

**學術論述**

## 森林在水土資源保育上之功能

陸象豫<sup>1,2)</sup>

### 摘要

本文依據基本學理, 並參考國內外研究成果和經驗, 分項探討森林在水土資源保育上的功能以及林地變更後對有關水文因子之影響。森林與水資源間並無一致的關係性, 所能明確證實地為改變植物覆蓋面積或組成會影響集水區之出水量; 然而集水區出水量受林木變更影響的程度隨降雨量、優勢樹種、砍伐面積或作業方式之不同而不同, 本文對各項因子逐一作詳細的說明。森地對集水區水源涵養有間接而正面的功效, 森林提供一良好環境使林地土壤層達到最佳之保水蓄水狀況, 並藉植物育土、護土的功能維持此最佳狀況。在同一土壤、地形等條件下, 森林對減低洪峰流量及延緩洪峰到達時間並無顯著的效用, 僅能減輕洪水所造成的災害; 洪水之發生主要係受氣候與地形因子所決定, 上游集水區土地利用方式對河川流量的影響有限。由於覆蓋良好的林地內非點源沖蝕甚少發生, 且根系所及範圍內的崩塌亦較相同深度範圍之裸露地為少, 故森林在防止地表沖蝕與淺層崩塌具有顯著之功效。林木光合作用與蒸發散會消耗一部分輻射能, 因而可降低地表溫度, 且林木之屏障作用亦會改變能量傳遞, 致使森林能影響一地區的微氣候, 但區域性之天候狀態仍決定於氣象因素。雨水與樹冠層間之交互反應作用, 能吸收及淋洗部分離子, 因而森林具中和雨水酸性之功能; 而林冠的庇護能降低溪流的水溫, 對增加水體含氧量有所助益。森林涵養水源之功效可使大部分的降水進入土壤層, 並經由土壤層之過濾與離子交換作用, 發揮淨化水質的作用。森林與地下水間關係較不明確, 除非是位於地下水水源區, 否則林木之有無對地下水位或地下水流量無顯著的相關性。在水土資源保育上, 森林之功能雖有其有限性, 但毫無疑問地卻是所有土地利用中最佳者。

**關鍵詞:** 出水量、水源涵養、洪峰流量。

陸象豫 1996 森林在水土資源保育上之功能。台灣林業科學 11(3): 333-347。

**Review article**

## The Role of Forests in Soil and Water Conservation

Shiang-yue Lu<sup>1,2)</sup>

### 【Summary】

The role of forests in soil and water conservation and the impact of forest removal on related

<sup>1)</sup> 臺灣省林業試驗所集水區經營系, 台北市南海路53號 Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53, Nan-Hai Rd., Taipei, Taiwan, ROC.

<sup>2)</sup> 通訊作者 Corresponding author

1996年2月送審 1996年5月通過 Received February 1996, Accepted May 1996.

hydrologic factors are discussed by emphasizing basic principles and results of studies throughout the world. It is clear that water yield will change after vegetation conditions of a watershed are altered. However, the relationship of forests to water supply still remains controversial due to the diversity of watershed conditions such as the amount of precipitation, dominant vegetation, cutting area and harvesting operation method. Comparing with other land use patterns, the well-protected forest land with high infiltration capacity provides a better environment for water detention and retention, and makes more water available during drought periods. Forests can not prevent floods caused by heavy rain storms, but they can mitigate their destruction to a certain extent. Floods of major rivers are affected more by meteorological and topographic factors than by land use activities in upland watersheds. Surface and gully erosion are rarely happened in forest land, therefore there is no doubt that forest can prevent erosion to a point. Forests not only lower air temperature inside and above the canopy, because a large portion of input radiant energy is consumed by evapotranspiration and photosynthesis, but also influence the movement of winds which results in the redistribution of heat. Removal of forests can affect microclimates significantly but have little or no impact upon regional climate. Watersheds covered by forests generally promote high quality water by allowing more water to pass through mineral soil layers than other cover conditions. In addition, vegetation cover conditions have less effect on the groundwater system unless they are located in the groundwater recharge areas. Although forests have their limitations, it is clear that forests are the best of all land use patterns as far as soil and water conservation are concerned.

**Key words:** water yield, water conservation and streamflow regulation, peak flow.

Lu, S. Y. 1996. The role of forests in soil and water conservation. *Taiwan J. For. Sci.* 11(3): 333-347.

## 一、緒言

森林在水土資源保育上的功能，尤其是森林砍伐後對水資源的影響，為本世紀水文學者最關注之問題，亦為一爭論不休之課題。國外針對此一問題所提出的研究報告甚豐，而國內亦有些許之研究。臺灣地區由於民國82年之久旱不雨及民國83年之水災肆虐，凸顯現今臺灣地區『雨豐則澇，雨寡則旱』的現象，也喚起政府及熱心環保的民間團體對森林保土理水功能的重視。於是有所謂『種樹救水源』的活動與『生態防洪』的呼籲，然而此等活動太過於強調森林之功能，致以偏差的觀念誤導國人，對社會大眾水土資源保育觀念反而有不利之影響（鄭皆達，1995）。本文根據森林水文學的學理，並參考國內外研究成果和經驗，分項探討森林在水土資源保育上的功能，期能對森林在水土資源保育上之基本功能有正確的認識。

## 二、森林與水資源

### (一)集水區出水量 (Water yield)

砍伐森林後對溪流流量的影響，長久以來即為水文學者所感興趣之課題；研究之目的不僅在探討伐木對環境之衝擊，亦在探討森林在水文循環上所扮演的角色。自本世紀之初起，世界各地即不斷地進行此等問題的研究。然而大多數之試驗研究均採用配對試驗集水區 (paired watershed) 方法，在不同的土壤、地形與植生狀況以及氣候條件無法控制之情況下，致所得結果並無一致性。而大多試驗處理面積多在 500公頃以內，且所量測的洪峰流量均在25年迴歸週期以下；因此大面積伐採對水資源影響之程度以及林地變更後對河川流量長期性之影響至今仍有所爭論。

國內外有關森林與集水區出水量間之關係的研究報告已達數百篇，且至少包括Hibbert(1967)、Bosch與Hewlett(1981)、Hornbeck等作者(1993)

以及 Wheathead 與 Robinson (1993) 等四篇評論報告 (review paper)。綜觀各研究報告, 已明確地證實「改變植物覆蓋面積或組成會影響集水區之出流量」。砍伐林木後, 由於蒸發散損失量減少 (包括截留損失量之降低), 致砍伐區之土壤含水量則相對地較高, 使水分有較多的機會可進入溪流內, 因此集水區出水量通常會增加。且在某些地區或某種條件下, 林地變更後集水區之出水量改變情形可藉公式或經驗預測。而由下列水平衡關係式亦可說明林地變更後集水區出水量之改變情形:

$$Q = P - ET \pm \Delta S$$

其中

Q: 集水區出水量

P: 降水量 (precipitation)

ET: 蒸發散量 (evapotranspiration)

$\Delta S$ : 地下水滲透量 (groundwater seepage)

就一水文週期而言 (如1年),  $\Delta S$  之值應可視為零, P 不受土地利用影響, 則 Q 僅隨 ET 因子而變。故地表覆蓋變更若導致蒸發散量降低, 則集水區的出水量即會增加; 反之, 集水區的出水量則會減少。因此, 砍伐林木、將深根性樹種轉變為淺根性樹種或由截留量高之樹種轉換成截留量低之樹種均可預期集水區出流量會增加。雖然如此, 集水區出流量受林木變更影響之程度與降雨量、優勢樹種、砍伐面積或作業方式仍有密切的關係, 茲分別說明如下:

### 1. 降水量

降水量為決定集水區出水量對任何處理反應度的主要因子。多篇研究報告已證實集水區出流量對砍伐之反應, 濕季時較乾季明顯, 且隨年雨量之增加而增加 (Hibbert, 1967、1971; Lull and Reinhart 1967; Anderson *et al.*, 1976; Bosch and Hewlett 1982; Ponce and Meiman, 1983; Wheathead and Robinson, 1993)。Hibbert 氏 (1983) 更指出: 當年降雨量低於 400 mm 門檻之地區, 集水區出水量即不會受地表植物變更而有所影響; 若年雨量超過此門檻, 則當林木砍伐後, 年雨量每增加 4 mm 集水區年出流量可增加 1 mm。Bosch 與 Hewlett (1982) 並由世界各地 94 個集水區試驗結果, 推導出不同植被集水區之出水量對處理反應的程度與年降雨量間之正相關回歸式。很明顯地, 無論是伐木或是造林對集水區出水量之影響, 均以年

平均雨量高之地區較為顯著, 但受影響之時間則因植生快速地恢復而相對地較短。

### 2. 優勢植物

影響出水量多寡另一重要因子為集水區優勢植物改變之情形。剷除植被或造林後, 集水區年出水量最大可增加達 540 mm (Harr *et al.*, 1982; Harr, 1983), 最小亦有減少 403 mm 之記錄 (Van Lill *et al.*, 1980), 可見植被對集水區出水量有相當大之影響。各地試驗研究結果差異雖甚大, 然仍有一般性之準則可依循。若改變地表覆蓋會導致集水區蒸發散量 (evapotranspiration) 降低, 則出水量即會增加; 反之出水量則會減少。因此, 砍伐林木, 或將深根性樹種轉變為淺根性樹種, 或由截留量高之樹種轉換成截留量低之樹種均可望增加出水量。

### 3. 疏伐與皆伐

由於疏伐與擇伐較皆伐整個集水區越來越為普遍, 因此疏伐對集水區出水量之影響亦廣受重視。很多學者認為疏伐或擇伐對集水區之出水量影響不大 (Lull and Reinhart, 1967; McMinn and Hewlett, 1975; Leaf, 1975), 但亦有若干報告證實疏伐或擇伐對集水區出水量或洪峰流量之影響與皆伐具有同樣效果, 尤其是在亞高山區 (subalpine) (Troendle and Meiman, 1986; Troendle, 1987; Troendle and King, 1987; Hicks *et al.*, 1991)。後者所持之理由為疏伐對減低截留損失以及土壤水分與皆伐具同樣的效果, 且疏伐區之積雪量較空曠區為高。疏伐與皆伐對水資源影響是否具相同效果, 仍無定論; 但可以確定的是二者均與砍伐面積有關。Bosch 與 Hewlett 氏 (1982) 所得之結論為: 當植被改變之面積小於全集水區面積 20% 時, 集水區出水量之改變即無法由量測溪流流量偵測出。

此外, 林地變更後集水區出水量受影響之季節及影響時間長短亦為另一重要研究課題。基本上, 集水區流量季節性之變化主要決定於氣候因素, 森林覆蓋的影響有限; 林地變更後, 集水區各季節流量受影響的程度與當季之蒸發散量、降雨量、溶雪量以及土壤水分之多寡有關。若干試驗結果顯示, 若不考慮溶雪及颶風等因素, 砍伐後集水區出水量相對增加量以旱季為最高 (通常為夏季, 但非絕對量之增加, 蓋乾旱時期蒸發散量高, 集水區流量通常較低, 因此流量增加量有

限) (Hibbert, 1967; Rothacher, 1970; Pitman, 1978; Cheng, 1989); 而最高絕對量增加之時間, 則多發生於降雨季節 (Rich and Gottfried, 1972; Harr *et al.*, 1975; Bosch and Hewlett, 1982; 夏禹九等, 1982【註一】)。若考慮溶雪之影響, 則無論是季節集水區出水量或是洪峰流量多發生於早春溶雪季節, 且基流增加之比率尤大 (Harris, 1973; Troendle, 1983; Verry *et al.*, 1983; Hornbeck *et al.*, 1993)。至於受影響時間的長短, 主要決定於當地植生恢復之速度; 在乾旱區影響時間較久且受影響之程度較一致, 在潮濕多雨區則反是 (Rothacher, 1970; Bosch and Hewlett, 1982; Douglass, 1983; Hornbeck *et al.*, 1993)。一般而言, 伐木後若任由植生自然恢復, 溪流流量受影響之時間約在10年以下; 而確實影響時間, 據有限報告資料, 少則2至3年, 多則可長達60至80年 (Lull and Reihart, 1967; Douglass and Swank, 1975; Troendle, 1983; Baker, 1986)。

【註一】林業試驗所蓮華池分所4號試驗集水區 (面積5.86公頃) 於1978年11月至1979年3月進行皆伐與集材作業。砍伐後第一個濕季 (1979年5月至9月) 溪流量增加達402 mm (55%), 第二個濕季增加量為184 mm (47%); 砍伐後第一個乾季 (1979年10月至翌年4月) 增加了46 mm (108%), 第二年乾季則增加了20 mm (293%)。乾季所增加之溪流量比率雖大, 但僅佔全年增加量的10%。顯示砍伐森林雖能增加集水區之出水量, 但對枯水期水資源的供應其效果係有限的。蓮華池4號集水區之皆伐處理為臺灣地區探討森林與集水區出水量關係僅有之研究 (夏禹九等, 1982)。

綜合上述, 可歸納若干通則: (1) 集水區地被植物改變後, 若導致蒸發散量降低, 則出水量將會增加 (2) 採伐面積越大, 出水量之增加量亦越多 (3) 林木對集水區出水量之影響, 以降雨量豐富地區較為顯著 (4) 砍伐後第一年出水量增加最多, 而伐木之效應隨時間呈指數型態遞減, 且起始的影響程度越大, 伐木效應持續越久。唯砍伐林木後, 所增加之流量多集中於降雨季節, 對解決水荒助益不大, 且恐有增加水災危害之虞。

## (二) 水源涵養 (Water conservation and streamflow regulation)

林木覆蓋完整之集水區, 常令人想到水流源源不斷之「青山綠水」。事實上森林地保育水土、調節水源的功効確實高於非林地, 然而對森林涵養水源之功効多為定性的描述, 缺乏定量性之數據或試驗研究可予以證實。涵養水源一般係指增加集水區之低流量或基流 (base flow) 量與調節流量在時間上之分佈。本報告亦由定性描述著手, 並輔以實測資料以說明森林與集水區水源涵養間之關係。

森林涵養水源的功効可簡單地從林地有利於水分進入土壤層及增進土壤之保水能力兩方面加以說明。林木之樹冠及枯枝落葉層可有效地消滅雨滴打擊地表之能量, 一則可減少飛濺沖蝕, 一則可減免密封 (sealing) 作用, 使地表保持最佳之入滲狀況, 有助於雨水進入土壤層。枯枝落葉層及複雜交錯之植物體, 使地表之粗糙度大為提高, 除可增加地表之滯蓄容量 (surface detention storage) 外, 並可減低地表水流的速度, 因而可避免逕流集中與地表沖蝕, 增加水分入滲之機會。而林地土壤發達之團粒構造亦有利於水分進入土壤層, 故林地的入滲容量 (infiltration capacity) 多高於非林地 (請參見 Table 1)。此外, 腐敗之植物體及動物孔穴, 可增加土壤大孔隙的比率, 同時構成龐大的地下渠道網路, 雨水得以藉此路徑迅速地導入較深的土壤層內, 再全面性地擴散至各方土壤孔隙內; 此種管流 (pipe flow) 為次地表逕流 (subsurface flow) 之主要路徑, 對土壤水與地下水補注均有相當的助益。

森林地提供大量之有機質或腐植質 (humus), 每公頃林地每年約可產生1至10公噸的有機物質, 每平方公分林地一年中可累積1至3公克之乾物質重 (Henderson-Sellers and Gornitz, 1984)。此等物質能促進及穩定土壤的團粒作用; 腐植質含量高之土壤 (特別是含有新腐植質之土壤), 其土壤之團粒構造發達, 常出現多量的大孔隙或粗孔隙, 使土壤具有良好的通氣性與透水性, 有利於水分入滲。根據陳明杰 (1993) 之調查研究, 蓮華池地區天然闊葉林60公分內之土壤層總孔隙率為45.3%, 其中15.4%屬大孔隙, 其餘為中或小孔隙【註二】。大孔隙可作為水分快速流動的通

