

環境和土地利用因子對台灣地區 旱災問題和低水流量特性之影響

鄭皆達⁽¹⁾ 張祐祿⁽²⁾ 李錦浚⁽³⁾

摘要

本研究從土壤物理和水文特性的觀點，探討集水區水文現象及低水流量產生機制；內容包括降雨和滲透、土壤水分的移動、土壤孔隙對保水力的影響及集水區乾濕狀況與儲留保蓄和滯留保蓄的關係；低水流量特性則從低水流量大小、退水常數及保蓄水量各方面加以探討。環境與土地利用因子則討論降雨和森林覆蓋存在與否對低水流量影響。

降雨進入土壤後，除了快速地表下逕流很快流出集水區，其他則成爲保蓄水量，其中儲留保蓄主要是供蒸發散之用，而緩慢地表下逕流和地下水成爲滯留保蓄，爲低水流量的來源。降雨量的大小和其在一年間分布的狀況是決定低水流量最主要因子，久旱不雨是發生旱災的主因，土地利用和森林存在與否只是影響流量(含低水流量)的因子之一，但是維護集水區地面的滲透能，以確保降雨進入地表下以補助儲留保蓄、滯留保蓄和地下水層，卻是確保低水流量的必要條件。

林地因蒸發散量大於其他覆蓋，許多試驗都證明單純的森林伐採，在未嚴重擾動地面的情況下，會使包括豐水期和河水其在內的河川流量增加。森林伐採所增加的水，雖然增加了基流量，可是也增加了洪水量，且森林根系抗剪力減少，更容易造成災害。因此爲了增加基流量還砍伐森林，在國土保安功能上可能嚴重減少而得不償失。

(關鍵詞：低水流量、土地利用、旱災問題、環境)

Low Flows and Droughts in Taiwan as Related to Environmental Factors and Land Uses

J.D. Cheng⁽¹⁾, Yu Lu Chang⁽²⁾, Chin-chun Lee⁽³⁾

Professor⁽¹⁾ and Graduate Student⁽²⁾⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402. R.O.C.

ABSTRACT

-
- (1) 國立中興大學水土保持學系教授
(2) 國立中興大學水土保持學系碩士生
(3) 國立中興大學水土保持學系博士生

The study is to explore the hydrological phenomenon and the generation of low flows and drought mechanism from soil physics and hydrological characteristics point of view. Rainfall and infiltration, movement of soil water, influence of soil porosity on water holding capacity and the relationship between watershed wetness and detention storage or retention storage are low flow characteristics including low flow quantity, the constant(K) of recession curves and the quantity of water storage are assessed. The environmental and land use factors were investigated from the influence of rainfall and with or without forest existence. After the rainfalls infiltrate into the soil, some become rapid subsurface flows to the stream as the streamflow, and others become as detention and retention water. The retention water is mainly used by evapotranspiration. The slow subsurface flow reaches deeper as a ground water then becomes the source of the low flow later. The rainfall amount and its time distribution are the major factors affecting the occurrence of droughts. The land use including forest cover is just one of the factors affecting streamflow . Protecting good soil permeability of watershed to insure that the rainfall can infiltrate into the soil to supplement retention or detention water is essential to secure the low flow.

The evapotranspiration from forest land is much greater than any other ground covers. It has been proved by many experiments that the streamflows increased after the removal of forest if the ground is not severely disturbed. Though the baseflow amount increased after deforestation, yet the floodwater volumes increased at the same time as well. Removal of forests also decreases the soil shear strength and weakens the slope stability. Therefore, it is not wise to remove the forest cover for the purpose of increasing streamflow to without considering its detrimental effects on erosion and slope stability.

(**Keyword** : Low Flows, Land Use, Droughts, Environment)

導論

台灣水資源時空分布不均，年雨量雖豐富，但多集中在夏秋兩季的颱風季節，加上坡陡流急，所以大部分的降水很快成爲逕流入海中，真正能被我們利用到的水量則占少部分。隨著國人生活品質的提升，工業用水、家庭用水不斷增加因此即使在有水庫調節水量的情況下，只要久旱不雨，仍產生缺水問題，集中時，往往造成洪水及相關災害。

台灣河川溪流的集水區的大部分爲森林

覆蓋，森林有氣候調節、生態保育、景觀維護、自然教育、遊樂保健等功能；此外還有減少地表沖蝕、促進坡地穩定、理水與淨水等水土保持功能。森林的水土保持功能中，如對水災和旱災的防止程度的大小，國人和學界仍有爭議，因此有待做正確定位。

本研究分析台灣 河川溪流上游森林覆蓋良好的集水區之水文氣象資料，以土壤物理、水文現象和特性爲基礎，探討低水流量的產生機制、特性及其環境因子，由是土地利用(覆蓋因子)的關係，進而除低水流量的

觀點，明確界定森林的水源涵養(理水)功能。

本研究分析台灣河川溪流上游集水區之生態與低水流量特性，作為務實評估集水區經營保育對策之基礎。回歸學理，認識環境因子及尊重事實的態度，尊重傳統觀念但不忙從，肯定森林集水區生態系，對包括低水流量在內等水文特性之整體調整功能，但也探討其有限性。本研究依據學理、資料和觀測事實，解析集水區水文特性和對水資源的調整功能。強調立地條件與環境因子對集水區生態水文特性的影響，並以流量產生機制為基礎，探討集水區的低水流量特性及研究成果的應用性。

研究方法

2.1 研究集水區的選定

本研究選定的集水區以森林覆蓋良好，寄水文氣象資料的集水區為研究對象，其中又以具土壤物理及水文性質資料的森林試驗小集水區為主，包括林業試驗所設在台灣中部的蓮花池四號、五號及畢祿溪十一號、十二號集水區。面積較大的集水區，則有大甲溪德基水庫上游支流各集水區及荖濃溪集水區。另外荖濃溪上游的隘寮溪集水區，和一部分位於台北市郊的山坡地集水區。

2.2 研究方法

以土壤物理和水文學的理論為基礎，首先比較降雨強度、土壤滲透性(permeability)和水利傳導度(hydraulic-conductivity)，以了解降雨到達集水區後的路徑，由此討論低水流量的產生機制。並由低水流量特性(如最低流量、退水曲線、流量延時曲線)，探討影響低

水流量環境因子，尤其是氣象和土地利用因子，進而說明森林的理水功能，及其在水資源保育上的意義，以供水資源保育、管理、經營上的參考。

2.2.1 流量退水曲線特性理論

流量歷線代表集水區內逕流與時間關係，其特性反應集水區環境因子，如氣象及水文特性對水文之影響。典型的流量歷線如圖 1 所示。

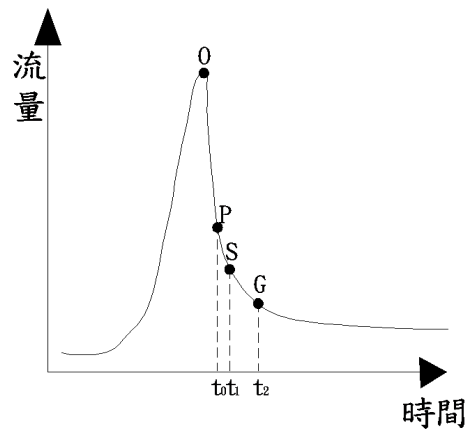


圖 1. 典型的流量歷線
Figure 1. Typical hydrographs.

