

以長時間河川低流統計資料特徵化臺灣南部流域消退特性之研究

高于婷^[1] 葉信富^[2*] 李振誥^[3]

摘要 台灣地形起伏變化高與降雨量空間分布差異很大，以致造成水資源分佈不均勻，近年來受氣候變遷影響，區域性乾濕季變化更加明顯，雨量集中在夏季，尤其以台灣南部地區乾濕季差異最大，乾季面臨嚴重缺水問題。在枯水期，地下水為補注河川的重要來源，因此瞭解地下水與河川流量之間的儲存-排出關係日益重要。一般水資源管理所需要資料取得不易且資料受限於空間分布，本研究採用低流分析之消退曲線建立河川流量與地下水之間儲存-排出關係，該方法的優點僅需取得流量資料。在低流分析中排除降雨與蒸發散的影響，僅與集水區內所儲存的水有關，因此消退曲線參數化後可以對集水區表現其消退特性。本研究以台灣南部流域為例，以長時間連續河川資料統計集水區特徵，比較 Vogel and Kroll (1992) 與 Brutsaert (2008) 兩種模式對台灣南部流域消退特性表現之差異性。

關鍵字：河川流量、低流、消退曲線

Using Low Flow of Statistical Streamflow Data to Characterize Southern Taiwan Recession Behavior in Long-Term Period

Yu-Ting Kao^[1] Hsin-Fu Yeh^[2*] Cheng-Haw Lee^[3]

ABSTRACT The uneven distribution of water resources in Taiwan is due to topography change severely and unevenly distributed rainfall. Recently, climate change result in wet and dry season become more apparent in the region. Owing to water deficit problem is more severe in the dry season which in the low flow period, groundwater is the main source of recharging stream. Thus, knowing relationship between groundwater and stream drainage-storage is becoming increasingly important. Generally, it is difficult to obtain data which is limited by spatial distribution on water resources management. In this study, recession curve is established for streamflow and groundwater storage-drainage relationship. Furthermore, only need streamflow data which is easy obtained. We exclude precipitation and evapotranspiration in low flow analysis that is only related with water of river basin. Thus, recession curve are characterized to display basin drainage behavior. In this study, we use continues long-term period of south of Taiwan streamflow data to analyze basin characteristic. Comparison of Vogel & Kroll(1992) and Brutsaert(2008) method difference between drainage behavior in south of Taiwan.

Key word: streamflow, low flow, recession curve

[1] 國立成功大學資源工程學系碩士生

Master, Dept. of Resources engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan

[2] 國立成功大學資源工程學系博士後研究員 (*通訊作者 E-mail: hfye@mail.ncku.edu.tw)

Post-Doctoral Researcher, Dept. of Resources engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, 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 701, Taiwan

一、 前言及文獻回顧

台灣雨量充沛，年平均降雨量高達 2500 公厘，約為全世界年平均降雨量的 2.5 倍，但由於地形起伏變化大且降雨量分佈不均，降雨空間以山區降雨多於平地；北部降雨多於南部，造成水資源時間與空間分佈不均與逕流量攔蓄利用率低等問題。再加上近年來，台灣受到氣候變遷的影響，乾濕季日趨分明，造成濕季雨量更加集中，乾季缺水問題日益嚴重。河川流量為人民賴以為生的水資源與生活息息相關，水資源缺乏國民影響農業、工業與民生等用水，因此河川流量在水資源管理佔有重要的地位，而枯水期地下水為補注河川的主要來源，在進行水資源管理時，所需資料取得不易且受限於空間分佈，如：地下水位測站與降雨量測站等，單一測站無法代表集水區水文狀況，因此本研究以台灣南部地區為研究區域，僅需要取得能代表研究區域空間的流量測站資料，探討長時間下低流時期台灣南部地區水文特徵行為，做為水資源管理參考，提升水資源規劃與利用效率。

低流統計廣泛應用於特徵化集水區水文特性、推估水文參數與地下水儲存量，Brutsaert and Nieber (1977) 對六個集水區做流量變化與流量對數圖以低門檻方法 (lower envelope) 參數化消退曲線，研究結果顯示參數化後低流分析結果可應用在無測站區域。Vogel and Kroll (1992) 以簡單河川-地下水概念模型觀察 23 個在低流時 Massachusetts 集水區特徵，研究結果顯示低流統計結果與集水區面積、平均集水區坡度與基流消退常數有高度相關。Szilagyi (1998) 以 Brutsaert and Nieber 在 1977 年提出的低流分析法推估數值模擬的集水區飽和水力傳導係數與平均含水層厚度，發現推估參數之模型不受到研究區域複雜度影響。Wittenberg (1999) 比較消退分析推估集水區地下水儲存量與地下水位差異，發現含水層給水度隨著地層深度變化。Tague and Grant (2004) 以 Brutsaert and Nieber 在 1977 年提出 Boussinesq 方程解析的低流分析方法，以 U.S Geological Survey 長期每日河川流量資料推估夏季河川流量體積、消退特徵與冬季補注時間，結果指出較陡集水區與水係密度較高的集水區退水時間較短，且冬季退水速度較慢。Brutsaert (2008) 觀察每年最低流量推估集水區地下水儲存量，研究結果顯示低流統計結果與集水區面積、集水區高程與集水區長度有高度相關。Sugita and Brutsaert (2009) 藉由假設基流隨著時間以指數衰退，在排除蒸發散與降雨影響後河川流量與地下水儲存量呈線性關係，以 Kanto 北部區域的 4 個集水區流量測站觀測過去 40 年基流與地下水儲存量之間關係與趨勢，結果顯示研究區域若是需水量固定，未來短時間內不會有缺水危機。由於集水區水文特徵重要性，Troch et al. (2013) 統整多種低流分析方法，提供水文背景資訊。Stoelzle et al. (2013) 以 Brutsaert、Vogel and

