

曾文水庫對流量及輸沙量的影響*

The Effect of Tsengwen Reservoir on River Discharge and Sediment Load

陳翰霖*¹
Han-Lin Chen

張瑞津*²
Jui-Chin Chang

Abstract

The Tsengwen coastal plain has experienced significant progradation over last three hundred years due to abundant sediment supply. The construction of the Tsengwen Reservoir on the main trunk in 1973, however, has caused dramatic change of this trend. This paper aims to examine the reservoir's impact on the discharge and sediment load at the lower course of the Tsengwen river. Based on the hydrological data of Hsikang gauge station in the lower course, the discharge decreased from 39 CMS to 29 CMS after the reservoir's construction and the number of days with high peak flow > 400 CMS drops from 7.4 to 5 while those with low flow < 0.3 CMS drops from 86 to 49. On the other hand, the total sediment discharge of the Tsengwen river decreased from 14.8 million to 9.65 million tons after the reservoir's construction. It is mainly caused by the reservoir interception up to 5.7 million tons/yr in average and the decrease of sediments supply of 3.6 million tons/yr from the major tributary, the Tsai-liao river.

Keyword : Tsengwen Reservoir, discharge, sediment load

中文摘要

曾文溪海岸平原受到長期輸沙的影響向西堆積進夷，但自1973年底曾文溪主流上游的曾文水庫完工啟用後，烏山頭水庫平均每年自東口進水口引水近8.7億 m^3 ，造成下游河道流量減少25%。同時水庫區也阻截了上游的河道搬運物，累計至2000年底止庫底共淤積約達1億6仟萬噸，年平均淤積570萬噸，並造成水壩下游河道輸沙減少。

* 本研究曾於 2003 年 2 月第四屆海峽兩岸地形與環境學術研討會中口頭發表。

*1 慈濟技術學院通識教育中心助理教授。

*2 國立台灣師範大學地理系兼任教授。

本研究採用經濟部水利署西港測站1960至2000年的資料分析，結果得知，曾文水庫興建前後造成平均日流量由39CMS降為29CMS；各月最大日流量平均值由328CMS降為210CMS；各月最小日流量平均值由1.4CMS提升為1.7CMS。且每年日流量大於400CMS的日數也由7.4日降為5日；日流量小於0.3CMS的日數也由86日降為49日，顯示曾文水庫確實降低洪水及乾旱流量的規模與頻率，發揮防洪與調節水量的功能。

經過率定曲線法的統計分析及檢定修正後，推估曾文溪主流下游及主要支流後岷溪、菜寮溪的歷年輸沙量，得知曾文溪下游歷年平均輸沙量為1128萬噸，支流菜寮溪高達774萬噸，約為主流的70%。分析顯示曾文水庫興建前主流下游年平均輸沙量1480萬噸，建庫後降為965萬噸，較建庫前減少515萬噸(約-35%)。其中，除了水庫年平均淤積量570萬噸外，菜寮溪年平均減少360萬噸，也是造成主流下游輸沙量減少的主要原因。

關鍵詞：曾文水庫、流量、輸沙量

壹、緒論

台灣西南部海岸平原以洲潟海岸地形著稱，而後歷經三百多年的演變，河流多次汜濫改道及淤塞，帶來大量輸沙並造成內海水域逐漸淤積，以及西南海岸平原自然環境的改變，對當地居民生活影響至鉅，其中尤以曾文溪的影響程度最受矚目。曾文溪同時也是台灣西南部的重要水源之一，提供大量灌溉及民生用水，但因本區降雨集中於夏秋之間，每年十一月至翌年四月的乾季，往往出現水源不足的窘境。為充分利用曾文溪水源，乃於楠西上游7 km的柳藤潭興建曾文水庫，發揮灌溉、給水、防洪的功能。

但自1973年底曾文水庫完工啟用以來，各界即開始關心水壩對河流自然環境的影響，而其中最受注意的就是曾文水庫對下游河道地形的影響。為釐清此問題，本文分析建壩前後曾文溪流域上游的雨量長期趨勢，以及下游河道的流量與輸沙量的變化，並採用文獻分析、野外實察、統計分析等方法進行研究。