- 其中：
- O 為尖峰流量
 - P-S 為由於地表逕流之退水
 - S-G 為地表下逕流之退水
 - G-H 為地下水逕流造成之退水
 - G-H 所謂的低水基流量
 - O-H 為退水段

影響低水流量的因素除集水區及水面積外，還有降雨、地形、地質、土壤、地下水含水層、植生狀況等。本研究所用退水曲線特性分析方法為巴斯氏段的退水有不同的退水常數，在相同退水常數階段，是為同一逕流形態。退水逕流曲線可用來做低水流量之

預測估算，應用此法可分析現有尖峰流量發生後的退水曲線，並可進一步探討各集水區退水曲線與集水區面積、起始流量、地文因子等之關係。分析方法將退水過程之流量取對數為縱軸，經過時間為橫軸，繪於半對數紙上，如圖 2 所示，連接各點可得若干折線，不同的折線代表不同的退水階段，可據以求得不同的退水常數。退水曲線表示式如下：

$$Q_t = Q_0 \cdot K_r^t$$

取對數後， $\ln Q_t = \ln Q_0 + t \cdot \ln K_r$ (2-1)

可得， $\ln K_r = \frac{\ln Q_t - \ln Q_0}{t}$ (2-2)

上式中， Q_t ：經過 t 日後之流量(m³/day)；

Q_0 ：起始流量(m³/day)，一般指 P 點之流量；

K_r ：第一段退水常數； T ：經過時間(day)

由式(2-2)可知 $\ln K_r$ 代表圖 2 對數退水曲線之斜率因 $\ln Q_0 > \ln Q_t$ ，故 $\ln K_r < 0$ ，代表一負斜率，如直線越陡，經反對售後所求 K_r 反較小，直線越緩， K_r 較大。

故將退水過程之逕流量取對數與對應時間在半對數方格紙上做圖，找出兩個折點 S、G 及 t_1 、 t_2 值，即將退水歷線分成三個部份，在求得每一直線的斜負率，得到三個退水曲線 K_{r1} 、 K_{r2} 、 K_{r3} 。

a. 當 $t < t_1$ 時

$$Q_t = Q_0 \cdot K_{r1}^t$$

b. 當 $t_1 \leq t \leq t_2$ 時

$$Q_t = Q_s \cdot K_{r2}^{t-t_1} = Q_0 \cdot K_{r1}^{t_1} \cdot K_{r2}^{t-t_1}$$

c. 當 $t \geq t_2$ 時

$$Q_t = Q_g \cdot K_{r3}^{t-t_2} = Q_0 \cdot K_{r1}^{t_1} \cdot K_{r2}^{t_2-t_1} \cdot K_{r3}^{t-t_2} \quad (2-3)$$

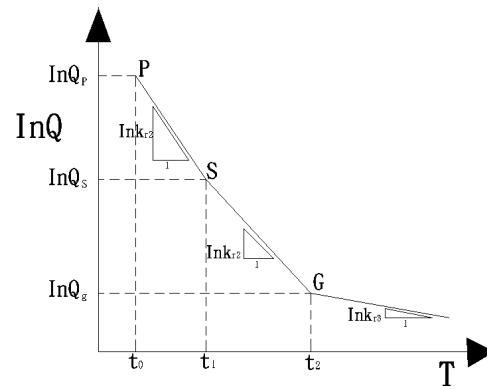


圖 2. 退水常數之圖解法
Figure 2. Graphic illustration of recession constant

t ：尖峰流量後第 t 日之逕流量(m³/day)

t_1 ：第一段退水結束之日

t_2 ：第二段退水結束之日

K_{r1} ：第一段退水常數

K_{r2} ：第二段退水常數

K_{r3} ：第三段退水常數

Q_s ：第一個折點(S)時流量

Q_g ：第二個折點(G)時流量

2.2.2 集水區保蓄水量之推求

集水區保蓄水量，一般系以集水區洪峰流量過後至穩定之基流為起點，推求至下一場暴雨來臨前為終點，故以 G 點來表示基底逕流最大流量進行基分計算，即可算出該集水區之保蓄儲水量，其表示式可用式(2-3)進行積分求出如下：

$$\begin{aligned} Q_{\text{storage}} &= \int_{t_2}^{\infty} Q_t dt \\ &= \int_{t_2}^{\infty} Q_g K_{r3}^{(t-t_2)} dt \\ &= Q_g \int_{t_2}^{\infty} K_{r3}^t dt \\ &= Q_g \left[\frac{K_{r3}^t}{\ln(K_{r3})} \right]_{t=t_2}^{t=\infty} \end{aligned}$$

環境和土地利用因子對台灣地區旱災問題和低水流量特性之影響：鄭皆達、張祐祿、李錦浚

$$\because K_{r3} < 1$$

$$\therefore K_{r3}^{\infty} \rightarrow 0, K_{r3}^{\infty} - K_{r3}^0 = -1$$

$$\text{故 } Q_{\text{storage}} = -\frac{Q_g}{\ln(K_{r3})} \quad (2-4)$$

另外並運用馬丁式(Martin)於 1973 年提出的流量半衰期(half-flow days)理論，可以簡單明顯地描述出一個集水區退水日流量變化情形，其表示如下：

$$Q_{t_{0.5}} = \frac{1}{2} Q_0 \text{ 且 } Q_{t_{0.5}} = Q_0 K^{t_{0.5}}$$

$$\text{可推得 } 0.5 = K^{t_{0.5}}$$

$$\ln(0.5) = t_{0.5} \ln K$$

$$t_{0.5} = \frac{\ln(0.5)}{\ln K} = -\frac{0.693}{\ln K} \quad (2-5)$$

$Q_{t_{0.5}}$ ：起始流量一半之流量(m³/day)

Q_0 ：起始流量(m³/day)

$t_{0.5}$ ：流量半衰期(day)

K ：退水常數

結果與討論

3.1 森林覆蓋坡地的水文現象

3.1.1 降雨與滲透

森林的樹冠層、林下植生和枯枝落葉層具有遮蔽土壤，減低與緩和對土壤的直接衝擊，森林覆蓋也使土壤表層的幅射能減少，使林內溫度降低，維持較大溼度，使土壤表面蒸發量(evaporation)減低，微生物的活動量較旺盛，有機質的供應較充份，有助於土壤團粒的結構。而且森林的根系發達，根層較深，其蒸發散量(evapotranspiration)較高，使較深層的土壤比較不容易飽和，這些都有助於土壤化育，使其具有高滲透能(permeability)，

所以一般林地滲透能(表 1)均高於降雨強度(rainfall intensity)(表 2)，亦即大部份的降雨強度小於林地之滲透率，而且一班土壤的導水度(hydraulic conductivity)通常也很高，所以一般林地的坡面很少發生地表逕流(overland flow)。

表 1. 蓮華池試驗集水區林地最終滲透率(謝政道，1984)

Table 1. Infiltration capacity values of different landuses in Lianhuachi watershed.