26 Kroll 與 Kirchner 三種消退分析方法和三種參數化方式對礮次儲存-排出模型結果比較集水區消退特徵，集
27 水區的特徵決定消退行為，但由於多種分析與參數化方式，產生多種變異參數，造成具體集水區特性模糊。

28 在低流分析中，許多文獻皆是採 Brutsaert and Nieder (1977) 概念方法進行消退曲線參數化以瞭解研究
29 區域之集水區特徵，而 Vogel and Kroll (1992) 以較簡單河川-地下水概念模型定義出集水區特徵，本研究中
30 應用上述二者的方法對台灣南部流域進行消退曲線參數化評估參數化結果，瞭解台灣南部地區水文特性。

31

32 二、 研究區域概述

33 本研究區域為台灣南部流域，包含有嘉義縣(市)、台南市、高雄市、與屏東縣等縣市以及主要河川八
34 掌溪、急水溪、曾文溪、鹽水溪、二仁溪、高屏溪、東港溪以及林邊溪等，年平均氣溫在 22°C 至 26°C 之間，
35 年平均降雨量約有 2000 公厘，乾濕季分明，雨量集中在 5 月至 10 月豐水期，11 月至 4 月為枯水期，常造
36 成台灣南部河川缺水乾涸。本研究以低流時期河川流量，將所得每年平均最低流量定量集水區退水時間後，
37 藉由定量的退水時間特徵化研究區域水文特性(經濟部水利署，2013)。

38 在選擇流量測站有兩個標準，第一，測站必須為長時間下資料連續的測站，長時間下資料連續的測站
39 才可以完整顯示集水區流域水文特徵，因此在本研究中，所選取資料時間長度至少 40 年以上；第二，所選
40 取的測站不能受到人工設施影響，受影響的測站無法表現研究區域水文行為。台灣南部流域有六個測站符
41 合上述兩標準，分別為八掌河流域-常盤橋測站、鹽水河流域-新市測站、二仁河流域-崇德橋測站、高屏溪
42 流域-荖濃測站、東港河流域-潮州測站以及林邊河流域-新埤測站等六個測站，各測站資料如流域、站名以
43 及地文因子列於表 1，地理位置如圖 1 所示。

44 三、 研究方法

45 1.低流分析模式-Brutsaert method

46 Boussinesq(1877)提出水文低流分析方程式，描述河川流量與初始流量隨著時間變化的指數關係。

47

$$48 \quad Q = Q_0 e^{-\frac{t}{K}} \quad (1)$$

48

49 Q 為河川流量[L³T⁻¹]， Q_0 為任意所選取初始時間的河川流量[L³T⁻¹]， K 為集水區退水時間常數[T]。

50 Brutsaert and Nieder (1977) 提出以幕次關係表示水文低流分析方程式，描述河川流量變化與流量之間
51 的幕次關係。

52

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ^b \quad (2)$$

53

54 Q 為河川流量[L³T⁻¹]， a 與 b 為常數[-]。

55 由於在低流分析中，排除降雨、蒸發散與其他輸入因子影響，因此依照質量守恆定律，系統之集水區
56 儲存量僅與輸出量相關，可用下方積分公式表示。

57

$$S = - \int_t^{\infty} y \, dt \quad (3)$$

58

59 S 為單位集水區面積儲存水體積[LT⁻¹]， y 為單位面積河川流量[LT⁻¹]，根據式 (1) 與 (3) 可得到地下水
60 儲存量與集水區輸出關係。

61

$$S = K y \quad (4)$$

62

63 式 (4) 顯示出地下水儲水量趨勢與集水區基流趨勢相同，如式 (5) 所示。

64

$$\frac{dS}{dt} = K \frac{dy}{dt} \quad (5)$$

65

66 Brutsaert (2008) 提出以低門檻 (lower envelope) 的方式定義集水區退水時間常數，該模式以百分之五
67 資料點為門檻值所做的迴歸，確保所得的消退曲線為低流；在低流分析中為了確保所選取的資料排除降雨
68 的影響，因此 Brutsaert 對於流量資料有選取的標準：

