

森林與水

撰 文：陸象豫

繪 圖：唐凱軍、黃昌榕

By Shiang-Yue Lu

Drawings by Kai-Jung Tang

and Chang-Jung Huang

森

FORESTS and WATER

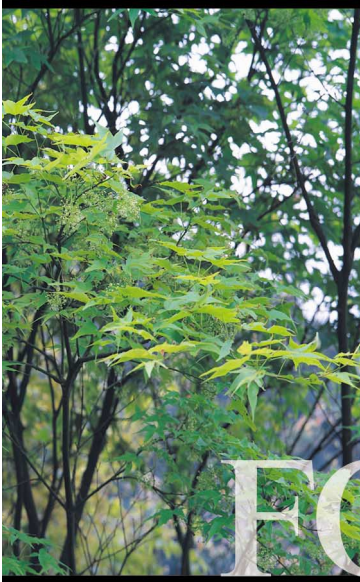
FORESTS
WATER

林

水

Published by Taiwan Forestry Research Institute

Published in March 2001





所長序

水滋養森林並使之生長茁壯，森林進而能影響水資源的質與量，二者之間的關係又因土壤、氣候、降水特性等因素而顯得複雜。森林與水間相互影響的現象係森林及水文等領域的主要研究課題，學術界累積上百年的研究成果，業已將其間相互關係理出一可依循的基本脈絡。本所 2000 年行事曆即以森林與水為主題，藉少許的文字與精美的圖片，精要地將森林與水間基本的關係傳達出來。然限於篇幅及形式，無法詳細陳述各單元的意義及內涵。作者特針對此項缺失，以深入淺出的文字闡述水與森林間的相關知識，並以臺灣及世界各地試驗結果為佐證；使社會大眾對森林與水間的關係能有更正確的認識。

臺灣森林覆蓋率相當高，亦屬降雨豐富地區，理論上應不致發生水資源不足的情形。然臺灣的降雨時空分佈不均勻，加上地形的因素，大部分的降雨均以直接逕流方式流入海洋，致仍有水資源匱乏的情形。在此情況下，森林的保土、護土及涵養水資源功能益顯重要。森林為保育水土資源最佳的土地利用方式，為臺灣的命脈均為不爭的事實。但我們亦應了解森林的防澇、防旱功能有其上限，要減緩臺灣地區水資源供需不平衡的情形，維持良好的森林覆蓋當為第一要件，但亦需從節約用水、減低水汙染及逕流水的利用等多管齊下方能竟其全功。

森 林 與 水

and WATER

森林經營的重點已由木材生產轉移至環境保育及遊憩等方面，不當的經營或濫伐林木不僅是林地惡化或樹種的減少而已，生活在其內外的生物都將受其影響，人類自不能倖免。然而只要大家關心我們的環境，愛護保護森林，森林自會回饋人類。對森林與水間的關係亦應繼續加強研究，了解越深，越能夠保護此兩種寶貴的自然資源。

林業試驗所

楊政川  謹誌

中華民國九十年三月

FORESTS & WATER

森林與水 林業試驗所集水區經營系 陸象豫

一、緒言 / 1

1-1 水文學與水文循環 / 4

1-2 臺灣的水資源概況 / 5

1-3 臺灣的森林概況 / 7

二、試驗集水區 / 10

2-1. 集水區的水平衡 / 11

2-2 配對集水區試驗法 / 13

2-3 臺灣的試驗集水區 / 13

2-4 臺灣的森林水文及集水區經營試驗研究 / 18

三、與森林相關的水文因子 / 20

3-1 降水 / 20

3-2 降水截留 / 22

3-3 蒸發散 / 25

3-4 降雨損失 / 28

3-5 入滲與滲漏 / 28

3-6 漫地流 / 32

3-7 次地表逕流 / 34

3-8 基流 / 35

四、森林土壤 / 36

4-1 森林土壤的特性 / 36

4-2 土壤性質 / 39

4-3 土壤水 / 40

4-4 土壤水的移動 / 43

4-5 土壤水的變化 / 43

五、溪流水 / 45

5-1 溪流水的量測 / 46

5-2 流量歷線圖 / 48

5-3 變動飽和水域 / 51

5-4 影響溪流水量的因子 / 52

5-5 砍伐林木對水量的影響 / 55

六、森林與水質 / 60

6-1 沖蝕與沈積物 / 60

6-2 溪流水溫 / 68

6-3 水化學 / 71

6-4 地質與水質 / 72

6-5 養分循環 / 74

6-6 大氣沉降 / 75

6-7 森林經營對水質的影響 / 78

七、森林在水土資源保育的功能 / 82

7-1 水資源涵養 / 82

7-2 森林的防洪功能 / 84

7-3 森林的防旱功能 / 88

7-4 森林的控制沖蝕功能 / 90

7-5 改變水質 / 92

八、結論 / 95

誌謝 / 96

參考文獻 / 97

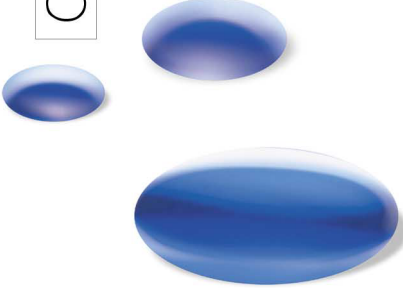
FORESTS & WATER

圖 表 目 錄

- 圖 1. 世界森林分佈圖 / 2
- 圖 2. 全球降水量分佈圖 / 3
- 圖 3. 降水與溫度決定森林的型態 / 3
- 圖 4. 未擾動森林地可能發生的水文現象示意圖 / 4
- 圖 5. 臺灣等雨量線圖 / 6
- 圖 6. 臺灣坡地分佈及剖面圖 / 7
- 圖 7. 臺灣冷杉、玉山圓柏林相 / 10
- 圖 8. 恆春半島海岸林 / 10
- 圖 9. 集水區示意圖 / 11
- 圖 10. 配對試驗集水區法示意圖 / 14
- 圖 11. 蓮華池4號集水區皆伐前後流量關係圖 / 14
- 圖 12. 林業試驗所試驗集水區及氣象站位置圖 / 16
- 圖 13. 林試所蓮華池分所 3 號集水區量水堰圖 / 16
- 圖 14. 林試所蓮華池分所森林氣象站 / 17
- 圖 15. 九芎打樁護坡情形 / 19
- 圖 16. 生態系經營研究說明圖 / 19
- 圖 17. 自計雨量計 / 21
- 圖 18. 虹吸式雨量計 / 21

- 圖 19. 樹冠攔截降雨量情形 / 23
- 圖 20. 穿落雨量測 / 23
- 圖 21. 幹流量量測 / 24
- 圖 22. 針葉樹的枝葉攔截雨水情形 / 24
- 圖 23. 闊葉樹樹葉攔截雨水情形 / 24
- 圖 24. 林試所蓮華池分所的滲漏計 / 26
- 圖 25. 蓮華池滲漏計剖面圖 / 26
- 圖 26. 美國 Hubbard Brook
森林試驗集水區降水量與逕流量關係圖 / 27
- 圖 27. 蓮華池 5 號試驗集水區降雨量與逕流量關係圖 / 28
- 圖 28. 臺灣天然闊葉樹林每年截留的雨量約佔年雨量的 11.3 % / 29
- 圖 29. 臺灣高海拔山區的針葉樹林，截留量較闊葉樹林為高 / 29
- 圖 30. 地表入滲速率的量測 / 30
- 圖 31. 裸露表土遭水流沖蝕情形 / 31
- 圖 32. 森林的樹冠層及枯枝落葉層保護地表情形 / 31
- 圖 33. 林道路面上的地表逕流 / 33
- 圖 34. 匯聚的地表逕流 / 33
- 圖 35. 森林土壤層的滲流水 / 34
- 圖 36. 次地表逕流的量測 / 35
- 圖 37. 基流分離方法中相關的水文因子 / 36
- 圖 38. 畢祿溪試驗集水區臺灣二葉松林地的枯枝落葉層 / 38
- 圖 39. 蓮華池試驗集水區森林土剖面圖 / 39
- 圖 40. 水分與土壤顆粒在未飽和土壤層中關係示意圖 / 41
- 圖 41. 土壤水分張力與土壤含水量關係圖 / 42
- 圖 42. 以一水文週期為計算單位，土壤水總變化量說明圖 / 44
- 圖 43. 美國 Appalachians 山脈地區森林集水區土壤水分變動情形 / 45
- 圖 44. 流速儀測量流速的情形 / 47
- 圖 45. 臺灣試驗集水區量水堰斷面圖 48

FORESTS & WATER

- 
- 圖 46. 集水區不同路徑的水流所產生的流量歷線圖 / 49
- 圖 47. 畢祿溪集水區水文歷線圖 / 50
- 圖 48. 變動飽和區域觀念示意圖 / 51
- 圖 49. 融雪為高緯度地區春季及夏初溪流主要來源之一 / 52
- 圖 50. 伐木造成的流量時間差效應對下游集水區流量的影響 / 54
- 圖 51. 溪流沿岸的深根性植物會消耗相當多的水分 / 57
- 圖 52. 闢建林道會嚴重擾動集水區原有的水流路徑 / 57
- 圖 53. 蓮華池 4 號集水區於 1978 年砍伐的情形 / 59
- 圖 54. 蓮華池 4 號集水區砍伐後次年植生恢復情形 / 59
- 圖 55. 雨滴打擊裸露的地表為發生沖蝕的開始 / 61
- 圖 56. 峽谷與溪谷乃千萬年來沖蝕作用下的產物 / 62
- 圖 57. 溪流沿岸的冲刷 / 64
- 圖 58. 風倒木所造成的地表裸露與窟窿 / 64
- 圖 59. ISCO 自動水樣收集器 / 65
- 圖 60. Coshocton 取樣轉盤 / 66
- 圖 61. 小集水區泥砂輸送歷線圖 / 66
- 圖 62. 不當的林道開闢 / 68
- 圖 63. 常見物質 pH 值比較圖 / 72

- 圖 64. 美國明尼蘇達州北部呈黃褐色的溪流水 / 73
- 圖 65. Anderson 乾濕沉降器 / 77
- 圖 66. 溪流的濱岸植物 / 79
- 圖 67. 焚燒會改變溪流水質 / 81
- 圖 68. 德基水庫暗褐色的水體 / 81
- 圖 69. 森林涵養水資源的功能來自整個森林生態體系 / 83
- 圖 70. 嚴重乾旱時森林集水區仍會有低量的水流出 / 84
- 圖 71. 覆蓋良好森林地所流出的洪水 / 86
- 圖 72. 挾帶大量泥砂與雜質的洪水 / 87
- 圖 73. 假設全年陸地降水為 100 個單位，全球年水文平衡關係示意圖 / 88
- 圖 74. 森林對解決由天候所造成的乾旱助益不大 / 89
- 圖 75. 臺東嘉路蘭農場水土保持處理前情形 / 91
- 圖 76. 臺東嘉路蘭農場水土保持處理後對照圖 / 91
- 圖 77. 森林的多層覆蓋幾乎可完全吸收雨滴的動能 / 91
- 圖 78. 未遭受擾動或破壞的集水區，溪水多呈清澈 / 92
- 圖 79. 臺灣山區的自然崩場現象 / 93
- 圖 80. 鴛鴦湖清澈的水體 / 94

- 表 1. 全球水分分佈估計量 / 1
- 表 2. 臺灣森林面積 / 9
- 表 3. 臺灣地區試驗集水區地形特性 / 15
- 表 4. 土壤入滲容量與質地及植生覆蓋間之概略關係 / 32
- 表 5. 美國農部土粒粗細分級標準 / 40
- 表 6. 一公尺單位深度下，不同質地土壤之土壤水含量 / 42
- 表 7. 林業試驗所部分試驗集水區溪流水各月分平均溫度 / 70
- 表 8. 流經不同地質條件溪流水的水化學特性 / 73
- 表 9. 福山1號及美國 Appalachian 山脈試驗集水區年養分收支情形 / 75

一、緒言

水是地球表層五公里範圍內存量最多的物質，不但是所有生物體的主要組成成分，亦是營造地球表面地形與地貌主要源動力。然而地球上的水約 96.5 % 存在於海洋，再扣除約 1 % 鹽分含量過高的地下水與鹹水湖，剩下僅有 2.5 % 為淡水；而可被人類日常生活利用的水所佔比率卻不及總水量的 1 %，見表 1 (Chow et al., 1988)。因此水對人類而言是充滿矛盾的物質，雖豐富但又具有有限性。

表 1. 全球水分分佈估計量 (Chow et al., 1988)

項目	分佈面積 (10 ⁶ km ²)	體積 (km ³)	佔總水量 的百分比	佔總淡水量 的百分比
海洋	361.3	1,338,000,000	96.5	
地下水				
淡水	134.8	10,530,000	0.76	30.1
鹹水	134.8	12,870,000	0.93	
土壤水	82.0	16,500	0.0012	0.05
極地冰帽	16.0	24,023,500	1.7	68.6
極地外之冰雪	0.3	340,600	0.0025	1.0
湖泊				
淡水	1.2	91,000	0.007	0.26
鹹水	0.8	85,400	0.006	
沼澤	2.7	11,470	0.0008	0.03
溪流河川	144.8	2,120	0.0002	0.006
生物體內含水		1,120	0.0001	0.003
氣態水分		12,900	0.001	0.04
全球總水量	510.0	1,385,984,610	100	
全球總淡水量	148.8	35,029,210	2.5	100

人類利用的水主要是來自湖泊、河流、沼澤及地下水，這些水多發源於森林地區，致使早期人們以為森林能促使降雨，並會於乾旱時釋放所保有的水分。多數的地表水均發源於森林區為一不爭的事實，但究其原因主要係森林多位於多雨地區，森林存在與否最主要之決定因素為降水量。大致而言年降水量在 250 mm 以上的溫帶或寒帶地區及年雨量在 1000 mm 之熱帶地區方能孕育出森林 (見圖 1 及圖 2)，再因其他環境因子的影響，而形成諸如；熱帶雨林、常綠林、季風林、落葉林、棘林、沙漠叢等差異甚大的林相 (Botkin and Keller, 1995)。比較圖 1 及圖 2 可即獲知森林分佈與降水量間之密切關係，降水或地下水豐富的地區才會有森林，才會有額外的地表水流出。這項因果關係雖甚為簡單明確，但森林與水關係錯綜複雜，致仍有許多人有上述錯誤觀念而誤認森林可『製造水源』。本文以淺顯易懂的方式闡述森林與水間的關係性，並補以臺灣及世界各地試驗研究結果為佐證，俾希望社會大眾對森林與水相互關係能有正確的認識。

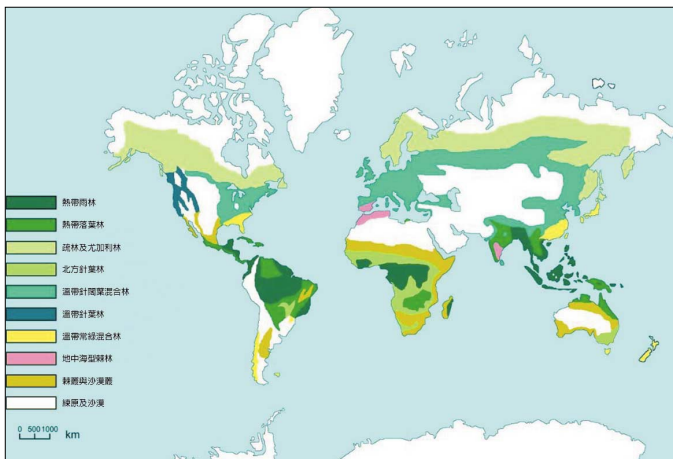


圖 1. 世界森林分佈圖 (FAO, 1990)

● 森林與水

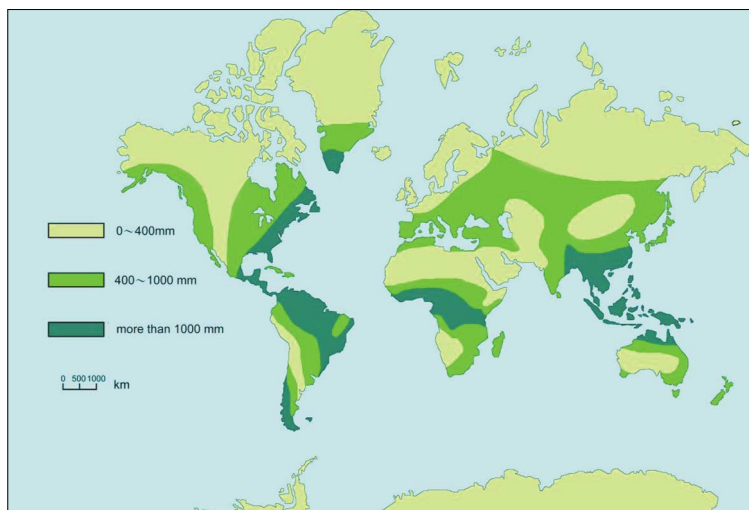


圖 2. 全球降水量分佈圖 (Hudson, 1995)

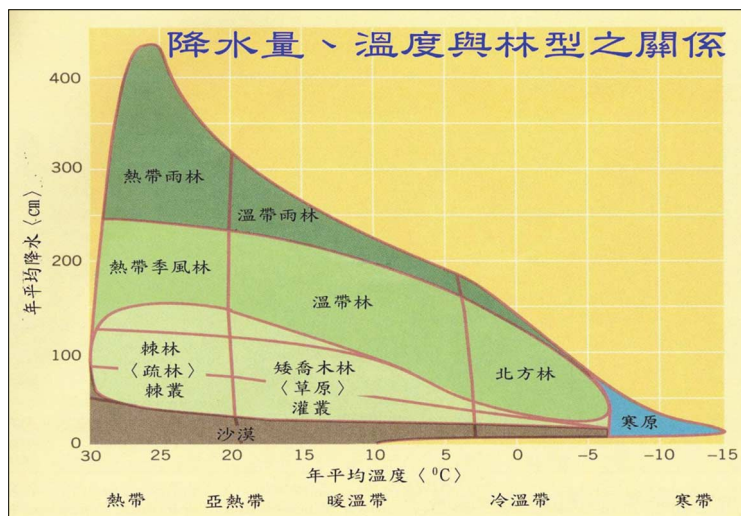


圖 3. 降水與溫度為決定森林型態的兩大環境因子

1-1 水文學與水文循環

欲探討森林與水的關係就必須先對水文學 (hydrology) 及水文循環 (hydrologic cycle) 有所了解。水文學是探討地球上有關水的流動、分佈、理化特性及其對環境影響的科學，它與水力學、氣候學、氣象學、地質學、海洋學等均有高度相關性。森林水文學則是以森林中為主要研究範圍的水文學。水文循環為存在於空氣中的水，遇冷以液態或固態方式下降於地表，因重力作用而向下方流動，嗣後再遇熱返回大氣中的過程；其中包括降水 (precipitation)、截留 (interception)、入滲 (infiltration)、滲漏 (percolation)、逕流 (runoff)、貯留 (storage)、蒸發散 (evapotranspiration) 等部分或全部的水文現象。它是一種循環不止的過程，無法斷定起始，亦可能數種水文現象同時發生。發生於森林的水文循環最為複雜，幾乎所有的水文因子均包含於其中 (見圖 4，說明請見第三章各節)，因此森林水文學是水文學者主要的研究範疇。

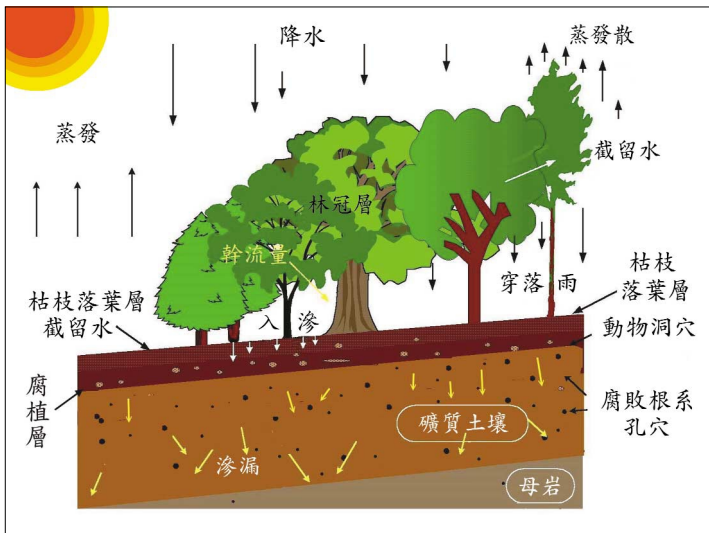


圖 4. 未擾動森林地可能發生的水文現象示意圖 (以台灣森林為例子)

● 森林與水

1-2 臺灣的水資源概況

臺灣全島處於亞熱帶至熱帶多雨區域，且位於北太平洋熱帶氣旋活躍的地區之中，颱風及頻仍的豪雨給臺灣帶來了豐富的雨量。由等雨量線計算臺灣年平均雨量為 2430 mm，沿海降雨較少，向丘陵及山麓區域漸增（但並非越高雨量就越多）。東岸年雨量約 2000 mm，西岸約 1500 mm，中央山脈則約在 3000 mm 以上，最多達 6000 mm，見圖 5（經濟部水資源局，1999）。就年雨量而言，臺灣地區為全球年平均雨量 834 mm 之 2.91 倍，可謂相當豐富。但臺灣每人每年可獲得的可用水量僅為 4500 立方公尺，卻不及全球平均值 9360 立方公尺的二分之一，反為水資源匱乏的地區。何以如此？人口眾多為原因之一，但並非為絕對因素。地勢陡峻與降雨在時間及空間上分配不均，則為徒有充裕之降雨卻缺乏足夠可利用水的主要原因。臺灣標高 1000 公尺以上山區面積佔全島 32%，100 至 1000 公尺山丘陵臺地均佔 31%，100 公尺以下之沖積平原約佔 37%。陡峻的地形本身即為水資源涵養、利用與水土保持上極為不利之因子（圖 6），而雨量的時空分配不均，更加重了此種不利之因素。統計資料顯示臺灣地區全年降雨量的 78% 集中於五至十月，其他 22% 則分佈於十一月至翌年四月間，因而有所謂的乾溼季之分。且溼季中之降雨，多係以豪雨的型態出現；亦即夏季或颱風季節所發生之強度高延時短暴雨。此種降雨在時間上分配不均的現象，越往南部則越明顯。就溼季降雨佔全年降雨的比率而言，北部區域為 62%，中部區域為 78%，東部地區約為 79%，南部地區則高達 90%；故南部地區在乾季時，特別容易缺水。由於上述之地形陡峻與豪雨集中等原因，使臺灣年降雨量中 75% 成為地表逕流，21% 因蒸發散而返回大氣，4% 入滲至地下水層（經濟部水資源局，1999）。此一事實，意味著臺灣