	滲透率平均值與最大最小值(mm/h)
A 天然闊葉樹	136 (62.4-246)
B 杉木二十年生	187 (85.4-266)
C 肖楠二十年生	97 (44.4-200)
D 肖楠六十年生	201 (135.0-266)
E 裸露地	40 (20.0-102)

表 2. 蓮華池 5 號試驗集水區不同重限期及不同延時的降雨強度(mm/h)

Table 2. Average rainfall intensities for different return periods and duration at the #5 Lianhuachi experimental watershed.

	重現期(年)				
	2	10	25	50	
延時(h)	1	51	98	118	132
	2	38	62	74	83
	3	29	47	57	63
	6	18	30	36	40

3.1.2 土壤水的移動

降雨入滲至坡地土壤後，因重力的影響使水分向下移動，塚本(1996)認為坡地可以分成土壤水帶、中間水帶、上層毛細管水帶及

地下水帶(圖 3)。

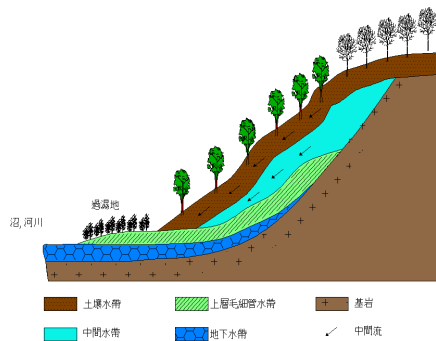


圖 3. 山坡地水流移動之剖面分析
(塚本, 1966)

Figure 3. Profile partition of hillslope water movement.

其中各層定義如下：

- * 土壤水帶：為植物根系分布範圍，這裡的水將受到植物之蒸發或地表蒸發之影響。
- * 中間水帶：介於植物根系分布範圍與上層毛細管水帶之間，相當於土壤底層及基岩之風化物層。
- * 上層毛細管水帶：為地下水帶之上緣，因受到毛細管作用，將水由地下水帶提昇至此水帶。
- * 地下水帶：介於地下水面以下及不透水之基岩或基岩風化物之上，依重力作用使水移動的部分(不包括不具地下水面的被壓地下水)。

降於森林的雨水，除了由於蒸發散及極少數地表逕流消失以外，其餘被土壤水帶及中間水帶之孔隙保存或受重力向下方滲透。這個時候，如果土壤水帶或中間水帶之供給水量大於往下滲透之水量時，就會產生間流。往下滲透的水在滿足「儲留保蓄」所需水量後，一部份是快速中間流，成為暴雨流量，

另一部份慢速中間流則與地下水庫的水，一起成為「滯留保蓄」，為基流的主要來源，有關「儲蓄保蓄」與「滯留保蓄」之定義將於下節說明。因此降於森林的雨水有分配在地表逕流，地表下逕流和地下水流的情況，分別以不同的速度在不同的時間流入溪流及河川。

3.1.3 土壤孔隙與保水能力

土壤水帶與中間水帶的保水能力，受其孔隙組成大小所影響。在粗大的非毛細管孔隙中的水，受重力快速地向下方滲透或變成快速間流，而在毛細管孔隙中的水，則因毛細管張立作用而使移動變慢，緩慢地向下方滲透，成為慢速中間流。如毛細管張力大於重力時，毛細管孔隙中之水則不移動。

由表 3，可知不同孔隙大小所對應水流動的狀態。孔徑大於 0.05mm 者，以重力水和快速中間流為主，部份孔徑接近 0.05mm 者為慢速中間流；孔徑大介於 0.05mm 和 0.006mm 以上孔隙所含的水分，為可利用的水資源。而恐徑介於 0.006mm 和 0.0002mm 間所含水分為毛細管非移動水，稱為「儲留保蓄」，不會流入和川或地下水帶，但可被植物吸收利用。

另外竹下計算流域土壤全層孔隙與貯存容量，發現集水區所能貯存的水與坡度、土壤孔隙有關，通常坡度越緩及孔隙月大其貯存容量越高。

表 5 為鐘啓榮(1997)所分析之森林水文反應值，分析的集水區均覆蓋良好，其中關刀溪集水區，水文反應增值明顯得較低，推究其原因可能因為畢綠溪集水區的土壤屬粉

環境和土地利用因子對台灣地區旱災問題和低水流量特性之影響：鄭皆達、張祐祿、李錦浚

質壤土，蓮華池集水區屬粘質壤土而，而關 性，因此有較多降雨量滲入地表下。
 刀溪集水區主要為砂質壤土，有較好的滲透

表 3. 孔隙大小與水之狀態
 Table 3. Moisture conditions and soil porosity.

P ^F 值	-∞	0	0.2	0.5	1.6	1.8	2.7	4.2	7.0	
巴	0	0.001	0.002	0.004	0.04	0.06	0.5	1.5		
水柱高 (mm)	0	1	1.6	3.5	40	63	500	15.848		
孔隙徑 (mm)	∞	3	1.9	0.9	0.08	0.05	0.006	0.0002		
水分常數	最小容量		田間含水量			毛管移動停止點		永久凋萎點		絕乾
水之狀態	動水(非毛管水)				毛管移動水		毛管非移動水		吸濕水	
孔隙分區	(真下氏)	粗孔隙				細孔隙				
	(竹下氏)	大孔隙	粗大孔隙	粗孔隙		細孔隙				

表 4. 土壤孔隙組成與貯存容量(竹下,1981)
 Table 4. Soil porosity and water retention capacity.

地形	開析山地				高原、緩坡土	
	土石流堆積土押出	崩積土	匍行土	陡坡匍行土	殘積土	緩坡匍行土
坡度(α°)	12	28	32	42	18	12
厚度(cm)	180	153	149	111	117	219
大孔隙率(%)	4.5	6.7	4.4	9.5	3.2	4.9
大孔隙量(mm)	81.5	103.2	65.6	104.9	38	106.6
粗大孔隙量(mm)	158.6	170.6	103.4	145.1	62.1	186
粗孔隙量(mm)	145.7	137.9	106.9	103.7	85.2	175.1
短時間貯留容量(mm)	49.5	98.1	52.4	120	19.3	48.9
長時間貯留容量(mm)	275	226.3	167.9	134.8	135.4	331.3
貯留容量(mm)	324.5	324.4	220.3	254.8	154.7	380.2

表 5. 森林集水區水文反應值之比較
(鍾啓榮,1998)

Table 5. Ratio of hydrologic response for forest watersheds.