**Table 1. Typical values of infiltration capacity as related to soil texture and cover.**

Texture	Infiltration capacity (mm/hr)	
	Bare soil	Vegetated
Clay	0-5	5-10
Clay loam	5 - 10	10 - 20
Loam	10 - 15	20 - 30
Sandy loam	15 - 20	30 - 40
Sand	20 - 25	40 - 50

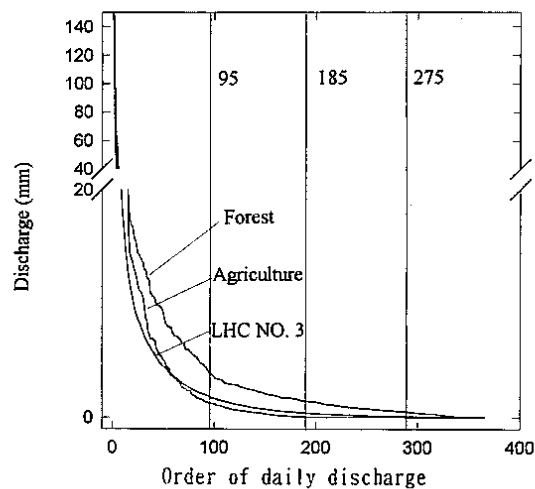
(Adapted from: Lee, 1980)

路，中小孔隙則可藉毛細作用延伸水分的移動範圍並作為水分暫時貯存所。土壤孔隙率可作為評估集水區有效貯水容量之指標，森林土壤中發達的孔隙構造以及豐沛之地下水係林地發揮『綠色水庫』功能的主要原因。此外，有機質或腐植質本身亦可提高土壤之保水、蓄水能力。腐植質及其分解後所產生之有機質均可吸附大量水分；腐植質能從濕潤的空氣中吸取水分達到其本身重量之80-90%，當其浸水時，體積大為膨脹，更能容納其本身體積2-6倍的水（郭魁士，1974）。而有機質之濕潤熱甚高，其與水分子間之吸引力甚強，水分不易流失。故縱使孔隙率含量相同之土壤，林地集水區土壤水含量與保水能力通常較非林地者高出甚多。

林地由於上述兩方面正面之效應，大部分之降雨得以進入土壤層。保存於土壤孔隙間之水分，若受重力之影響較大，則漸次地向下方移動，終將進入母岩孔隙內或地下水層，得以滯留而貯存較長的時間。此等貯存於土壤或岩石孔隙內的水分與地下水則為基流之主要來源。因此，森林集水區之基流量通常較非林地集水區為高，證實森林涵養水源之功效是可肯定的。綜合上述，森林涵養水源之功能並非來自林木本身而係整個動態的森林生態體系，森林僅提供一良好的環境使土壤層達到最佳之保水蓄水狀況，並藉植物保土護土之功能維持此最佳狀況。至於涵養水分的多寡，則決定於土壤之孔隙率（porosity）、土壤深度、有機質含量、坡度、地下水位、土壤及岩石層裂隙、母岩性質與不透水層分佈等多種因素。

森林在水資源效益目前尚無共同認可的評估方式，一般以土壤孔隙率乘以土壤深度計算集水

區之貯水能，作為水資源涵養機能大小之指標；另有採用集水區基流量的多寡及其與高流量間之比率或以集水區流況曲線來評估涵養水源之效益（林淵霖，1978）。若以貯水能計算方式，根據陳信雄、李錦育（1986）之報告，全省1,786,500公頃之森林表層50公分之土壤約可貯存 $1.273 \times 10^9$ 公噸水資源。而蓮華池五個試驗集水區計37.31公頃，亦可貯存29,243公噸之水量。貯水能計算方式多用於無流量記錄之集水區，所得結果係集水區保存水量多寡之能力，亦即靜態地表示集水區土壤層的最大蓄水量，但並不表示所貯存之水均為可利用之水。儲存於森林集水區土壤孔隙內之水分，一部分將因蒸發散失於大氣中或與土壤分子緊密結合而無法利用，實際能由集水區出水口流出之水分多來自所謂的自由水（free water，大於田間容水量之土壤水分）、地下水或填充於較大孔隙內之水體。以流況曲線表達集水區可利



**Fig. 1. Daily discharges for Pinlin and LHC No.3 watersheds.**

Table 2. The average high, moderate, low, and minimum flow for forested and agricultural watersheds.

	Discharge (mm)		
	Lien-Hua-Chi <sup>1)</sup> # 3	Forest	Pin-Lin <sup>2)</sup> Agriculture
High flow <sup>3)</sup>	10.0786	14.3095	12.7619
Moderate flow	0.9118	2.3748	0.4668
Low flow	0.2080	0.9400	0.0163
Minimum flow	0.0529	0.2505	0.0001
Drought flow	0.0146	0.0006	0.0000
Avg. of annual rainfall(mm)	2227.98	3269.50	2945.00
Avg. of annual total discharge	935.84	1958.18	1254.54
Avg. of annual <sup>4)</sup> total base flow	205.88	302.21	137.33

<sup>1)</sup> Average of daily records from 1975 to 1992.

<sup>2)</sup> Daily rainfall records of Sep. 1, 1994 to Aug. 31, 1995 from Prof. M. J. Cheng by permission.

<sup>3)</sup> High flow represents total daily flow of the 95th largest value of the calendar year.

Moderate flow represents total daily flow of the 185th largest value of the calendar year.

Low flow represents total daily flow of the 275th largest value of the calendar year.

Minimum flow represents total daily flow of the 355th largest value of the calendar year.

Drought flow represents the driest 10 or 11 days of the calendar year.

<sup>4)</sup> Base flow separated by Bethalmy's variable slope separation technique.

用水分之多寡，則與實際情形較相符；Fig. 1及Table 2 為林務局坪林林地集水區（48.71 公頃）與農地集水區（24.82公頃，以茶園為主）之流況圖及流量分佈情形，而林業試驗所蓮華池3 號集水區（3.43公頃），則作為對照。森林集水區之平均平水量（moderate flow）、低水量區（low flow）與枯水量（minimum flow）則遠高於農地集水區，顯示林地集水流量起伏變化較小。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302.21 mm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137.33 mm及4.66%與10.95%之比值為高，亦說明森林涵養水源之功效。

由以上敘述可知，林木砍伐後年流出量雖會增加，但其所增加的大多是緊隨著降雨而出之直接逕流量，對枯水期水源的供應其效果係有限的。蒸發散量之多寡與可用水量間無明顯的相關性，因枯水期之蒸發散量通常甚低，砍伐林木所減少之蒸發散量常不足以彌補因地表擾動而導致之基流補注損失（游繁結，1994）。森林涵養水源最大功能在於地下水的補注；然而僅就地表

水而言，森林供給水源之功效是有其上限的（蓋雖涓涓細流不斷，但其量甚低，尤以坡陡及土層淺之集水區為甚），若由極端氣候所造成之長期無雨，即使有良好的森林庇護，亦難避免水源枯竭。如要增加可利用之水，則仍須靠增加水庫的蓄水及河川之取水，並減少可利用水之浪費。

【註二】陳明杰係採用日本學者竹下敬司（1985）之區分法，依據土壤水分勢能（pF）與孔隙直徑之關係，將土壤孔隙區分為大孔隙（ $pF \leq 0.6$ ），中孔隙（ $0.6 \leq pF \leq 1.7 \sim 2.0$ ），小孔隙（ $1.7 \sim 2.0 \leq pF \leq 2.7 \sim 3.0$ ），與細孔隙（ $pF \geq 2.7 \sim 3.0$ ）。其中土壤水分勢能係指土壤水與土壤顆粒間作用力之總和，包括水靜力（hydrostatic force）、毛管張力（capillary force）、滲透力（osmotic force）與吸著力（hygroscopic force）等；而以自由能差藉水柱高度（h 單位為cm）之對數表示，即 $pF = \log(h)$ 。