大部分之降雨將多成爲地表逕流而很迅速地流入四周的海洋，亦造成臺灣地區河川枯洪流量極大之差量。在 100 條主要河川中，高屏溪、濁水溪等七條河川曾有每秒超過一萬立方公尺的流量記錄，而世界上達到此記錄之河川亦不過 40 條。主要河川中亦有七條曾有斷流的記錄 (蔡長泰，1994)，這種情形不但使臺灣地區水工構造物設計不易，且使河川供水大受限制。因此，臺灣地區由於地形與氣候之特殊性，縱有充足的降雨及高森林覆蓋率 (約 58%，包括人工林) 亦難免有水資源不足與洪水肆虐之苦，此爲世界其他地區少有之現象。

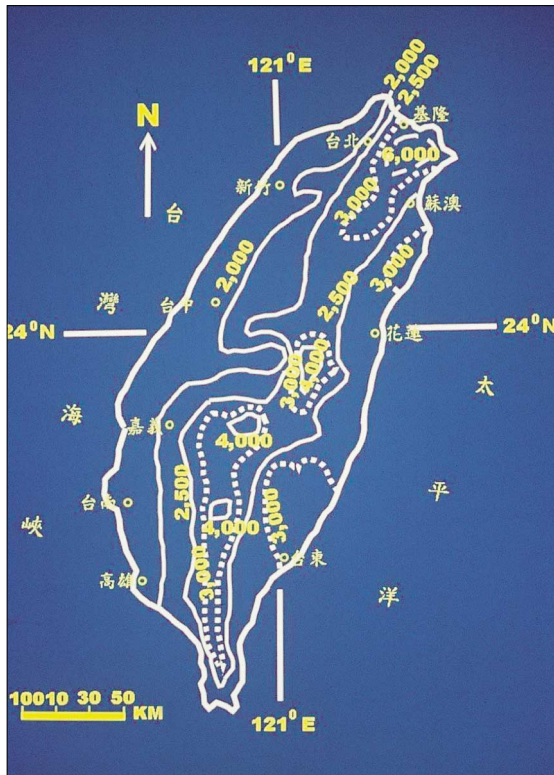


圖 5. 臺灣等雨量線圖

● 森林與水

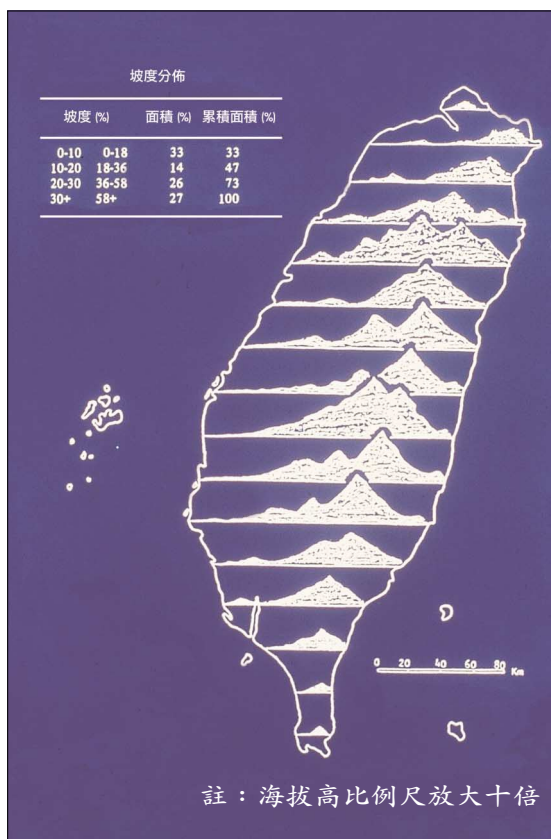


圖 6. 臺灣坡地分佈及剖面圖

1-3 臺灣的森林概況

前已提及臺灣位處亞熱帶，年平均降雨量接近 2500 mm，全島皆適於森林生長，惟目前因平地與低山地區多已開發為農地或市鎮，森林則主要保存於山坡地區。由於地形陡峻，土地標高差距甚大，致使山地區域的林型隨海拔高度的增加而轉為溫帶與寒帶。因此臺灣具備熱帶、暖溫帶、溫帶、與寒帶四種不同林型，擁有多彩多姿繁盛的植物相。

臺灣地區由海拔高度所形成的不同溫度帶，以及其它環境因子 (土壤深度、降雨量、風等) 的影響而形成各種不同型態的森林，依海拔高度由上而下分別為 (劉業經等，1994；路統信，1996)：

- (1) 亞高山針葉樹林：分佈於海拔 3000 m 至林木界線處，以臺灣冷杉與玉山圓柏等純林為主，林下植物以玉山箭竹為優勢 (圖 7)。
- (2) 冷溫帶山地針葉樹林：分佈於海拔 2500-3000 m 之間，主要樹種為臺灣雲杉、鐵杉及臺灣二葉松，間或有臺灣冷杉混生於上部，臺灣扁柏及少數闊葉樹混生於下部。
- (3) 暖溫帶山地針葉林：分佈於海拔 1400-2500 m 間 (北部上限約在 2000 m)，以紅檜及臺灣扁柏、香杉等為優勢樹種，次優勢樹種則為混生之闊葉樹如雲葉、卡氏槲、森氏櫟等。其中臺灣扁柏分佈之上限與下限皆較紅檜多出 200 m。由於從上下方延伸之樹種甚多，因此林相遠較前者為複雜。
- (4) 亞熱帶與暖溫帶雨林：北部分佈於海拔 500-1800 m，南部分佈於海拔 700-2100 m 之間，構成分子以樟科、殼斗科之常綠樹種為主，為臺灣闊葉樹林之主體，所佔面積亦最廣。
- (5) 熱帶雨林：分佈於北部海拔 700 m，南部 900 m 以下之常綠闊葉樹林，惟原始林多已遭破壞。原生林分之主要組成為榕樹類、大葉楠、茄苳、瓊楠等，且均為優勢植物。次生林則以白匏子、野桐、山黃麻、楓香、九芎等為主。
- (6) 海岸林：可再細分為紅樹林與正海岸林兩類。紅樹林北部海岸區以水筆仔為主，中部僅海茄苳一種，

● 森林與水

南部則有海茄苳、欖李及紅茄苳等。正海岸林係指高潮線以上的海岸林木，以木本植物為優勢，常見者有黃槿，血桐、胡頹子等，恆春半島地區則以棋盤腳、蓮葉桐等為主(圖 8)。

根據林務局等單位第三次森林資源及土地利用調查資料，臺灣全島面積共 35,951,000 公頃，森林面積計 2,102,400 公頃，佔土地總面積之 58.5 %。森林地中，天然林面積約 1,527,500 公頃，佔 72.7 %；人工林面積約 422,600 公頃，佔 20.1 %；竹林約 152,300 公頃，佔 4.2 %。相關資料列於表 2 (臺灣省林務局，1995)。

表 2. 臺灣森林面積

森林種類	面積 (公頃)	百分比 (%)
森林地	2,102,400	58.53
針葉樹林	438,500	12.21
針闊混淆林	391,200	10.89
闊葉樹林	1,120,400	31.19
竹林	152,300	4.24
非森林地	1,489,100	41.47
全島合計	3,591,500	100.00



圖 7. 高海拔山區臺灣冷杉、玉山圓柏及高山箭竹所構成的優美畫面 (林試所呂勝由攝)



圖 8. 恆春半島海岸林，現多已劃入墾丁國家公園範圍內 (林試所呂勝由攝)

二、

試驗集水區

集水區 (watershed) 一詞近來常見於報章雜誌，但許多人對其所代表內涵仍模糊。集水區簡單的定義為雨水匯集而集中流出的一個地形單位，通常以山嶺為其上界，且地表水僅有一處出口 (見圖 9)。依此定義，廚房中的水槽與集水區相近似，均具有周界且單一出水口，惟集水區乃限於『地形單

● 森林與水

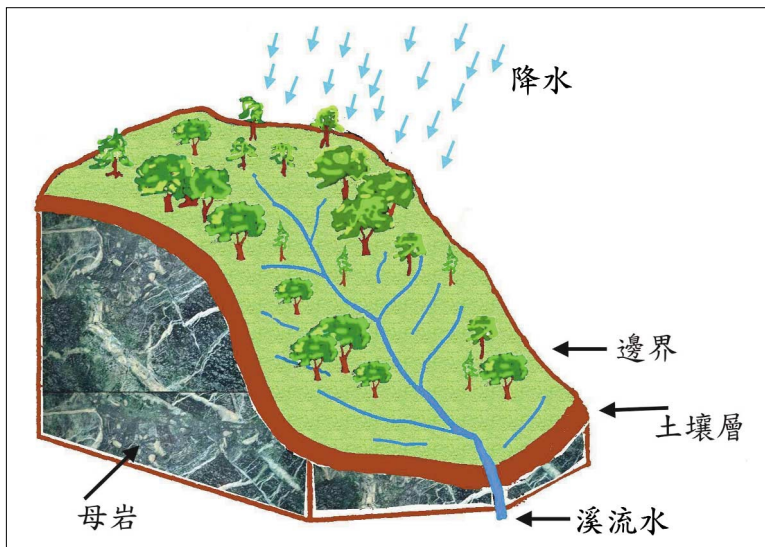


圖 9. 集水區與流域 (drainage basin) 概念相接近，部分降落的雨水將以地表水方式由單一出口流出

位』。在區域內設置量測雨量的裝置並在地表水出口處設流量觀測設施，以便能長期監測雨量及流量記錄的集水區即為試驗集水區。早在二十世紀初期，美國、日本等國家即著手設立試驗集水區，嗣後世界各地陸續設置了多處，臺灣亦不例外。試驗集水區對增進森林中水的流動、分佈及與森林間關係的知識貢獻甚鉅。

2-1 集水區的水平衡

由於水文現象過於複雜而難以全盤瞭解，水文學者常簡化地以系統觀念 (system concept) 來表示各水文因子間的關係。系統為任何空間的一部分，可大可小但必須是連結的

(connected)；水文系統 (hydrologic system) 為地球上的一區域，周遭有邊界區隔，能允許水分、空氣與能量等物理量進入其間，並在內部運作，而於邊界處離開系統。依此觀念，集水區為最方便且易於掌控的水文系統，降雨、降雪為其主要輸入 (input)，森林地區多以溪流水為主要的輸出 (output)，而蒸發散與滲流水則為次要的輸出。

水分進出一系統應有脈絡可尋，再基於物質不滅定律，即可探究其間的關係性，因而有所謂水平衡 (water balance) 關係式。若在一段時間內，將進入集水區的水分取正值，離開者取負值，則集水區的水平衡關係式可表示如下：

$$P - ET - Q \pm \Delta S = 0$$

其中

P 為降水量 (precipitation)

ET 為蒸發散量 (evapotranspiration)

Q 為溪流量 (streamflow)

ΔS 為土壤水與地下水的變化量

(changes of soil moisture storage)

就一水文週期 (如一年) 而言，土壤水與地下水變化總量趨近於於零，可忽略不計，則上式可簡化為 $P = Q + ET$ 。水平衡關係係水文學上應用最廣的基本觀念，凡舉探討與集水區水量有關的課題，均可採用此種方法。

集水區的蒸發散量難以直接量測，森林水文學者常以簡化的水平衡關係式推估之。另一方面，緯度與土地利用接近的集水區，其蒸發散量應當接近，且長期蒸發散量平均值與受降雨量變化的影響較不顯著，據此則亦可藉水平衡關係推估無測站集水區的流量。

● 森林與水

2-2 配對集水區試驗法

水文學研究者常以配對集水區試驗法 (paired watershed method) 來探討伐木、築路或其他經營作業對森林生態系所產生的影響。此種方法係選定二相近的集水區作為試驗場所，先行收集若干年雨量及流量等基本資料，俾建立二集水區流量等主要參數間的數學關係式；再行將其中一集水區進行某種處理 (treatment)，並比較處理後二集水區相關性改變情形，即可推知該項處理的影響效力。資料收集階段稱為檢定期 (calibration period)，接受處理或受干擾的集水區稱為處理集水區 (treatment watershed)，另一集水區則為對照集水區 (control watershed)，處理後實計量測的數值與數學關係式推估值間的差異，稱為處理效應 (treatment effects)。配對集水區試驗法能減低氣象因素所產生的影響，使水文研究者能精確地獲知各項經營作業對集水區所帶來的衝擊（圖 10）。圖 11 則為林業試驗所蓮華池 4 號集水區砍伐前後與鄰近 5 號對照集水區之累積流量關係圖（雙累積曲線圖，double mass curves），其中 4 號集水區估測流量為以砍伐前檢定期二集水區流量間相互關係公式所推算出的數值，累積線橫向的位移可視為處理效應的顯現 (Hsia and Koh, 1982)。

2-3 臺灣的試驗集水區

美籍集水區專家 Dr. Robert E. Dils 1963 年來訪考察後，認為臺灣自然環境特殊，坡地土地利用方式複雜，且水旱災害頻繁，乃建議政府應儘早進行集水區經營試驗，以探討合理的森林經營方法。次年 (1964 年) 林業試驗所獲得農復會及林務局資助，於六龜分所扇平工作站境內著手籌建五處森林試驗集水區。設置初期由於經驗有限，人力配備不足，致遭遇許多困難，幸賴前農委會副主任委員葛錦昭先生、林試所

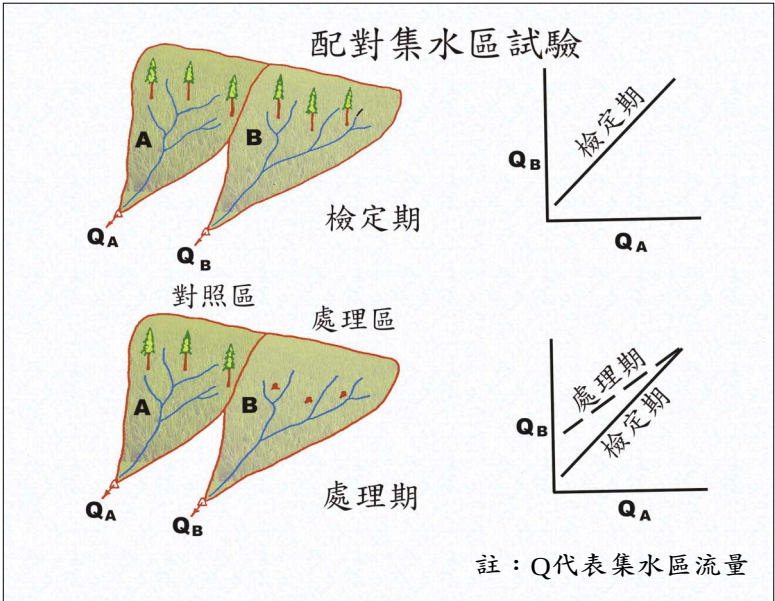


圖 10. 配對試驗集水區法示意圖 (Brooks et al., 1992)

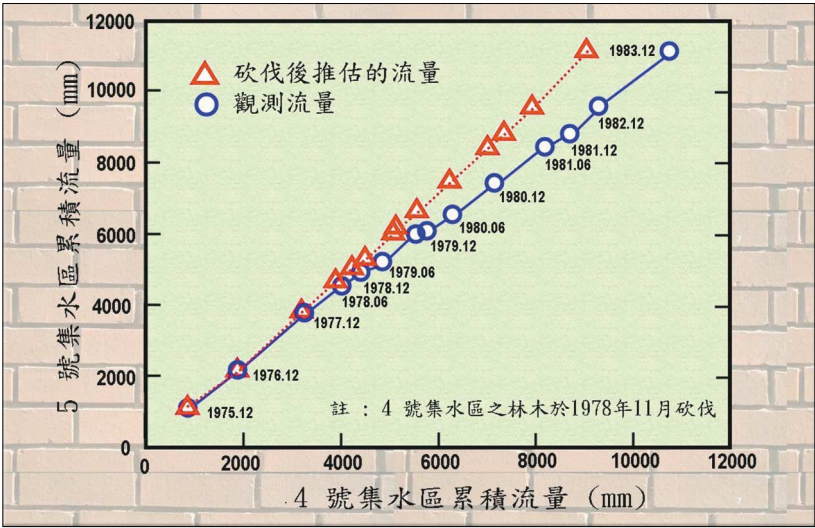


圖 11. 蓮華池4號集水區皆伐前後流量關係圖

● 森林與水

楊楚淇先生及漆陞忠先生等先進不辭勞苦的投入與努力，一一克服諸如設計洪水、淤砂、堰口形式、漏水等問題，並於 1965 年間陸續進行觀測，正式開啓臺灣集水區經營研究工作。茲後林試所陸續於中部、東部、及北部地區增設蓮華池、畢祿溪、太麻里 (已因漏水及淤砂而撤銷)、福山等試驗集水區，林務局曾亦於坪林與花東地區設置若干試驗集水區，惟只進行短期的觀測。目前臺灣地區仍維持觀測的試驗集水區計 11 座，均屬林業試驗所負責，其地形特性如表 3，相關位置則如圖 12。

表 3. 臺灣地區試驗集水區地形特性

名 稱	面積	海拔高 (m)	平均 坡度 (%)	設置時間
福山一號	37.98	842	54	Jan, 1993
福山二號	94.15	922	85	Jul, 1995
畢祿溪十一號	144.0	2530	82	Aug, 1969
畢祿溪十二號	238.0	2622	74	Aug, 1969
蓮華池一號	3.53	741	63	Jan, 1967
蓮華池二號	13.13	812	56	Jan, 1967
蓮華池三號	3.40	723	69	Jan, 1967
蓮華池四號	5.86	763	40	Jan, 1967
蓮華池五號	8.39	757	41	Jan, 1967
扇平二號	50.76	1064	69	Jan, 1965
扇平四號	21.40	1057	55	Jan, 1965

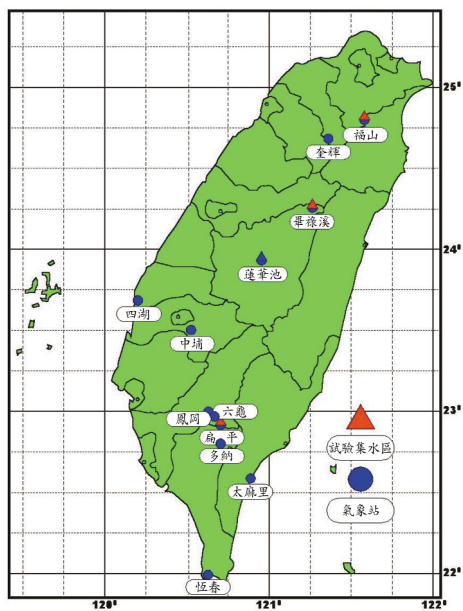


圖 12. 林業試驗所試驗集水區及氣象站位置圖



圖 13. 林試所蓮華池分所 3 號集水區量水堰圖

● 森林與水

臺灣的試驗集水區多屬上游小型森林集水區，堰口斷面多採取分段複式，下方為 90° V 型，其上接矩形堰口，以便掌握臺灣山地集水區高流量與低流量差異懸殊的特性 (圖 13)。林試所各試驗集水區均配有一氣象站，觀測項目包括氣溫 (含每日最高最低溫度)、濕度、降雨量、蒸發量、風速、風向、日照時數、雲量、日輻射量等多種 (圖 14)。此等試驗集水區及相配合的氣象站，長期收集上游森林集水區水位與氣象記錄，部份氣象站已累積三十餘年的記錄，是一項極為重要的基本資料庫，且已成為全球研究熱帶及亞熱帶地區森林水文因子特性的主要場所之一。



圖 14. 林試所蓮華池分所森林氣象站

2-4 臺灣的森林水文及集水區經營試驗研究

在林業試驗所、中興大學、臺灣大學等機關學校研究同仁的努力下，臺灣地區森林水文研究可謂已奠定良好的基礎，茲將相關試驗研究結果分類略述如下。

(1) 森林水文學及林木與水關係基礎研究

此等研究的目的是在於了解臺灣地區森林集水區的水文特性。已進行的試驗研究包括林冠截留、入滲、蒸發散、土壤沖蝕、地下水、流量歷線以及水文模式應用等多項，範圍相當廣闊，且已獲得若干成果。

(2) 森林經營對水土資源的影響

此等研究多針對不同類型的森林 (如針葉林、闊葉林及針闊葉混交林) 以及經營方式，探討對水質水量、土壤流失、及土石流等的影響。其中較著名的試驗當屬蓮華池四號集水區的皆伐試驗，該試驗指出臺灣地區天然闊葉林轉變為農牧地，可於來年的降雨季節增加 240 mm 的流量。然而此等轉變對洪水發生頻率、崩塌、及土石流等卻未進行任何研究。惟近年來，臺灣的森林經營以維護保安林為主，因此研究重點多轉向於林火及森林病蟲害等方面。