集水區	最大值 (%)	最小值 (%)	平均值 (%)
畢祿溪 11 號	65	0.1	11.18
畢祿溪 12 號	86.5	0.9	15
畢祿溪 3 號	51.29	0.91	13.63
畢祿溪 4 號	78.81	1.07	15.9
畢祿溪 5 號	71.41	0.93	18.52
關刀溪	4.25	0.36	1.64

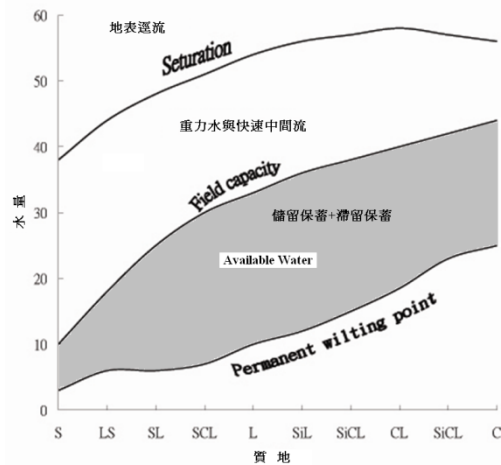
(註:水文反應值=直接逕流總量/總降雨量)

3.1.4 集水區乾濕(watershed wetness)與滯留保蓄 (detention storage) 和儲留保蓄(retention storage)

在無降雨期間溪流低水流量的來源來自地下水層和土壤的飽和水層，這二種飽和水層都會去土壤的飽和水層，這二種飽和水層都會在降雨期間得到滲入雨水的補助，其補注量與降雨前集水區乾濕情形有關。水區乾濕指數，一般可由定期量測集水區土壤水分來決定，間接方法則是以集水區臨前降雨 (antecedent precipitation) 或臨前基流量 (Antecedent base flow) 來表示。換句話說，下到森林集水區的雨水，除了截留量蒸發外，大部份經由枯枝落葉進入土壤後，視集水區土壤乾濕情形和雨量的大小，決定其成為儲留保蓄和滯留保蓄的多少和比例，圖 5 則表示了進入土壤的水先供給儲留保蓄，爾後隨著降雨量持續，水分轉而以滯留保蓄方法存在。

由圖 4 可知，儲留與滯留保蓄大致介於

永久凋萎處(Permanent wilting point)與田間容水量(Field capacity)之間，其容量大小視土壤質地而定，一般而言砂土因孔隙率小，故可用水較少，但黏土因顆粒較小，雖然可用水較多，但黏土因顆粒較小，雖然可用大量亦少，而壤土的滯留保蓄水量可能較多。



S=sand; LS=loamy sand; SL=sandy loam; SCL=sandy clay loam; L=loam; SiL=silty loam; SiCL=silty clay loam; CL=clayey loam; SiC=silty clay; C=clay

圖 4. 土壤水分與質地關係

Figure 4. Water content vs texture soils.

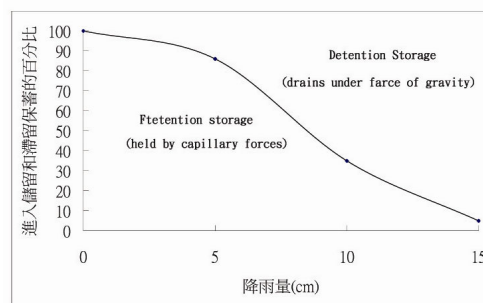


圖 5. 降雨與儲留及滯留保蓄關係

Figure 5. The partition of rainfall into detention and retention storages.

環境和土地利用因子對台灣地區旱災問題和低水流量特性之影響：鄭皆達、張祐祿、李錦浚

3.2 低水流量特性

3.2.1 集水區地文及退水特性

本文針對各別單場暴雨進行研究，分析集水區地文及退水特性，今蒐集台灣中部畢祿溪 11、12 號集水區，蓮華池 4、5 號集水區及台北市郊坡地集水區，包括四分溪、無名溪、山豬窟溪、青碧溪、內雙溪及明德集水區水文資料，分析其基流退水常數、G 點逕流量、保蓄水量、保蓄深度及流量半衰期，如表 6 及表 7 所示。發現集水區基流退

水常數 K 都差不多，約在 0.6~0.9 之間。而不同暴雨的 G 點逕流量、保蓄水量、受降雨大小、強度、時間分配、集水區面積、坡度等之影響。

表 8 分析德基水庫長期觀測之結果，發現集水面積越小，其基流退水常數越小，顯示可能因為集水面積過小，洪水來臨時形成野溪所測得，而這些水未來可能再進入土壤，成為保蓄水量，或因為集水區坡度較陡而造成。其餘集水區所得基流退水常數 k 值則與前述分析單場暴雨所得到結果相差不多。

表 6. 畢祿溪與蓮華池集水區的地文及暴雨流出量和低水流量特性

Table 6. Stomflow and low flow characteristics as related to quantitative geomorphologic characteristics of PiLuChi and Lianhuachi watershed.

	面積 (ha)	坡度 (%)	選用流量資料 (年/月)	總降雨量 (mm)	暴雨流出量 (m ³)	暴雨流出量深度 (mm)	洪峰流量 (m ³ /s/km ²)	基流退水常數 K	G 點逕流量 (m ³ /s)	保蓄水量 (m ³)	保蓄深度 (mm)	流量半衰期 (day)	
畢祿溪 11 號集水區	146.6	82	1975/8	317.9	228542	155.87	3.0248	0.8535	0.209	113861	77.66	4.4	
			1975/9	534	418982	285.76	5	0.9348	0.5886	754437	514.55	10.28	
			1977/8						0.958	0.14	281910	196	16.2
			1978/2						0.989	0.04	312450	217	62.7
			1979/8	440.8	330948	255.71	1.49	0.9246	0.246	271403	185.11	8.84	
			1983/6	267	158349	108	1.193	0.96	0.14	349680	243	20.0	
			1984/9						0.981	0.11	495440	344	36.1
畢祿溪 12 號集水區	241.4	74	1980/9	345.5	531019	222.116	2.34	0.898	0.309	248930	103.11	6.45	
			1981/9	500.6	1080792	447.6	4.16	0.885	0.401	284535	117.86	5.7	
			1983/6	270.7	305186	126.4	1.01	0.936	0.35	595068	246.49	10.57	
			1984/8						0.979	0.09	366380	254	32.7
蓮華池 4 號集水區	5.9	40	1976/8					0.988	0.019	5760	98	57.4	
			1977/8						0.986	0.023	5466	93	49.2
			1979/6						0.989	0.017	5560	95	62.7
			1981/7						0.98	0.025	4600	78.5	34.3
			1982/5						0.985	0.01	2488	42.5	45.9
			1982/6						0.952	0.023	1638	28	14.1
			1985/8						0.97	0.032	3730	63.65	22.8
蓮華池 5 號集水區	8.4	41	1978/5					0.987	0.017	4704	56.07	53.0	
			1979/6						0.984	0.025	5669	67.57	43.0
			1982/5						0.982	0.018	3627	43.23	38.2
			1982/6						0.951	0.035	2494	29.73	13.8
			1984/6						0.99	0.02	7200	85	69.0

表 7. 台北市郊坡度集水區的地文及暴雨流出量和低水流量特性

Table 7. Stomflow and low flow characteristics as related to quantitative geomorphologic characteristics of taipei city watersheds.

