料中 8 至 11 月上空無雲之影像進行分析(Choate *et al.*, 2012; Engebretson, 2018)，分別為 1978 年 9 月 4 日(Landsat2)、1993 年 8 月 31 日(Landsat5)、2004 年 11 月 1 日(Landsat5)與 2018 年 3 月 13 日(Landsat8)。由於 2010 年後 8 月至 11 月間無法取得蘭陽溪流域上空無雲的影響，故選取 2018 年 3 月品質較好之影像進行分析，並且將其 NDVI 與 2015 年 11 月 16 日稍有雲之 NDVI 影像比較後得到相似之結果，判定其 NDVI 值具有一定代表性。蘭陽溪流域之 NDVI 值與變化圖如圖 6 與圖

7 所示。表 6 為 NDVI 各其間之變化區間表，可見蘭陽溪流域 NDVI 於 1978 年至 1993 年間 NDVI 增加的區域佔總面積之 78.85%，排除下游蘭陽平原地區 NDVI 減少屬農作之季節耕作變化，指出流域植被茂密程度在此期間有提高的情形。然而在 1993 年至 2004 年間，蘭陽溪流域 NDVI 呈現下降的趨勢，流域內下降的面積比例為 71.32%，其中有 47.74%集中在 NDVI 下降 0 至-0.1 間的區間。而 2004 年至 2018 年，NDVI 則有更明顯的下降，NDVI 降低之面積達到總面積之 91.76%，其中下降值介於-0.2 至-0.3 者比例最高，佔 44.46%的面積。本研究推測蘭陽溪流域基準期 NDVI 提高為治山造林之成果，然而在 1993 年至 2018 年 NDVI 卻開始下降，表示其變化期之植物覆蓋量與茂密度有降低的情形。

過去許多研究指出在流域內較大規模的造林引發

表 5 彈性係數分析結果

流域	時間	B-F			B-M-C-Y		
		$\epsilon_P$	$\epsilon_{E0}$	$\epsilon_m$	$\epsilon_P$	$\epsilon_{E0}$	$\epsilon_n$
蘭陽溪	1980-1993	1.37	-0.37	-0.27	1.36	-0.36	-0.18
	1994-2017	1.05	-0.05	-0.73	1.05	-0.04	-0.16
基隆河	1980-1990	1.05	-0.05	-0.49	1.05	-0.05	-0.13
	1991-2017	1.11	-0.10	-0.46	1.10	-0.10	-0.18
大漢溪	1980-2017	1.11	-0.11	-0.79	1.11	-0.10	-0.26
鳳山溪	1981-2017	1.19	-0.20	-0.75	1.18	-0.19	-0.33
油羅溪	1980-2017	1.17	-0.16	-0.54	1.16	-0.16	-0.24
上坪溪	1980-2017	1.11	-0.11	-0.72	1.10	-0.11	-0.25

表 6 蘭陽河流域 NDVI 改變區間表

NVDI 改變值 區間	1978-1993	1993-2004	2004-2018
-1.00~0.30	3.11%	3.51%	29.49%
-0.30~-0.20	2.31%	5.28%	44.46%
-0.20~-0.10	3.59%	14.79%	12.09%
-0.10~0	12.14%	47.74%	5.73%
0~0.05	21.13%	18.06%	2.30%
0.05~0.10	28.91%	4.70%	2.58%
0.10~0.15	16.27%	1.88%	2.04%
0.15~0.20	6.38%	1.12%	0.72%
0.20~0.25	2.71%	0.86%	0.30%
0.25~0.30	1.43%	0.70%	0.16%
0.30~1.00	2.02%	1.36%	0.16%

逕流量減少的案例，這是由於森林的增加通常會使蒸散作用更加旺盛，進而造成流量的損失所致；反之，皆伐等減少植被覆蓋量之行為則會提高河川逕流量 (Roderick and Farquhar, 2011; Jaramillo *et al.*, 2018; Guzha *et al.*, 2018)。本研究推測蘭陽溪流域流量由於基準期間實施治山造林而增加植被量，因此基準期之流量呈現較低之情形，然而 1993 年後變化期之 NDVI 指出植被量開始相對減少，造成流量增加並發生轉折點。該結果指出植被量的變化與蘭陽溪流域的水文變化習習相關，但對於造成蘭陽溪流域於 1993 年後植被量降低之因素，可能包含如人為活動、天災與氣候變遷等，因此仍需要進一步的討論。