### (三) 洪峰流量 (Peak flow)

由於降雨所引發之洪水與溶雪所造成之洪水其發生機制有所不同，故本報告將二者分開討

論, 並略述伐木對洪峰到達時間之影響與森林的防洪功效。

1. 降雨型洪峰 (Rainfall peak)

有關伐木或改變植被型態對降雨型洪峰流量影響之報告亦缺乏一致性的定論。大部分報告結論認為伐木會顯著增加洪峰流量 (Hornbeck, 1973; Reinhart *et al.*, 1963; Hewlett and Helvey, 1970; Swanson and Hillman, 1977; Harr *et al.*, 1975; Troendle and King, 1987; Verry *et al.*, 1983; Cheng, 1989), 尤其是在砍伐後的數年間增加量最為顯著。然而亦有報告認為不會造成洪峰流量顯著的增加 (Hewlett and Hibbert, 1961; Harr and McCorison, 1979; Rothacher, 1973; Harris, 1973; Harr *et al.*, 1975; Settergren *et al.*, 1980), 甚至有洪峰流量降低之結果 (Cheng *et al.*, 1975) 【註三】。

就水文平衡理論觀點而言, 若無地表壓實 (compactness) 或改變集水區水流路徑等現象, 伐木後洪峰之增加量應來自截留及蒸發散損失減少之量。樹冠層之截留量有一定的限度 (陸象豫, 1995), 而降雨時之蒸發量通常甚低, 且減少此二種損失所節省之水量係以某種方式分佈於整個水文過程中, 而非完全反應於洪峰流量上, 故洪峰流量增加之能力極為有限。作者曾以76年之降雨資料藉PHIM (Peatland Hydrologic Impact Model) 水文模式探討森林對水文因子長期性之作用, 證實移除林木僅能對上游第1或2級小集水區 (面積23.2公頃) 10年回歸週期以下之洪峰流量有所影響, 見Fig. 2 (Lu, 1994)。然而上述分歧之試驗結果主要係導至於伐木所造成地表擾

動之不同, 伐木時機械之壓實以及林道之闢建為造成洪峰流量增加的主要因子。Harr氏 (1976) 曾指出受築路或其他活動干擾之區域, 若小於全集水區面積之12%時, 則伐木後洪峰流量即不會顯著增加。除擾動之程度外, 洪峰流量增加之多寡亦決定於砍伐區土壤水分狀況, 若降雨時土壤處於飽和或近飽和狀態, 則大部分之降雨可立即轉換成逕流, 洪峰流量即相對地增加較多。因此, 若集水區土壤處於飽和或接近飽和狀態下, 林木之有無對洪峰流量影響不大 (Hess, 1984)。

【註三】洪峰流量降低之原因係因伐木所造成之地表擾動與碎屑, 增加了集水區對雨水之滯留量, 並減緩河道內之水流速度, 使過多之水分無法快速地宣洩至集水區出口, 因而使洪峰流量不增反減 (Cheng *et al.*, 1975)。

2. 溶雪型洪峰 (Snowmelt peak)

在中、高緯度地區, 降雪量可能佔全年總降水量之25%以上, 溶雪為河川流量主要的來源。此等地區冬季之積雪量與春季之氣溫常左右溪流的洪峰流量。由於溶雪係受能量傳遞因素所控制, 發生面積通常較降雨為廣, 故所產生逕流歷線之型態與降雨型流量歷線有所不同。試驗研究已證實, 皆伐或擇伐可增加採伐區內之積雪量 (或雪水當量, snow water equivalent) 以及傳導性熱能, 致較多之溶雪可注入採伐區之土壤中 (Gray, 1975; Anderson *et al.*, 1976; Troendle and King, 1985; Harr and Coffin, 1992)。因此絕大部分之研究均認為伐木後除集水區出流量會增加外, 溶雪性洪峰亦會增加, 且受影響之時期較降雨型洪峰更為長久, 而洪峰增加量主要決定於溶雪季節之氣溫 (Hornbeck, 1973; Swanson and Hillman, 1977; Rothacher, 1973; Verry *et al.*, 1983)。少數例外情形多發生於美國Oregon州海岸山脈區; 此種伐木後溶雪型洪峰降低之情形, 除由於該區林分截留較多的降雪外, 另一原因為林冠層之積雪可接受較多來自太平洋之對流熱能 (Harr and McCorison, 1979)。

3. 對洪峰到達時間 (Time to peak) 之影響

若干研究顯示伐木會影響集水區之洪峰到達時間或集流時間 (time of concentration)。大部分報告認為砍伐後洪峰到達時間會提前數小時至數天不等 (Troendle and King, 1985; Cheng, 1989;

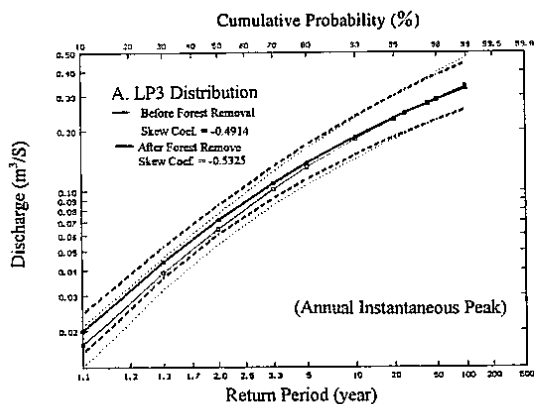


Fig. 2. Frequency curves of annual instantaneous peak discharge for watershed S-4N.

Verry *et al.*, 1983; Verry, 1986; 鄭皆達, 1995), 但亦有研究得到相反之結論 (Harr and McCorison, 1979; Cheng *et al.*, 1975) 或認為無顯著之影響 (Hewlett and Helvey, 1970; Troendle and King, 1987)。試驗結果之差異性相當大, 但其原因一般認為係導致於伐木改變集水區逕流路徑與微氣候。集流時間以及洪峰到達時間主要是決定於集水區之地形、土壤 (尤其是土壤含水量) 及地表狀況等因素; 林木樹冠層雖可延緩雨滴進入土壤之時間, 唯其影響程度不大 (陸象豫, 1995)。降雨型洪峰時間主要係受伐木改變逕流路徑所致; 伐木時部分地表被壓實, 致原本入滲之次地表流改經地表進入溪床, 因而縮短集流時間。溶雪型洪峰時間則係受伐木後改變能量平衡狀態及積雪之空間分佈所引起。森林覆蓋庇護積雪, 使溶雪高峰延遲至較暖和的時候, 伐木後喪失此種庇護, 溶雪高峰及洪峰發生時間大多會提前; 少數例外的情形多發生在以降雨為主要誘因之溶雪, 亦即rain-on-snow之情形。

#### 4. 減輕洪患之作用

在不破壞地表狀況之前提下, 砍伐林木後集水區洪峰流量增加量有限, 因此可推論森林的防洪功能有其極限。洪水之發生主要決定於氣象因素, 即使有良好的森林覆蓋亦不能防止由極端降雨所導致之洪水; 然而, 森林卻可減輕或緩和洪水的危害 (Verry, 1986; Lu, 1994; 鄭皆達, 1994)。森林減輕洪患之作用可由兩方面加以說明。林木樹冠與枯枝落葉層的截留作用可減少引起逕流之有效雨量; 樹冠及林下枯枝落葉層可截留3%至63%之年降雨量 (Raich, 1983; Lloyd and Marques, 1988), 臺灣地區天然闊葉林約可截留13%之年降雨量 (陸象豫, 1995)。此種截留作用對降雨強度小的地區當可發生顯著之效果, 然而對水災頻繁之高降雨強度地區卻難發揮功效。林地較高之蒸發散量, 亦會消耗較多的土壤水, 因而可增加暴雨時土壤之容水空間。林地與非林地蒸發散損失之差異, 在土壤含水量介於零界凋萎點 (wilting point) 與田間容水量 (field capacity) 之半時最為顯著 (Leaf and Brink, 1975); 而高降雨量地區, 土壤含水量經常大於田間容水量之半, 故藉林地較高之蒸發損失來達到減輕洪水之作用在多雨地區亦難發揮功效。蓮華池 4號集水區的皆伐試驗, 在旱季轉為雨季起始之時, 砍伐區無論出水量及洪峰流量均較天然