集水區	面積 (ha)	坡度 (%)	不透水面積 (%)	選用流量資料 (年/月)	總降雨量 (mm)	暴雨流出量 (m ³)	暴雨流出量深度 (mm)	洪峰流量 (m ³ /s/km ²)	基流退水常數 K	G 點逕流量 (m ³ /s)	保蓄水量 (m ³)	保蓄深度 (mm)	流量半衰期 (day)
四分溪	562	47	15.65	1993/6					0.908	0.13	285031	53.2	7.2
				1994/9	248	432658	80.9	1.49	0.794	0.522	195993	36.6	3
				1994/10	283	661617	123	1.59	0.706	0.309	76774	14.4	2
				1994/12	75	69405	12.9	0.211	0.626	0.239	4415	8.3	2
無名溪	668	58	15.93	1993/1					0.919	0.225	228706	34.24	8.2
				1993/6					0.86	0.273	1562207	26.6	4.6
山豬窟溪	187.3	43	21.99	1993/6					0.969	0.005	13935	7.4	6.4
青碧溪	763	37	7.21	1993/6					0.957	0.174	341673	45	15.8
內雙溪	474.8	44		1994/7	90.5	66668	14	0.564	0.856	0.144	86439	18.2	4.8
				1994/9	264.7	467999	98.6	5.05	0.74	0.623	179602	37.8	2.3
				1994/9	208	561152	118	0.741	0.73	0.548	152208	32.06	2.2
				1994/10	477	1469346	309	6.571	0.786	1.551	557142	117.3	2.9
				1995/5	157.5	267649	56.4	1.123	0.835	0.281	134943	28.42	3.9
明德	758.53	37		1994/2	56	66130	8.7	0.125	0.707	0.434	108404	14.3	2.0
				1994/5	106	176220	23.2	0.598	0.706	0.495	123222	16.3	3.5
				1994/5	47.5	27175	3.5	0.138	0.612	0.318	56013	7.4	1.41
				1994/8	261.5	926995	122	1.25	0.928	0.98	1135994	149.7	9.3
				1994/8	201.5	531302	70	1.31	0.858	1.399	789806	104.1	4.5

表 8. 德基水庫上游集水區最低水流量及退水常數

Table 8. Minimum flows and recession constants for tributary watersheds of Tech reservoir.

水文站名	集水面積(km ²)	最低流量 (m ³ /s/km ²)	基流退水常數(k)
PL-11(1969-)	1.4	0.0010	0.60
PL-12(1969-)	2.4	0.0010	0.67
四南湖(1958-)	125.7	0.0050	0.90
四季郎(1958-)	156.5	0.0065	0.87
環山(1958-)	258.5	0.0024	0.91
松茂(1974-)	417.0	0.0082	0.10
佳楊(1954-63)	418.0	0.0013	0.90
達見(1953-73)	514.0	0.0018	0.92

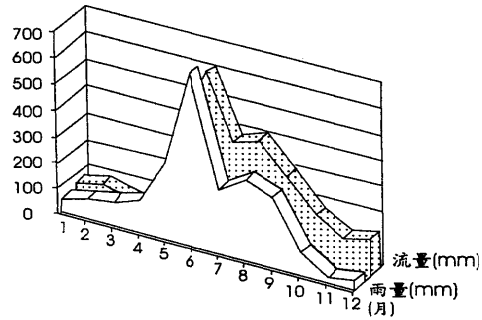


圖 6. 蓮花池一號集水區雨量與流量比較圖
Figure 6. Rainfall and streamflow amounts of the #1 Lianhuachi watershed.

3.2.2 降雨與低水流量

影響集水區包括低水流量在內的流量特性，最主要的環境因子為降雨的大小、強度和時間分配。集水區流量大小隨著降雨強度

大小會有明顯的起伏變化。圖 6 是蓮華池一號集水區，多年的月平均雨量和月平均流量比較圖，說明了流量與雨量成正比關係。

3.3 森林與低水流量

本節將從森林用水量與蒸散量，探討森林對保蓄水量降低的效應，同時研究森林的保水功能，探討究竟是砍伐森林或造林，何者對台灣水資源保育有較正面的效益。

3.3.1 蒸發量與低水流量

降雨至地面後，部份的水隨著時間變化而匯流入海，而部份的水被森林截留而蒸發散，其餘則成為地下水變化量，因此我們可以寫出水平衡公式如下：

$$Q_s + Q_b = P - ET + \Delta S \quad (3-1)$$

Q_s ：暴雨期間或其後短期內的流出量

Q_b ：基流量或稱低水流量

P ：降雨量

ET ：蒸發散量

ΔS ：地下水變化量

由公式 3-1 可知，要使流量增加，可以從減少蒸發散量著手，而蒸發散量在流量所佔的比例，可示如圖 7 畢祿溪月雨量、流量與蒸發散量比例，圖中蒸發散量大致隨降雨量增大而增加，約佔總降雨量的 20% 至 30%，因此可推斷森林集水區，蒸發散量是使流量降低的重要因子。

同時更進一步分析針葉樹、闊葉樹和草地不同月份蒸發散量的變化，如圖 8 所示。分析結果發現針葉樹、闊葉樹的蒸發散量都差不多，但草生地的蒸散量約為森林的 3/5，因此，砍伐森林改為植草是的確會使出流量增加，收集了有關森林砍伐前後流量的變化，

發現就長期水生產量而言，森林對水量的影響是負面的。分別於不同月份在林地(控制區)和皆伐區，比較土壤水分和土壤深度的關係如圖 9，顯示皆伐區的土壤往往含有較高的水分。圖 10 為一試驗證明，單純的森林伐採，未嚴重擾動地面的情況下，會使包括豐水期和渴水期內的河川流量增加。日本的森林集水區試驗顯示，不嚴重擾動地表狀態下施以皆伐，對土壤滲透性影響不大。年直接流出量多了 5%，年基流量多了 4%，而年截留量減少了 10% 如圖 11。所以在其它條件相同下，森林的水生產力反而較其它不同植生覆蓋為低。

綜合上述，可歸納若干通則：(1)集水區地被植物改變話，若導致蒸發散量降低，則出水量將會增資；(2)砍伐面積越大，出流量的增加越多。

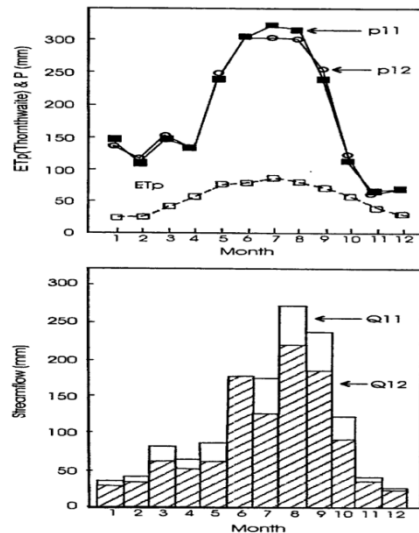


圖 7. 畢祿溪 11、12 號集水區平均月雨量、流量與蒸發散量比較

Figure 7. Monthly distribution of rainfall and streamflow for PiLuChi #11 and #12 watershed.