近期有關水壩對河川流量及輸沙量影響的研究，國外部分有Inbar (1990)研究Goland高地建壩的影響，認為最顯著的影響是水壩下游洪水流量明顯下降為原本的1/3。Kondolf (1997)認為河流建壩將造成河道上細小沉積物被帶走，河床礫石裸露，加速河岸侵蝕、河口海岸侵蝕。Abam (1999)認為尼日河上游興建49個水壩，儲水3600萬 m^3 ，並造成河口輸沙減少70%，影響尼日河三角洲的海岸地形變遷。Garland等(1999)研究南非Inanda水壩影響河道底質運輸及沉積物的情形，認為Mgeni河自1988年建壩後平均年逕流量減少4%，並造成下游沉積物減少。Loizeau (2000)認為隆河上游興建發電水壩，阻攔水量達12.2億 m^3 ，雖降低下游洪水發生頻率，但也造成隆河三角洲輸沙量減少。Shields Jr. (2000)研究美國密蘇里河Fort Peck水壩，認為水庫興建可以降低洪水發生頻率及歷時，並減緩河道變遷的速率。國內學者有蔡長泰等(1995)發現曾文水庫興建後下游河道明顯發生侵蝕；(1999)水庫蓄水提昇了枯水季的河川流量。陳翰霖、張瑞津(2001)研究曾文水庫興建後，確實造成主流下游流量及輸沙量減少以及平原段河道侵蝕的現象。

貳、研究區概況

曾文溪全長138 km(圖1)，流域面積1177 km^2 ，為台灣南部第二大河，河源標高2440 m，平均坡降0.0174，谷口以上的山地區坡降則達0.0381。梅雨及颱風環流雨是主要的降水來源，年平均雨量2643 mm，平均逕流量約為23.6億 m^3 ，是台灣西南部主要水源之一。但因降雨約有90%集中於五月至九月之間夏秋兩

季，因此每年十月至隔年四月的乾季往往出現水源不足的窘境。

為充分運用曾文溪水資源，分別於1930、1973、1994年興建完成烏山頭水庫、曾文水庫及南化水庫，蓄水提供嘉南平原灌溉、民生及工業用途，並兼具防洪功能。其中，除了曾文水庫興建於曾文溪主流外，烏山頭水庫位於官田溪上游，是曾文溪的離槽水庫；南化水庫則位於支流後堀溪上，除取用後堀溪水外，也自甲仙附近越域引取旗山溪水源。菜寮溪雖有鏡面水庫，但因其集水面積 2.73 km^2 僅佔菜寮溪流域的1.5%，在流量及輸沙量上影響甚微。

曾文溪上游集水區地質岩性以中新世及上新世砂岩為主並夾有少數頁岩，且茶山以上多斷層、褶皺及節理，故坡面較不穩定容易崩塌(張石角，1971、1972)。此外，主要支流菜寮溪因流經易受侵蝕的古亭坑層泥岩區，故河流含沙量亦偏高。根據經濟部水利署水文年報資料顯示曾文溪下游歷年平均輸沙量高達3100萬噸，居台灣第三位，比輸沙量 $26346 \text{ MT}/\text{km}^2/\text{yr}$ 亦高居全台第二位。受到長期輸沙影響，曾文溪下游平原近三百多年來持續向西堆積進夷，並發生四次重要改道，直到1930年代河堤興築後，河道才未再發生大幅變遷(張瑞津等，1996)。