基隆河流域為本研究選取研究流域中降雨量最為豐沛者，然其流量減少主要為受到降雨量減少連帶所致，因此該流域在日後的治理可額外考量氣候變遷下對流域水文環境所帶來之衝擊，以建立有效的水資源利用與調配模式。經兩項 Budyko 模式針對臺灣北部流域氣候變遷與非氣候因子對流量變化之影響，兩者間分析結果表現相當接近，表示 Budyko-Fu 模式與 Budyko-Mezentsev-Choundhury-Yang 模式對於流域水文分析皆可提供具有可信度之結果。

### 4.3 流量變化敏感度分析

透過分析流域之敏感度可了解臺灣北部流域在不同環境下對於水文變化的反應型態，並提出進一步的分析。表 5 為流量變化針對降雨量、潛勢能蒸發散量、特徵參數之敏感度分析。根據結果本研究分析流域之流量皆對降雨量變化之彈性係數介於 1.05 至 1.37 之間，表示每增加 1% 的降雨，會使流域增加 1.05% 至 1.37% 之河川逕流量。在氣候變遷因子中，流量對潛勢能蒸發散量改變的敏感度不若降雨量變化明顯，其彈性係數介於 -0.04 至 -0.37 間，代表流域之潛勢能蒸發散每增加 1% 將使流量減少 0.04% 至 0.37%。相對於氣候變遷因子，流量對 Budyko-Fu 模式流域特徵參數  $m$  之彈性係數幅度為 -0.27 至 -0.79，最低與最高者為基準期之蘭陽溪流域與大漢溪流域，指示參數  $m$  每增加 1% 會使流域河川逕流量降低 -0.28% 至 -0.79%；Budyko-Mezentsev-Choundhury-Yang 模式參數  $n$  之彈性係數則介於 -0.13 至 -0.33，最低及最高者為基準期之基隆河流域與鳳山溪流域，表示  $n$  值每升高 1% 會使流域河川逕流量降低 -0.13% 至 -0.33%。兩項模式評估之流量對特徵參數敏感度於各流域間存在差異，顯示兩種 Budyko 模式之特徵參數對於流域特徵的變化幅度表現不同。

根據敏感度分析結果，本研究分析之臺灣北部流域彈性係數對於氣候變遷中之降雨量變化為最高，而流域特徵變化之影響為次高，表示在氣候變遷下，降雨量時空變遷使臺灣北部流域水資源受到的影響將最為顯著，而人為活動對流域也將造成一定程度的影響，不論過去或是未來，此結果皆提醒了流域治理方針配合環境變遷與時俱進的重要性。

## 五、結論與建議

臺灣北部流域囊括大面積的原始林地區，同時為

供應人口密集都會區的重要水源，具有珍貴的水土保育價值。在生態與經濟考量下，評估其水資源在環境變遷下的變化係為重要的課題。本研究分析蘭陽溪流域、基隆河流域、大漢溪流域、鳳山溪流域、油羅溪流域以及上坪溪流域等 6 個流域於 1980 至 2017 年間降雨量、潛勢能蒸發散量與河川逕流量之變化趨勢與轉折關係，並評估流域流量變化對於各項改變因子的敏感度及改變百分比。經由分析結果指出，流域降雨量、潛勢能蒸發散量皆不具顯著改變趨勢，而流量測站則以蘭陽溪流域之蘭陽大橋站呈現顯著之上升趨勢。轉折點檢定法之結果進一步顯示蘭陽溪流域與基隆河流域之流量分別於 1993 年及 1990 年點發生轉折。根據 Budyko-Fu 模式與 Budyko-Mezentsev-Choundhury-Yang 模式計算結果，影響蘭陽溪流域於變化其流量增加之變因以非氣候因子為主，其占比為 109.01% 至 108.99%，代表流量的增加全為非氣候因子所貢獻；而基隆河流域變化期流量減少之主因為氣候變遷，其佔總改變量之 71.75% 至 71.30%。在本研究分析流域中，僅有蘭陽溪流域為東部及蘭陽地區治山防洪整體治理計畫實施目標，依照其流量變異分析結果，推測該計畫期間內實施的治山造林與水保工程，可能與河川逕流量轉折具有高度相關。然而影響森林植被之因子相當複雜，造成蘭陽溪流域於變化期之植被覆蓋量減少之原因，可能包括人為活動的影響、天災或是氣候條件的變遷等，在機制複雜的情況下，仍有進一步佐證與探討的空間。不論如何，此結果將可供未來臺灣北部區流域在經濟發展與環境保育政策上作為參考，以至於探討大規模的流域整治對水資源的影響性。