69 (a)流量變化為零或是正值又或是有奇異點發生時須與以排除。

70 (b)流量變化為零或是正後三點資料點與主要事件發生後四點資料點須刪除。

71 (c)流量變化為或是正前兩點資料點排除。

72 (d)當流量為缺水連續資料時，若是突然有較大流量變化需刪除。

73 2.低流分析模式-Vogel and Kroll method

74 Vogel and Kroll(1992)排除降雨與蒸發散等影響，提出假設河川與地下水之間為線性關係如圖 2 所示。

75 以下式 (6) 基流方程式進行低流分析。

76

$$Q = Q_0 K_b^t \quad (6)$$

77

78 K_b 為基流消退常數[-]， Q_0 為初始河川流量[L³T⁻¹]，由式 (1) 可以得到基流消退常數與集水區退水時間

79 常數之間關係，如式 (7) 所示。

80

$$K = -\frac{1}{\ln K_b} \quad (7)$$

81

82 Vogel and Kroll(1992)以線性回歸方式定義集水區退水時間常數，以此方式較可以顯示集水區的平均水

83 文行為，為了確保選取的資料排除降雨的影響，Vogel and Kroll(1992)對於流量資料選取的標準：

84 (a)以三天移動平均減少至增加為範圍。

85 (b)水文歷線消退段刪除前面 λ 天資料。

86 (c)僅接受 $Q_t \geq 0.7Q_{t-1}$ 。

87 本研究整理上述 Vogel and Kroll(1992)與 Brutsaert(2008)對於流量選取標準，簡單以圖 3 示意圖所示。

88 四、 結果與討論

89 在本研究中選擇 Brutsaert (2008) 與 Vogel and Kroll (1992) 兩種方法，對台灣南部集水區以低流分析參

90 數化消退曲線，顯示其與研究區域地文因子之間相關性，Brutsaert (2008) 與 Vogel and Kroll (1992) 結果分

91 別由表 2 與表 3 所示，根據 Tague and Grant (2004) 中提及常數 a 受到集水區坡度與水系密度影響，集水區

92 主流坡度較陡時較大的常數 a 值表示退水較快速，由結果顯示常數 a 與退水時間 K 之間為逆相關，以 Vogel

93 and Kroll (1992) 中荖濃集水區為例，最小的常數 a 值有最大的 K 值，由於其他五個集水區主流坡度為荖濃

94 集水區主流坡度的 1 至 6 倍，因此退水時間相較於其他集水區有明顯較長；然而 Brutsaert(2008)中荖濃集水
95 區結果顯示退水時間較長，與其他五個集水區無明顯區別；水系密度為集水區主流長度與集水區面積比，
96 水系密度較高時，退水速度亦較快，Vogel and Kroll (1992) 的常數 a 與水系密度高達 0.9 高度相關，而
97 Brutsaert (2008) 僅達 0.7 中度相關，因此 Vogel and Kroll (1992) 方法較適合表示台灣南部集水區水文特性。

98

99 在進行低流分析時，為了確保消退曲線排除降雨影響，圖 4 為 Brutsaert (2008) 的方法對台灣南部的流
100 量變化與流量做對數圖，百分之五資料點為門檻值以低門檻 (lower envelope) 決定研究區域集水區退水時
101 間。圖 5 為 Vogel and Kroll (1992) 方法，同樣對台灣南部流量變化與流量做對數圖後以線性迴歸方式決定
102 集水區退水時間。由於台灣地形變化起伏高，因此流量變化快速造成選用 Brutsaert (2008) 方法時流量資料
103 數相較於 Vogel and Kroll (1992) 顯著下降，尤其 Vogel and Kroll (1992) 為 Brutsaert (2008) 方法所得的新市
104 集水區資料點的 11 倍，這結果可能造成後續研究區域集水區水文特性分析時的誤差；Brutsaert(2008)退水
105 時間平均高於 Vogel and Kroll (1992) 方法，推測由於低門檻 (lower envelope) 方式確保所選取的資料為低
106 流的部分，然而線性迴歸主要是顯示集水區平均水文行為，因此所選取資料可能參雜直接逕流或中間流的
107 部分，造成平均退水時間較短。