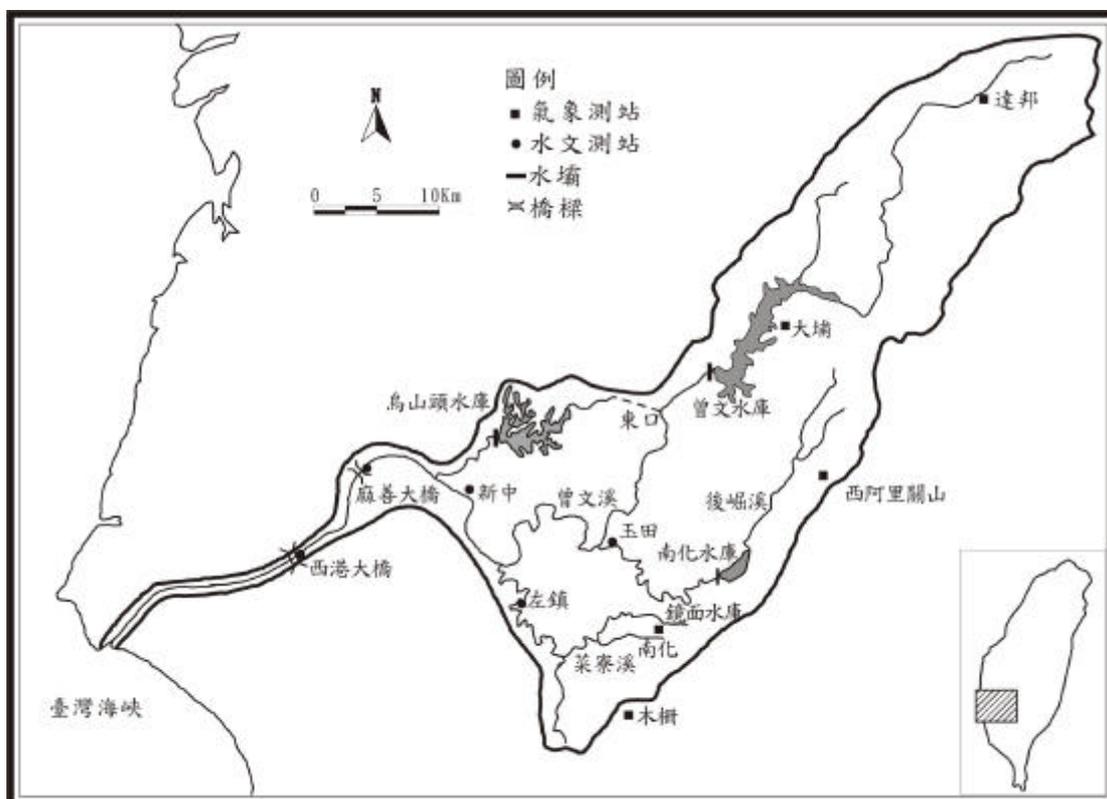


圖 1 研究區位置圖

參、流量變化

根據上游的達邦、西阿里關山及木柵測站¹雨量觀測資料可知，曾文溪流域上游年平均降水量2780 mm，其中87%集中於每年五至九月份之間，尤其梅雨及颱風環流所引發的豪雨或大雨²，往往因為降雨強度而高而造成土壤侵蝕流失，對於下游河流輸沙影響至鉅。以1959年至2000年的降雨量統計分析可知，平均各年豪雨及大雨總日數約僅10天，但雨量卻佔年平均雨量的42%。影響所及，河流洪枯水量差異甚大，歷史最大日流量為3090 CMS，而乾季時河川乾涸，甚至常有無法測得流量的狀況。

為了解歷年來的流量變化，本研究參考水文年報的流量資料進行分析，其歷年日流量資料係由每年約20至30次的水位流量實測資料，建立各年水位流量率定曲線後，推估各日流量。若有豪雨或颱風時，則密集測量各小時水位流量變化情形。

分析結果發現每年六至九月份因為豪雨及大雨較為頻繁，故期間西港站流量佔全年比例近90% (圖2)。其中尤以颱風環流雨量影響最大，造成1972、1977、1990年曾文溪下游各年逕流量超過23億m³以上。1980、1993、1995年逕流量相對較少，均不及4億m³ (圖3)。另外，根據年中日流量變化比較亦可知豪大雨所造成的洪水流量極為突出(圖4、圖5)，豐水年日流量最高者可超過2000 CMS，而枯水年最高日流量則罕有超過500 CMS者。