以全流域間進行比較之分析而言，彈性係數分析結果指出降雨量為臺灣北部流域逕流量變化最敏感之因子，代表臺灣北部流域對於人為活動的干擾敏感度較低，屬於較穩定的水文環境。對於日後流域的規劃與治理，氣候變遷對水文環境帶來的衝擊仍為臺灣北部水資源的重要課題，在流域供應大型都會區以及工業區水源的情況下，應進一步擬定相應的環境政策，並且持續關注人為活動對流域產生的影響，以達到環境的永續經營與利用之目的。同時此結果將可提供未來在擬定流域治理政策上量化的依據。

## 參考文獻

- Amirataee, B., & Montaseri, M., "The performance of SPI and PNPI in analyzing the spatial and temporal trend of dry and wet periods over Iran," *Natural Hazards*, 86(1), 89-106, 2017.
- Arora, V. K., "The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff," *Journal of hydrology*, 265(1-4), 164-177, 2002.
- Ashofteh, P. S., Bozorg-Haddad, O., Loáiciga, H. A., & Marino, M. A., "Evaluation of the impacts of climate variability and human activity on streamflow at the basin scale," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(8), 04016028, 2016.
- Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A., "A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation," *Journal of hydrology*, 310(1-4), 28-61, 2005.
- Budyko, M. I., "Evaporation under natural conditions, Gidrometeorizdat, Leningrad," English translation by IPST, Jerusalem, 1948.
- Budyko, M. I., "Climate and life," 1971.
- Buishand, T. A., "Some methods for testing the homogeneity of rainfall records," *Journal of hydrology*, 58(1-2), 11-27, 1982.
- Chang, J., Wang, Y., Istanbuluoglu, E., Bai, T., Huang, Q., Yang, D., & Huang, S., "Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China," *Quaternary International*, 380, 169-179, 2015.
- Chang, J., Wei, J., Wang, Y., Yuan, M., & Guo, J., "Precipitation and runoff variations in the Yellow River Basin of China," *Journal of Hydroinformatics*, 19(1), 138-155, 2017.
- Choate, M., Steinwand, D., & Rengarajan, R., "Multispectral Scanner (MSS) Geometric Algorithm Description Document," USGS Landsat Project Documentation (Vol. 6). LS-IAS, 2012.
- Choudhury, B., "Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model," *Journal of Hydrology*, 216(1-2), 99-110, 1999.
- Dooge, J. C., "Sensitivity of runoff to climate change: A Hortonian approach," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(12), 2013-2024, 1992.
- Engelbreton, C., "Landsat Thematic Mapper (TM) Level 1 DFCB," USGS Landsat Project Documentation, 2018.
- Field, C. B. (Ed.), *Climate change 2014-Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects*. Cambridge University Press, 2014.

1. Amirataee, B., & Montaseri, M., "The performance of SPI and PNPI in analyzing the spatial and temporal trend of dry and wet periods over Iran," *Natural Hazards*, 86(1),