(3) 水土保持

主要在發展適用於陡坡地的沖蝕控制、邊坡穩定方法及潛在危險地區辨識，且已研發如廢輪胎壩、草溝、C型排水溝、打樁等均屬經濟有效的簡易水土保持措施。而山坡地廣泛使用作為覆蓋或敷蓋作物的百喜草，及採用的九芎、榕樹等枝幹打樁以穩定邊坡，均為值得推廣於國際的水土保持措施 (圖 15)。

● 森林與水

(4) 生態系經營

生態系經營研究主要在探討如何兼顧生態、社會、與經濟等層面以經營森林，並試圖瞭解不同林型、土壤、濱岸地區、及土地利用等相互間的關係。1994年起在國科會支助下，陸續於林試所福



圖 15. 九芎打椿萌芽情形

山分所、鴛鴦湖、關刀溪、塔塔加及南仁山設立了五個長期生態研究 (LTER) 場所 (圖 16)，有系統的進行長期性地探討，而林試所亦於 1997 年起傾全力於六龜試驗林進行更具代表性的生態系經營研究。此等研究至少可使吾人對自然環境以及其組成分子間相互關係更加了解，並提供教學研究資料與場所，應予肯定。



圖 16. 長期生態系經營研究

三、

與森林相關的水文因子

圖 4 已標示出發生於森林中可能的水文因子，森林在水文循環所扮演的角色不宜僅考慮森林本身單一因子，其影響程度尚因土壤、氣候、降雨等其他條件而有顯著差異。本節詳細說明與森林有關水文因子之內容及其相互間關係。

3-1 降水

凡降落於地表的水，不論其為固態或液態，統稱為降水。降水為生態系中水分最主要的輸入途徑，其量的多寡及時間分佈，對隨後發生的各項水文現象有決定性的影響。大氣環境需滿足 (1) 水氣含量達到飽和 (2) 具有灰塵、鹽粒等結核，以利水氣凝結 (3) 凝結的水氣必須相互結合，並大到可抵抗地表上升的氣流等三條件，方有可能發生降水。而降水的種類則有：雨 (rain)、濛或毛毛雨 (drizzle)、霰 (sleet，為凍結的小雨滴)、雪 (snow)、雹 (hail)、露 (dew)、霜 (frost) 等多種，其特性及形成原因可參考一般水文及氣象書籍。

降水量通常以深度表示，常用的單位為公釐 (mm) 或英吋 (inch)，降水深度乘以面積可得降水總量。由於無法量測降落於集水區所有的降水，因此僅藉取樣法推求整個區域降水量。降水的取樣多以雨量計為之 (圖 17 及 18)，目前常用的雨量計有標準雨量筒及自計雨量計等兩種；二者均是由承雨器、容雨器及外筒三部分所組成。標準雨量筒可量計一段時期內的總降雨量，其高度為 60 公分，承雨器為口徑 20 公分漏斗狀構造物；容雨器為長圓筒型，內徑斷面積為承雨口斷面積之十分之一，因此貯水深度的十分之一即為降雨量。自計雨量計為能將時間和降雨量自動記錄的降水量測裝置，可分為虹吸式及傾斗式兩類，承雨器口徑與標準雨量相同筒；其原理則均是藉承雨器所收集的雨量牽動記錄裝置，記



圖 17. 自計雨量計



圖 18. 虹吸式雨量計

錄時間及單位時間內的收集量或傾倒次數。降雪的量測除可於雨量計承雨口裝設加溫裝置，以融化積雪外，亦可直接量測地面積雪的深度再換算成雨量深度。通常 8 至 10 公分新降的雪，相當於 1 公分降雨量。

目前臺灣地區絕大部分的雨量計多屬電子型傾倒式自計雨量計，傾斗容量約為 157.1 cc，相當於承雨器所收集 0.5 公釐的雨量，傾倒時藉磁場感應產生一脈衝，而隨附的感應及記錄裝置則可記錄各時段內脈衝的次數，並儲存於資料匣中。

精確地推估一集水區降水量是相當困難的。風的吹拂及其所造成的亂流、雨滴在承雨口的濺入濺出、建築物或樹木枝葉的遮蔽等，均會產生誤差，而影響雨量量測的精確度。欲減少取樣誤差，雨量站應設置於開曠處，其曝露程度至少要達到從雨量計承雨口以 45° 仰角向上延伸線無障礙物的程度。試驗集水區內通常都設置兩座以上的雨量觀測站，再由算術平均法、等雨量線法、徐昇法 (Thiessen method)、距離平方權重法等方式，計算全集水區平均雨量。

3-2 降水截留

您是否有降雨時躲在樹下或森林內的經驗？降雨初期大部份的降雨會附著於林木的枝葉上，而不會到達地面上 (圖 19)，隨著降雨時間的增長及量的增加，部分林木枝葉附著的水量達飽和後，則方有水滴自葉尖等處滴落，或沿樹幹流下，林下即不再處於乾燥狀況。部分降水經樹冠層及枯枝落葉層攔截而無法達到土壤層的作用稱為截留，穿過樹間空隙或由枝葉滴落的降水稱為穿落雨 (throughfall, 圖 20)，而沿樹幹流下的部分則為幹流水 (stemflow, 圖 21)。樹冠截留量與降水雨量間具有下列之關係：

● 森林與水



圖 19. 樹冠所攔截的降水量相當可觀



圖 20. 穿落雨量測

$$\text{截留量} = \text{降水量} - (\text{穿落雨量} + \text{幹流量})$$

一般而言針葉樹因葉面積指數 (Leaf Area Index) 大且降雨會以水滴方式附著於枝葉間因此攔截的雨水較闊葉樹為多 (附著於闊葉樹葉面的水多呈薄膜狀，總體積較小，圖 22 及 23)。試驗顯示針葉樹林可攔截約全年降水量的 25%，闊葉樹林則在 10% 至 18% 之間 (Brooks et al., 1992; Kochenderfer et al., 1998)，主要係隨降雨特性、季節分佈及林冠組成及密度不同而有所差異，強度大的降雨截留比率較低，熱帶森林較溫帶森林截留比率高。臺灣中部地區天然闊葉樹林可攔截全年降雨量的 13% (陸象豫、唐凱軍，1995)，北部地區可能



圖 21. 幹流量量測



圖 22. 針葉樹的枝葉。水分多以水珠狀附著於其上，體積較大，因此針葉林所截留的雨水較闊葉樹為多



圖 23. 雨水浸濕的闊葉樹樹葉，附著的水分呈水膜狀

● 森林與水

略高，南部則較低；針葉樹林在臺灣尚缺具體資料。

在海岸山脈等多霧的森林區，截留作用可能產生相反的作用；概此等地區的凝結作用可較空曠地區高出 30 % 至 50 %，致使較多水氣可附著於林木枝葉上形成露，進而滴落產生所謂的霧雨 (fog rain)。諸如夏威夷、加州海岸山脈及捷克斯洛伐克等少數地區的森林，會發生此種情形。此等地區截留作用可增加水氣凝結的機會，反而增加降雨量。

3-3 蒸發散

蒸發散是蒸發 (evaporation) 與蒸散 (transpiration) 兩種作用的總稱。蒸發乃水分自物體表面以水蒸氣返回大氣的過程，蒸散則為水分由根系吸收後，經由枝葉上的氣孔散失於大氣的過程。森林中蒸發的水分多為截留的雨水，蒸散的水分則多為土壤水。除土地利用方式外，蒸發散量主要決定於溫度、太陽輻射、空氣相對濕度、風速等氣候因子；而土壤所能提供蒸發散量的最大值，則決定於土壤質地與深度兩大因素。截至目前尚未有直接有效的方法可量測一棵樹的蒸發散量，更遑論整個集水區；故多藉著集水區水文平衡關係，採取間接推估法估算之。譬如蓮華池 4 號集水區年平均降雨量為 2057.78 mm (1975-1992)，平均逕流量為 1121.65 mm，則集水區年蒸發散量推估值約 846.13 mm，約為大型蒸發皿所量測的年蒸發量 909.40 mm 的 93 % (陸象豫等，1997)。

勢能蒸發散量 (potential evapotranspiration) 係指在水分充分供應情況下，覆蓋完整植生地在單位時間內的蒸發散量，其量多寡僅取決於供應的能量。亦即勢能蒸發散量為在某種能量供應狀況下，一地區最大的蒸發散量。基於此種表示方法僅為能量的函數，故有許多推算勢能蒸發散量的理論或經驗公式甚早即被提出 (Thornthwaite and Mather, 1955;

Hamon, 1961)，由再以土壤水等關係可藉勢能蒸發散量推估實際蒸發散量。

滲漏計 (lysimeter) 為估算蒸發散量最常使用的裝置；其基本構造為一底部半封閉（僅留出水口）的桶狀或槽狀物，內盛土壤並可栽植作物或林木，如圖 24 及 25。降落至滲漏計的雨水及流出的地表逕流與地中逕流可加以監測，而內部土壤水的變化亦因半封閉的空間而較易掌握，故藉水文平衡關係即可推估蒸發散量。如欲量測植物的蒸散量，則需以不



圖 24. 林試所蓮華池分所的滲漏計

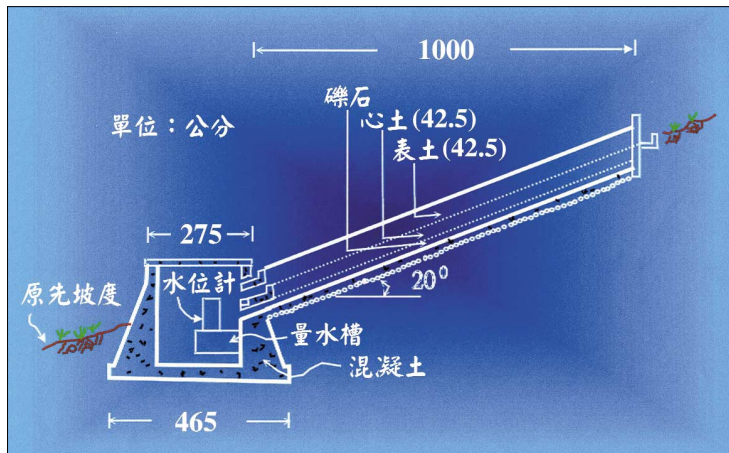


圖 25. 蓮華池滲漏計剖面圖

● 森林與水

透水物質覆蓋滲漏計的整個地表。

圖 26 為美國 Hubbard Brook Experimental Forest 試驗集水區長期雨量與流量統計結果 (Bailey, 1998)，雨量與流量之差可視為蒸發散量，由圖 26 可看出夏季時森林蒸發散量的水分消耗情形。臺灣蓮華池五號試驗集水區的統計資料則如圖 27 所示，因蓮華池地區全年均為生長季節，各月分蒸發散量消耗的差異較不明顯。

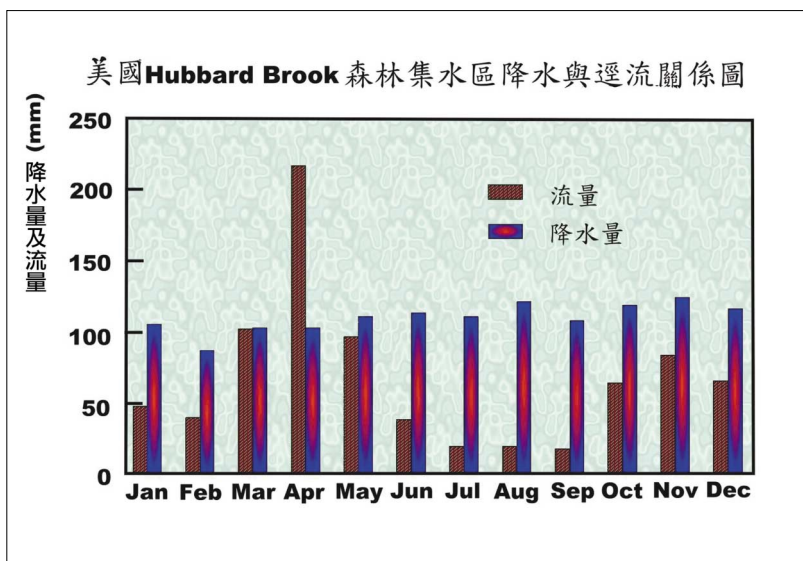


圖 26. 美國 Hubbard Brook 森林試驗集水區的記錄顯示降水量與逕流量在生長季節有明顯的差異，證實森林會消耗相當多的水分 (Bailey, 1998)

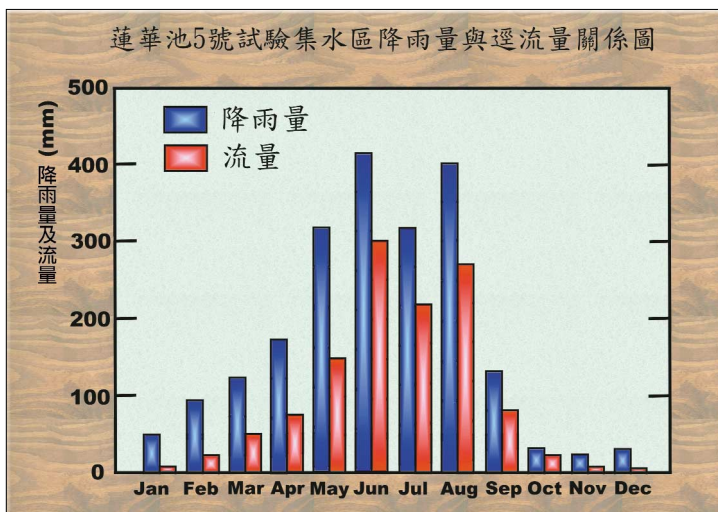


圖 27. 蓮華池 5 號試驗集水區降雨量與逕流量關係圖，因亞熱帶地區植物終年繁茂，較不易顯現森林蒸發散所消耗的水分

3-4 降雨損失

蒸發散是土壤-植物系統喪失水分的主要途徑。樹冠層及枯枝落葉層所攔截的降水終將被蒸發返回大氣而無法進入土壤層，當然更無緣進入溪流，此部分的降水稱為降雨損失 (rainfall losses)。熱帶森林的降雨損失可達每年降雨量的 30 %，乾旱區或植被稀疏地區，此種損失量則較低。強度低延時長為主要降雨型態的地區，如臺灣北部森林地，降雨損失佔總降雨量的比率則相對地較高 (圖 28 及 29)。

3-5 入滲與滲漏

水分由地表進入土壤的過程稱為入滲 (圖 30)，而進入地表後受地心引力影響而向下或側方移動直至地下水層或溪流的現象為滲漏；最大的入滲速率，則稱為入滲容量

● 森林與水

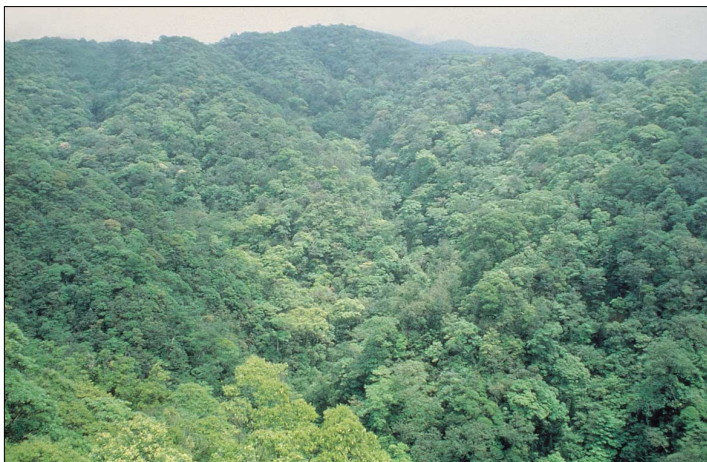


圖 28. 臺灣中部地區的天然闊葉樹林，每年截留的雨量約佔年雨量的 11.3 %



圖 29. 臺灣高海拔山區的針葉樹林，截留量較闊葉樹林為高



圖 30. 地表入滲速率的量測

(infiltration capacity)。入滲容量為一動態的數值，降雨初始時最高，隨著降雨延時增加而遞減，其主要原因之一為土壤膠體粒子遇水膨脹阻塞土壤孔隙所造成。森林地由於樹冠層及枯枝落葉層的保護地表，可吸收雨滴的打擊能量，一則可避免土粒分離而遭沖蝕，一則可減免地表遭夯實而發生密封現象 (sealing，較小的土壤顆粒被激起並塞封於土壤孔隙間，因而減緩入滲，圖 31)，亦可減緩地表水流的速度，進而增加入滲機會 (圖 32)。此外，森林土壤更具有有發達的土壤構造，高孔隙率以及動植物遺留的孔穴或通道，更大大提高入滲容量，見表 4 (Lee, 1980)。因此其入滲容量會高於絕大部分降雨的強度，降入森林的雨水多能進入土壤層內，滿足涵養水資源的先決條件。

● 森林與水



圖 31. 裸露的表土，遇雨打，土粒飛濺，不但容易造成沖蝕且會封閉孔隙，待乾燥後，地表往往結成一層硬殼，阻礙水分進入土壤層



圖 32. 森林的樹冠層及枯枝落葉層保護地表，可防止沖蝕並維持林地高入滲速率

表 4. 土壤入滲容量與質地及植生覆蓋間之概略關係 (Lee, 1980)

質地	入滲容量 (mm/hr)	
	裸露地	植生地
黏土 (Clay)	0 - 5	5 - 10
黏質壤土 (Clay loam)	5 - 10	10 - 20
壤土 (Loam)	10 - 15	20 - 30
砂質壤土 (Sandy loam)	15 - 20	30 - 40
砂土 (Sand)	20 - 25	40 - 50

3-6 漫地流

漫地流 (overland flow) 又名為地表逕流 (surface runoff)，係流經地表的水，通常發生於入滲速率較小(如：不透水層上方或土壤水飽和區域) 或地形陡峻的地區，發生時機則以降雨強度大於地表入滲容量時為最常見。水分以漫地流的方式可很快的流至河川渠道中，而成為溪河直接逕流的主要部分，尤以高度開發的集水區最為顯著 (圖 33)。漫地流由於流動速率快，同時因水流向下方集成的特性，致其沖蝕破壞力隨水流聚集而急速遞增，成為構成蝕溝侵蝕的原動力 (圖 34)。然而森林集水區因地表入滲容量多大於一般的降雨強度，因此甚少發生漫地流，即使有也多位於鄰近溪谷、道路路面、枯枝落葉層遭破壞或土壤受夯實的區域。而森林地所發生漫地流也會受地表枯枝落葉的阻絕而減緩流速，不致造成嚴重的破壞。

● 森林與水



圖 34. 匯聚的地表逕流是主要的土壤沖蝕原動力



圖 33. 林道路面上的地表逕流

3-7 次地表逕流

次地表逕流 (subsurface flow) 又稱地中流 (interflow)，為入滲至土壤層後再經由較大孔隙的流路流至溪流河道的水分。森林集水區的次地表逕流主要係經由腐敗根系或動物洞穴等流路於暴雨中期後起快速地進入溪河渠道內，為暴雨逕流 (stormflow) 的主要部分 (圖 35 及 36)。高入滲容量以及高水力坡降 (hydraulic gradient)，為產生次地表逕流的主要條件；或入滲的水遭遇透水性較差的地層，而沿不透水層上方橫向流出，成為次地表逕流。臺灣的森林多位於陡峭的山區，集水區坡面入滲容量亦大，故每次暴雨後由山地森林區流出的洪水主要就是此部分的水流。

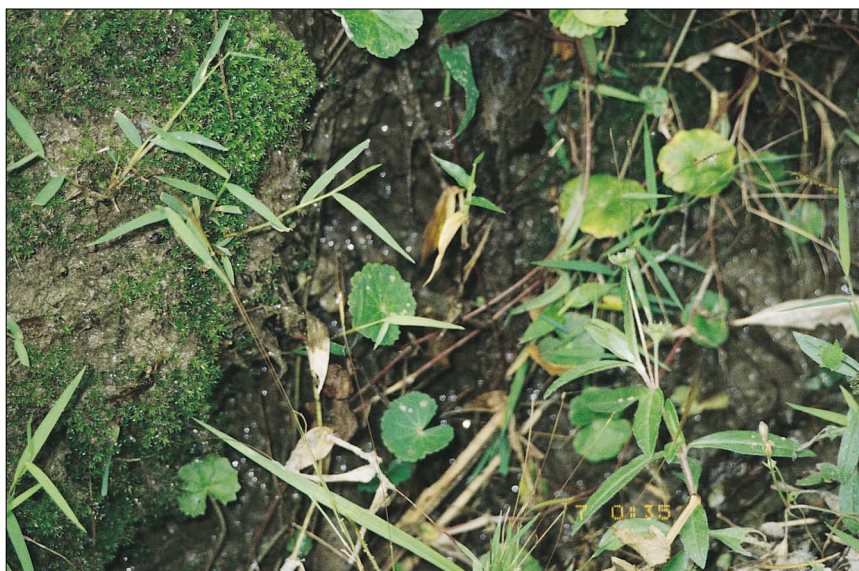


圖 35. 森林土壤層的滲流水



圖 36. 次地表逕流的量測

3-8 基流

基流 (baseflow) 是指兩場暴雨間 (通常以6小時的時間間隔來區分不同場次的暴雨) 的低水流量，其來源多為地下水或深層土壤細孔隙間緩慢釋出的土壤水 (亦稱遲滯性次地表逕流，delayed subsurface flow)。滲漏的水進入地下水層後，通常需要相當長的時間方能再滲流出，進而成為溪流水的一部分。因此，基流與上述三種水流特性差異較大，

水文學者常以某種法則將其與其他部分流量主觀地分離出，稱為基流分離 (baseflow separation，圖 37)。一河川基流量佔總流量的比率越大，則越有利於水資源開發利用，森林涵養水資源的功能即在提高並確保集水區的基流量。