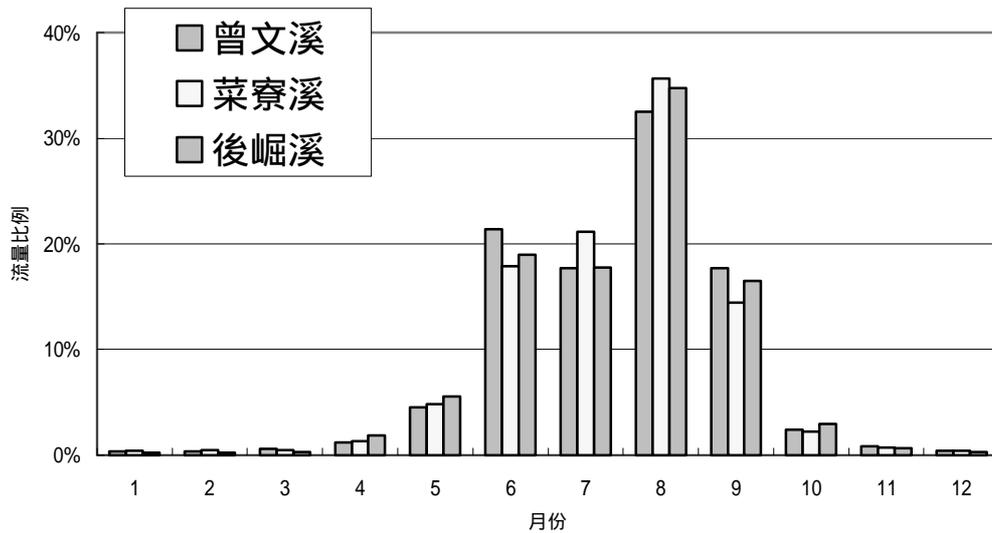


圖 2 歷年各月平均流量比例圖

¹ 菜寮溪上游各雨量站均缺乏長期且完整的資料，故除了採用南化氣象站資料外，並參考二仁溪上游與菜寮溪分水嶺附近的木柵測站雨量資料，以解釋菜寮溪上游的降雨特性。木柵站與南化站各年雨量資料經統計相關分析及顯著性檢定後，呈現顯著正相關。

² 本研究採中央氣象局的定義：連續 24 小時累積雨量超過 50 mm，且其中一小時超過 15 mm 者稱為大雨；連續 24 小時累積雨量超過 130 mm，且其中一小時超過 15 mm 者稱為豪雨。