15. Fu, G., Charles, S. P., & Chiew, F. H., "A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow," *Water Resources Research*, 43(11), 2007.
16. Freund, E. R., & Kirchner, J. W., "A Budyko framework for estimating how spatial heterogeneity and lateral moisture redistribution affect average evapotranspiration rates as seen from the atmosphere," *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 217, 2017.
17. Gao, P., Mu, X. M., Wang, F., & Li, R., "Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River," *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 1, 2011.
18. Gao, G., Fu, B., Wang, S., Liang, W., & Jiang, X., "Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework," *Science of the Total Environment*, 557, 331-342, 2016.
19. Greve, P., Gudmundsson, L., Orłowsky, B., & Seneviratne, S. I., "Introducing a probabilistic Budyko framework," *Geophysical Research Letters*, 42(7), 2261-2269, 2015.
20. Guzha, A. C., Rufino, M. C., Okoth, S., Jacobs, S., & Nóbrega, R. L. B., "Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa," *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 49-67, 2018.
21. Hamed, K. H., & Rao, A. R., "A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data," *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196, 1998.
22. Huntington, T. G., "Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis," *Journal of Hydrology*, 319(1), 83-95, 2006.
23. Huntington, T. G., & Billmire, M., "Trends in precipitation, runoff, and evapotranspiration for rivers draining to the Gulf of Maine in the United States," *Journal of Hydrometeorology*, 15(2), 726-743, 2014.
24. Jaramillo, F., Cory, N., Arheimer, B., Laudon, H., Van Der Velde, Y., Hasper, T. B., ... & Uddling, J., "Dominant effect of increasing forest biomass on evapotranspiration: interpretations of movement in Budyko space," *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 567-580, 2018.
25. Kendall, M. G., "Rank Correlation Measures [M]," Charles Griffin, London, 1975.
26. Li, Y., Liu, C., Zhang, D., Liang, K., Li, X., & Dong, G., "Reduced runoff due to anthropogenic intervention in the Loess Plateau, China," *Water*, 8(10), 458, 2016.
27. Li, Z., Ning, T., Li, J., & Yang, D., "Spatiotemporal variation in the attribution of streamflow changes in a catchment on China's Loess Plateau," *Catena*, 158, 1-8, 2017.
28. Liang, W., Bai, D., Wang, F., Fu, B., Yan, J., Wang, S., ... & Feng, M., "Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau," *Water Resources Research*, 51(8), 6500-6519, 2015.
29. Lintner, B. R., Gentine, P., Findell, K. L., & Salvucci, G. D., "The Budyko and complementary relationships in an idealized model of large-scale land-atmosphere coupling," *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2119, 2015.
30. Mann, H. B., "Nonparametric tests against trend," *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259, 1945.
31. Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A. and Verhoest, N.E.C., "GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture," *Geoscientific Model Development*, 10, 1903-1925, 2017.
32. Mezentsev, V. S., "More on the calculation of average total evaporation," *Meteorol. Gidrol*, 5(2426.28), 1955.
33. Milly, P. C. D., "An analytic solution of the stochastic storage problem applicable to soil water," *Water Resources Research*, 29(11), 3755-3758, 1993.
34. Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., de Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J., "Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations," *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 453-469, 2011.
35. Ol'Dekop, E. M., "On evaporation from the surface of river basins," *Transactions on meteorological observations*, 4, 200, 1911.
36. Parry, M., Lowe, J., & Hanson, C., "Overshoot, adapt and recover," *Nature*, 458(7242), 1102, 2009.
37. Pettitt, A. N., "A non-parametric approach to the change-point problem," *Applied statistics*, 126-135, 1979.
38. Pike, J. G., "The estimation of annual run-off from meteorological data in a tropical climate," *Journal of Hydrology*, 2(2), 116-123, 1964.