若以 $0.0005 \text{ l/s} \cdot \text{ha} \cdot \text{h}$ 固定斜率分離蓮華池3號試驗集水區 1975-1992 流量記錄，得平均基流量佔總流量的比率為 36.21%，變動範圍從 18.34% 至 48.59%，並顯示流量越大的年份其基流量所佔比率越低。森林集水區非暴雨時期的流量多以基流方式出現，且少有枯竭情形。

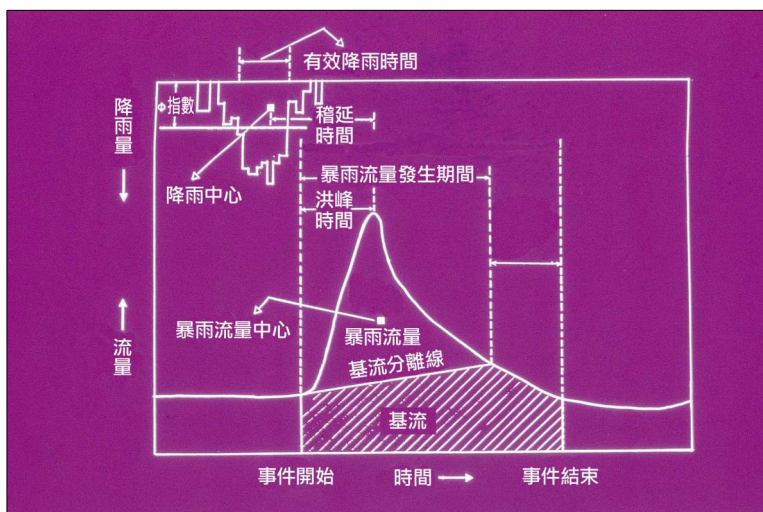


圖 37. 基流分離方法中相關的水文因子

四、森林土壤

談及森林與水就不能不討論土壤，土壤位於地殼的最上部，由未固結的礦物及有機物兩大類的固體物質所組成。土壤乃陸生植物的培養體，沒有土壤森林難以立足，水文現象亦因為土壤而更趨複雜且變化多端。本章不對基本土壤學作太多的論述，僅以森林土壤特性為開端，介紹與森林水文有關的土壤特性。

4-1 森林土壤的特性

森林土壤最大的特色為具有枯枝落葉層 (litter floor) 及腐植層 (humus layer) 二種富含有機物的層次。枯枝落葉層位於地表最上端 (土壤學上稱之為L層)，係由掉落的枝葉及果實

● 森林與水

等所構成，具有保護地表防止沖蝕，維持土壤孔隙暢通等作用。腐植層則可概略分為有機殘體 (organic residuals) 及腐植質(humus) 兩部分；有機殘體在分類上稱為 F 層，有機物的來源多已不易辨識，而其中一部分已遭分解；腐植質在分類上稱為 H 層，為無定形物，來源無法鑑別，其下層與礦質土 (mineral soil) 混合 (金恆鑣，1991)。此兩種有機層的覆蓋保護作用，除可吸收雨滴的打擊能量外，免除土壤顆粒遭分離而沖蝕，亦可篩除入滲水中的雜質，防止土壤孔隙被堵塞，進而維持較高的入滲速率。同時此等腐植質對水的吸納能力特強，能吸附本身重量兩倍以上的水分，可大為增加土壤層的保蓄功能 (Brooks et al., 1992)。有機層亦為土壤生物活動的主要區域，為林木水分與養分主要的攝取區域，對土壤構造的化育皆具有顯著的影響。

另一特性為森林土壤富含植物根系及大小不一的土壤孔隙。不論是活的或是死亡的根株，皆是土壤水、營養與空氣輸送的通道，根系亦為土壤化育的一主要影響因子。此外，森林土壤中常因植物腐敗的植物體，無脊椎動物或小型脊椎動物的洞穴或活動鑽掘，而形成孔徑大小不一但分佈綿密的網路系統。此等網路系統除可增加土壤孔隙外，亦可作為水分流動的渠道，入滲的水分可藉此渠道網路迅速地導入各方土壤層內，進而再全面性地擴散至較小的土壤孔隙內。此種管流 (pipe flow) 為次地表逕流的主要路徑，藉此途徑森林土壤能快速且有效的吸收下降的雨水，並即刻地輸送至整個土壤層，滿足涵養水資源的必要條件，同時對土壤水與地下水補助亦有相當助益 (陸象豫，1996)。

臺灣地區的天然林枯枝落葉層平均深度依次為：針闊葉混交林 8.0 cm、臺灣二葉松林 7.9 cm (圖 38)、人工杉木林 4.7 cm、天然闊葉林 3.98 cm、桂竹林 2.9 cm，每公頃每年約



圖 38. 畢祿溪試驗集水區臺灣二葉松林地的枯枝落葉層

可累積 5700 - 8500 公斤掉落的枝葉花果等植物體。落地後的植物體約經 5 個月，即可用肉眼觀察出分解現象；而堆積的厚度，則隨森林組成、地形及氣候等特性而異 (陸象豫等，1988；陸象豫、漆陞忠，1988)。臺灣森林土壤則多屬淺薄，有效深度多在 50 公分以下 (圖 39)，分類上可概略區分為灰化土群 (多分佈於海拔 1800 公尺以上)、棕色森林土群 (主要分佈在海拔 500 至 1800 公尺間)、紅黃色土群 (以海拔 800 公尺以下地區為主)、黑色土群 (主要分佈於大屯火山群及東部海岸山脈) 等大類 (台灣省林務局，1999)。



圖 39. 蓮華池試驗集水區
森林土剖面圖

4-2 土壤性質

位於枯枝落葉層下方及母岩層上方的區域稱之為礦質土 (mineral soil) 層，此區域主要由大小不等形狀各異的無機物粒子組成，間雜有多寡不一的有機質，孔隙則為水或空氣所充滿，是構成土壤的主要層次。土壤質地 (soil texture) 及土壤結構 (soil structure) 為決定礦質土層物理特性的兩大因素。礦質土中，黏粒 (clay)、粉粒 (silt)、及砂粒 (sand) 等礦質粒子所佔的比率決定土壤的質地；砂粒粒徑最大，粉粒次之，黏粒最小，單獨黏粒肉眼幾乎無法辨識 (見表 5)，但可用觸覺分辨。砂土含有較高比率的砂粒，一般視為粗質地土壤；黏土以黏粒所佔比率較高，為細質地土壤；以粉粒為主要組成的土壤稱為壤土 (loam)，物理特性介於前二者之間。細質地土壤孔隙率 (porosity，單位土壤體積內孔隙所佔之百分比) 通常較高 (黏土孔隙率約 33-60%)，可容納較多的土壤水；粗質地土壤孔隙通常較大，但整體的孔隙率卻較低 (砂土孔隙率約 25-50%) (Brooks et al., 1992)。

表 5. 美國農部土粒粗細分級標準

粒徑級	直徑範圍 (mm)
砂粒 (sand)	0.05 - 2.0
極粗砂	1.0 - 2.0
粗 砂	0.5 - 1.0
中 砂	0.25 - 0.5
細 砂	0.10 - 0.25
極細砂	0.05 - 0.10
粉粒 (silt)	0.02 - 0.05
黏粒 (clay)	< 0.02

土壤顆粒間因物理及化學鍵的吸引作用，彼此糾結纏繞成團粒，形成片狀、柱狀等不同類型，稱為土壤結構，亦即土壤顆粒的空間配置及排列方式。土壤結構受質地、有機質含量及土壤生物所影響；而土壤結構對入滲及滲漏水的流路 (pathway) 有決定性的影響，結構發達的土壤，水分及空氣流通較容易，因此入滲容量通常較高。再者，土壤顆粒因受重力影響，越下層越緊密，密度亦越高，孔隙亦遞減；是故入滲的水經滲漏至下層土壤時，移動速度會漸緩。

4-3 土壤水

土壤水 (soil moisture) 的多寡足以主宰其上部林木的型態，進而影響森林的分佈。土壤若僅養分豐富而獨缺水，則毫無生產力可言；反之，若能供應適量的水，即使貧瘠如砂土，亦可能孕育出良好的森林 (金恆鑑，1991)。

入滲進入地表的水分一部分因蒸發散而返回大氣中，一

● 森林與水

部分因滲漏而進入地下水層，其餘的水分則多暫時儲存於土壤孔隙間。土壤孔隙是大小不一但相通的空間，可佔土壤整個容積的 20 至 60 %。此等孔隙非為水即為空氣所填充 (圖 40)，土壤水乃存在於土壤孔隙中的水，亦即土壤顆粒外圍的水分。土壤孔隙被水完全充滿時稱為飽和，飽和的水分在自然狀況下經約兩天的時間，大孔隙 (macropores) 中的水分因受重力作用而滲漏至地下水層或至溪流，僅較小的孔隙 (micropores) 有水充填，此時土壤的水分含量稱田間容水量 (field capacity)。當土壤繼續乾燥，土壤顆粒對剩餘水分的吸引力逐漸增強，終至植物根系亦無法吸收水分，至葉面開始凋萎，此時的土壤含水量稱為臨界凋萎點 (wilting point)。田間容水量與臨界凋萎點二者間水分含量之差，是植物主要吸收利用的水分，稱為有效土壤水 (available moisture)，其數值則為有效保水量 (available water-holding capacity)。臨界凋萎點的土壤水分含量，細質地的土壤較粗質地的土壤為高 (見表 6 及圖 41)，森林土壤的含水量幾乎不會降至臨界凋萎點，即使在長期乾旱下，僅局部地區的淺根系植物會有枯萎的現象。

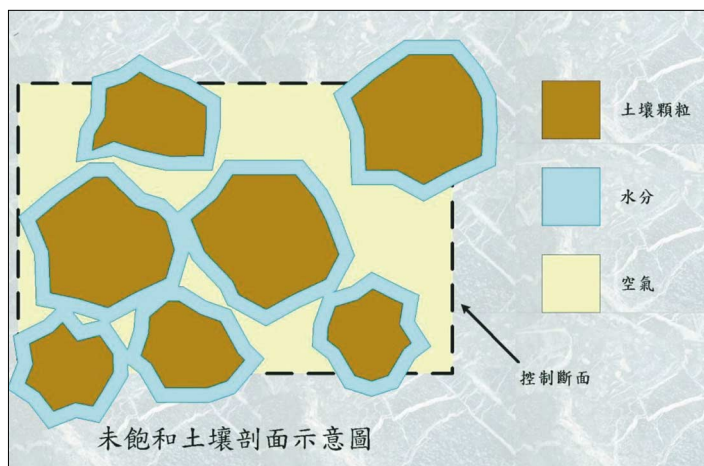


圖 40. 水分與土壤顆粒在未飽和土壤層中關係示意圖

表 6. 一公尺單位深度下，不同質地土壤之土壤水含量 (Lee, 1980)

質地別		田間容水量	臨界凋萎點	有效土壤水
		mm	mm	mm
砂土	(Sand)	100	25	75
細砂土	(Fine sand)	116	33	83
砂質壤土	(Sandy loam)	158	50	108
細砂質壤土	(Fine sandy loam)	217	67	150
壤土	(Loam)	267	100	167
坊質壤土	(Silty loam)	283	116	167
輕黏質壤土	(Light clay loam)	300	133	167
黏質壤土	(Clay loam)	317	150	167
重黏質壤土	(Heavy clay loam)	325	175	150
黏土	(Clay)	325	208	117

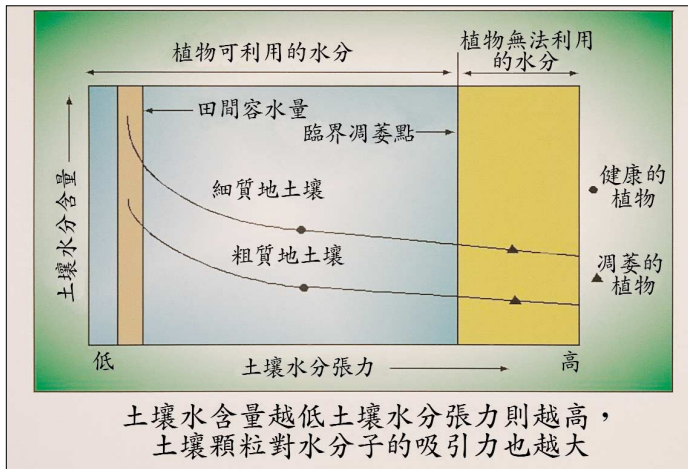


圖 41. 土壤水分張力與土壤水含量關係圖。在乾旱情形下，水分子與周遭土壤顆粒緊密結合，致植物根系無法吸收，植物便會凋萎

● 森林與水

土壤水的量測的方法有烘乾稱重法、張力計法、電阻塊法、中子散射法、壓力膜與張力碟法等多種，其中以烘乾稱重法最為精準，但須破壞土體攜回實驗室量測。森林水文學家常需藉著不同的方法以推求土壤水含量，以獲知水分在土壤中的變化及移動情形，進而可推估植物蒸發散量以及掌握水分消耗情形。

4-4 土壤水的移動

土壤水在孔隙間移動、儲存及被植物根系吸收均涉及各種能量的消長。作用於土壤水分的勢能包括：重力 (gravity)、表面張力 (surface tension)、附著力 (adhesion，為土壤粒子與水分子間的引力)、基質力 (matric force，土壤粒子對水的吸附及微管作用產生的引力)、滲透力 (osmotic force，土壤中陰陽離子與其他溶質因滲透作用對水分子所產生的引力) 等，此等勢能的差距決定土壤水的流向及流量。土壤水具有自高勢能處向低勢能流動的趨勢，若質地相同則水從溼潤處往乾處流動 (金恆鑣，1991)。土壤學上依據土壤保水總勢能值的大小，將土壤水分為重力水 (gravitation water)、微管水 (capillary water)、及吸著水 (hygroscopic water) 三大類。重力水為受地心引力而自大孔隙中排出的水分；微管水為重力水排除後，尚存於細小孔隙內或因附著力而圍繞在土壤粒子表面的水分；吸著水是指強力附著土壤顆粒表面，極為細薄呈膜狀的水分，不能為高等植物吸收利用 (金恆鑣，1991)。

4-5 土壤水的變化

由於降雨、重力作用、蒸發散、毛細作用等因素，土壤含水量隨時會變動。降雨及毛細的表面張力作用可增加土壤

含水量，蒸發散及重力吸引流出則會減低含水量，此種土壤水分的增減，在一水文週期 (如一年或一乾早期至另一乾早期) 內，其總量接近一致，而達到一動態平衡狀態 (圖 42)。因此，水文平衡公式中可將一水文週期內的土壤水變化量忽略不計，而以降水量與流量之差推估一集水區的蒸發散量。森林由於蒸發散及入滲作用均為所有土地利用方式之冠，因此森林土壤含水量的變化亦較明顯，尤以溫帶落葉林更為顯著 (圖 43)。

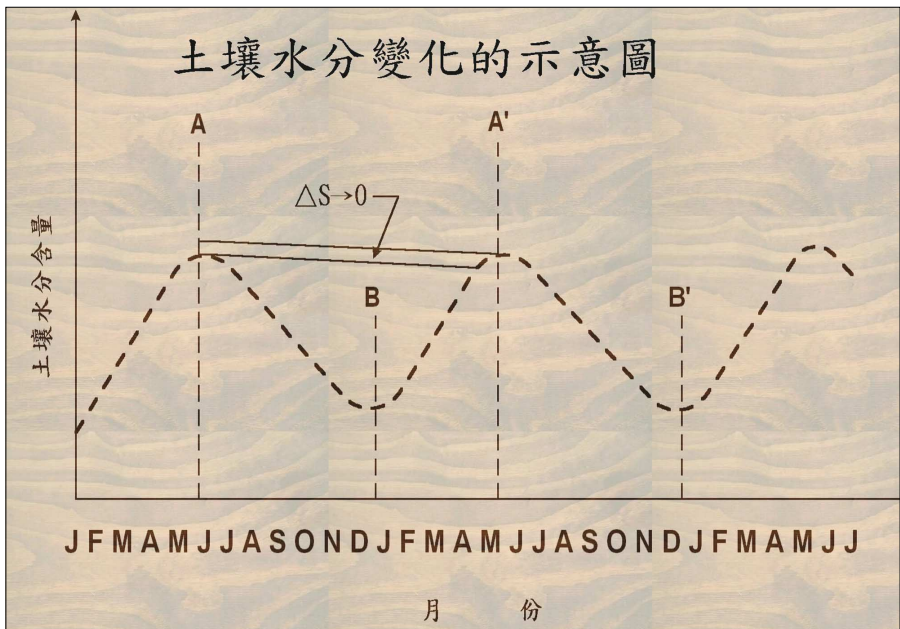


圖 42. 若取一水文週期為計算單位，土壤水總變化量將趨近於零 (Brooks et al., 1992)

● 森林與水

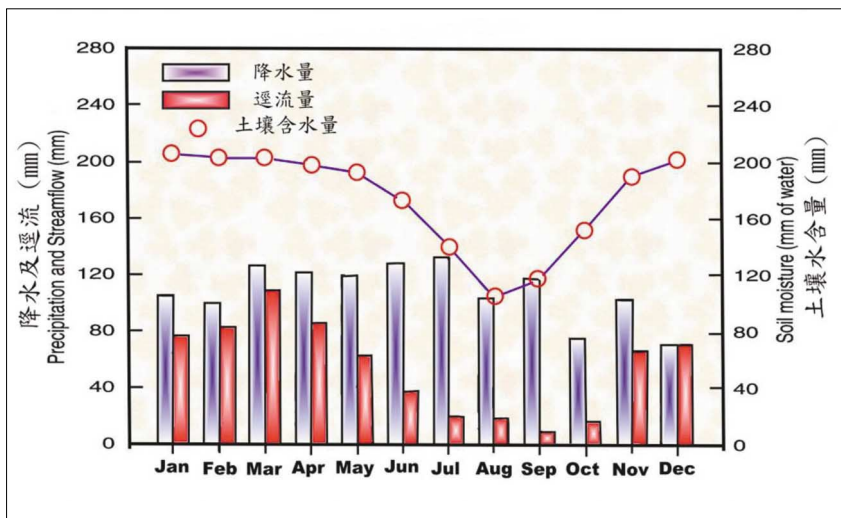


圖 43. 美國 Appalachians 山脈地區森林集水區表土2英尺土壤水分變動情形

五、溪流水

溪流水 (streamflow) 為出現在河川網路中的地表水，為集水區內扣除蒸發散損失、土壤水填補量及深層滲漏流失後的降水量。部分的雨水直接降落至河道中或河道附近的土壤水飽和區域，將可很快的成為溪流水；然而森林集水區此部分的溪流水所佔比率通常甚低，大部分降水進入溪流前的過程及行經路線均甚為複雜，有些經過延遲保蓄 (detention storage) 過程，可能需數週或更久方能進入溪流。溪流依流量分佈特性可劃分為常年性 (perennial)、暫歇性 (intermittent) 及短暫性 (ephemeral) 等三大類。常年性河川集水區面積通常較大或多位於潮濕區域，河道固定且終年水流不斷；暫歇性河川亦具有固定的河道，但乾旱季節河道則無水；短暫性河川

通常集水區面積較小，僅在暴雨過後有水流，多發生於乾旱沙漠邊緣區域。臺灣地區上游森林集水區的溪流，終年流量不斷，然部分中下游區域因引水灌溉或其他用途，乾旱期間常有斷流現象。

降水經過各種不同的路徑匯集入溪流內，路徑的不同導致溪流水的組成亦不同。水文學者將溪流水依據其來源，可劃分為：河道攔截水、漫地流、次地表逕流、及基流四部分。其中河道攔截水為直接降至河道的降水，此部分的降水流至集水區出口的路徑最短，通常最先流出集水區。然而河道面積佔集水區總面積甚低（通常小於 1 %），此部分溪流水僅佔總流量的一小部分。其他三者已於『與森林相關的水文因子』章節介紹過，茲不贅述。

河道攔截水、漫地流及次地表逕流均是降雨後迅速流出集水區的水分，此三者通稱為暴雨逕流 (stormflow) 或快速逕流 (quickflow)，通常多以 6 小時的時間間隔來區分不同場次的暴雨逕流。此等暴雨逕流多由高強度的降雨或大量融雪所造成，若流量超過河道容量即稱為洪水 (flood flow)，是造成災害的主要原因。森林集水區河道攔截水比率不大，而絕大部分的降雨都可入滲至森林土壤中，因此次地表逕流為構成森林集水區暴雨流量的主要成分。

5-1 溪流水的量測

量測溪流流量的基本要項有二，一為斷面積，一為該斷面的流速。在無人為構造物的野溪，多以流速儀量測河床橫斷面上若干點的流速，再以『流速斷面積法』推求總流量，如圖 44。由於流速可委由水位高程或水壓而求得，據此試



圖 44. 以流速儀測量溪流流速的情形

驗集水區溪流量測量的方式多係將水流導入一固定斷面的人為構造物，再量測水位高，藉水位與流速的率定關係，求得流量。此等人為的構造物可統稱為量水堰 (weir)，其廣義的定義為：任何固定形式而水流可流經其上方的構造物，由此而衍生出三角堰、矩形堰、寬頂堰等不同名稱的量水堰，而另一常見於水力叢書的量水槽 (flume)，實為特殊形式的寬頂矩形量水堰。量水堰通常建構於溪谷狹窄且具岩盤露頭處，將混泥土坎入岩石築成水壩，並迫使地下水流返回地表，以便量測所有流出集水區的水量。堰口後方有一靜水池，以減緩水流的流速及水面的波動，觀測井以管路與靜水池連接，並藉著浮筒的升降，牽動記錄儀器，記錄堰口的水位高，其配置示意圖如圖 45。臺灣的試驗集水區均採用 90° 開口的