林顯著增加; 但在雨季 (尤其是連續性之豪雨情況下), 兩區間之出水量與洪峰流量間並無差異 (夏禹九, 1984), 即可作為佐證。根據水文模擬試驗, 林地減緩洪峰流量之作用, 對小集水區 10年回歸週期以下之洪水方能發揮功效 (Lu, 1994)。

森林減輕洪患之作用主要在於森林的保土護土功能。在地表覆蓋保持完整之狀態下, 林地內層蝕與紋蝕幾乎可完全避免, 且漫地流 (overland flow) 亦鮮發生, 故森林可有效地阻絕雨滴的飛濺沖蝕以及地表逕流的水力沖蝕, 因而達到保持土壤之功效。洪水中若無挾帶的土砂等沖積物, 則其衝擊破壞力將大為降低, 且不會阻塞排水構造物, 藉此可達到減輕洪患之作用, 此乃森林減輕洪水災害的最大功能。保水必先保土, 治土為治水之本, 森林乃是防止洪水為患之最佳土地利用方式。良好的森林覆蓋與穩定的土壤層能減少小洪水發生之次數, 亦是保護水源之先決條件, 但森林對超強度降雨的防洪功效不能過分樂觀。

### 三、森林與沖蝕及泥砂

集水區泥砂 (sediment) 產生方式包括地表沖蝕 (surface erosion)、蝕溝沖蝕 (gully erosion) 及山崩地滑 (soil mass movement) 等三種, 而導致沖蝕與崩塌最主要之因素則為坡度、地質等, 誘因則為降雨、地下水與土地利用。地表沖蝕係指土壤顆粒或小團粒構造受雨滴打擊、集中漫地流 (concentrated overland flow) 沖擊或風之吹襲而自土壤表層分離與移動現象。蝕溝沖蝕則指發生在溝渠內之土壤顆粒或團粒分離與移動的現象。山崩地滑包括土體之崩、塌、滑、落、陷等現象, 主要係因重力不平衡所致, 其移動之速度可能極快亦可能甚慢。林地地表因受樹冠層攔截雨水及枯枝落葉層之覆蓋, 可免除雨滴所造成的飛濺沖蝕; 且林地土壤由於具有發達之結構與良好之通透性, 入滲容量往往均大於降雨強度, 除非在極強之降雨強度下, 地表逕流 (漫地流) 甚少發生。即使發生地表逕流, 亦因枯枝落葉層及植物體之阻絕, 使地表流流速降至甚低而多以層流 (laminar flow) 方式出現, 如此水流的沖蝕能力大為降低, 故林地之非點源性沖蝕甚少發生。在自然狀況下, 林地的沖蝕多發生在裸露處 (導因



為強風、暴雨、崩坍、野火等)或根圈土附近由幹流水(stemflow)所造成之蝕溝沖蝕。覆蓋良好的森林地(尤以具有完整之枯枝落葉層之林地),地表沖蝕與蝕溝沖蝕均不易發生,此乃為森林防止沖蝕之正面效應。造成山崩地滑的原因多屬地質與地形因素,誘因則多為土壤水劇增或其他外力(強風與地震為主)所導致之重力不平衡。森林土壤雖因具有較多的大孔隙而增加土壤之孔隙水壓,致對坡面穩定造成負面的影響;然而植物根系的網結土壤作用,足以彌補孔隙壓力增加所產生之不利因素。但林木根系深度與網結作用均有限度,森林僅具有減少淺層崩塌之效,而是否因而會減少大型崩塌之發生,尚缺乏具體資料可資佐證。砍伐跡地於原有林木根系腐敗而新植被未建立之際最易發生小型崩塌(Trustrum *et al.*, 1984; Sidle, 1985),即可說明孔隙水壓及網結作用與淺層崩塌間之相互關係。另一方面,在陡峭邊坡上之樹木,其本身生重量即為一坡面不穩定因素,若風力作用於枝幹之力矩大於根系固著力之力矩時,則亦會對邊坡穩定會產生負面的影響。而風倒木除會導致表土裸露,增加地表沖蝕之機會外,其所造成的窟窿亦會成為水分聚積之處,對坡面穩定有極不利的影響。雖上述三種沖蝕現象均可能發生於林地內;然若無築路、砍伐林木、耕作或放牧等人為活動則覆蓋良好林地所發生的沖蝕多屬自然沖蝕,不致有加速、加劇之現象。

許多研究報告指出森林集水區溪流之泥沙多源於道路開闢及維修(Meeuwig and Packer, 1975; McCashion and Rice, 1983; Brooks *et al.*, 1991)。林道開闢需先剷除地被植物,繼之以大量之挖填方;挖掘處底土裸露,植生難以恢復,回填處土壤受嚴重擾動,已非自然邊坡,路面攔截水流,成為逕流渠道,故林道上下邊坡以及路面遭雨水或逕流沖蝕之機會甚大。加以壓實地表減少入滲及截斷原有之水流路徑,更造成逕流集中,加速沖蝕。隨開路而來的人為活動(如伐木、墾殖、遊憩等),更使沖蝕問題惡化。在美國約90%進入溪流之泥沙多來自林道開闢及伐木作業(Meeuwig and Packer, 1975; Brooks *et al.*, 1991),Megahan及Kidd(1971)之調查更指出開路所導致之泥沙輸出為未擾動集水區泥沙輸出之770倍,其中30%是導因於路面及邊坡的地表沖蝕,其餘為因築路所導致之崩塌所產生。又根據航測調查,臺灣地區山坡崩坍地有2535處,崩坍種面積為8100公

頃,崩坍原因以築路開墾佔29%為最多,地質因素佔24%次之(吳輝龍,1991)。

#### 四、森林與氣候

天候狀況主要係由能量之分佈與傳遞情形所決定,森林與氣候間之關係性主要決定於森林對能量傳導之影響程度。地球最大的能量來源為太陽,在北緯40度地區夏季每日所接收之太陽輻射能約500 langley(能量單位,等於calorie/cm<sup>2</sup>),冬季則約100 langley/day,年平均則為300 langley/day(Reifsnyder and Lull, 1965)。並非所有入射之輻射能均會被地表所吸收,此種吸收能力之強弱隨地表狀態與組成而不同,稱為物體之吸收率(absorptivity),為影響地表能量收支之主要因子,常見地表狀態之吸收率如Table 3(Reifsnyder and Lull, 1965);經反射而散失之輻射能比率則為反射率(albedo)。地表所吸收之輻射能將轉換成有感熱能(sensible heat),並以下列方式貯存或散失:

1. 轉換為長波輻射能,並經地表層散失於大氣中。
2. 加熱地表上方空氣。
3. 經蒸發散或光合作用而消耗。
4. 儲存於地表或其上方之物體內。

森林地對短波之吸收率甚高,幾乎所有之短波入射能將會被吸收。森林砍伐後,除非砍伐跡地極為乾燥或為積雪所覆蓋,否則在入射能接收方面相差不顯著(請參見Table 3);因此林地變更後能量收支差異主要在有感熱能之不同。在植物生長季節,蒸發散及光合作用將消耗入射能量之三分之二弱,剩下的能量則以其他三種方式儲存或散失(Miller, 1956)。因木材之比熱僅約0.3,而鬱閉良好之森林其生物量約1.5 g/cm<sup>2</sup>,故儲存於林木之熱能相當有限;事實上,20公尺森林樹冠層之總熱容量(thermal capacity)約為0.6 langley/°C,相較於5公分厚表土或積雪之熱容量約4.8 langley/°C遠為小,故主要之熱能貯存場所為土壤或積雪(Reifsnyder and Lull, 1965)。貯存於地表之熱能將以長波輻射能散失於大氣中(尤以晴朗之夜晚最為明顯),長波輻射能之放射量與物體之絕對溫度成四次方正比(Stefan Boltzmann Law)但其量與短波輻射能相比則甚低;砍伐林