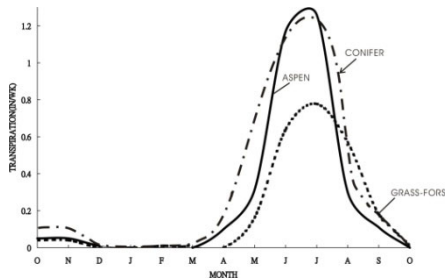


圖 8. 針葉樹、闊葉樹和草地不同月份蒸散量變化
 Figure 8. Monthly distribution of evapotranspiration for conifer, broad leaf forest and grassland.

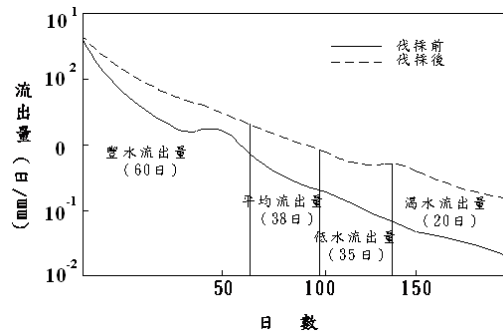


圖 10. 溫暖期(6月~10月)平均流量曲線
 Figure 10. Comparison of streamflows (June-October) before and after clearcut.

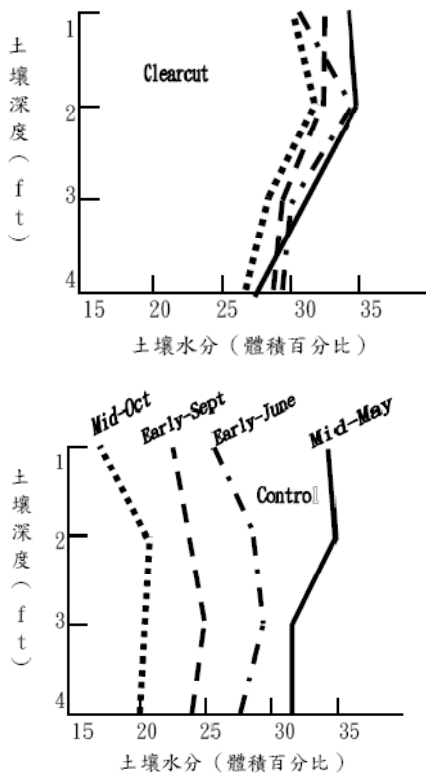


圖 9. 土壤水分體積比
 Figure 9. Soil moisture vs time for clearcut and control sites.

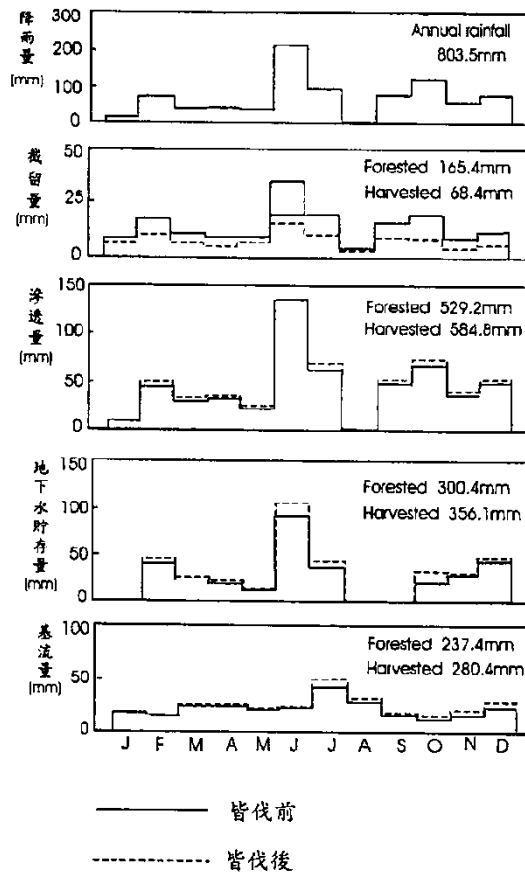


圖 11. 集水區森林皆伐前後水循環量的變化
 Figure 11. Water balance components, before and after clearcut for forested watersheds.

3.3.2 不同地被與滲透能

本節討論分析集水區不同土地被的滲透能及流量分佈特性，以了解森林涵養水源之功效。

陸象豫(1996)年分析不同覆蓋與土壤質地狀況下之地表入滲容量如表 9，發現砂的入滲容量最佳，而且有覆蓋的土地，地表入滲容量較裸露地佳。

村井宏(1975)詳細分析不同地被與處理情況下，土壤的滲透能發現，森林的滲透能最佳，而裸地的滲透能最差，分析所的如表 10 所示。

綜合上述，可知道有覆蓋的土地入滲透能力較佳，而森林的入滲容量較草地佳，其原因可能是因為森林地提供大量之有機質或腐植質，此物質能促進及穩定土壤的團粒作用；腐植質含量高的土壤其團粒構造發達，常出現多量之大孔隙，使土壤具良好的通氣性與透水性，有利於水分入滲。草地因滲透能低，洪水來臨時大部份的水可能很快的流出。

3.3.3 流量延時曲線與低水流量

低水流量的來源係指緩慢的地下水逕流和地下水，而集水區保蓄水量係以集水區洪

峰流量過後至穩定的基流為起點，至下一場暴雨來臨前為終點，由圖 2 退水曲線之圖解法可知 G 點為保蓄水量之起點。因此假設各集水區流量延時曲線最後折點附近以下的水為集水區年保蓄水量，並據以推求流量延時曲線之特性如表 11。

由表 11 可知，不管由面積最大的荖濃溪集水區至最小的蓮華池集水區，其低水流量佔全年的時間超過 80%，由此可推斷此三集水區不降雨或低降雨量的時間佔了 80%。而年最大洪峰流量與低水流量最大量比值約在 12 至 30 之間可見森林集水區的暴雨流出量相當大，雖然森林覆蓋良好，但暴雨來臨時仍免不了產生洪水災害。

表 9. 不同覆蓋狀況下之地表入滲容量

Table 9. Infiltration capacities of various ground covers.