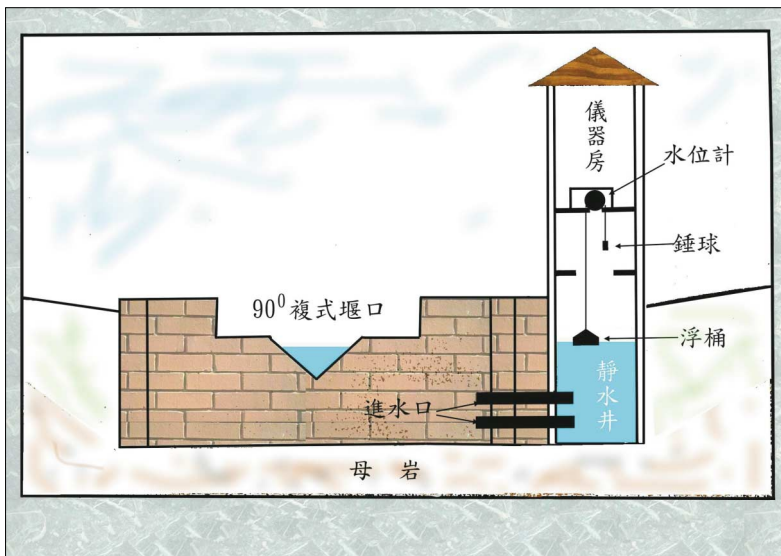


圖 45. 林業試驗所試驗集水區量水堰斷面圖

量水堰 (90-degree V-notch weir)，並配合臺灣河川流量驟起驟落的特性，採取複合形式的堰口，如圖 13 所示。

5-2 流量歷線圖

任何物理量對時間的關係圖稱為歷線圖，集水區流量對時間的關係圖即為流量歷線圖 (hydrograph)，而降水量在時間上分佈的關係圖稱為雨量歷線 (hyetograph)。流量歷線圖可視為反應一集水區地形及氣候特徵的最佳指標，配合相對應的雨量歷線圖常可顯示一集水區相關的水文特性，因而被視為研究集水區水文特性主要途徑之一。圖 46 為溪流流量各組成部分的歷線圖，時間軸上某點各部分流量的總和，則為

● 森林與水

該瞬間的總流量。瞬間最大流量稱為洪峰流量 (peak flow)，為設計水利工程構造物的主要考慮因子。圖 47 則為臺灣上

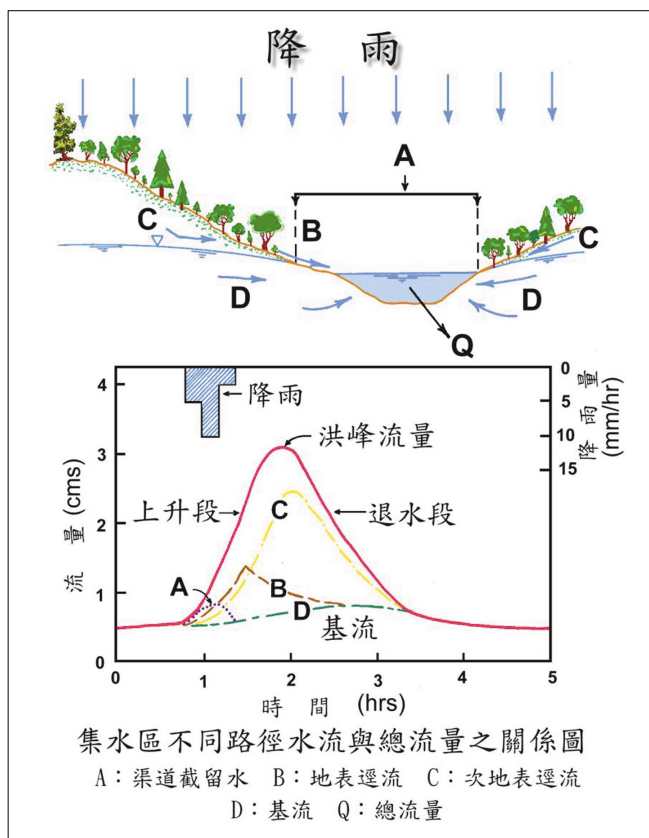


圖 46. 集水區不同路徑的水流所產生的流量歷線圖
(Brooks et al., 1992)

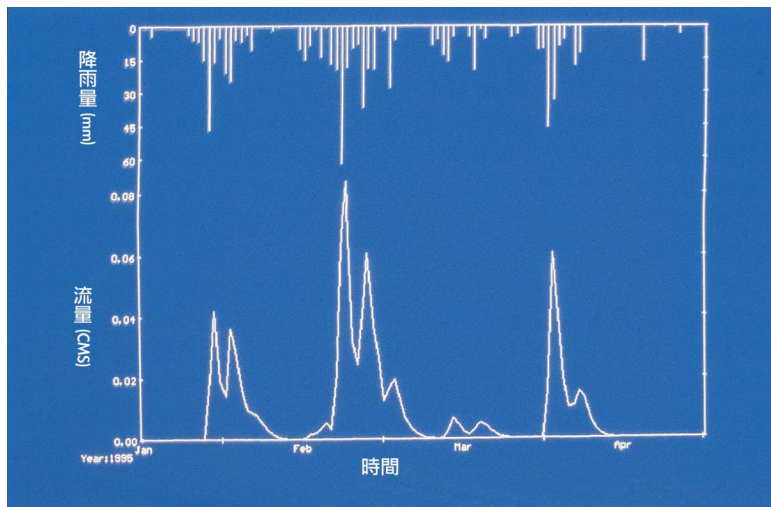


圖 47. 畢祿溪11號集水區降雨量及流量歷線圖

游集水區典型的雨量及流量歷線圖，驟起驟降為其特色，洪峰流量與最低流量間差異甚鉅，亦屬罕見。

水文學家常將流量概略地區分為基流與暴雨流兩大部分，如圖 37 所示。當高強度降雨發生時，多數上游小集水區 (如臺灣山區的大多數集水區) 的流量幾乎緊接暴雨的降臨而上升，所造成的洪峰流量亦較高；強度較小的降雨，流量歷線上升的速率即較緩和 (尤以森林集水區最為明顯)，洪峰流量亦較低。水文歷線圖上升區段的斜率，即可反應此種現象；而集水區流量上升的速度，除受降雨支配外，集水區的坡度、形狀、土壤深度等亦是主要影響因子。當降雨強度減弱時，流量隨即降低，衰退的速度，則主要決定於集水區的坡度及土壤深度等集水區地形因子。

● 森林與水

5-3 變動飽和區域

目前大多數水文研究者對森林集水區流量產生機制多採納飽和漫地流 (saturation overland flow) 觀念，認為產生飽和區域的主要因素是次地表逕流，而非降雨，且土壤飽和區域是由下而上地擴展。當持續降雨時，鄰近溪流或下坡處土壤會因為次地表逕流逐漸的匯入而漸次達到飽和，接受地表下逕流的斷面積隨之增加，並使溪流面積漸次擴張；在此情況下，水流經由地表下流至溪流的時間將縮短，同時降落於其上部的雨水會以地表逕流的方式出現進而流至溪流，造成流量迅速上升。降雨減緩或停止時，次地表逕流減量，飽和區域隨之縮減。此種降雨時因次地表逕流的匯入而使土壤達到飽和的區域，稱為變動飽和區域 (variable source areas)。此區域的面積隨降雨強度或時間的增加而漸增，反之則漸次縮小 (如圖 48, Hewlett and Troendle, 1975)。一般而言在潮濕覆蓋良好的森林集水區，經由飽和水域以地表逕流流出的水流約佔一場暴雨直接逕流的 10 %。

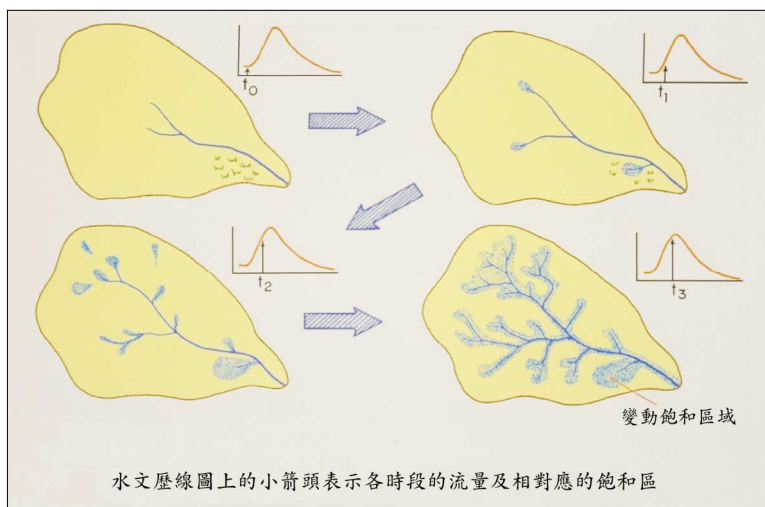


圖 48. 變動飽和區域觀念示意圖 (Hewlett and Troendle, 1975)

5-4 影響溪流水量的因子

決定集水區總流量及洪峰流量多寡的因子甚多，且相互具關連性，但為便於說明可概分為降雨特性等因時而變的因子、集水區地形等不變性因子、以及土地利用等可變性因子三大類。茲略述如下：

因時而異的因子包括分為降水特性及集水區特性兩類。溪流流量的多寡與降雨量或降雨延時以及融雪關係最為密切，強度高或延時久的降雨，所造成的流量通常較大，且洪峰流量亦高。除此之外，暴風雨侵襲的方向亦會影響集水區的流量；若暴雨由集水區嶺界向出口處移動，則會使下游區域的流量產生集中與累加效應，流量即增加，反之則減少。而融雪為高緯度地區春季及夏初期間溪河流量的主要來源(圖 49)，融雪係受能量因素所左右，發生區域常遠較降水的



圖 49. 融雪為高緯度地區春季及夏初溪流水主要來源之

● 森林與水

範圍為廣且一致，對溪流流量之影響甚為顯著。因時而異的集水區因子主要係指土壤含水情形，水文學上的名稱為臨前水分狀況 (antecedent moisture condition)；若降雨時土壤處於接近飽和狀態下，土壤顆粒間的空隙多被水分所填充，已無足夠空間可容納新近入滲的雨水，後續的降雨勢必迅速進入溪流內，流量因而增加。因此森林地區的洪水多發生於第二或第三場降雨時，頭場降雨有相當大的比率被儲存於土壤孔隙間，在臨前水分充足的情況下，方能產生較高的溪流量。

集水區大小、形狀、坡度、排水密度 (drainage density，定義為集水區內所有溪流的總長度除以集水區面積)、有無濕地或湖泊等較不具變異性的地形特性，對溪流流量與洪峰流量亦有顯著的影響。大集水區無論是降雨或融雪所產生的流量通常較大。地表與地表下逕流流至出口的距離及時間與集水區形狀密切相關；接近圓形的集水區，各子集水區所產生的逕流，會以接近同一時間匯集於出口處，致使洪峰流量較相同情況的其他形狀集水區為高；狹長形集水區，因為水流時間差關係，洪峰流量會相對較低。同樣的集水區排水密度亦會影響逕流流至出口的時間，密度高者反應降雨的速度快較，產生的洪峰流量亦較高。集水區內的濕地、湖泊或水庫具有遲滯 (detain，口語為 slow down) 與保蓄 (retain，口語為 store) 作用，可調節流量並降低洪峰流量。

土地利用方式、植生種類與覆蓋程度、築路開發等可變因子亦影響集水區對降雨的反應。相同狀況集水區對同等降水所產生的洪峰流量與總流量，其大小依土地利用別依次為都市集水區、農地集水區與森林集水區。植物種類可影響集水區流量，深根性樹種較淺根性樹種消耗水分多，針葉樹林較闊葉樹林截留較多的雨水，因此深根性或針葉樹為優勢樹種的森林，其溪流流量會較同一狀況下的其他森林地為低。

道路、社區等設施會增加不透水區域的面積，並改變水流的流路與速度，導致集水區直接逕流所佔比率增加，產生較高的洪峰流量與總流量。水利工程亦可改變溪流原有的特性，對流量在時間與空間的分配上均可造成巨大的影響。改變集水區的地表狀況或土地利用方式，是人類藉以改變集水區流量常用的方法，且隨著科技的進步，改變的程度亦大幅增加。圖 50 以示意圖說明伐木對上游集水區流量改變，且因時間差效應 (desynchronization) 對下游流量影響的情形。

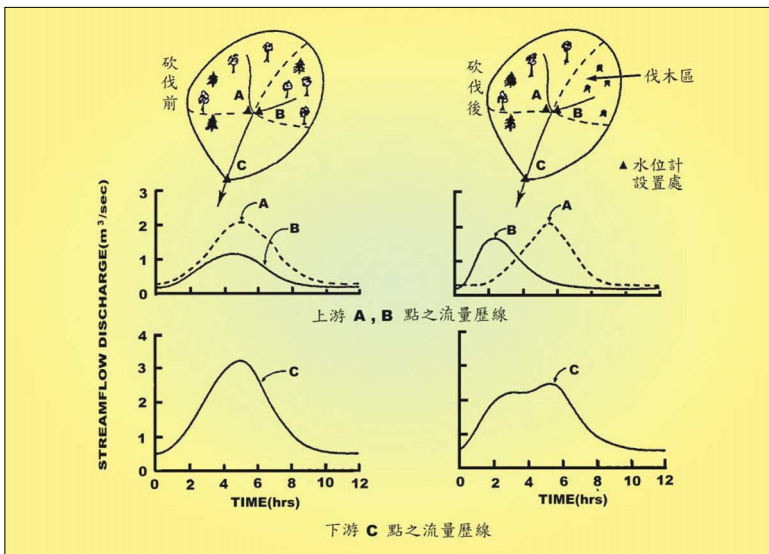


圖 50. 伐木造成的流量時間差效應對下游集水區流量的影響 (Brooks et al., 1992)

● 森林與水

5-5 砍伐林木對水量的影響

砍伐森林後對溪流流量之影響，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之角色。自本世紀之初起，世界各地即不斷地以配對試驗集水區為主要方法，在不同的土壤、地形與植生狀進行此等問題之研究。研究結果一致認為：減少植生覆蓋會導致集水區流量增加，在裸露區域造林，則會減少集水區流量 (Hibbert, 1967; Bosch and Hewlett, 1981; Hornbeck et al., 1993; Wheathead and Robinson, 1993)。其原因為砍伐林木會減少截留與蒸發散損失，促使土壤含水量增加，導致有額外的水分可流入溪流，流量因而增加。雖然原因甚為明確，但有許多人仍基於『青山常在，綠水長流』、『窮山惡水』的印象，而認為失去林木庇護後的集水區，流量將減少的錯誤觀念。

若再從水文平衡公式來探討其原因，可知：就一水文週期（如 1 年）而言，土壤水與地下水的總變動量 ($\Sigma \Delta S$) 可視為零，降水量 (P) 不受土地利用影響，則流量 (Q) 僅隨蒸發散量 (ET) 而變。故地表覆蓋變更若導致蒸發散量降低，則集水區之流量即會增加；反之，集水區之流量則會減少。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流量會增加。雖然如此，集水區流量與植生覆蓋關係甚為複雜，伐木後集水區流量受影響的程度與降水量、優勢樹種、砍伐面積及作業方式仍有密切之關係，茲略述如下：

(1). 降水量

降水量為決定集水區流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 (Lull and Reinhart 1967; Hibbert, 1971; 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。很明顯地，無論是伐木或是造林對集水區流量之影響，均以年平均雨量高之地區較為顯著。

(2). 優勢植物

影響集水區流量多寡另一重要因子為集水區優勢植物改變之情形。若改變地表覆蓋會導致集水區蒸發散量降低，則流量即會增加；反之流量則會減少。因此，砍伐林木，或將深根性樹種轉變為淺根性樹種 (圖 51)，或由截留量高之樹種轉換成截留量低之樹種均可望增加集水區流量 (Brooks et al., 1992)。

(3). 作業方式

皆伐、疏伐、集材、運材等伐木作業方式，對集水區流量的影響端視受擾動的面積及程度而定。林道開闢及集材場對地表的擾動與夯實 (圖 52)，可劇烈地改變流量歷線的型態以及洪峰流量，但對集水區總流量的影響，則仍需視擾動面積的大小。亦有研究者認為疏伐或擇伐對集水區流量之影響與皆伐相差無幾，所持之理由為對減低截留損失以及對土壤水分的改變，疏伐與皆伐具同樣之效果，且疏伐區之積雪量較空曠的皆伐區為高 (Troendle and Meiman, 1986; Troendle, 1987; Troendle and King, 1987; Hicks et al., 1991)。

● 森林與水

圖 52. 林道闢建擾動原有的水流路徑，對集水區溪流水總量及在時間上的分配顯著的變化



圖 51. 溪流沿岸的深根性植物會消耗相當多的水分



(4). 砍伐面積

砍伐後集水區流量增加量與砍伐面積成正相關性，亦為不爭的事實。然由世界各地試驗顯示，植被改變之面積小於全集水區面積 15 % 時，集水區流量之改變即無法達到統計上的顯著水準 (Bosch and Hewlett, 1982)。此外值得注意的是，探討伐木對流量影響的試驗研究，均是在面積小於 500 公頃以下的上游小集水區進行；對下游區域的影響多因河川流量的時間差效應而抵銷，對大集水區而言，則因砍伐面積比例過小，而難以偵測出其影響。

此外，林地變更後集水區流量受影響之季節及影響時間長短亦為另重要研究課題。基本上，集水區流量季節性之變化主要決定於氣候因素，森林覆蓋之影響有限；林地變更後，集水區各季節流量受影響之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，若不考慮溶雪及颱風等因素，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，但非絕對增加量，概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)；而最高絕對增加量，則多發生於降雨季節 (陸象豫，1996)。至於受影響時間之長短，主要決定於當地植生恢復之速度；在乾旱區或高緯度地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。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多在 10 年以下。

林業試驗所於 1978 至 1979 年間，亦曾進行過探討皆伐對集水區流量影響的研究 (圖 53、54)。該所蓮華池分所面積 5.86 公頃的四號集水區，於 1978 年底以索道運材的方式，進行全面皆伐作業，並監測流量變化情形。砍伐後第一個濕

● 森林與水

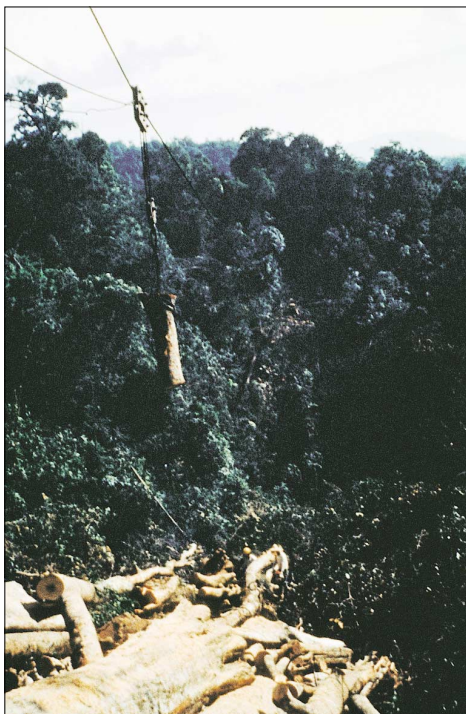


圖 53. 蓮華池4號集水區於 1978 年砍伐的情形

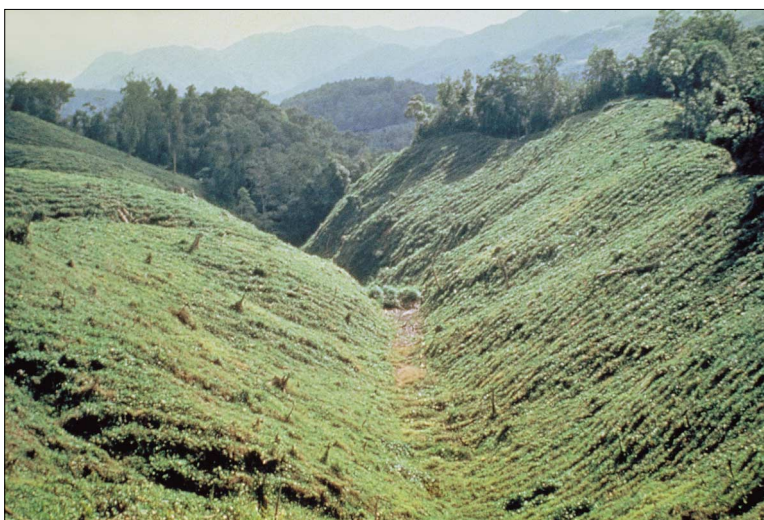


圖 54. 蓮華池4號集水區砍伐後次年植生恢復情形

季 (1979 年 5 月至 9 月) 溪流量增加達 240 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 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 %。證實砍伐森林雖能增加集水區流量, 但對枯水期水資源的供應其效果卻係有限的 (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, 則流量將會增加 (2) 採伐面積越大, 流量之增加量亦越多 (3) 林木對集水區水量之影響, 以降雨量豐富地區較為顯著 (4) 砍伐後第一年流量增加最多, 而伐木之效應隨時間呈指數型態遞減, 且起始之影響程度越大, 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 (陸象豫, 1996)。

六、森林與水質

水質乃水中所含有或溶解的物質或生物體的物理與化學特性, 由於此等特性多無法以肉眼觀察, 必須借助儀器量測, 因此其定義端視所量測的項目而異, 但其良窳的標準卻隨水的用途而有所不同。溪流水水質是生態系健全與否的有效指標, 乃氣候、土壤、地質、野生動植物、及人為活動等綜合反應的結果, 茲說明如後。