**Table 3. Solar (0.3 to 2.5 microns) absorptivity coefficients of various surface.**

Water body	0.94
Moist ground 70% - 95% bare	0.88 - 0.91
Pine forest	0.85 - 0.90
Hardwood forest	0.80 - 0.85
Ground, dry plowed	0.75 - 0.80
Desert surface	0.75
Dark soil	0.85 - 0.95
Pasture	0.75 - 0.85
Grass, high and dry	0.67 - 0.69
Snow	0.13 - 0.33

Note: 1 micron = one-millionth of a meter

木後，長波輻射散失上之差異在整個能量平衡中並不顯著。森林砍伐後能量收支的變化主要在於蒸發散與光合作用所消耗量之減少。空氣的比熱雖甚低但為不良之熱導體，除非在對流作用旺盛之地區，此等減少之量大部分被地表所吸收；根據Fowler (1987) 等之研究報告，砍伐林木後集水區日平均最高氣溫上升約2 °C，日平均最低溫因長波輻射能散射之屏障喪失而降低2.6°C。很明顯地，林木剷除後地表及其上方之空氣溫度將會增加，間接地影響當地之微氣候，若大面積伐木亦會對區域性氣候有所影響。

事實上，森林之有無對地表能量收支之影響不及對地表能量傳遞之影響為顯著。最近30年來，人類以約11.1 million ha/year之速率毫無節制地砍伐森林(Lanly, 1982)，致使全球平均反射率增加約0.00033至0.00064，而導致全球平均溫度降低約0.06°K至0.09°K (Henderson-Sellers and Gornitz, 1984)【註四】。此種影響遠較工業化大量製造二氧化碳所導致之溫室效應為小。然而，森林對阻絕風砂之移動卻可發揮明顯之功效，間接地發揮影響地表對流熱能之傳遞與背風區之蒸發散量，進而能改變受影響區域的微氣候。森林影響對流熱能之傳遞，鮮有明確之定量性資料可供參考；但定性資料方面，小者海岸防風林保護農舍作物等，大者中國大陸三北造林生態計劃，改變部份氣流方向，因而創造無數可耕地，當可為森林影響能量傳遞而使(微)氣候變化之例證。

【註四】地球陸地之平均反射率約為0.14，而全球之反射率則約為0.40 (Reifsnyder and Lull, 1965)。

## 五、森林與水質

最近30年來由於森林經營的集約化以及肥料與農藥之大量使用，造成水資源品質的劣化，有關森林及其經營活動對水質之影響始受到重視。森林對維護水質之功能尚無明確的定論；已知之事實為森林的樹冠層、枯枝落葉層與土壤層均會對雨水中之某些化學物質會起不同的交互反應作用，此等作用之結果將使有些物質被吸收，有些則被淋洗出。雨水經過樹冠層時，一部分的離子會與枝葉細胞壁的纖維素、半纖維素之OH及COOH等物質產生離子交換作用，或為附著的著生植物所吸收(洪富文, 1984)。經過林木樹冠層離子交換作用後，雨水中一部分NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、及SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>等離子會被吸收，而K<sup>+</sup>、Ca<sup>+2</sup>、Mg<sup>+2</sup>等陽離子則會被淋洗出，故林冠可中和雨水之酸性(Martin et al., 1986; 金恆鏞等, 1994)。枯枝落葉層與有機層中半分解的有機質及腐植質具有強大之離子交換與吸附功能，生長於其中之菌類亦具有極大的吸收及濃縮養分的功能，因此流經此層之大部分養分可暫時保存或被植物體吸收利用而濾出。土壤層除微生物或植物根系會吸收利用養分外，其他有機物及土壤礦物(如鐵、鋁氧化物、高嶺土、伊萊石、蛭石等)更可吸附各種離子與有機化合物，而使養分滯留於土壤層內(洪富文, 1984)。水中養分或其他物質之過濾、離子交換與吸收作用絕大部分係在A<sub>0</sub>層以下各層次土壤中進行，森林可有效地使雨水進入土壤層，亦可減少雨水沖蝕所造成之懸浮質，因而間接發揮淨化與改善水質之功能。

森林砍伐後，除上述樹冠層之離子交互作用及庇護地表作用無法達成外，一部分離子如NO<sub>3</sub><sup>-</sup>等將因未被植物吸收而大量流失，但對集水區水質最主要之影響在於林地地表溫度升高所引發的有機質加速分解作用。森林砍伐後，短波形式之輻射能將直接進入土壤，將使土壤之溫度提高；相反地，夜間或冷季時，裸地土壤因缺乏植物覆蓋之隔絕作用熱量將迅速喪失，而使土壤溫度降低。土壤之溫度升高2至3°C，則有機質分解之速率將增加10倍(Adu and Oades, 1978)。分解之有機質，遇雨則極易遭流失(尤以坡地為甚)；有機質流失，一則會破壞原有之土壤結構，將使土壤之保水蓄水能力喪失殆盡，一則減少土壤之離子吸附能力，將使土壤無法保持原有之地力。

Helvey等(1985)發現集水區經火燒過後,其溪流N, P, Ca, Mg, K與Na等陽離子含量因有機質破壞殆盡而顯著增加。又劉瓊霖等(1994)比較蓮華池4號及5號集水區之水質,發現皆伐後栽植杉木之4號集水區其溪流之pH、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>與S-濃度均高於5號天然闊葉林之溪水;此等研究或可說明林地變更後養分流失之情形。因此若坡地上之林地被剷除後改變為農業用地,會導致有機質加速分解而喪失地力,進而必須使用大量施肥以維持生產,所施的除肥料少部分被作物吸收利用外,大部分多隨逕流而去,成為河川或水庫優養化之主要因子。

另一方面,砍伐林木或剷除濱岸植物,亦會影響溪流之水溫。水體溫度可左右許多水生動植物或藻類的生存;在若干地區水溫為決定溪流與河川水質之主要因子(Brooks *et al.*, 1992)。已有報告證實,砍伐濱岸林木會使溪流水溫增加攝氏零點幾度至攝氏10度以上不等;在北美地區年溪流最高溫度受剷除濱岸植物影響,亦有增高4°C至15°C之記錄(Brown, 1980)。水溫增加,則水生動植物活動力增加,最起碼將會使水中含氧量降低,此亦為伐木影響溪流水質之另一不利因素。

## 六、森林與地下水

研究地下水通常僅會考慮地形、地質、含水層之滲透性與水力梯度等特性,而甚少討論其與地表植物間之關係。在乾季期間,林地表土之土壤含水量較非林地為高,但森林對地下水位之影響則不明確。然而在濱岸地帶(riparian)、濕地(wetland)、地下水水源區或某些高地下水位之地區,改變植物覆蓋則會對地下水造成直接之影響。

濱岸地帶指鄰近於河邊或湖邊具有較高之地下水位且土壤經常處於含水飽和狀況的地帶。濕地通常發生於年雨量遠超過年蒸發散量之大面積平坦地形區,高地下水位、地形平坦、排水不良為大多數濕地之特色。生長於濱岸地帶與濕地之植物由於水分供應不虞匱乏,其蒸發量往往接近勢蒸發散量(potential evapotranspiration),因而可消耗大量之地下水(Brooks *et al.*, 1991)。濕地與濱岸地區多為地下水注入(discharge)地區,若此