質地	入滲容量 Capacity(mm.hr)	
	裸露地	植生
Caly	0-5	5-10
Caly Loam	5-10	10-20
Loam	10-15	20-30
Sandy Loam	15-20	30-40
Sandy	20-25	40-50

表 10. 不同地被土壤的滲透能 (村井宏，1975) (最終滲透率 mm/hr)

Table 10. Infiltration capacity values of different landuses

林		地		伐採跡地		草地		裸地	
針葉樹 天然林	闊葉樹 人工林	天然林	輕度 攪亂	重度 攪亂	自然 草地	人工 草地	崩塌地	步道	旱作地
211.4 (5)	260.2 (14)	271.6 (15)	212.2 (10)	49.6 (5)	143 (8)	107.3 (6)	102.3 (6)	12.7 (3)	89.3 (3)
林地平均		伐採跡地平均		草地平均		裸地平均			
258.2(34)		158.0(15)		127.7(14)		79.2(12)			

()內的數值為測定樣區數

此外，保蓄水量佔年總流量體積百分率在 30%至 90%之間，說明覆蓋良好的森林集水區，降雨大部份均滲透至地表下，得以成為滯留保蓄的水量，而這些水若能予以有效利用，例如興建水庫或其它水利設施來調節水量供應，將可有效解決台灣缺水的問題。

表 11. 試驗集水區流量延時曲線特性分析
Table 11. Flow duration curves for different watersheds.

地區	時間(年)	低水流量佔年流量時間百分率(%)	保蓄水量佔年總流量體積百分率(%)	年最大洪峰流量與低水流量最大量比值	
蓮華池	3號集水區	70	91	86	12
		71	91	80	12
		72	88	78	14
		73	92	78	12
		74	94	90	12
	4號集水區	70	85	36	24
		71	92	77	20
		72	85	40	16
		73	90	56	13
	5號集水區	74	85	40	25
		70	83	33	30
		71	89	53	23
72		80	37	23	
隘寮溪	73	87	37	25	
	74	81	31	25	
荖濃溪	78	88	55	19	
	81	87	53	16	
荖濃溪	78	90	64	12	
	81	85	54	17	

3.3.4 森林砍伐與低水流量

據陸象豫(1996)分析林業試驗所蓮華池 3 號林地集水區(3.43 公頃)與林務局坪林林地(48.71 公頃)及農地集水區(24.82 公頃)之不同大小日流量之日數分佈圖 12 及不同大小流量之比較如表 12，推得森林集水區之平均水量(moderate flow)、低水量(low flow)與枯水量

(minimum flow)遠高於農地集水區，顯示林地集水區流量起伏變化較小。若以基流量計算，坪林林地集水區一年(以 1994 年 9 月至 1995 年 8 月為例)可得 302.21mm 基流量，其基流與降雨量及總逕流之比值分別為 9.24%與 15.43%，均較同一時期坪林農地集水區之基流量 137.33mm 及 4.66%與 10.95%之比值為高，亦說明森林理水(涵養水源)的功效。

和低水流量相對的尖峰流量也會因集水區森林的砍伐而變大，Lynch & Corbett(1982)分析集水區森林砍伐百分率與尖峰流量增加百分率之關係如圖 13，發現尖峰流量與砍伐面積成正比。而圖 14 畢祿溪集水區與台北子集水區之降雨量與尖峰比流量關係，畢祿溪集水區的相對尖峰流量較小，可能是因為畢祿溪上游森林覆蓋良好所致。

綜合 3.4 節所得的結果可以將森林伐採後產生的連鎖效應，示如圖 15，因砍伐所增加的水，形成地表逕流及升高地下水位，雖然增加了基流量，可是也增加了洪水量。而由於滲透能降低、根系抗剪力減少及雨滴打擊力增大，增加了洪流量與沖蝕量，更容易形成山崩地滑，造成生命財產的損失。

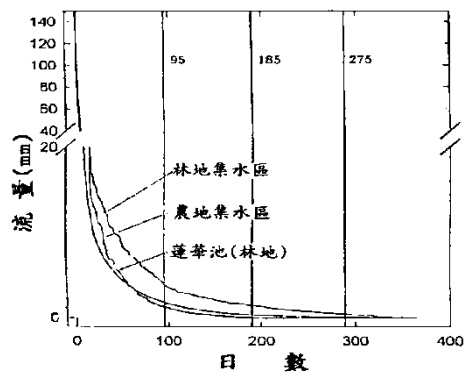


圖 12. 林地和農地集水區一年內不同大小日流量之日數分佈圖

Figure 12. Annual flow duration curves for forest and agricultural watersheds.

表 12. 林地與非林地集水區不同
大小流量之比較
Table 12. High moderate, low and drought
flows for forest and agricultural watershed.

Texture	流 量(mm)		
	蓮華池三號 (林地)	林地	坪林農地
High Flow	10.078	14.3095	12.7619
Moderate Flow	0.91	2.3748	0.4668
Low Flow	0.21	0.9400	0.0163
Minimum Flow	0.053	0.2505	0.0001
Drought Flow	0.015	0.0006	0.0000
Ave. Annual Rainfall	2227.98	3269.50	2945.00
Ave. Annual Discharge	935.84	1958.18	2154.54
Ave. Annual Total	205.88	302.21	137.33
Base Flow			

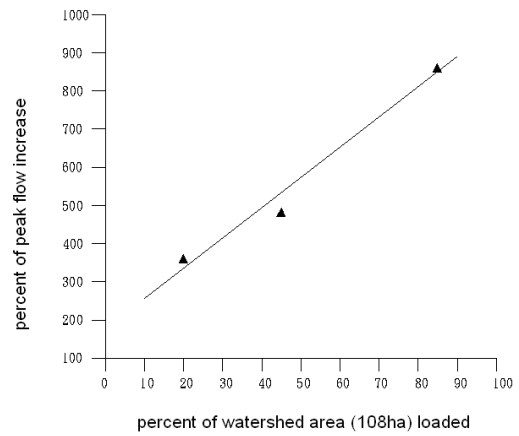


圖 13. 集水區森林砍伐與尖峰流量增加的關係(Lynch and Corbett, 1982)
Figure 13. relationship between percent of watershed area clearcut and percent of peak flow increases.