108

109 為了解消退曲線參數化結果與研究區域地文之間的相關性，本研究選取河川區河川級序數、集水區平
110 均高程(m)、集水區主流長度(m)、集水區平均坡度(m/m)、集水區主流坡度 (m/m) 與集水區面積 (km²) 等
111 地文因子分別對常數 a、b 與消退時間 K 做相關性分析結果如下表 4 至 6 所示。表 4 顯示 Brutsaert(2008)方
112 法中退水時間對集水區平均高程 (m) 與集水區面積 (km²) 分別達 0.84 與 0.83 的高度相關，然而 Vogel and
113 Kroll (1992) 方法達 0.92 與 0.95 高度相關且也與集水區主流長度 (m) 有 0.91 高度相關，結果顯示 Vogel and
114 Kroll (1992) 比 Brutsaert (2008) 更能表示台灣南部集水區特徵。表 5 為常數 a 與地文因子相關性，由 Tague
115 and Grant (2004) 所提出較大的 a 值表示退水較快速，由 Vogel and Kroll (1992) 常數 a 與集水區坡度呈現高
116 度相關，即可證為集水區主流坡度較陡造成退水速度較快，而 Brutsaert (2008) 方法無法證之。常數 b 與地
117 文因子之間由表 6 顯示皆無顯著相關。圖 6 消退時間分布中，由於荖濃集水區平均高程、集水區主流長度
118 與集水區面積皆遠大於其他集水區，且 Vogel and Kroll (1992) 消退時間與此三個地文因子呈現高度相關，
119 因此消退時間分布在選擇 Vogel and Kroll (1992) 方法會產生極端值；反之，雖然 Brutsaert (2008) 消退時間

120 與集水區平均高程及集水區面積呈現高度相關，但由於台灣地形變化劇烈，使得流量變化快速，造成
121 Brutsaert (2008) 所選取資料點較 Vogel and Kroll (1992) 顯著減少，且 Vogel and Kroll (1992) 利用移動平均
122 平滑化流量變化幅度，因此 Vogel and Kroll (1992) 較能表示常數 a 與退水系統之間關係。

123 五、 結論

124 本研究利用 Brutsaert(2008)與 Vogel and Kroll(1992)模式探討台灣南部流域六個集水區的特徵，可得以
125 下結論：

- 126 1. Brutsaert (2008) 與 Vogel and Kroll (1992) 退水時間與平均高程及集水區面積呈現高度相關，其中 Vogel
127 and Kroll (1992) 退水時間又與主流長度呈現高度相關。
- 128 2. Vogel and Kroll (1992) 相關性較 Brutsaert (2008) 模式高，推測原因為台灣地形起伏變化大，使得流量變
129 化快速造成 Brutsaert (2008) 方法較無法顯示流域特徵，而 Vogel and Kroll (1992) 方法藉由移動平均平滑化
130 變化幅度，因此較能表現集水區水文特徵常數 a 與流域排水系統之間關係。
- 131 3. Vogel and Kroll (1992) 模式常數 a 與集水區坡度呈現高度相關，較陡的集水區會造成退水時間較短，因
132 此 Vogel and Kroll (1992) 模式退水時間常數較 Brutsaert(2008)短，分別為 25 ± 17 天與 66 ± 25 天，推測其原
133 因為由於 Brutsaert (2008) 選用低門檻 (lower envelope) 的方式確保所選取資料為低流的部分，而 Vogel and
134 Kroll(1992)選用線性迴歸方式探討集水區平均行為，因此可能參雜直接逕流或是中間流部分，造成退水時
135 間較短。

136 參考文獻

- 137 [1] 經濟部水利署 (2013) 「水文年報」。(Water Resources Agency. (2013) “Hydrological year book.”)
- 138 [2] Brutsaert and Nieder. (1977) “Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau.”
139 *Water Resources Research*, Vol.13, NO.3, pp.637-643.
- 140 [3] Brutsaert. (2005). *Hydrology*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 605.
- 141 [4] Brutsaert. (2008). “Is Mongolia's groundwater increasing or decreasing? The case of the Kherlen River
142 basin.” *Hydrological Sciences Journal*, 53(6), pp.1221-1229.
- 143 [5] Brutsaert. (2008). “Long-term groundwater storage trends estimated from streamflow records: Climatic
144 perspective.” *Water Resources Research*, Vol.44, W02409.
- 145 [6] Sugita and Brutsaert. (2009). “Recent Low-Flow and Groundwater Storage Changes in Upland Watersheds
146 of the Kanto Region, Japan.” *Journal of hydrologic engineering*, Vol.14, NO.3, pp.280-285.
- 147 [7] Kirchner. (2009). “Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff
148 modeling, and doing hydrology backward.” *Water Resources Research*, Vol.45, W02429.

- 149 [8] Stoelzle et al. (2013). "Are streamflow recession characteristics really characteristic?" *Hydrology and Earth*
150 *System Sciences*, 17, pp.817-828.
- 151 [9] Szilagyi et al. (1998). "Recession flow analysis for aquifer parameter determination." *Water Resources*
152 *Research*, Vol.34, NO.7, pp.1851-1857.
- 153 [10] Tague, and Grant. (2004). "A geological framework for interpreting the low-flow regimes of Cascade
154 streams, Willamette River Basin, Oregon." *Water Resources Research*, Vol.40, W04303.
- 155 [11] Troch et al. (2013). "The importance of hydraulic groundwater theory in catchment hydrology: The legacy
156 of Wilfried Brutsaert and Jean-Yves Parlange." *Water Resources Research*, Vol.49, pp.5099-5116.
- 157 [12] Vogel and Kroll. (1992). "Regional Geohydrologic-Geomorphic Relationships for the estimation of
158 Low-Flow Statistics." *Water Resources Research*, Vol.28, NO.9, pp.2451-2458.
- 159 [13] Wittenberg. (1999). "Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and
160 baseflow separation." *Journal of Hydrology*, 13, pp.715-726.