等地區之水源為區域性地下水系統(regional groundwater system),則有無植物覆蓋對地下水位之影響將難以顯著;若係為棲止地下水(perched groundwater)或局部性地下水系統(local groundwater system),則對地下水位之影響較為顯著。若地下水之水源來自濕地或濱岸地區,亦即此等地區為地下水流入(recharge)區域,則砍伐林木將會提高地下水之水位與流量(Urie, 1971)。Johnson(1960)及Urie(1971)等報告均證實砍伐地下水水源區之森林,基流量或地下水流量會增加,即間接證明伐木可影響此等區之地下水位。

## 七、結論

撇開森林的其他公益不談,森林在水土資源保育及水文循環上之功能無疑地是所有土地利用中最佳者,其所扮演之角色因地而異,然大致上有一通則可依循,茲綜合以上之討論對森林的功効擇要說明如下:

- (1) 森林可增加降雨量及降雨頻率〔通常為假〕
- (2) 森林可調節河川流量,使旱季時流量增加,濕季時流量降低〔通常為假;河川流量主要受氣候支配,地形、土壤次之,森林對溪流水流量及其時間分佈之影響是間接且有限的〕
- (3) 森林可保存水分以供給溪流量〔假,森林僅提供有利之保水蓄水環境〕
- (4) 森林可延緩溶雪時間〔通常為真〕
- (5) 森林可防止沖蝕〔真,但有其限度,對防止層蝕與紋蝕發生效果顯著〕
- (6) 森林可減輕洪水之災害,但無法防止極端降雨所造成之洪水〔真〕
- (7) 森林可影響一地區之氣候〔對微氣候而言為真,區域性氣候則不明顯〕
- (8) 森林可改善水質〔真,可淨化水質〕
- (9) 森林可防止淺層崩塌〔真,能防止由逕流沖刷所造成之崩塌〕
- (10) 森林可降低林內及樹冠層上方之氣溫〔真〕
- (11) 森林可降低地下水位,進而排除溼地過多之水分〔通常為假〕

然上列所述僅為一般性的通則，各項說明均可能有例外的情形，對一些不尋常之水文事件，必須藉森林水文學之基本原理去探討及解釋發生的原因。而了解森林所扮演之角色，方有助於對水資源缺乏、全球氣溫變遷、土地利用開發等問題作出正確的因應之道。

### 誌謝

本研究承本系賴國基先生提供寶貴之意見與資料方得以完成，特此致謝。

### 引用文獻

- 郭魁士 1974 土壤學。中國書局。137-139頁。
- 林淵霖 1978 國外與臺灣之森林集水區經營。中華水土保持學會。137頁。
- 夏禹九、金恆鑣、楊炳炎、漆陸忠 1982 皆伐作業對蓮華池試驗集水區溪流流量的影響。林業試驗所研究報告第381號。
- 夏禹九 1984 水源涵養與森林經營。臺灣林業 10(11): 34-38。
- 洪富文 1984 森林經營對水質的影響。臺灣林業 10(11): 39-45。
- 竹下敬司 1985 森林土壤と水源かん養機能。森林立地 5(2): 19-26。
- 陳信雄、李錦育 1986 森林對水資源涵養效益評估之研究。中華林學季刊 19(4): 11-26。
- 吳輝龍 1991 永續利用有良方—談水庫集水區的水土保持。水庫集水區特輯。行政院農業委員會、中華水土保持學會合編。
- 陳明杰 1993 蓮華池地區不同林相土壤孔隙率分佈特性之研究。中華林學季刊 26(2): 63-77。
- 鄭皆達 1994 評論：突破困境開創林業第二個黃金時代—在環保意識高漲，乾旱與洪澇頻仍的壓力下，林業界今後應努力的方向。人為本位發展新臺灣系列研討會論文集。21-28頁。
- 游繁結 1994 集水區水土保持與改進之道。人為本位發展新臺灣系列研討會論文集。29-38頁。
- 金恆鑣、夏禹九、翁松元、劉瓊穆 1994 森林集水區對水質維護之功能。農委會林業特刊第46號，408-412頁。
- 劉瓊穆、孫正春、夏禹九、漆陸忠、金恆鑣 1994 人工淋雨天然林集水區溪流水文及水化學。農委會林業特刊第46號，413-419頁。
- 鄭皆達 1996 慎思明辨 探討森林的水土保持功能—由種數救水源談起。林業試驗所百週年慶學術研討會論文集。台灣省林業試驗所。123-136頁。
- 陸象豫 1995 臺灣中部地區天然闊葉林降雨截留量之探討。林業試驗所研究報告季刊 10(4): 447-457。
- Adu, J. K., and J. M. Oades. 1978. Physical factors influencing decomposition of organic materials in soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry* 10: 109-115.
- Anderson, H. W., M. D. Hoover, and K. G. Reinhart. 1976. Forest and water: effects of forest managements on flood, sedimentation, and water supply. USDA Forest Service Technical Report PSW-18.
- Baker, M. B. 1986. Effects of ponderosa pine treatments on water yield in Arizona. *Water Resources Research* 22(1): 67-73.
- Bosch, J. M., and J. D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effects of vegetative changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55: 3-23.
- Brooks, K. N., P. F. Ffolliott, H. M. Gregersen, and J. L. Thames. 1991. Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Brown, G. W. 1980. Forestry and water quality. Oregon state University Presses, Corvallis.
- Cheng, J. D., T. A. Black, J. De Vries, R. P. Willington, and B. C. Goodell. 1975. The evaluation of initial changes in peak streamflow following logging of a watershed on the west coast of Canada. Pages 475-486 in International Association Scientific Hydrology Publication, 117.
- Cheng, J. D. 1989. Streamflow changes after clear-cut logging of a pine beetle-infested watershed

- in southern British Columbia, Canada. *Water Resources Research* 25(3): 449-456.
- Douglass, J. E., and W. T. Swank.** 1972. Streamflow modification through management of eastern forest. USDA Forest Service Research Paper SE-94.
- Douglass, J. E.** 1983. The potential for water yield augmentation from forest management in the eastern United States. *Water Resources Bulletin* 19(3): 351-358.
- Fowler, W. B., J. D. Helvey, and E. N. Felix.** 1987. Hydrologic and climate changes in three small watersheds after timber harvest. USDA Forest Service Paper PNW-RP-379.
- Gray, H. C.** 1975. Airflow patterns and snow accumulation in a forest clearing. Pages 106-133 in *Proceedings of the 43rd Western Snow Conference*, Coronada, Calif.
- Harr, R. D., W. C. Harper, and J. T. Krygier.** 1975. Changes in storm hydrographs after road building and clear-cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resources Research* 11(3): 436-444.
- Harr, R. D.** 1976. Forest practices and streamflow in western Oregon. USDA Forest Service, General Technique Report PNW-49. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon, 22 pp.
- Harr, R. D., and F. M. McCorison.** 1979. Initial effects of clearcut logging on size and timing of peak flows in a small watershed in western Oregon. *Water Resources Research* 15(1): 90-94.
- Harr, R. D., A. Levno, and R. Mersereau.** 1982. Streamflow changes after logging 130-year-old douglas fir in two small watersheds. *Water Resources Research* 18(3): 637-644.
- Harr, R. D.** 1983. Potential for augmenting water yield through forest practices in western Washington and western Oregon. *Water Resources Bulletin* 19(3): 383-393.
- Harr, R. D., and B. A. Coffin.** 1992. Influence of timber harvest on rain-on-snow runoff: a mechanism for cumulative watershed effects. Pages 455-469 in *Interdisciplinary Approach in Hydrology and Hydrogeology*, American Institute of Hydrology.
- Harris, D. D.** 1973. Hydrologic changes after clear-cut logging in a small Oregon coastal watershed. *Journal of Research, U.S. Geologic Survey* 1(4): 487-491.
- Helvey, J. D., A. R. Tiedemann, and T. D. Anderson.** 1985. Plant nutrient loss by soil erosion and mass movement after wildfire. *Journal of Soil Water Conservation* 40: 168-173.
- Henderson-Sellers, A., and V. Gornitz.** 1984. Possible climate impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Climate Change* 6: 231-258.
- Hess, S.** 1984. Timber harvesting and flooding. *Journal of Soil and Water Conservation*. 39(2): 115-117.
- Hewlett, J. D., and J. D. Helvey.** 1970. Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph. *Water Resources Research* 6(3): 768-782.
- Hewlett, J. D., and A. R. Hibbert.** 1961. Increases in water yield after several types of forest cutting. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin* 6(3): 5-17.
- Hibbert, A. R.** 1967. Forest treatment effects on water yield. Pages 527-543 in *International Symposium on Forest Hydrology*. W. E. Sopper and H.W. Lull, eds. Pergamon Press, Oxford, England.
- Hibbert, A. R.** 1983. Water yield improvement potential by vegetation management on western rangelands. *Water Resources Bulletin* 19(3): 375-381.
- Hibbert, A. R.** 1971. Increases in streamflow after converting chaparral to grass. *Water Resources Research* 7(1): 71-80.
- Hicks, J. H., R. L. Beschta, and R. D. Harr.** 1991. Long-term changes in streamflow following logging in western Oregon and associated fisheries implications. *Water Resources Bulletin* 27(2): 217-226.