39. Pirnia, A., Golshan, M., Darabi, H., Adamowski, J., & Rozbeh, S., "Using the Mann-Kendall test and double mass curve method to explore stream flow changes in response to climate and human activities," *Journal of Water and Climate Change*, 2018.
40. Porporato, A., Daly, E., & Rodriguez-Iturbe, I., "Soil water balance and ecosystem response to climate change," *The American Naturalist*, 164(5), 625-632, 2004.
41. Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J., "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters," *Monthly weather review*, 100(2), 81-92, 1972.
42. Roderick, M. L., & Farquhar, G. D., "A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties," *Water Resources Research*, 47(12), 2011.
43. Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F., "Climate elasticity of streamflow in the United States," *Water Resources Research*, 37(6), 1771-1781, 2001.
44. Schaake, J. C., "From climate to flow," *Climate change and US water resources*, 177-206, 1990.
45. Schreiber, P., "Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa," *Z. Meteorol*, 21(10), 441-452, 1904.
46. Siriwardena, L., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A., "The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: The Comet River, Central Queensland, Australia," *Journal of Hydrology*, 326(1-4), 199-214, 2006.
47. Sposito, G., "Understanding the Budyko equation," *Water*, 9(4), 236, 2017.
48. Sun, Y., Liang, X., Xiao, C., & Fang, Z., "Quantitative impact of precipitation and human activity on runoff in the upper and middle Taoer River basin," *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(1), 19-29, 2019.
49. Tomer, M. D., & Schilling, K. E., "A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology," *Journal of hydrology*, 376(1-2), 24-33, 2009.
50. Trenberth, K. E., & Shea, D. J., "Relationships between precipitation and surface temperature," *Geophysical Research Letters*, 32(14), 2005.
51. Turc, L., "The water balance of soils. Relation between precipitation, evaporation and flow," *Ann. Agron*, 5, 491-569, 1954.
52. Wang, D., & Hejazi, M., "Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States," *Water Resources Research*, 47(10), 2011.
53. Wang, D., & Tang, Y., "A one-parameter Budyko model for water balance captures emergent behavior in darwinian hydrologic models," *Geophysical Research Letters*, 41(13), 4569-4577, 2014.
54. Wang, D., Zhao, J., Tang, Y., & Sivapalan, M., "A thermodynamic interpretation of Budyko and L'vovich formulations of annual water balance: Proportionality Hypothesis and maximum entropy production," *Water Resources Research*, 51(4), 3007-3016, 2015.
55. Wang, C., Wang, S., Fu, B., & Zhang, L., "Advances in hydrological modelling with the Budyko framework: A review," *Progress in Physical Geography*, 40(3), 409-430, 2016.
56. Wang, T., Yang, H., Yang, D., Qin, Y., & Wang, Y., "Quantifying the streamflow response to frozen ground degradation in the source region of the Yellow River within the Budyko framework," *Journal of Hydrology*, 558, 301-313, 2018.
57. Wentz, F. J., Ricciardulli, L., Hilburn, K., & Mears, C., "How much more rain will global warming bring?," *Science*, 317(5835), 233-235, 2007.
58. Wu, J., Miao, C., Zhang, X., Yang, T., & Duan, Q., "Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities," *Science of The Total Environment*, 586, 328-337, 2017a.
59. Wu, J., Miao, C., Wang, Y., Duan, Q., & Zhang, X., "Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods," *Journal of hydrology*, 545, 263-275, 2017b.
60. Xu, X., Yang, D., Yang, H., & Lei, H., "Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe basin," *Journal of Hydrology*, 510, 530-540, 2014.
61. Xue, L., Yang, F., Yang, C., Chen, X., Zhang, L., Chi, Y., & Yang, G., "Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China," *Scientific reports*, 7(1), 8254, 2017.
62. Yan Yang, H., Yang, D., Lei, Z., & Sun, F., "New analytical derivation of the mean annual water-energy



- balance equation,” *Water Resources Research*, 44(3), 2008.
63. Yang, H., & Yang, D., “Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff,” *Water Resources Research*, 47(7), 2011.
64. Yang, H., Qi, J., Xu, X., Yang, D., & Lv, H., “The regional variation in climate elasticity and climate contribution to runoff across China,” *Journal of hydrology*, 517, 607-616, 2014.
65. Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R., “Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale,” *Water resources research*, 37(3), 701-708, 2001.
66. Zhang, L., Karthikeyan, R., Bai, Z., & Srinivasan, R., “Analysis of streamflow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China,” *Catena*, 154, 1-11, 2017.
67. Zhao, Y., Zou, X., Liu, Q., Yao, Y., Li, Y., Wu, X., ... & Wang, T., “Assessing natural and anthropogenic influences on water discharge and sediment load in the Yangtze River, China,” *Science of The Total Environment*, 607, 920-932, 2017.
68. 汪中和, 「氣候暖化與台灣的水資源」, 鑛冶, 第五十九卷, 第二期, 第 11-15 頁, 2015。
69. 汪中和, 「氣候變化對台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, 第十八號, 第 239-255 頁, 2007。
70. 楊德福, 治山防洪治理計畫效益評估方法之研究: 以蘭陽地區為範例, 中興工程顧問社出版, 臺北市, 1997。
71. 經濟部水利署, 水利統計年報, 經濟部水利署編印, 臺北市, 2017。

收稿日期：民國 108 年 06 月 18 日

接受日期：民國 109 年 02 月 07 日