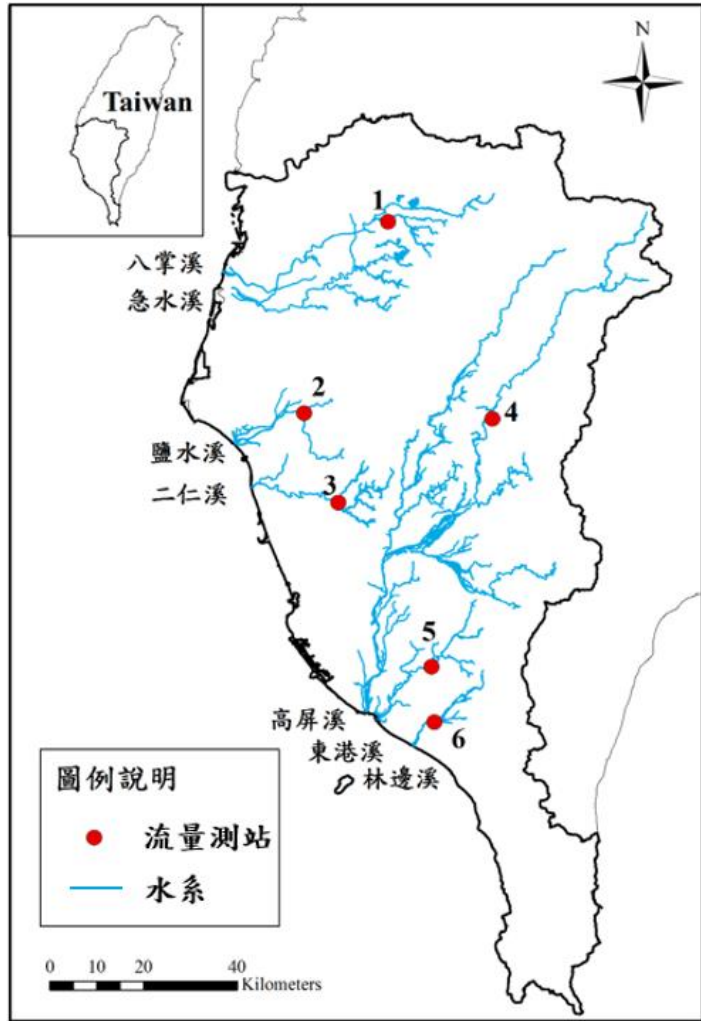


圖 1 研究區域流量測站位置

Fig.1 Location of streamflow gauging station

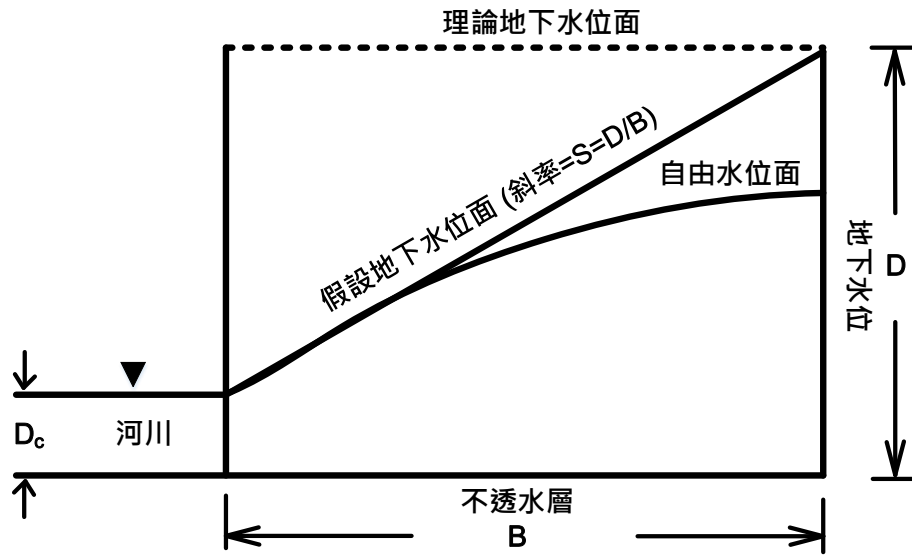
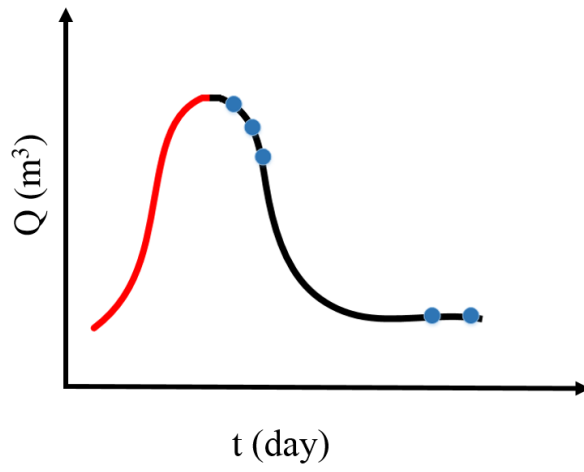
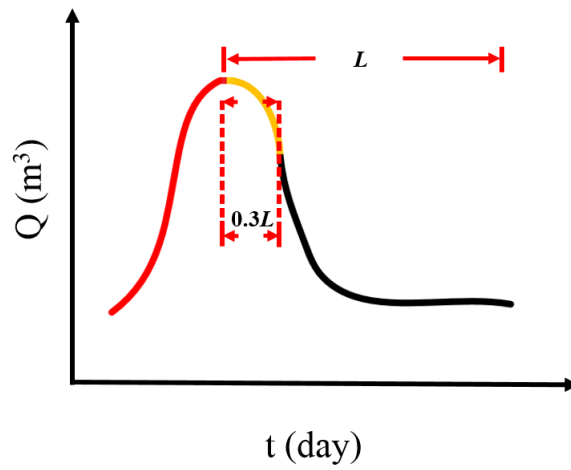