- Hornbeck, J. W.** 1973. Storm flow from hard-wood-forested and cleared watersheds in New Hampshire. *Water Resources Research* 9: 346-354.
- Hornbeck, J. W., M. B. Adams, E. S. Corbett, E. S. Verry, and J. A. Lynch.** 1993. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northern USA. *Journal of Hydrology* (150): 323-344.
- Johnson, E. A.** 1960. Effect of altering forest vegetation on low flows of small streams. *International Association Scientific Hydrology Publ.* 51: 257-266.
- Lanly, J. P.** 1982. Tropical forest resources, *FAO Forestry Paper* 30, FAO, Rome. 106 pp.
- Leaf, C. F.** 1975. Watershed management in the Rocky Mountain subalpine zone. *USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station Research Paper RM-137.* 31 pp.
- Leaf C. E. and G. E. Brink.** 1975. Land use simulation model of the subalpine coniferous zone. *USDA Forest Service Rocky Mountain Forest Experiment Station Research Paper RM-135.* 42 pp.
- Lee, R.** 1980. *Forest hydrology.* Columbia University Press, New York. 339 pp.
- Lloyd, C. R., and A. de O. Marques F.** 1988. Spatial variability of throughfall and streamflow measurements in Amazon rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 42: 63-73.
- Lu, S. Y.** 1994. Forest harvesting effects on streamflow and flood frequency in the northern Lakes States. Ph.D Thesis, Department of Forest Resources, University of Minnesota, St. Paul, Minnesota. 213 pp.
- Lull, H. W., and K. G. Reinhart.** 1967. Increasing water yield in the Northeast by management of forested watersheds. *USDA Forest Service Research Paper NE-66,* Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, Pennsylvania. 45 pp.
- Martin, C. W., R. S. Pierce, G. E. Likens, and F. H. Bormann.** 1986. Clearcutting affects stream chemistry in the White Mountains of New Hampshire. *USDA Forest Service Research Paper NE-579.*
- McCashion, J. S., and R. M. Rice.** 1983. Erosion on logging roads in north-western California: how much is avoidable? *Journal of Forestry* 81: 23-26.
- McMinn, W., and Hewlett, J. D.** 1975. First-year water yield increase after forest cutting: an alternative model. *Journal of Forestry* 73(10): 645-655.
- Meeuwig, R. O., and P. E. Packer.** 1975. Erosion and runoff on forest and range lands. *Proceedings Fifth Workshop of US/Australia Rangelands Panel.* Boise Idaho, June 15-22, 1975.
- Megahan, W. F., and W. J. Kidd.** 1971. Effect of logging roads on sediment production rates in the Idaho Batholith. *USDA Forest Service Research Paper INT-123.* 14 pp.
- Miller, D. H.** 1956. The influence of pine forest on daytime temperature in the Sierra Nevada. *Geography Review* 46: 209-218.
- Pitman, W. V.** 1978. Trends in streamflow due to upstream land-use changes. *Journal of Hydrology* 39: 227-237.
- Ponce, S.L., and J. R. Meiman.** 1983. Water yield augmentation through forest and range management-issues for the future. *Water Resources Bulletin* 19(3): 415-419.
- Reifsnyder W. E., and H. W. Lull.** 1965. Radiation energy in relation to forests. U.S. Department of Agriculture, *Technical Bulletin No. 1344.*
- Reinhart, K. F., A. R. Escher, and G. R. Trimble, Jr.** 1963. Effect of streamflow of four forest practices in the mountains of West Virginia, Northeast. *Forest Experiment Station Research Paper NE-1.* 79 pp.
- Rich, L. R., and G. J. Gottfried.** 1976. Water yields resultin from treatments on the Workman Creek experimental watershed in central Arizona. *Water Resources Research* 12(5): 1053-1060.

- Rothacher, J. S.** 1970. Increases in water yield following clearcut logging in the Pacific Northwest. *Water Resources Research* 6(2): 653-658.
- Rothacher, J. S.** 1973. Does harvest in west slope douglas-fir increase peak flow in small forest stream? U.S.D.A. Forest Service, Research Paper PNW-163, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, Oregon. 13 pp.
- Settergren, C. D., R. M. Nugent, and G.S. Henderson.** 1980. Timber Harvest and water yield in the Ozarks. Pages 661-668 in *Symposium on Watershed Management 1980*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. II.
- Side, R. C.** 1985. Factors influencing the stability of slopes. Pages 17-25 in D. Swanson ed, *Proceedings of the workshop on slope stability: problems and solutions in forest management*. USDA Forest Service General Technical Report PNW-180.
- Swanson, R. H., and G. R. Hillman.** 1977. Predicted increased water yield after clearcutting verified in West-Central Alberta. Northern Forest Research Center Information Report NOR-X-198, Edmonton, Alberta. 40 pp.
- Troendle, C. A., and R. M. King.** 1987. The effect of timber harvest on the Fool Creek watershed 30 years later. *Water Resources Research* (21): 1915-1922.
- Troendle, C. A., and J. R. Meimen.** 1986. The effect of patch clearcutting on the water balance of subalpine forest slope. Pages 93-100 in *Proc. Western Snow Conference*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Troendle, C. A.** 1987. The potential effects of partial cutting and thinning on streamflow from the subalpine forest. USDA. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Research Paper RM-274.
- Troendle, C. A., and R. M. King.** 1987. The effect of partial and clearcutting on streamflow at Deadhorse Creek, Colorado. *Journal of Hydrology* 90: 145-157.
- Trustum, N. A., V. J. Thomas, and M. G Lambert.** 1984. Soil slip erosion as a constraint to hill country pasture production. *Proc. New Zealand Grassland Association* 45: 66-76.
- Urie, D. H.** 1971. Estimated groundwater yield following strip cutting in pine plantations. *Water Resources Research* 7(6): 1497-1510.
- Van Lill, W. S., F. J. Kruger, and D. B. van Wyk.** 1980. The effect of afforestation *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology* 48: 107-118.
- Verry, E. S.** 1972. Effect of an aspen clearcutting on water yield and quality in northern Minnesota. Pages 276-284 in *American Water Resources Association National Symposium on Watersheds in Transition*, Urbana, Illinois.
- Verry, E. S., J. R. Lewis, and K. N. Brooks.** 1983. Aspen clearcutting increases snowmelt and storm flow peaks in northern Central Minnesota. *Water Resources Bulletin* 19(1): 59-67.
- Verry, E. S.** 1986. Forest harvesting and water: the Lake State experience. *Water Resources Bulletin* 22(6): 1039-1047.
- Wheathead P. G. and M. Robinson.** 1993. Experimental basin studies- an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology* 145: 217-230.