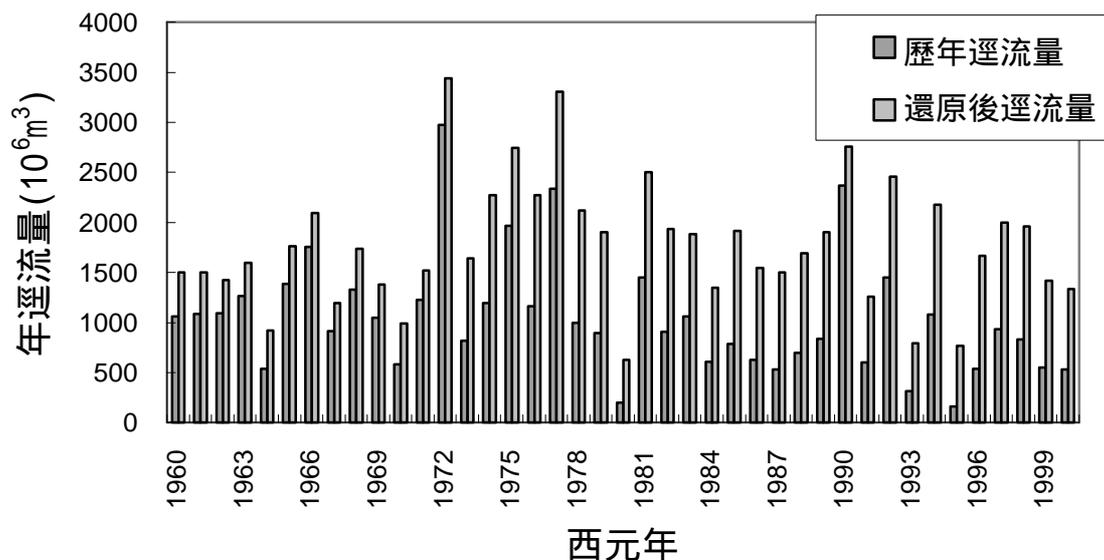


圖 3 曾文溪歷年逕流量比較圖

以曾文溪下游西港站流量數據分析可得，1960至1972年主流建庫之前的年平均逕流量為12.5億 m^3 ，1973年建庫蓄水後至2000年間，平均年逕流量降為9.44億 m^3 ，較往年減少3億 m^3 (-25%)；菜寮溪年平均逕流量也由2.39億 m^3 降為1.85億 m^3 ，平均減少0.54億 m^3 (-23%)。反觀後岷溪則由2.94億 m^3 略增為3.02億 m^3 (表1)。對照曾文溪上游集水區達邦及西阿里關山測站的降雨量資料，顯示曾文水庫興建後主流上游及後岷溪的年平均雨量均較建壩前略增100公釐，但因曾文水庫建壩引水而造成曾文溪主流下游流量減少。後岷溪卻因遲至1994年才有南化水庫攔水影響，故自1973年以來年平均流量略為增加。相對地，菜寮溪則因同期雨量略減，故流量也同步減少³。

但是根據嘉南農田水利會的歷史資料記錄可知，早在1919年時日本台灣總督府委託八田與一技師對嘉南平原的灌溉計劃進行研究，統籌興建離槽式的烏山頭水庫，從曾文溪烏山嶺下開鑿引水隧道將水自東口進水口引入水庫中，其最大進水量為56 CMS，於1930年完工後平均每年自曾文溪取水約3.69億 m^3 。而此一時期因為曾文溪尚未有水庫蓄水，故豪大雨帶來的水量往往無法全數進入烏山頭水庫中，大部分水流仍由曾文溪排入下游河道中。曾文水庫興建後發揮強大蓄水功能，自1973年起平均每年引入烏山頭水庫的水量提昇至8.72億 m^3 ，造成曾文溪主流下游年逕流量平均減少約5億 m^3 。

支流後岷溪上游興建南化水庫，雖然自1994年開始蓄水後平均每年自河流中引走約1.22億 m^3 ⁴，再加上南化水庫集水區於興建水庫後，降雨量較之前減少200 mm，因此造成後岷溪年平均流量同步減少約1.34億 m^3 ，顯示南化水庫的興建，對於後岷溪流量亦產生影響。

³ 根據南化及木柵雨量站資料估計，曾文水庫興建後菜寮溪年平均雨量略減 10 公釐，但因水庫興建前菜寮溪流量資料僅有 1971 及 1972 兩年，樣本數過少且 1972 年又為豐水年，故平均年逕流量高過建庫後甚多。