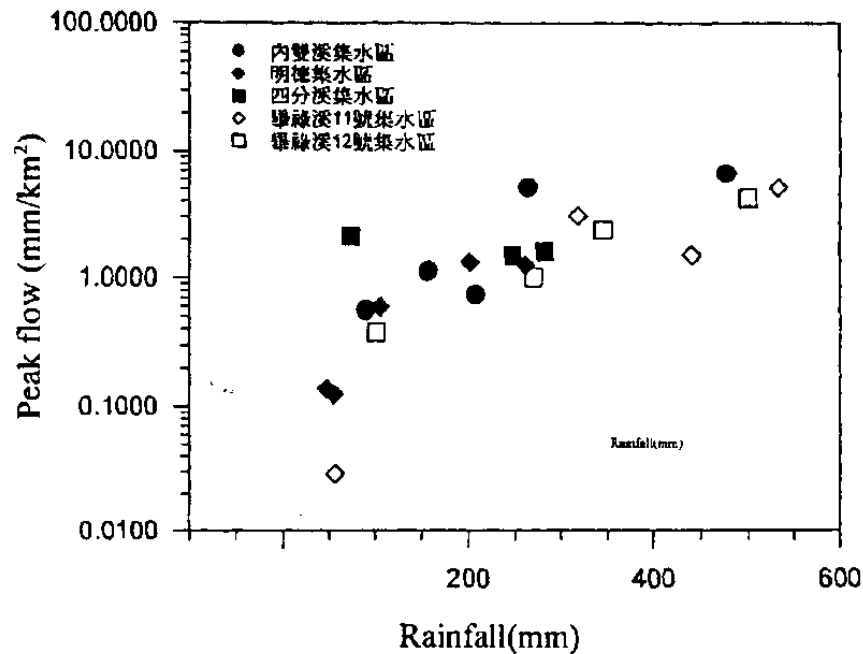


圖 14. 畢祿溪集水區與台北集水區降雨量與尖峰比流量關係
Figure 14. Storm rainfalls vs peak flows for PiLuchi and taipei city watershed.

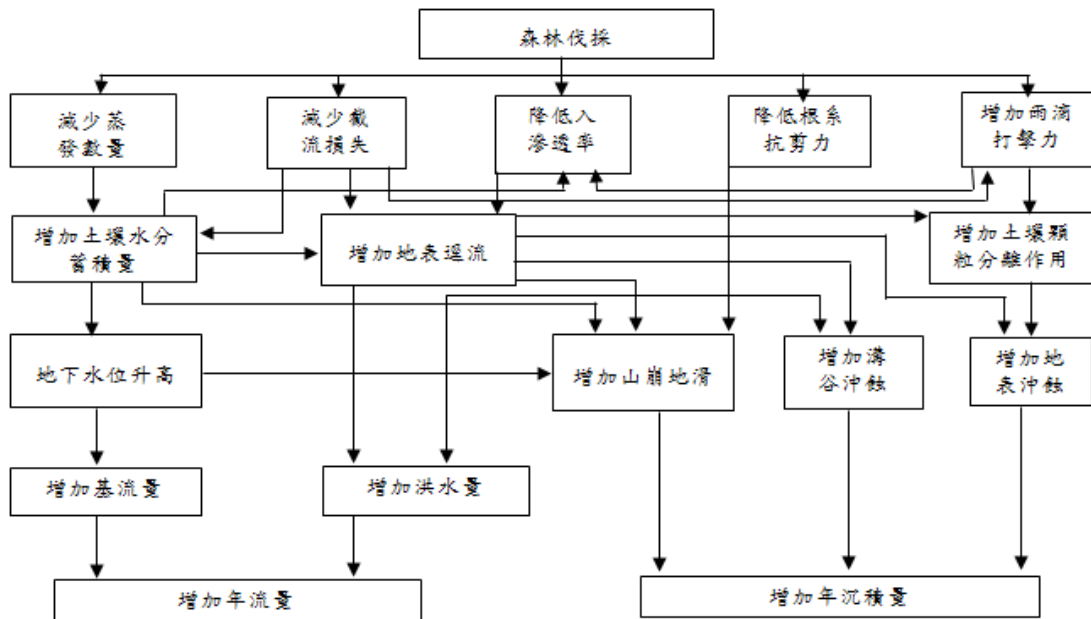


圖 15. 森林伐採後可能發生之水文變化情形(Source.R. Carpenter,1983)
 Figure 15. Potential impacts of clearcut on hydrologic characteristics.

結論

本研究為了解環境和土地利用因子對低水流量的影響，選定台灣地區河川溪流不同大小的森林集水區為研究對象，推算集水區保蓄水量公式，討論地文、水文因子與低水流量的關係，導入滯留保蓄和儲留保蓄的新觀念，並以實例探討森林砍伐對包括了低水流量在內的集水區可用水量的影響，藉以導正一些對森林與水資源關係的誤解，闡明森林生態系對水源涵養具有的正面的功效及其有限性，得到如下幾點結論。

(1) 森林的樹冠層、林下植生能因截留損失減少到達林地的雨量，森林土壤一般均化育良好，再加上根系發達使土壤具有高滲透能，所以一般林地滲透能均高於降雨強度，

因此在林地的坡面很少發生地表逕流，大部份到達地面的降雨均進入土壤，成為滯留與儲留保蓄，其中儲留保蓄的一部份成為快速地表下逕流，很快流出集水區，只有成為緩慢地表下逕流(slow subsurface flow)，才能和地下水(groundwater)合成為低水流量(low flow)的來源。

(2) 降雨量的大小和其一年間分佈的狀況是決定低水流量最主要因子，久旱不雨是發生旱災的主因，土地利用含森林存在與否只是影響流量(含低水流量)的因子之一，但是維護集水區地面的滲透能，以確保降雨進入地表下以補注儲流保蓄、滯流保蓄和地下水層，卻是確保低水流量的必要條件(不是充份條件)，因此嚴重擾動地面，減低滲透能的集水區土地利用方式，均會對低水流量造成不利影響。

- (3) 蒸發散量在森林集水區約佔總流量的 20% 至 30%，若比較森林和草地的蒸散量變化，發現草生地的蒸散量僅為森林的 60%，因此若森林改成草地，可使集水區流量增大 10%。林地因蒸發散量大於其它覆蓋，許多試驗都證明單純的森林伐採，在未嚴重擾動地面的情況下，會使包括豐水期和澇水期在內的河川流量增加且砍伐面積愈大，出流量的增加愈多。
 - (4) 森林伐採所增加的水，雖然增加了基流量，可是也增加了洪水量。但森林去除使雨滴直接打擊地面，增加沖蝕量，且森林根系抗剪力減少，土壤易發生飽和，間隙水壓增加，更容易造成山崩地滑的災害。因此為了增加流量而砍伐森林，在國土保安功能上可能嚴重減少而得不償失，不是明智之舉。
6. 竹下敬司(1981) 「有關森林土壤之水資源保育機能之分析與評估」，第 17 次 IUFRO 世界大會論文集。
 7. 陸象豫(1996) 「森林與水資源」，大自然季刊 53 期。

參考文獻

1. 王如意、易任(1989) 「應用水文學」，國立編譯館 pp.50~52。
2. 鄭皆達(1996) 「台北地區山坡地開發對逕流量特性影響之研究(2)」國科會八十五年環發會專題研究成果報告，計畫編號：NSC-84-2621-P-005-013B。
3. 有光一登著，陳信雄、劉明芬譯(1994) 「森林土壤之保水功能」，台大森林系防砂工程研究室。
4. 藤枝基久(1995) 「巴西聖保羅州海岸山脈之流出特性」，日本森林總會研究所研究報告第 369 號。
5. 藤枝基久、野口正二、小川真由美(1996) 「森林集水區地被變化對水文環境之影響-以皆伐、牽引機集材為例」，日林誌