6-1 沖蝕與沈積物

沖蝕為土壤或岩石顆粒受水、風、或重力等外在作用力而自母體分離並運離的過程 (圖 55), 為塑造地球表面地形地貌的主要營運力; 其中又以水流為最主要的原動力, 多數溪

● 森林與水

流及峽谷均是水流經年累月刻蝕的結果 (圖 56)，為本節討論的重點。在分類上常將沖蝕歸納為自然沖蝕 (natural erosion) 與加速沖蝕 (accelerated erosion) 兩類；自然沖蝕又稱地質沖蝕，為沖蝕原動力長時期作用造成地質地形變動的現象，自然界中無時無刻均在進行。加速沖蝕則為受開墾、築路、社區開發等人為因素影響，而導致土壤於短期時間內大量且加劇流失的現象。無論自然沖蝕或加速沖蝕，均會產生分離剝落的土石，此等受水流沖刷或雨滴打擊而分離的顆粒與碎屑統稱為沖積物 (sediment)。沖積物為集水區的自然產物，為河道穩定及水生物生存不可或缺的因子，多數自然沖蝕所產生的沖積物對河川生態系均有正面的作用。



圖 55. 雨滴打擊裸露的地表為發生沖蝕的開始

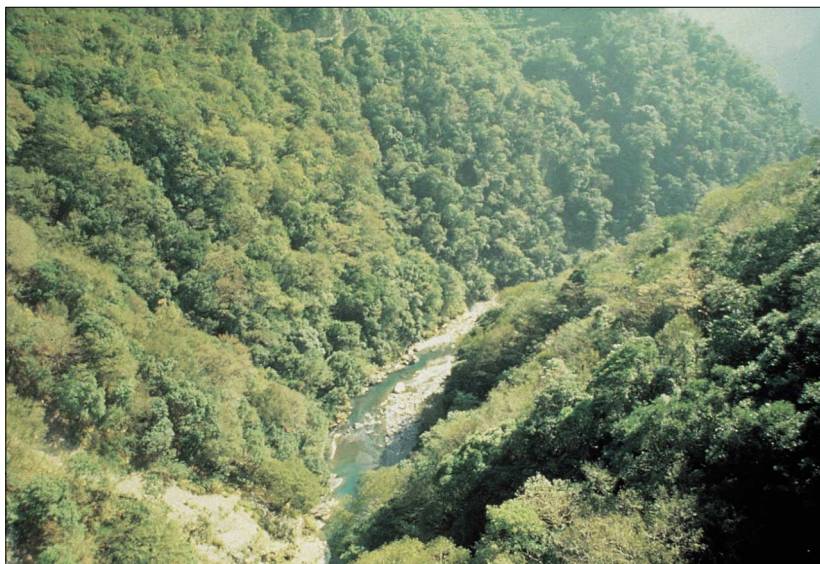


圖 56. 峽谷與溪谷乃千萬年來沖蝕作用下的產物

沖積物中粒徑小並能隨水流飄移者稱為懸浮質 (suspended sediment)，是造成溪水混濁的主要原因。顆粒較大無法懸浮於水體但可受水流攜帶間歇性地跳離河床的土壤石塊，則稱為河床載 (bedload)，為造成河道淤積的主要物質。當水流流速減緩時，無論是河床載或懸浮載均會漸次下沉並堆積於河道或水庫內，此即所謂的沈澱作用 (sedimentation)。在自然沖蝕情形下，多數河川沖刷與沈澱作用會達成一動態平衡狀態，可維持穩定的河道；但沖積物的量一旦超過河道輸砂能力，則會造成河道淤塞、水庫湖泊淤積、水質惡化等不良影響，進而危及水生物活動及水資源利用。

● 森林與水

集水區沈積物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。森林集水區地表因受樹冠層及枯枝落葉層雙重保護作用，可免除雨滴所造成之飛濺沖蝕；且林地入滲容量往往均大於降雨強度，致地表逕流甚少發生。換言之，覆蓋良好之森林地內，造成土壤顆粒分離並往下坡處輸送的原動力不足，因此地表沖蝕與蝕溝沖蝕均不易發生。

然而未受人為擾動且覆蓋良好的森林集水區，並非完全不會產生沖蝕；森林集水區中，大多數的沖積物來自鄰近河道的區域 (圖 57)。溪流的流速及流量，左右其沖刷搬運能力 (水流的搬運力與流速的四次方成正比)，而溪岸兩旁可被沖蝕的物質與溪流的流量及流速維持動態平衡狀態。非暴雨期的中低流量，水流的沖蝕能力多屬有限，除非極輕微的顆粒否則不會被沖刷運離，溪水可保持清澈。暴雨時，流量及流速大增，大粒徑的土壤石塊均可能隨水流沖刷而去，可產生大量的沖積物。溪流常藉大暴雨逕流時將河道上所堆積的大顆粒物質向下輸送，而造成河道的改變。另一沖刷物的來源地為森林中的裸露地區，此等裸露地多屬風倒木區域或近河道處，除發生地表沖蝕外亦伴隨著逕流水的沖刷。風倒木區域不僅會造成地表覆蓋破壞外，且往往會形成小窟窿 (圖 58)，小窟窿滿溢後即可能造成蝕溝沖蝕。河道兩旁的植被易受大水沖毀而造成地表裸露，地表沖蝕加上河道的沖刷，產生的沖積物往往相當可觀。但未受干擾的森林集水區，此等自然沖蝕現象均不會無限制擴大，概溪岸沖刷遇岩盤則難以繼續，風倒木區域範圍不大且待植生恢復後即趨穩定。

圖 57. 溪流沿岸的沖刷為森林集水區主要泥砂來源之一



圖 58. 颱風暴雨下，風倒木所造成的地表裸露或窟窿將導致森林地嚴重的沖蝕

集水區沈積物輸出量多以每公頃每年多少噸 (ton/ha/yr) 表示，往往被誤認為是整個集水區均勻的產物。然而雖然森林集水區泥砂主要源自溪床、溪岸或裸露地區，其他區域貢獻量甚低，且沖積物一旦被水沖離原位，即難以辨認其來源，因此環境科學研究者仍將其視為水的非點源污染物 (non-point source pollutant)。非點源污染物係指污染物產生自相當大面積的區域內，不易追溯其發生源頭，常與耕種、放牧、

● 森林與水

及林業經營等土地利用方式相關連。相對地，點源污染物 (point-source pollutant) 則指經由溝渠或排水管排入自然水體的污染物，可追溯源頭並易於量測排放量，常與市鎮或工業區開發利用有關連。

懸浮載與河床載特性上的差異致使量測方式亦有所不同。懸浮載的量測以往不外乎採取水樣、過濾、烘乾、稱重等步驟，而取水樣的方式除人工採集外，現多採用自動水位取樣計或取樣轉盤 (Coshocton wheel) 進行，如圖 59 及 60 所示。另一種方法為採用濁度計 (turbid meter) 量測水樣的濁度 (turbidity)，再以濁度推估懸浮載含量。目前仍無有效的儀器可量測河床載，所採用的方法多為量秤陷入量水堰或其他河床構造物中的土石量，再行推估之。由於大暴雨時，量水堰等構造物常遭河床載淤滿，致難以掌握大洪水時的輸出量，為待克服的缺點。懸浮載與河床載的總量，則為集水區的總沈積物量。



圖 59. ISCO 自動水樣收集器



圖 60. Coshocton 取樣轉盤

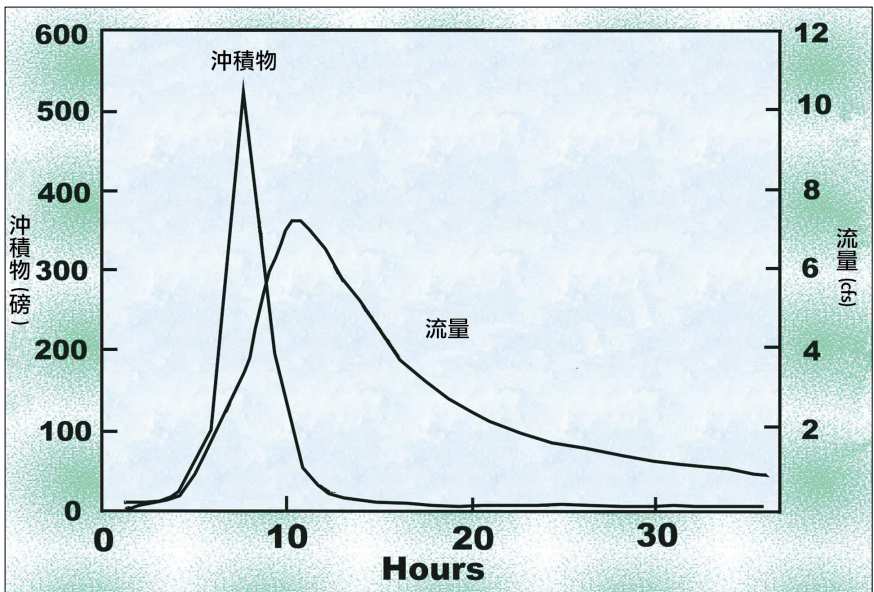


圖 61. 小集水區泥砂輸送歷線圖 (Kochenderfer et al., 1998)

● 森林與水

圖 61 為小集水區沈積物輸送情形的歷線圖，當溪流流量開始上升後，沈積物的輸送量迅速增加，致最大輸送量發的時間略早於洪峰流量發生的時間。當水流速度下降至不足以再沖刷並攜帶沈積物時，輸送量立即迅速下降，而此時河川流量仍繼續上升。此說明為何上游森林集水區溪流水於降雨開始後往往立即呈混濁，而雨停止後又轉為清澈的原因。長期的觀察研究證實，中強度的降雨僅有一小部分的沈積物會被輸送至河道內，大多會遭地表枯枝落葉或石塊等阻絕而暫時堆置於其後方，成為移置的土壤 (displaced soil)。移置沖積物若未受植物根系網節固定，則往後強度夠大的暴雨即有可能將其輸送至河道內。森林集水區大多數的沈積物是於大暴雨時，在相當短的時間內，輸送至下游地區的。因此懸浮載的量測相當困難，尤以偏遠的森林集水區為甚。

當植被遭受破壞導致地表裸露後，無庇護的土壤便會受雨滴的打擊而造成顆粒分離，此等分離的土粒向四方跳躍往往會阻塞入滲孔隙，使地表產生密封現象 (sealing)，降低入滲速率。密封作用再加上地表受夯實 (compaction) 的影響，致使未能入滲的水分成為地表逕流或漫地流。漫地流向下坡處匯集，水量增加流速加快，隨即造成蝕溝沖蝕，挾帶分離的顆粒向下坡處移動。基於此原因，許多人都認為砍伐森林會造成嚴重的逕流與沖蝕，而主張全面禁伐甚至經營森林。此種論調未能明瞭伐木並非是造成地表擾動元凶的事實，概因伐木而進行的開路 (圖 62)、焚燒、運材與集材等作業，方為使集水區重創的主要原因。許多研究報告均指出 (Megahan and Kidd, 1971; Meeuwig and Packer, 1975; McCashion and Rice, 1983) 只砍伐林木並不會造成林地嚴重的沖蝕，謹慎的選擇林道線路與作業方式，伐木對集水區泥砂沖蝕的影響可以達到不顯著且難以量測的範圍內。美國 Appalachians 山脈



圖 62. 不當的開闢林道為集水區泥砂主要來源

若干小集水區採伐後年沖蝕量仍維持 0.25-0.49 ton/ha (0.1-0.2 ton/acre)，與砍伐前無所差別，同屬可允許範圍的地質沖蝕，可為例證。

6-2 溪流水溫

森林藉著改變水流路徑、蔽陰以及光合與蒸發散作用而影響土壤水及溪流水的溫度，因此溪流水溫會因經營措施而變動。森林集水區大部分的太陽入射輻射能 (約三分之二強) 均被林木吸收以進行光合作用及蒸發散，故即使於盛夏期間，森林區溪流水的溫度鮮有超過 24 °C。此外由於水的比熱高，致溪流水溫變化幅度遠較氣溫變化為小，且反應溫度的速度較緩慢，尤以大流量的河川更為顯著。溪流水水溫端

● 森林與水

視溪流流量大小、水流路徑、集水區位置、河川流向等因素而定。表 7 為林業試驗所部分集水區各月分溪流水平均溫度，大致上各集水區水溫隨溫度成正相關，但畢祿溪及福山集水區一、二月分平均水溫均高於該月分平均氣溫，顯示水溫受冷氣團衝擊較氣溫為小。蓮華池 1 號集水區冬季水溫較 3 號集水區為高，盛夏時則反是；推測原因可能係 3 號集水區溪流水多源自深層地下水，亦可能係冬季時陽光可直射 1 號集水區觀測點，吸收較多熱能所致。影響溪流水溫的因子眾多，大氣溫度應是最顯著的因子，氣溫與水溫間之關係性，為值得探討的課題。

理論上林木砍伐後，原來用於進行光合作用及蒸發散的短波輻射能（約佔總入射能量的三分之二強）將會轉而用來加熱地表，促使土壤水溫度增高，進而影響溪流水溫。雖有研究報告指出砍伐濱岸植物會使溪流水水溫增加攝氏零點幾度至攝氏十餘度不等的記錄 (Brown, 1980)，但多數研究報告顯示砍伐林木鮮有造成溪流水溫顯著增高的例子，即使有也是短暫性或小區域性的。除非砍伐後改變土地利用方式，否則砍伐效應待植生半恢復後，即消失殆盡。上游集水區砍伐所造成溪流水水溫增高的現象，也會因其他水流的匯入，而被煙滅。除此之外，今日的伐木多不會破壞濱岸的緩衝帶 (buffer zone)，陽光不直皆射入溪流，水溫即難以顯著增加。

表 7. 林業試驗所部分試驗集水區溪流各月分平均溫度
(陸象豫，1997；陸象豫等，1999)

單位：℃

月分	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
畢祿溪 水溫	6.9	7.5	9.2	11.2	12.7	13.2	13.3	13.4	13.3	12.2	9.8	7.7
本流 氣溫	5.5	7.1	10.3	14.1	17.0	17.1	17.7	17.8	16.0	14.1	10.2	8.4
蓮華池 水溫	14.7	15.6	16.5	17.9	18.1	18.9	20.1	19.3	19.0	18.7	17.0	15.5
1 號 氣溫	14.9	15.9	18.1	21.1	21.6	23.5	23.6	24.9	24.7	22.0	18.6	15.8
蓮華池 水溫	14.6	15.5	16.4	17.8	18.3	19.1	20.3	19.5	18.9	18.5	16.7	15.4
3 號 氣溫	14.9	15.9	18.1	21.1	21.6	23.5	23.6	24.9	24.7	22.0	18.6	15.8
福山 水溫	14.2	14.3	15.5	17.0	17.5	18.2	19.7	20.0	18.6	18.2	17.0	16.1
1 號 氣溫	12.1	13.0	15.5	19.3	21.0	22.8	24.4	24.1	21.5	17.9	16.5	14.5

註：1. 畢祿溪本流水溫及氣溫記錄量測期間為1976 至1977 年
2. 蓮華池1號及3號集水區水溫及氣溫記錄量測期間為 1999年8月至2000 年8月
3. 福山1號集水區溪流水溫由臺大地理系林俊全教授提供，量測時間為1998年，氣溫記錄取自同一年度

● 森林與水

6-3 水化學

不含任何雜質與溶解物的純水乃實驗室的產物，幾乎不存在於自然界，雨水及溪流水中含有許多被水溶解的物質，而此等物質乃是影響溪流水質的主要因素。溶解於水中帶正電的原子或分子稱為陽離子 (cation)，帶負電者稱為陰離子 (anion)，二者均無法以肉眼觀測，必須借助儀器量測。在討論森林水化學前，宜先介紹電導度 (electrical conductivity)、酸鹼值 (pH)、與濃度 (concentration) 等標示水質的常用方式。

(1). 酸鹼度

溶液的酸鹼度是溶液中氫離子濃度的指標，定義為：

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

其中 $[\text{H}^+]$ 濃度單位為 M (mole/liter)。純水或蒸餾水氫離子濃度為 1.0×10^{-7} M，故 $\text{pH} = -\log[10^{-7}] = 7$ ；pH 值範圍從 0 至 14， $\text{pH} = 7$ 為中性，越低表示酸度越高，圖 61 標示日常生活中常見物質的酸鹼度。因 pH 為對數刻度，故 pH 從 7 降至 6 表示氫離子含量增加十倍。pH 值已為標示水質的必須指標，為日常生活中常見的水化學特性表示法（圖 63）。酸鹼度對魚類及水生物的生存有決定性的影響。淡水魚所能忍受的 pH 值範圍為 6.5 至 8.4，而藻類在 pH 值大於 8.5 的水域即無法存活 (Brooks, et al., 1992)。

(2). 電導度

電導度為水體傳輸電流能力的表示法，為所有溶解於水導電物質濃度的數值指數。電導度無法指出水體中是否含有

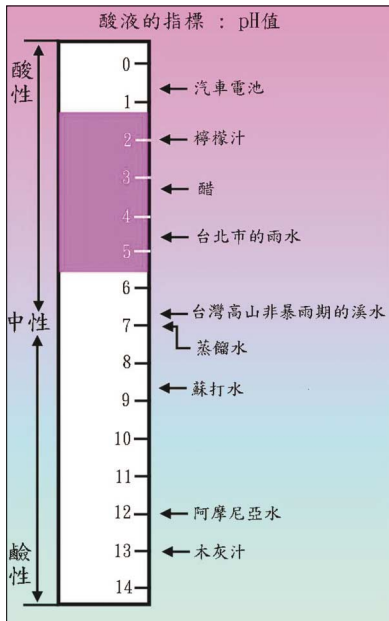


圖 63. 常見物質 pH 值比較圖，pH 值低於 5.6 的降雨即被視為酸雨

某種物質及其濃度，但可經由儀器（電導度計）直接量測，為水化學特性最簡單常用的表示方法。電導度的表示單位為 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，乃 $\text{micromhos}/\text{cm}$ ，過酸或強鹼性物質，其電導度亦高。

(3). 濃度

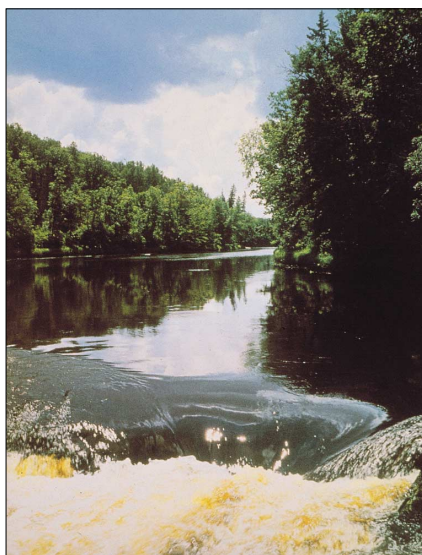
濃度定義為單位體積內，溶解物質的重量或所佔百分比，單位為 mg/L (毫克/公升) 或 ppm (百萬分之一)。水溶液中，濃度以 mg/L 表示時，其數值恰與以 ppm 表示時相同，故此兩種單位可通用。

6-4 地質與水質

部分岩石或土壤的組成物質會遭地下水或土壤水會溶解，水流亦會攜帶部分自然風化的分解物質，因此集水區地質組成對溪流水化學的特性有決定性影響 (圖 64)。若母岩係由富含碳酸鈣 (calcium carbonate) 的石灰岩 (limestone) 為主要組成，則該集水區溪流水的 pH 值必定較高，可較以酸性頁岩 (acidic shale) 為主的集水區高出四個單位，亦即氫離子濃度含量低一萬倍。由砂岩區流出的溪流水，酸鹼度適中但電導度通常甚低，致溶解的物質有限，而常被認為是貧瘠的水體，不利於水生生物生存但卻是可能是良好的飲用水。硫氧

● 森林與水

圖 64. 美國明尼蘇達州北部的溪流多呈黃褐色，乃流經泥炭土 (peat) 區淋溶大量有機物質所造成



化後可經由碳質頁岩 (carbonaceous shale) 淋溶出，會使溪流水中硫酸含量大增，因而成酸性反應。流經煤層的水硫酸含量特高，長使溪流水呈過酸性反應，開礦為人為活動中，影響溪流水質最嚴重者，且為持續時間最長者。表 8 為流經四

表 8. 流經不同地質條件溪流水的水化學特性 (Kochenderfer et al., 1998)

水化學特性	石灰岩 (Limestone)	砂岩 (Sandstone)	酸性頁岩 (Acidic shale)	洗煤水 (Mine drainage)
pH	7.90	5.94	3.91	3.0
電導度 (uS/cm)	188.0	21.7	127.0	1200.0
硫 (mg/L)	11.9	4.5	35.0	800.0
鈣 (mg/L)	28.4	1.5	2.5	60.0
氮 (mg/L)	2.20	0.70	0.06	1.0
鎂 (mg/L)	3.50	0.75	1.97	30.0
鉀 (mg/L)	0.86	0.69	0.76	2.0
鈉 (mg/L)	0.92	0.44	0.27	3.0

種不同地質條件下溪流的水質特性，其中以洗煤水最不利於水生物存活繁衍。

6-5 養分循環

氮、鈣、鎂、硫、鉀等物質溶解於水成離子狀態方可被植物吸收利用，因此此等物質的離子通稱為植物的營養基 (nutrients)。養分的來源主要為風化的母岩、生物體的釋出及大氣的輸入等三種；其中大氣輸入部分因空氣污染物質日益增加而益顯重要。在森林生態系中，養分物質不斷地被吸收利用、分解釋放、回歸土壤、進入溪流等一系列輸出、輸入及移動的過程，稱為養分循環。枯死的枝葉經由腐朽菌等微生物的分解，植物體中的養分便被釋出，而成為陸生或水生動植物能量的主要來源。在長期未受干擾的森林生態系中，由植物體所分解出的養分絕大部分會於短時間內被植物再吸收利用，甚少會被淋溶排出，而維持一養分有效循環使用的機制，此種狀況即所謂的穩定狀態循環 (steady-state cycling)。破壞林地則會干擾循環的穩定性，養分將加速地流失，最終的結果可能造成地力衰退，生長潛能下降。因此各項森林經營作業對林地養分循環的影響，為森林生態學上重要的課題。