⁴ 此一數據已扣除來自旗山溪甲仙攔水堰的越域引水量。

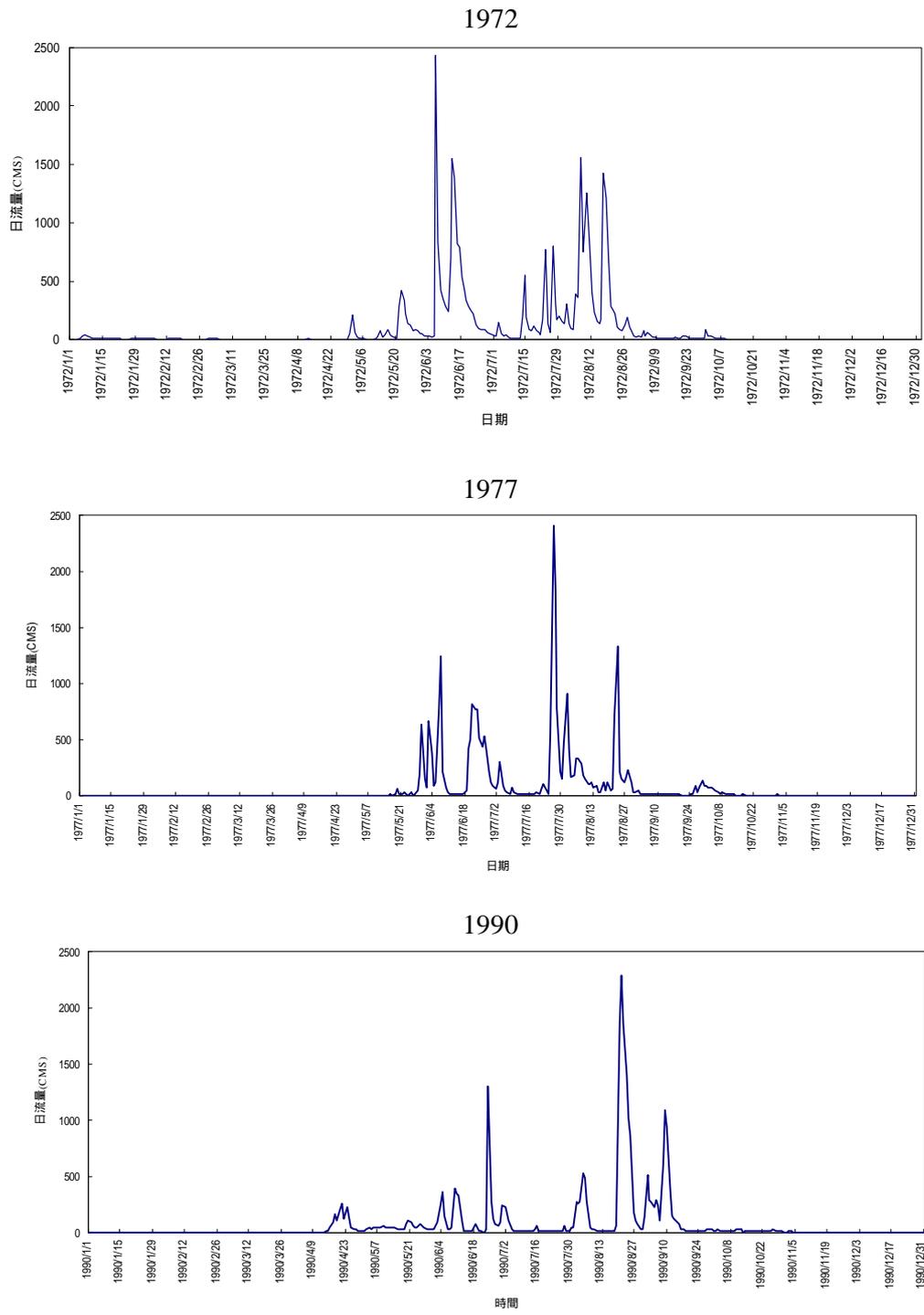


圖 4 曾文溪豐水年日流量變化圖

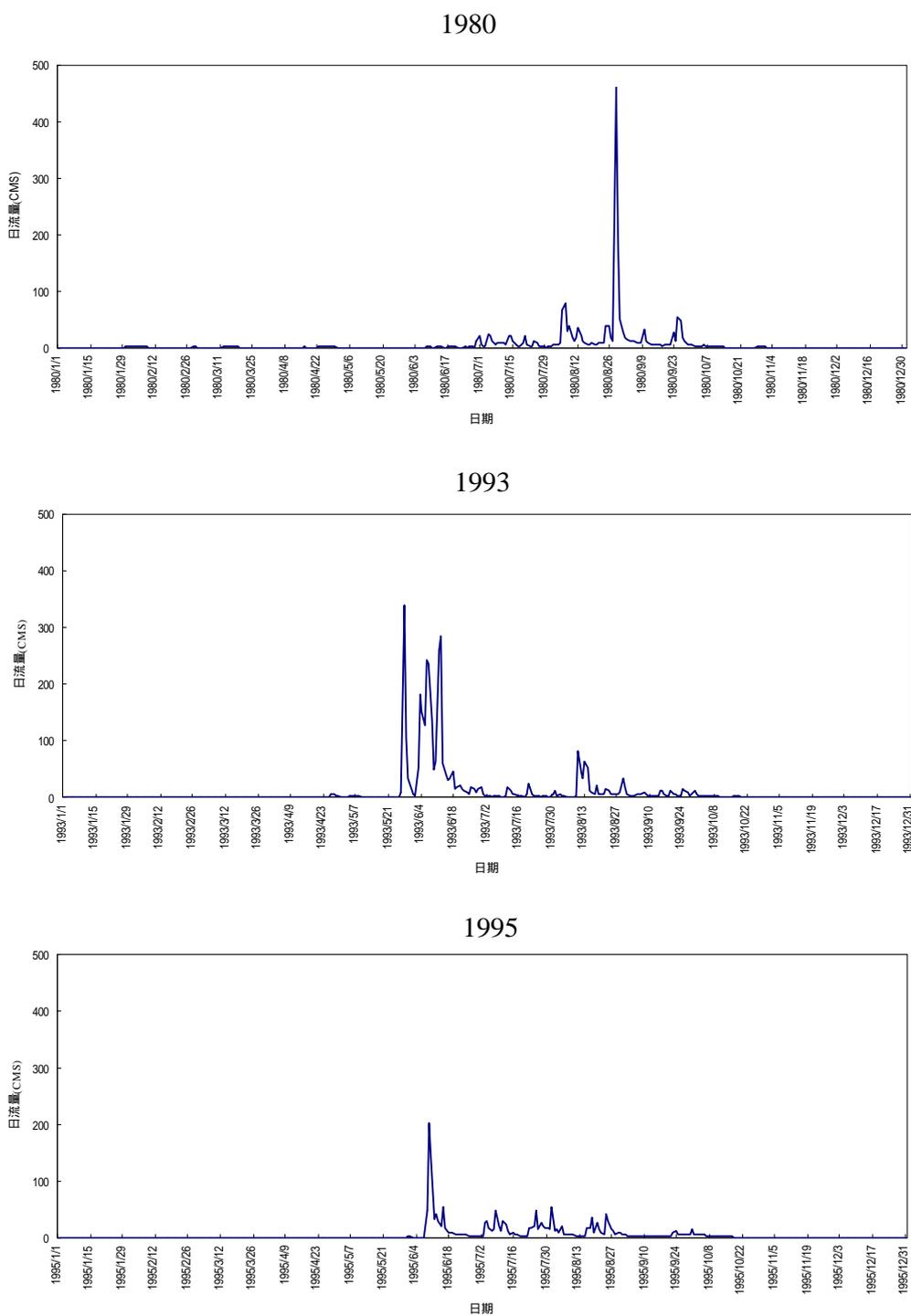


圖 5 曾文溪枯水年日流量變化圖

表 1 歷年逕流量及水庫取水量表

單位：10⁶m³

西元年	曾文溪	菜寮溪	後崛溪	烏山頭水庫 東口引水	南化水庫 取水	曾文溪 還原後	後崛溪 還原後
1959			417				
1960	1059		383	442		1501	
1961	1089		302	411		1499	
1962	1092		215	333		1425	
1963	1263		313	333		1596	
1964	539		209	385		923	
1965	1387		278	375		1762	
1966	1758		405	338		2095	
1967	912		197	281		1194	
1968	1327		196	412		1739	
1969	1047		261	330		1377	
1970	584		164	407		991	
1971	1226	173	284	291		1517	
1972	2974	305	611	466		3440	
1973	821	162	322	818		1639	
1974	1193	228	395	1077		2270	
1975	1969	292	488	776		2745	
1976	1161	214	381	1114		2276	
1977	2333	364	636	970		3304	
1978	996	190	319	1122		2118	
1979	894	185	330	1006		1900	
1980	196	41	85	430		626	
1981	1449	229	401	1057		2506	
1982	911	184	481	1021		1932	
1983	1058	167	241	828		1886	
1984	607	131	259	741		1348	
1985	789	179	276	1129		1918	
1986	624	123	348	922		1546	
1987	533	111	222	965		1498	
1988	698	176	282	995		1693	
1989	836	180	348	1068		1904	
1990	2368	305	383	393		2761	
1991	604	138	325	653		1257	
1992	1452	331	526	1008		2460	
1993	314	102	74	479		793	
1994	1077	275	162	1002	100	2178	262
1995	161	53	42	534	73	768	115
1996	535	174	97	955	176	1666	273
1997	934	139	322	937	128	2000	450
1998	832	149	136	932	198	1962	334
1999	553	260	247	737	129	1418	376
2000	529	102	327	757	48	1334	375
平均	1041	189	302	713	122	1775	322
建庫前	1250	239	294	369		1620	294
建庫後	944	185	302	872	122	1847	332
前後差值	-306	-54	8	503		227	38
變化比例	-25%	-23%	3%	136%		14%	13%