圖 2 地下水與河川呈線性關係示意圖

Fig.2 A linear relationship between groundwater and river



Brutsaert (2008)



Vogel and Kroll (1992)

圖 3 Brutsaert 與 Vogel and Kroll 選取流量資料示意圖

Fig.3 Brutsaert and Vogel and Kroll select flow data

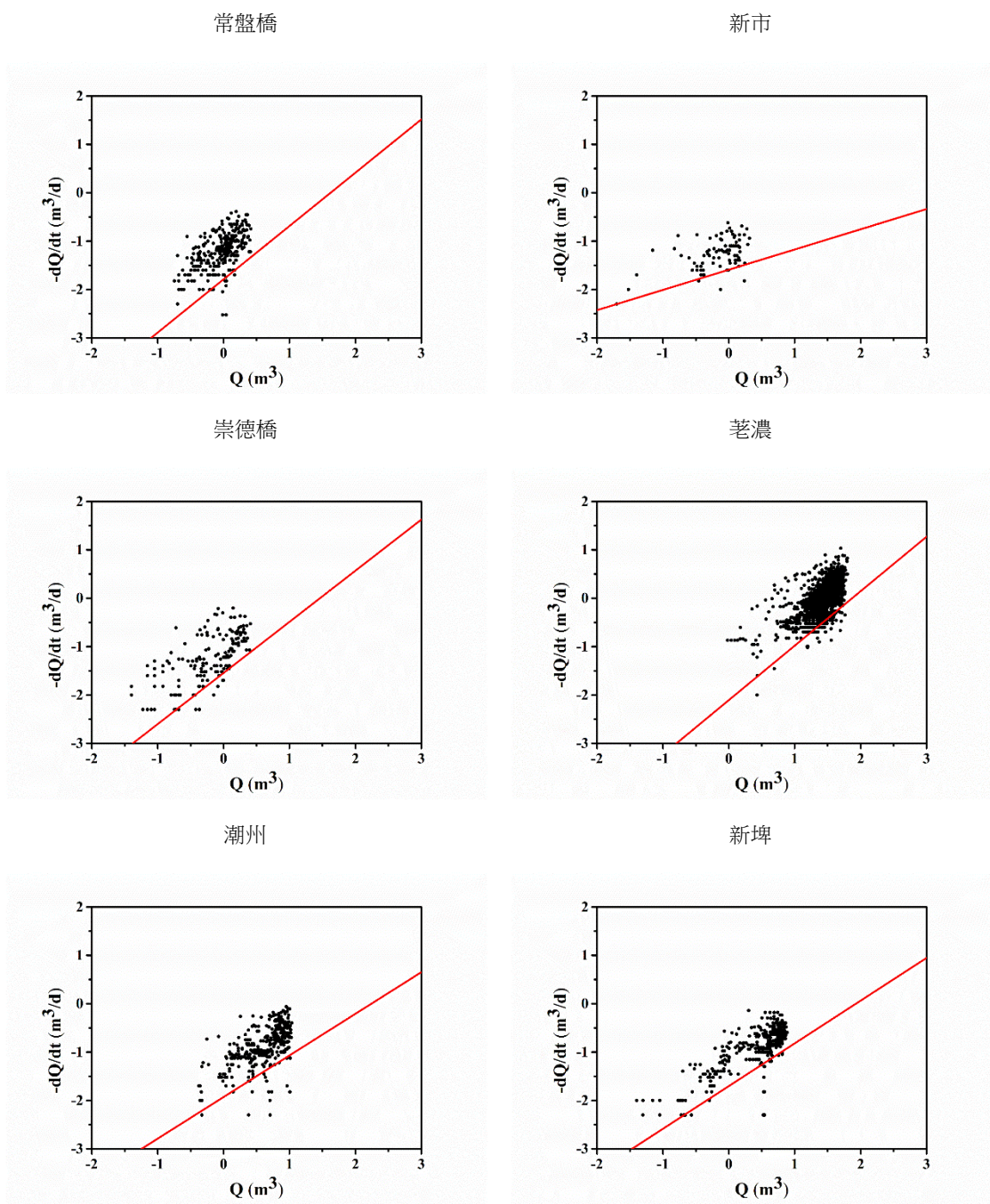
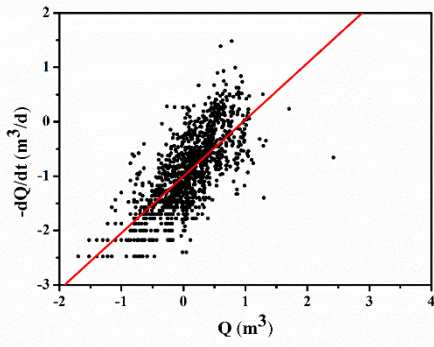