林地的土壤及地形特性對養分循環作用具有顯著的影響。坡度陡土壤淺薄的集水區，如多數熱帶森林集水區，養分流失情形較具深厚土層或坡度平緩的集水區為嚴重。再者若以黏土礦為主或土壤富含有機質的集水區，養分的穩定性通常較高，概黏土礦物表面積大，對離子吸附能力強，養分物質易與之結合而不致遭溶解釋出；有機質亦具有相同的功效。

與森林集水區關係密切的陽離子包括鈣 (Ca^{+2})、鎂

● 森林與水

(Mg^{+2})、鉀 (K^+)、鈉 (Na^+) 等；陰離子則包括氮 (NO_3^-) 與硫 (SO_4^{-2}) 等。陽離子大多源自母岩或土壤的風化與分解，氮、硫等陰離子則主要係來自降水；而排離集水區的方式，則主要係藉溪流水的攜帶。表 9 為林試所福山分所及美國 Appalachian 山脈試驗集水區的年平均養分收支情形，其中 Appalachian 山脈區氮的輸入及輸出約略相等，鈣、鎂、鉀、鈉等養分則出現失衡的現象；福山地區養分輸入與輸出差異甚大，其中以鈉、鎂、鈣流失最為嚴重，氮、鉀則有累積的現象。流失的養分必需經由岩層風化彌補，否則長期的失衡會導致生產力降低。

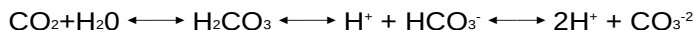
6-6 大氣沉降

大氣中所含的灰塵及其他化學物質，受重力作用或降水攜帶，一部分終將返回地表，此種降落於地表的物質統稱為

表 9. 福山 1 號及美國 Appalachian 山脈試驗集水區年養分收支情形
(Wang et al., 1994; Kochenderfer et al., 1998)

養分物質	福山 1 號				Appalachian 地區			
	降水		溪流水		降水		溪流水	
	mg/L	kg/ha	mg/L	kg/ha	mg/L	kg/ha	mg/L	kg/ha
氮 (NO_3^-)	1.20	36.1	1.44	22.3	2.09	23.62	3.40	23.13
鈣 (Ca^{+2})	0.47	14.1	3.86	59.5	0.36	4.10	1.55	10.29
鎂 (Mg^{+2})	0.21	6.3	1.26	19.4	0.04	0.44	0.77	5.16
鉀 (K^+)	0.96	28.8	0.35	5.4	0.21	1.74	0.68	4.61
鈉 (Na^+)	1.44	43.3	3.65	56.2	0.08	0.98	0.50	3.04
硫 (SO_4^{-2})	2.99	89.6	5.02	77.3	3.36	40.50	4.48	29.78

大氣沈降 (atmospheric deposition)。降水的溶解或挾帶，為化學物質進入集水區的主要途徑之一。因大氣中的二氧化碳會溶解於水產生碳酸，其反應式如下，故自然狀態下降水即呈若酸性反應，pH 值約為 5.6。



然而自工業革命後，大氣中氮、硫等化學物質大量增加，這些化合物不斷和其他物質發生化學反應，形成硫酸鹽、硝酸鹽等微粒，使部分地區降水的酸度增加，形成所謂的酸雨 (acid precipitation)。

酸雨的簡單定義為 pH 低於 5.6 的降水，為近二十年來大氣沈降對森林生態系影響最嚴重且最受關注者。造成酸雨的學物質包括、二氧化硫、氮氧化物、有機酸等，其來源可分為兩類自然產物及人為產物兩大類。自然產物包括：火山爆發噴出的硫化氫與懸浮固體等、隨海洋蒸散作用而進入大氣的鹵素離子、動植物分解產生的有機酸以及二氧化硫等；人為產物主要係燃煤排的硫酸根 (SO_4^{2-}) 及汽機車廢氣所含的硝酸根 (NO_3^-) 等，為造成酸雨的主要因素。因陽離子易與硫酸根及硝酸根結合，而從土壤中淋溶釋出，集水區內酸性離子含量若超過生態系所能承載量，則鈣鎂等陽離子的流失即加速，造成養分失衡，進而影響土地的生產能力。酸根離子會加速岩石與礦物質的化學風化作用，使土壤中如鉛、鋁等對植物有害的金屬物質大量釋出，毒害根系並干擾微生物活動，導致植物成長受限，甚至死亡。除此之外，酸雨會破壞植物的角質層及上表皮蠟質，減低植物對病菌的抵抗力，妨害細胞的正常機能，進而影響蒸散與光和作用。而溪流水的 pH 若值下降，除過酸對水生生態系的不利影響外，淋溶出的有毒物質亦會對水生動植物的生存造成嚴重威脅。

● 森林與水

降水所含的化學物質通常以乾濕沈降器 (wet-dry precipitation collector) 收集，如圖 65。此種收集器具雨水感應裝置，可藉降水控制活動的蓋子，降水開始時收集筒自動開啓，停止後 (感應器受熱乾燥後) 則關閉。如此可收集各場降水的水樣，再定期或不定期分析水樣中的化學物質含量。

酸雨影響範圍廣泛，不分國界，已成為全球性的環境問題。臺灣地區亦不可避免地受到酸雨的威脅，尤以臺北、桃園地區最為嚴重 ($\text{pH} = 4.1\text{--}4.4$)，高雄次之 (小港測站為 $\text{pH} = 4.45$)；嘉義、澎湖、墾丁等測站所測得雨水的 pH 質則較高 ($\text{pH} = 5.2\text{--}5.6$) (陳景森、陳淨修，1992)。顯示酸雨與都會區及工業區大量使用石化燃料有密切關係。

然而並非所有大氣沈降對森林生態系的影響均是負面的。降水中所含有的一些化學物質，諸如氮、鈣等化合物，乃是森林生態系中養分的主要來源。美國 North Carolina 州

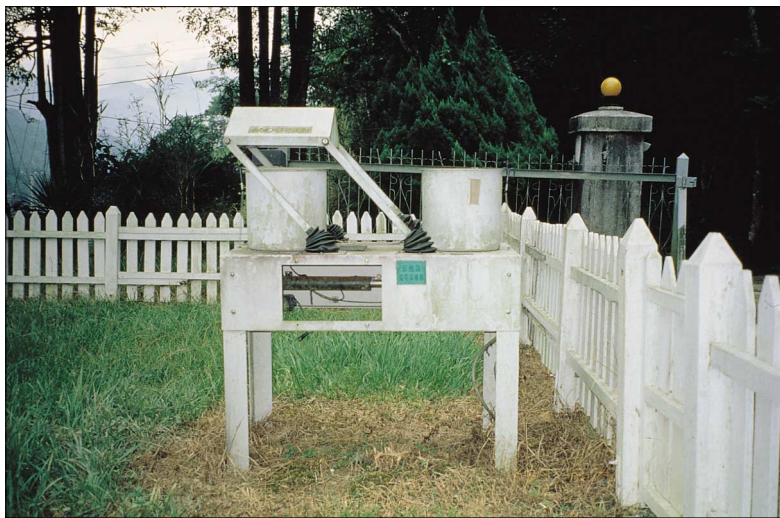


圖 65. Anderson 乾濕沈降器

Coweeta 水文試驗站追蹤林木的化學組成，結果顯示每年新生長的枝幹中，70 % 的氮及 20-40 % 的鈣與鉀是來自大氣沈降。大氣沈降為一自然現象，酸雨則是違反自然平衡的產物，唯有減少石化燃料的使用量，方能減少大氣中二氧化硫及氮氧化物的含量，且有待全人類建立共識，不分國界的共同努力與合作。

6-7 森林經營對水質的影響

集水區溪流水的水化學性質各異，其原因包括生物因素及非生物因素；生物因素包括：植生種類及密度、微生物含量多寡及動物活動等，非生物因素則計有：母岩性質、土壤質地與孔隙率、溪流量大小、降雨及溫度氣候因子等多種。此等因子相互關連，且因集水區而異，因此在探討林業經營對水質影響時，需先排除此等因子內在的關連性，作一概略性的說明。常見的森林經營作業中，對水質影響最受關注者為伐木、林火及家畜飼養等三項，茲說明如下。

(1). 伐木

砍伐林木會改變集水區流量產生機制並破壞養分循環，因而可能造成溪流水化學性質的變化。堆棄的殘材枝葉可使地表有機物質總量增加，砍伐跡地溫度會升高，土壤含水量亦因無蒸散作用而增加，因此高溫潮濕的環境有利於菌類滋長，加速有機物的分解。分解過程中釋出的二氧化碳，使土壤中亞碳酸鹽 (bicarbonate anion) 濃度增加，原吸附於土壤顆粒的陽離子，將因化學鍵作用的減弱而呈游離狀態，穩定性降低。分解過程中產生額外的養分 (主要為硝酸鹽) 已無林木可再吸取利用，造成養分收支失衡，砍伐區域聚積過多的養分，遇雨則容易被淋溶流失。

● 森林與水

美國 New Hampshire 州 Hubbard Brook Experimental Forest (HBEF) 為最先研究伐木對森林生態系養分流失影響的試驗地。長期研究結果與散佈世界各地的類似研究業已證實排水良好的集水區，經強度砍伐後，溪流水中的養分(陽離子及硝酸 [nitrate] 含量會增加，亦即砍伐區有養分流失現象。皆伐 HBEF 一北美闊葉樹為主的集水區，四年內溪流中無機氮增加 57 kg/ha，鈣增加 71 kg/ha，鉀增加 15 kg/ha (Martin et al. 1986)，為有力的例證。此種養分流失的現象，通常以砍伐後第二年為最高，但不會持續太久，待植生部分恢復後(北美洲約 2 至 3 年)，即無法量測。

另一方面，砍伐林木或剷除濱岸植物，亦會影響溪流之水溫 (圖 66)。水體溫度可左右許多水生動植物或藻類之生存；在若干地區水溫為決定溪流與河川水質之主要因子。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



圖 66. 約三分之二的太陽短波輻射 (0.3 至 2.5 microns) 會消耗於蒸發散及光合作用，林木砍除後則此部分能量將轉為增加地表及其上方空氣的溫度，因此砍伐小溪流的濱岸植物，會造成溪流水溫上升

量降低，此為伐木影響溪流水質之另一不利因素。

伐木會導致砍伐區養分流失已為不爭的事實，但對溪流水質的影響卻多屬不顯著 (Swank and Waide, 1979; Hewlett et al., 1984)。砍伐區增加的逕流量，為導致養分流失的肇因之一；然高流量亦能沖淡溪水化學物質的濃度，減緩影響。適當的伐木作業 (如帶狀擇伐不致造成林地養分收支失衡，被運出木材中所含的養分亦多可由大氣中補足) 以及採伐後迅速造林恢復植生，則伐木跡地的養分流失多屬不顯著，且不致影響溪流的水質。

(2). 林火

焚燒會使枯枝落葉等有機物質氧化成灰燼並造成氮、硫等養分而揮發；灰燼多屬可溶解的物質，遇雨則容易被淋洗流失，揮發與流失將會減少集水區總養分含量。焚燒殘材將導致枯枝落葉層及部分土壤層離子釋出量顯著地增加 (圖 67)，因而影響養分循環及溪流水水質，且此種影響常大於伐木本身所造成的影響。坡地上的植被遭焚燒後若再遇大雨，則灰燼中可溶解物質將會被大量地沖刷至溪流中，進而可改變溪流水原有的性質。然而多數林火乃自然現象，其所造成離子含量增加對養分流失及溪流水水質的影響通常是短暫的，一則是因為可溶解的灰燼很容易流失殆盡，一則是因為所產生的養分有利於植物更新而迅速被消耗 (Helvey, et al., 1985)。

(3). 家畜飼養

集水區內放牧或飼養家畜日漸普及，尤以亞洲鄰近都市的集水區及美國西部多數集水區為甚，而成為該等地區主要土地利用方式。一般而言，除非過度放牧或家畜集中圈養於

● 森林與水

溪岸地區，否則畜牧多不致對溪流水的化學性質造成影響，但細菌含量卻不應忽視。

除上述三種發生於集水區內的人為活動對水質有所影響外，區外事件所導致的酸性沈降，對河川水質的影響亦不可忽視。此種大氣沈降對森林及河川生態系的不利衝擊往往延遲甚久，而且治理困難，較其他諸如伐木等人為不當開發所造成的衝擊更為嚴重。水質惡化常始於溪流水陽離子濃度的增加，此種現象初期甚為緩慢，一旦土壤喪失其離子交換的緩衝功能後，則迅速惡化（圖 68）。任何生態系的失衡均有其



圖 67. 焚燒會使上層土壤的養分大量釋出，致使溪流水水質改變



圖 68. 德基水庫暗褐色的水體，乃優養化的結果

徵候，而溪流水質是生態系健全與否的有效指標，監測敏感地區的溪流水質，以掌握可能的改變，是生態系經營研究不可或缺的方法。

七、

森林在水土資源保育上的功能

森林在水土資源保育上所扮演的角色為二十世紀水文學者最熱衷探討的問題之一，國外對此課題所提出的研究報告甚豐，臺灣地區亦有些許之研究。本章根據森林水文學的學理，並參考國內外研究成果和經驗，分項討論森林在水土資源保育上的功能，期能對此一課題有更進一步的認識。

7-1 水資源涵養

水資源涵養 (water conservation and regulation) 一般係指增加集水區之低流量或基流量與調節流量在時間上之分佈，廣義則包括森林的水土保持功效。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』，事實上森林地確實比其他土地利用方式具有涵養水資源的功效，此種功能可從兩方面說明：

- (1). 在相近的土壤質地情況下，森林地具有最大的入滲 (水分由地表進入土壤層的過程) 容量。林冠及枯枝落葉層均具有機械式的保護作用，幾乎能完全吸收雨滴的打擊能量，一則可避免雨滴的飛濺沖蝕 (土壤顆粒受雨滴打擊而分離的現象)，一則可減免密封作用；此二種作用可使地表保持最佳的入滲狀況。枯枝落葉層及複雜交錯的植物體，使地表之粗糙度大為提高，除增加地表窪蓄容量外，亦能減緩地表水的流速，進而增加水分的入滲量與機率。因此，

● 森林與水

森林地的入滲容量多高於非林地 (見表 4)，且高於大部分降雨的降雨強度；降至森林的雨水多能進入土壤層，達到涵養水資源的必要條件。

- (2). 在相同土壤深度情況下，森林土壤具有最大的容水空間。森林地的上層部分多由枯枝落葉及腐植層所組成，含有大量的有機質，能促進土壤的團粒作用，增加土壤的孔隙率。而森林地滿佈的腐敗根系、植物體以及動物的孔穴，使森林土壤具有良好的通氣性與透水性，除大為提高孔隙率外，並可作為水流的快速通道，使水分能很快地進入各層次的土壤中，再藉毛係作用填充於較小的孔隙間。因此降雨後，森林土壤能快速且全面性的容納入滲的雨水，並暫時儲存於大大小小的孔隙間。

林地由於上述兩方面的正面效應，使大部分的降雨得以進入土壤層。保存於土壤孔隙間的水分，若受重力之影響較大，則漸次向下方移動，終將流入溪河、進入地下水層或進入母岩空隙內，並得以滯留貯存較常的時間。此等貯存於土

壤岩石孔隙內的水分與地下水則為基流之主要來源。因此，森林集水區的基流量通常較非林地集水區為高，證實森林涵養水資源之功效是可肯定的 (圖 69)。然而涵養水分的多寡，則決定於土壤之孔隙率、土壤深



圖 69. 森林涵養水資源的功能來自整個森林生態體系，而非林木本身

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，難以量化或精確的推估。

森林涵養水資源最大功能在於地下水的補注，乾旱時森林地的溪河多仍可見到水流，然而雖涓涓細流不斷，但其流量甚低，尤以坡陡及土層淺之集水區為甚。臺灣的水資源問題係『不患寡而患不均』，時間上及空間上的分佈差異太大，乾旱缺水時欲以如此低的流量來滿足臺灣現今廣大的水資源需求，幾乎是不可能（圖 70）。水源多來自上天的降水（森林無法涵養『水源』），若由極端氣候所造成之長期無雨，即使有良好的森林覆蓋，但無水可『涵養』，亦無法免除乾旱之苦。要避免乾旱時的水資源匱乏，則仍需靠水庫蓄水、減少水汙染以及杜絕浪費等方面著手。

圖 70. 源自森林的溪流在嚴重乾旱時仍雖不致枯竭，但流量甚低；對需水量日增的臺灣地區，無法僅靠植樹造林來解決水資源的需求



7-2 森林的防洪功能

洪水 (flood flow) 的定義為流量超過河道容量的大水，發生原因為降雨或融雪。降雨所引發的洪水主要係受氣象因

● 森林與水

素所影響，融雪所引發的洪水則係受能量傳遞因素所控制，二者產生機制不同。無論是何種原因所導致的洪水均會對生命財產造成嚴重損害，洪水防治在某些地區備受關注。長久以來森林即被認定具有此功能，但仍有許多爭論之處，本章就減少洪水水量及減少洪水危害兩方面，說明森林的防洪功效。

(1). 森林減少洪水水量

水珠自天空下降至流入溪流，此過程中最大的容水空間為土壤，若不考慮土壤因素，則就水文平衡理論觀點而言，林木之有無對洪水水量之影響主要來自截留及蒸發散。樹冠層之截留量有一定之限度，最大截留容量僅數釐米 (陸象豫、唐凱軍, 1995)，而降雨時之相對濕度大，致蒸發散量通常甚低，此兩種降雨損失量與產生洪水的降雨量多不成比率；因此可推斷森林在減少洪水水量方面，其功效是相當有限的。由於森林的截留與蒸發散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，故若無地表壓實 (compactness) 或改變集水區水流路徑等現象，伐木對集水區洪峰流量增加之能力極為有限。試驗證實移除林木僅能對上游第 1 或 2 級小集水區 10 年回歸週期以下的流量及洪峰流量會有所影響，對大集水區或極端降雨事件所導致的洪水，幾乎偵測不出水量上的影響 (陸象豫, 1996)。

然而許多研究者將土壤所容納的水量亦歸功於森林，認為林地能減少可觀的洪水水量。此種認知上的差異，可能會誤導社會大眾，認為森林具有無限的防洪功能，進而產生森林能避免洪水發生的錯誤觀念。須知非林地的土壤亦具有相近似的容水空間，況且流量的多寡主要決定於降雨時集水區的土壤水分狀況。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逕，逕流量即相對地增加較

多；故大部分的洪水多發生於連續降雨的第二場或第三場之後，概先頭下降的雨水主要用於填充土壤孔隙，當集水區土壤處於飽和或接近飽和狀態下，林木之有無對洪水流量影響不大 (Hess, 1984)。

(2). 森林減輕洪患之作用

前已述明，洪水之發生主要決定於氣象因素，既使有良好之森林覆蓋亦不能防止由極端降雨所導致之洪水；但森林可減輕或緩和洪水之危害卻是不爭的事實。林地較高之蒸發散量，會消耗較多之土壤水，因而可增加暴雨時土壤之容水空間，再加上截留與蒸發散所減少的雨量，對降雨強度小之降雨可顯著的減少逕流量，進而減輕洪水之發生次數及危害程度。然而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，林地內非點源沖蝕幾乎可完全避免，且漫地流亦鮮發生，故森林可有效地阻絕雨滴的飛濺沖蝕以及減緩地表逕流的水力沖蝕，因而達到保持土壤之功效 (圖 71)。洪水中若無挾帶的土砂等沖積物，則其衝



圖 71. 森林對減緩洪水水量的能力雖有限，但可借助其水土保持功能，發揮減緩水災災情的功能。圖為覆蓋良好森林地所流出的洪水

● 森林與水



圖 72. 洪水中挾帶大量泥砂與雜質，衝擊破壞力將大增，且會阻礙水流宣洩

擊破壞力將大為降低，且不會阻塞排水構造物，肆略時間亦因而縮短，藉此可達到減輕洪患之作用，此乃森林減輕洪水災害的關鍵，亦是森林防洪功能的真諦 (圖 72)。

森林防止沖蝕的功能亦非無上限，颱風期間挾帶強風的超強度降雨，森林亦難以抵擋而可能發生沖蝕崩塌現象。台灣夏秋期間所發生總降雨量大、強度高的連續豪雨，是引起大洪水的主因，森林覆蓋僅是影響集水區水文與洪水大小的幾項重要因素之一，其減輕洪患的功能是有限的 (鄭皆達，1999)。雖然如此，森林乃是防止洪水為患之最佳土地利用方式。保水必先保土，治土為治水之本，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，但對超強度降雨的防洪功效卻不能過分樂觀地完全寄望於森林。

7-3 森林的防旱功能

乾是氣象學上用語，旱則是針對植物而言；本文所指的乾旱 (drought) 主要係針對低降水量及低土壤含水量所導致的土壤乾旱 (soil drought)，而未考慮高溫、強風等因素所造成的大氣乾旱 (atmospheric drought)。換言之：長期無雨，土壤極度乾燥，致可利用的水源減少，無法滿足人類及動植物需求的情形即為乾旱。陸地上形形色色生物所使用的水絕大部分來自降水，湖泊、河川、沼澤及地下水等可用水亦多源自降水，而天空中的水氣則主要來自海洋蒸發。圖 73 為全球水分比率示意圖，假定降落於陸地的水分為 100 個單位，則來自地表蒸發散的水氣約為 71 單位，而源自海洋的水氣則高達 427 單位，可說明天空中絕大部分水氣來自海洋，只有一小部份才是由陸地上之蒸發散所賜與。而一地區降水量的多寡，主要決定於氣候因素 (諸如：緯度、距海洋遠近等)，地形因素 (如海拔高、坡向等) 次之，土地利用方式的影響則

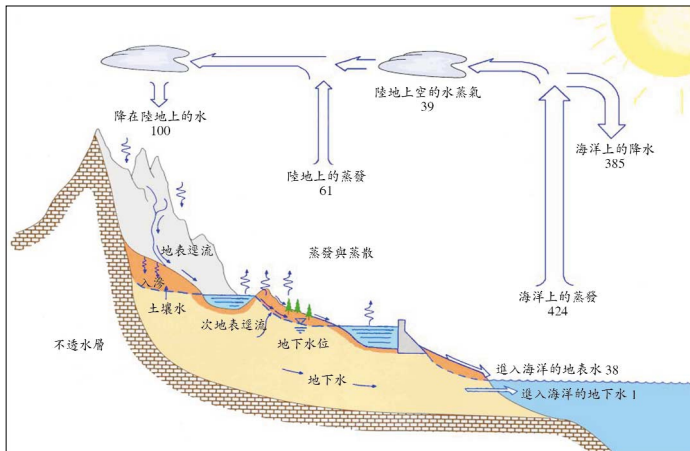


圖 73. 假設全年陸地降水為 100 個單位時，全球年水文平衡關係示意圖 (Chow et al., 1988)

● 森林與水

微不足道。因此以人爲的力量改變土地利用方式，進而影響一地區的降雨量的可能性甚低，區域性的降水幾乎不可能靠局部地區之充份造林而加以改變，即使有也因其量甚微而難以察覺。目前爲止，尚無資料可證實需要多大面積的森林方足以顯著影響大氣水文及能量收支。基於上述原因，伐木與造林均無法對一地區降水量產生顯著的影響，也間接說明旱災的發生和森林經營良窳鮮有關連 (圖 74)。



圖 74. 森林對解決由天候所造成的乾旱助益不大。

然而林地的透水性較其他覆蓋地區爲高，大部分的降雨均能入滲至土壤內，得以發揮涵養水資源的功能，以維持無雨時的基流量。源源不斷的基流水是森林減緩旱象的最大功能，但能否解除缺水之苦，則需視當地用水量而異。另一方面，森林的蒸發散會消耗大量的水分，能減少入滲的水分進

入溪流，此為森林對減緩旱象的負面影響。因此森林對低水基流量的影響是正反均有，有利或有害則因時因地而異。南非與紐西蘭等地區，曾有砍伐森林改闢為牧場以增加水資源的案例，且收良好效果；概該等地區年雨量僅七八百公釐，森林會消耗大部分的降水量，藉改變土地利用方式以增加集水區方屬可行。臺灣中南部地區有明顯的乾濕季節，乾季時亦有缺水之苦，但卻不適合藉改變森林覆蓋以增加河川流量。臺灣的水資源問題係不患寡而患時空上的不均，1980 年蓮華池的皆伐試驗即證實砍伐後所增加的流量多集中於多雨的濕季，對解決旱象無所助益，且會助長洪水危害。

7-4 森林的控制沖蝕功能

免除地表沖蝕最有效的方法為地表覆蓋 (ground cover，圖 75 及 76)，森林土壤受樹冠層、林下植生和枯枝落葉層的重重遮蓋，幾可完全吸收雨滴打擊土壤的能量 (圖 77)，免除雨滴所造成之飛濺沖蝕。林地入滲容量往往均大於降雨強度，地表逕流甚少發，即使高強度延時長的暴雨造成局部性的地表逕流，亦因高粗糙度 (roughness) 的地被植物與枯枝落葉層而受阻絕至流速減緩，使發生蝕溝的機會降低。因此，覆蓋良好之森林地地表沖蝕與蝕溝沖蝕均不易發生，此乃為森林控制沖蝕之正面效應。在自然狀況下，林地之蝕溝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) 所造成之沖蝕。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微量，不致有加速、加劇的現象 (圖 78)。

崩塌與滑動係指坡面上的土方受重力影響於短時間內大量向下方移動的現象。地被植物對坡面崩場地滑的影響，有正面的亦有負面的，但作用多僅及於根系到達範圍內 (圖

● 森林與水

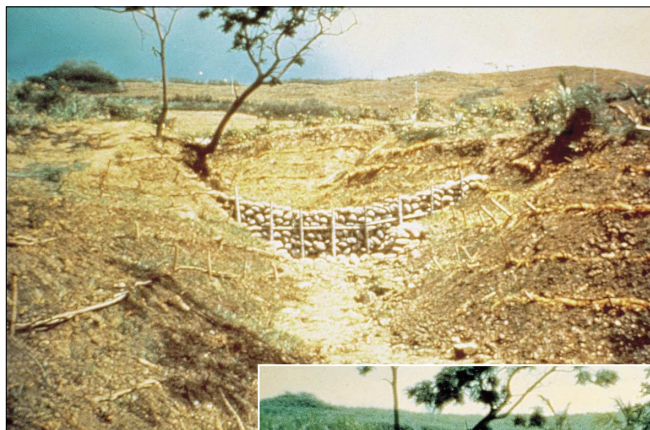


圖 75. 76. 臺東嘉路蘭農場水土保持處理前（上）後（下）對照，說明地表覆蓋對防止沖蝕的功效



圖 77. 森林的多層覆蓋幾乎可完全吸收雨滴的動能



圖 78. 若地表未遭受擾動與破壞，則林地的沖蝕量幾乎微乎其微，溪水不致混濁

79)。植物蒸發散具有減少土壤水含量、減輕土體重量、降低孔隙水壓、及緩和化學風化等作用，而植物根系網結土壤，糾結岩盤，能增加坡面抵抗滑動崩落的摩擦力，及土壤岩塊間的結合力；此二種功效均能增加坡面的穩定性。但林地具有高滲透率，降雨時土壤孔隙卻易達到飽和，產生高孔隙水壓、摩擦力減少、土體重量增加等不利坡面穩定的因素。據野外實際觀察研究，發現伐木後當原有林木根系漸次腐壞而新植被根系尚未健全之際（約砍伐後 3 至 8 年間），淺層崩塌發生的次數最為頻繁，此可間接證明在根系所能到達範圍內（通常為 1 公尺），森林防止崩塌的功效應予肯定。

7-5 改變水質

影響溪流水質的因素眾多，森林是否能改變（或改善）水質，尚無具體的定論。比較明確的事實為：森林的防止沖蝕

● 森林與水

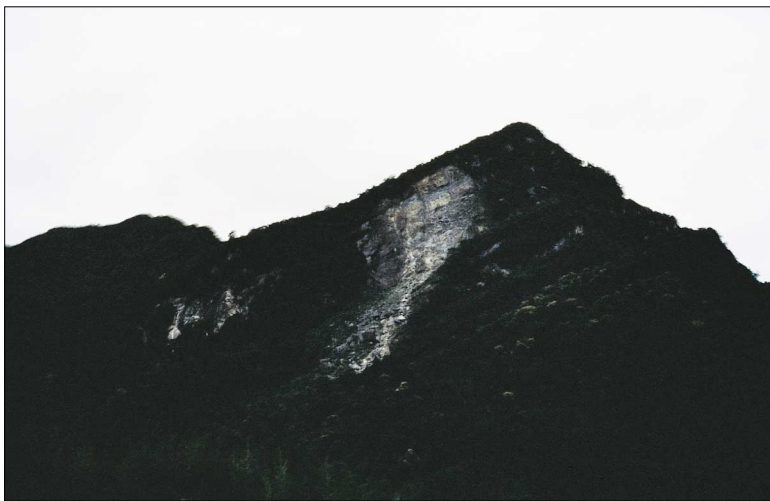


圖 79. 臺灣地區地質脆弱、坡度陡峻，部份地區的崩塌地滑屬正常現象，與森林存在與否無關

功效，能減少溪水泥砂與雜質含量，具有淨化水質的作用；林地的高入滲率可使大部分的降水進入土壤層，達到過濾的效果。故由森林地流出的溪水多屬清澈，森林在維持水源清潔上扮演重要的角色 (圖 80)。

至於森林對溪水化學性質的影響則較不明確，且因植物組成及地質條件而異。森林的樹冠層、枯枝落葉層及土壤層均會對雨水中之某些化學物質會起不同之交互反應作用，將使某些物質被吸收，有些則被淋溶出。雨水經過樹冠層時，一部分 NH_4^+ 、 NO_3^- 、及 SO_4^{2-} 等離子會被吸收，而 K^+ 、 Ca^{+2} 、 Mg^{+2} 等陽離子則會被淋洗出，故林冠可中和雨水酸度 (Martin et al., 1986; 金恆鑣等, 1994)。枯枝落葉層與有機層中半分解的有機質及腐植質均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吸收及固定養分的能力，因此流經此層

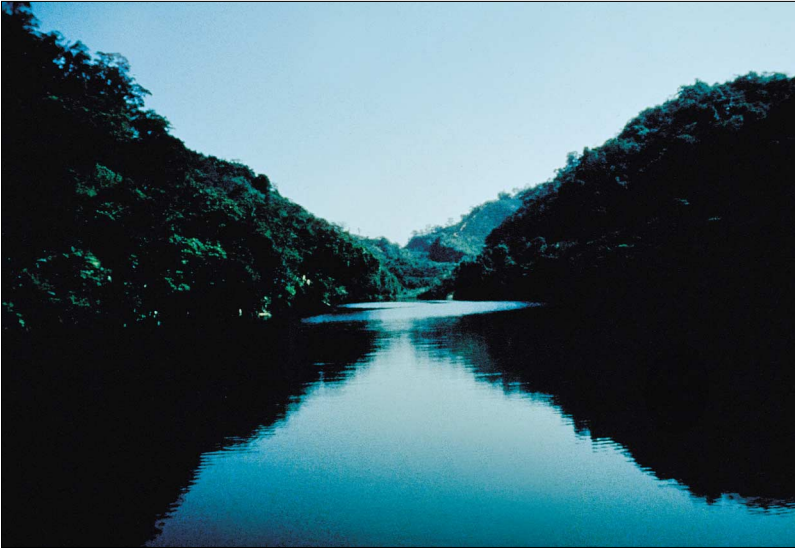


圖 80. 經過森林土壤層的過濾與淨化，致大多數森林區的溪流均屬清淨。圖為鴛鴦湖清澈的水體，乃四週環抱的森林所賜

之養分，大部分可被暫時保存或被植物體吸收而濾出。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_0 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，進而有機會與土壤顆粒等物質進行離子交換作用，因而間接發揮淨化與改善水質之功能。

一般而言森林地區由於土地利用單純，污染源較少，且森林土壤入滲率甚高，致絕大多數下降的雨水均能進入土壤層，再經過土壤的過濾而發揮『淨水』的功能。因此源自森林地區的水質均較佳，森林改善水質的功能絕對是可肯定的。

八、結 論

降水多寡為決定森林存在與否的最主要因素，而森林則影響雨水下降後的流動路徑及在時間上分配，森林與水相互影響，關係錯綜複雜無且因時因地而異。本文僅作一概略說明，茲綜合上述各章說明討論，歸納下列森林與水之關係的幾項基本科學認知。

- 降水量的多寡為決定一地區森林存在與否的最主要因子，溫度則為造成不同林型的主要環境因子
- 降水乃陸地上最主要的水源，其主要來自海洋蒸發，植樹造林難以增加當地的降雨量及降雨頻率
- 林木不會保存水分以供給溪流量，涵養水資源的功能係來自整個森林生態體系所提供的有利保水蓄水環境
- 河川流量主要受氣候支配，地形、土壤次之，森林對河川流量僅能達到微量調節之作用
- 森林可藉著其保土護土功能發揮減輕洪水危害的功效，但無法防止極端降雨所造成之洪水
- 森林對非點源沖蝕的防止效果顯著，但對崩塌的防治卻多止於根系所能到達的範圍內
- 森林區大多數的降水皆可進入林地的土壤層，進而達到過濾與淨化水質的效果
- 森林的環境保育功能有其上限，但毫無疑問卻是水土資源保育最佳的土地利用方式。

森林佔臺灣全島面積的 58%，水在森林生態系內的分佈、流動、及儲存與水資源利用及國土保安息息相關，森林與水可謂臺灣的命脈。但臺灣森林區陡峭的地形、脆弱的地

質、以及極端的氣候等因素，使森林地對任何擾動均相當敏感，對山坡地築路、砍伐林木以及隨後而至的農業開墾，均應慎重其事。森林的消失不僅是樹種的減少而已，生活在其內外的生物都將受其影響，人類自不能倖免；然而只要大家關心我們的環境，愛護森林，受森林庇護的動植物亦會力爭上游生生不息。對森林與水間的關係，了解越深，越能夠保護此兩種寶貴的自然資源，同時亦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

本文承蒙林試所金恆鏞、胡蘇澄先生、中興大學水保系鄭皆達教授審稿並提供寶貴意見，臺灣大學地理系林俊全教授提供福山試驗集水區水溫記錄，農委會吳輝龍科長、中興大學水保系林昭遠教授、林試所呂勝由先生提供照片，僅此致謝。

● 森林與水

參考文獻

金恆鑣 (譯) 1991 森林土壤的性質與程序。國立編譯館主編。
pp:3-9。

金恆鑣、夏禹九、翁松元、劉瓊霏 1994 森林集水區對水質
維護之功能。農委會林業特刊第 46 號 PP:408 - 412。

洪富文 1984 森林經營對水質的影響。臺灣林業 10(11):39-
45。

夏禹九、金恆鑣、楊炳炎、漆陞忠 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。

陸象豫、漆陞忠、盧惠生 1988 不同林相枯枝落葉層物理及
水文特性之研究。林業試驗所研究報告季刊3(1):363-377。

陸象豫、漆陞忠 1988 蓮華池地區天然闊葉林枯枝落葉層特
性之研究。中華水土保持學報 19(1):71-79。

陸象豫、唐凱軍 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。

陸象豫 1996 森林在水土資源保育上的功能。臺灣林業科學
11(3):33-347。

陸象豫 1997 林業試驗所蓮華池分所氣象資料 (1961-1996)。
林業試驗所林業叢刊第 76 號，pp 449。

陸象豫、唐凱軍、黃惠雪 1999 林業試驗所畢祿溪工作站氣
象資料 (1971-1998)。林業試驗所林業叢刊第104號，pp
343。

陳景森、陳淨修 1992 揭開酸雨的神祕面紗—酸雨的成因及
對策。科學月刊 23(6):419-423。

路統信 1996 森林與環境保護。新時代林業特刊 No.16，中國造林事業協會。

鄭皆達 1999 森林經營對水資源的影響。台灣省林務局，臺北市，21p。

經濟部水資源局 1999 中華民國八十八年臺灣水文年報。經濟部水資源局，臺北市，350p。

劉業經、呂福原、歐辰雄 1994 臺灣樹木誌。中興大學農學院，臺中市，925p。

蔡長泰 1994 臺灣的發展與河流關係之研究。人爲本位發展新臺灣系列研討會論文集，PP：43-55。

臺灣省林務局 1995. 臺灣森林資源及土地利用調查。臺灣省林務局，臺北市，286p。

臺灣省林務局 1999 第三次臺灣森林資源及土地利用調查—林地分級調查報告。臺灣省林務局，臺北市，222p。

Bailey AS 1998 USDA Hubbard Brook Experimental Forest. Hubbard Brook Data Manager at the Forestry Sciences laboratory, Durham NH, pp16.

Bosch JM and JD 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.

Botkin DB and EA Keller 1995 Environmental science-earth as a living planet.Wiley and Sons, Inc. p133.

Brown GW 1980 Forestry and water quality. Oregon State

● 森林與水

University Press, Corvallis.

Brooks KN, PF Ffolloitt, HM Gregersen and JL Thames 1992 Hydrology and the Management of Watersheds. Iown State University Press. Ames Iowa. pp 89-90.

Chow VT, Maidment DR, Mays LW 1988 Applied hydrology. McGraw-Hill Publishing Company. New York. pp175-186.

FAO (Food and Agricultural Organization) 1990 Forest Product Prices, No. 95, 1969-1988. Rome: FAO.

Hamon WR 1961 Estimating potential evapotranspiration. Journal of Hydrology Division, Proceedings ASCE 87(HY3)107-120.

Helvey JD, AR Tiedemann and TD Aderson 1985 Plant nutrient loss by soil erosion and mass movement after wildfire. Journal of Soil Water Conservation 40:168-173.

Hess S 1984 Timber harvesting and flooding. Journal of Soil and Water Conservation. 39(2):115-117.

Hewlett JD and CA Troendle 1975 Nonpoint and diffused water sources: A variable source area problem. In Proceedings of Symposium on Watershed Management, pp. 21-46. American Society Civil Engineering New York.

Hewlett JD, HE Post, and R Rose 1984 Effect of clearcut silviculture on dissolved ion export and water yield in the Piedmont. Water Resource Research 20:1030-1038.

Hibbert AR 1967 Forest treatment effects on water yield. International Symposium on Forest Hydrology, W. E. Sopper and

H.W. Lull (Editors). Program Press, Oxford, England, 527-543.

Hibbert AR 1971 Increases in streamflow after converting chaparral to grass. *Water Resources Research* 7(1):71-80.

Hibbert AR 1983 Water yield improvement potential by vegetation management On western range lands. *Water Resources Bulletin* 19(3):375-381.

Hicks JH, RL Beschta and RD Harr 1991 Long-term changes in streamflow following logging in western Oregon and associated fisheries implications. *Water Resources Bulletin* 27(2):217-226.

Hornbeck JW, MB Adams, ES Corbett, ES Verry, and JA Lynch 1993 Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northern USA. *Journal of Hydrology* (150):323-344.

Hsia YJ, Koh CC 1982 Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan. *IAHS Publication No.* 140, 215-220.

Hudson Norman 1995 *Soil Conservation*. Third Edition. Iowa State University Press. Ames, Iowa. pp:28-31.

Kochenderfer JN, JD Helvey, JH Patric and EK Jr William 1998 *Woodlot Management: An Introduction to Water in the Forest*. USDA Forest Service Northeastern Experimental Station, Parsons, W.Va. pp 28.

Lee Richard 1980 *Forest Hydrology*. Columbia University Press, New York. pp:130-133.

● 森林與水

Lull HW and KG 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 CW, RS Pierce, GE Likens, and FH Bormann 1986 Clearcutting affects stream chemistry in the White Mountains of New Hampshire. USDA Forest Service Research Paper NE-579.

McCashion JS and RM Rice 1983 Erosion on logging roads in north-western California: how much is avoidable? *Journal of Forestry* 81:23-26.

Meeuwig RO and PE 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 WF and WJ Kidd 1971 Effect of logging roads on sediment production rates in the Idaho Batholith. USDA Forest Service Research Paper INT-123, 14 pp.

Martin CW, RS Pierce, GE Likens and FH Bromann 1986 Clearcutting affects stream chemistry in the White Mountains of New Hampshire. USDA Forest Service Research Paper NE-579.

Ponce SL and JR Meiman 1983 Water yield augmentation through forest and range management-issues for the future. *Water Resources Bulletin* 19(3):415-419.

Swank WT and JB Waide 1979 Interpretation of nutrient cycling research in a management context: Evaluating potential effects of alternative management strategies on site productivity. In *Forest*

Ecosystems: Fresh Perspectives from Ecosystem Analysis, ed. Waring RH and J Franklin. pp:137-158. Corvallis: Oregon State University Press.

Thornhwaite CW and JR Mater 1957 Instructions and tables for computing potential Evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute Technical Publication In Climatology 10(3).

Troendle CA and JR Meimen 1986 The effect of patch clearcutting on the water balance of subalpine forest slope. In: Proc. Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, pp 93-100.

Troendle CA 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 CA and RM King 1987 The effect of partial and clearcutting on streamflow at Deadhorse Creek, Colorado. Journal of Hydrology 90:145-157.

Wang LJ, YL Hsia, JL Hwang and HB King 1994 Long-term ecological research in Fushan Forest-hydrogeochemical cycles, Biodiversity and Terrestrial Ecosystems (CP Peng and CH Chou eds), Institute of Botany, Academia Sinica Monograph Series No. 14, pp 449-456.

Wheathead PG and M Robinson 1993 Experimental basin studies-an international and historical perspective of forest impacts. Journal of Hydrology 145:217-230.

國家圖書館出版品預行編目資料

森林與水 = Forests and water / 陸象豫撰文
：唐凱軍，黃昌榕繪圖，—初版— 臺北市
：農委會林試所，民90
112 面；15x21公分.—（林業叢刊：133）

ISBN 957-02-8180-4 (平裝)

1. 森林 2. 水文學 3. 森林保護

436

90004910

森林與水

發行人：楊政川

撰 文：陸象豫

繪 圖：唐凱軍、黃昌榕

美 編：麥克馬林有限公司 Steven

電 話：(02)2974-0276

出版者：行政院農業委員會林業試驗所

100 台北市中正區南海路53號

電 話：(02)-2303-9978 傳真：(02)2314-2234

網 址：<http://www.tfri.gov.tw>

印 刷：

出版年月：中華民國九十年三月 初版

定 價：每冊新台幣 200元

展售處/三民書局：100台北市重慶南路一段61號 (02)23617511

104台北市復興北路386號 (02)25006600

正中書局：100台北市衡陽路20號 (02)23821394

五南文化廣場：400台中市中山路2號 (04)22260330

新進圖書廣場：500彰化市光復路177號 (04)7252792

青年書局：802高雄市青年一路141號 (07)3324910

GPN: 1009001069

ISBN: 957-02-8180-4 (平裝)