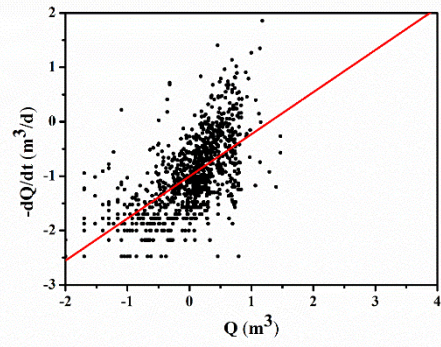
圖 4 Brutsaert(2008)台灣南部集水區

Fig.4 Southern Taiwan basin result of Brutsaert(2008)

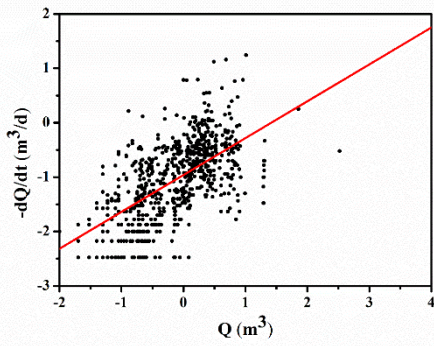
常盤橋



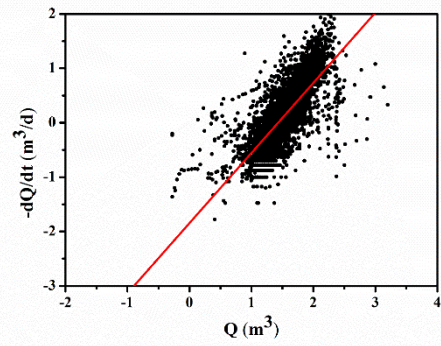
新市



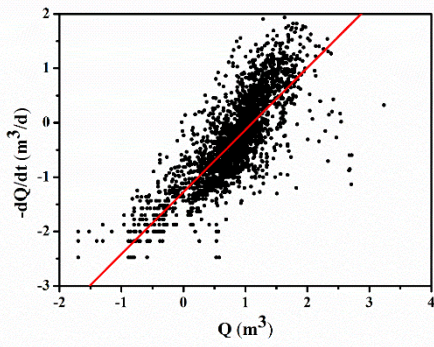
崇德橋



荖濃



潮州



新埤

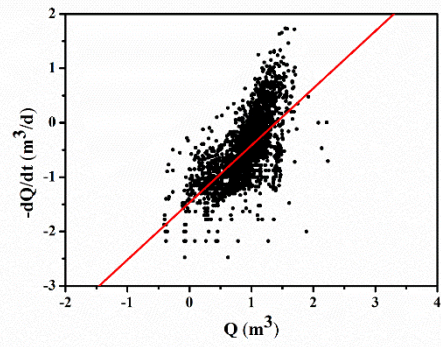


圖 5 Vogel and Kroll(1992)台灣南部集水區

Fig.5 Southern Taiwan basin result of Vogel and Kroll(1992)

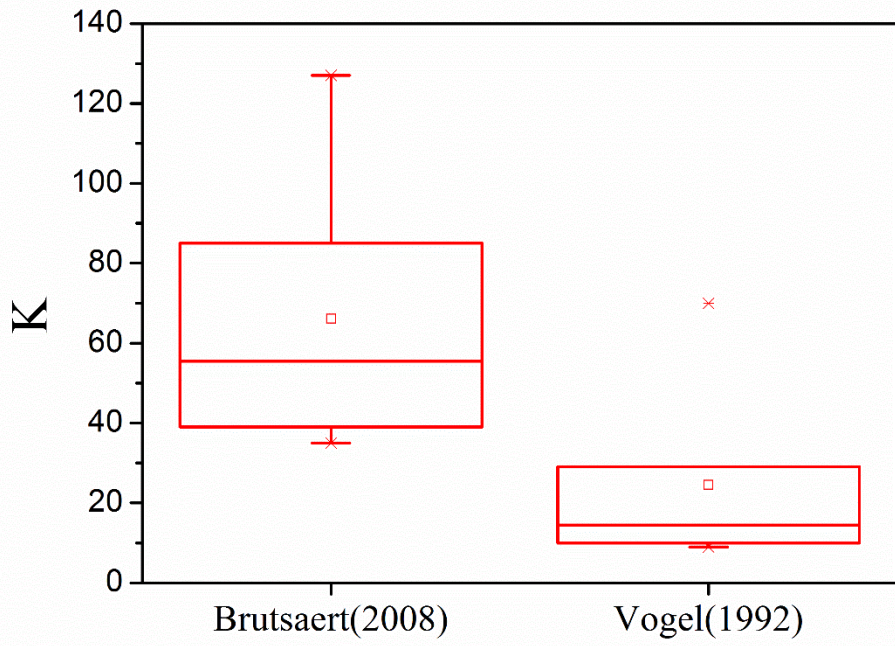


圖 6 消退時間分佈

Fig.6 Distribution of recession time

表 1 流量測站地文因子(資料來源：經濟部水利署)

Table 1 Topography factor of streamflow gauging station

No.	Basin	Gaging station	Stream order	Average elevation(m)	Length of main stream (m)	Average slope (m/m)	Slope of main stream (m/m)	Area (km ²)
1	八掌溪	常盤橋	4	309	22547	0.31	0.05	98.34
2	鹽水溪	新市	4	49	29402	0.14	0.06	143.4
3	二仁溪	崇德橋	4	89	38553	0.36	0.25	138.3
4	高屏溪	荖濃	5	1833	99211	0.70	0.08	803.0
5	東港溪	潮州	5	233	28848	0.25	0.06	178.5
6	林邊溪	新埤	5	692	36815	0.49	0.10	311.4

表 2 Brutsaert (2008) 參數化結果

Table 2 The result of parameterizing Brutsaert (2008) method

Basin	a	b	K
常盤橋	1.64×10^{-2}	1.102	61
新市	2.56×10^{-2}	0.418	39
崇德橋	2.86×10^{-2}	1.057	35
荖濃	7.85×10^{-3}	1.126	127
潮州	1.18×10^{-2}	0.860	85
新埤	1.99×10^{-2}	0.884	50
Range			66 ± 25

表 3 Vogel and Kroll (1992) 參數化結果

Table 3 The result of parameterizing Vogel and Kroll (1992) method

Basin	a	b	K
常盤橋	9.92×10^{-2}	1.041	10
新市	9.92×10^{-2}	0.774	10
崇德橋	1.10×10^{-1}	0.678	9
老濃	1.43×10^{-2}	1.290	70
潮州	3.40×10^{-2}	1.051	29
新埤	5.35×10^{-2}	1.142	19
Range			25 ± 17

表 4 K 對不同地文因子相關係數

Table 4 The correlation between K and topography factor

	集水區河 川級序數	集水區平 均高程(m)	集水區主 流長度(m)	集水區平 均坡度 (m/m)	集水區主 流坡度 (m/m)	集水區面 積(km ²)
Brutsaert(2008)	0.666	0.841	0.784	0.662	-0.381	0.828
Vogel and Kroll (1992)	0.679	0.917	0.906	0.727	-0.295	0.945

表 5 常數 a 對不同地文因子相關係數

Table 5 The correlation between constant a and topography factor

	集水區河 川級序數	集水區平 均高程(m)	集水區主 流長度(m)	集水區平 均坡度 (m/m)	集水區主 流坡度 (m/m)	集水區面 積(km ²)
Brutsaert(2008)	-0.712	-0.707	-0.539	-0.527	0.595	-0.644
Vogel and Kroll (1992)	-0.716	-0.556	-0.37	-0.266	0.826	-0.542

表 6 常數 b 對不同地文因子相關係數

Table 6 The correlation between constant b and topography factor

	集水區河 川級序數	集水區平 均高程(m)	集水區主 流長度(m)	集水區平 均坡度 (m/m)	集水區主 流坡度 (m/m)	集水區面 積(km ²)
Brutsaert(2008)	0.203	0.471	0.403	0.677	0.293	0.365
Vogel and Kroll (1992)	0.673	0.616	0.344	0.396	-0.836	0.531