說明：曾文水庫完成於1973年，南化水庫完成於1994年。

假設在曾文溪上游及後崛溪未興建水庫的情況下，河水可完全輸送至主流下游，則將歷年曾文水庫及南化水庫的取水量加上現有曾文溪下游及後崛溪各年流量，即可推估得到歷年未興建水庫的還原後流量。計算結果得知曾文溪還原後年平均逕流量應為17.75億 m^3 、後崛溪為3.22億 m^3 (表1)。

將還原後之逕流量分建庫前、後二期加以比較，可發現曾文溪與後崛溪建庫後期之平均年逕流量比建庫前期者，分別增加2.27億 m^3 (14%)及0.39億 m^3 (13%)，而菜寮溪則反而減少近0.54億 m^3 (-23%) (表1)。經與雨量資料對比，係受降雨量差異所致。

根據西港測站的流量資料研究得知，曾文水庫啟用蓄水後的歷年平均日流量由39 CMS降為29 CMS；各月最大日流量平均值亦由328 CMS降為210 CMS；且日流量大於或等於400 CMS的日數(百分位數90以上的洪水流量)由每年7.4日降為5日，洪水流量規模及發生頻率均明顯降低。至於各月最小日流量平均值分析則顯示由建庫前的1.4 CMS上升為1.7 CMS；且小於0.3 CMS的枯水位流量日數由每年86日降為49天，顯示水庫蓄水確實降低河流的乾旱規模與頻率。若以歷年平均日流量四分位分差距由建庫前的平均13.7 CMS降為建庫後11.9 CMS，亦顯示流量的離散程度已趨於縮小，亦即洪水及枯旱流量的情形已獲得明顯改善，曾文水庫確實發揮了防洪及水源調節的功能(表2、表3)。

表 2 曾文水庫興建前後主流下游各月平均流量特性比較表

單位：CMS

項目	算術平均數 (M)		最大值 (Max)		最小值 (Min)		中位數 (Md)		下四分位數 (Q1)		上四分位數 (Q3)		四分位差 (QD)	
	建庫前	建庫後	建庫前	建庫後	建庫前	建庫後	建庫前	建庫後	建庫前	建庫後	建庫前	建庫後	建庫前	建庫後
1	1.2	1.5	4.8	3.5	0.5	0.7	0.9	1.5	0.6	1.0	1.2	1.8	0.3	0.4
2	0.7	1.7	1.5	8.7	0.0	0.0	0.7	1.0	0.5	0.8	0.9	1.5	0.2	0.4
3	1.4	2.6	13.4	15.3	0.1	0.5	0.5	1.4	0.2	0.7	1.2	3.5	0.5	1.4
4	1.0	6.3	11.5	45.3	0.0	0.0	0.4	2.6	0.2	0.8	0.8	6.8	0.3	3.0
5	16.5	18.2	124.9	157.1	0.3	1.2	3.9	8.4	1.1	3.5	12.1	15.6	5.5	6.1
6	119.7	66.2	794.6	428.9	0.0	0.0	50.6	24.3	16.0	9.7	127.6	75.3	55.8	32.8
7	84.5	61.5	890.3	511.9	3.7	4.3	22.9	19.6	10.2	8.5	57.0	53.5	23.5	22.6
8	139.0	120.6	1112.2	839.8	10.4	9.5	52.9	57.4	26.7	26.5	126.3	121.9	49.8	47.8
9	91.7	58.1	912.3	455.4	0.0	0.0	25.0	24.8	12.0	11.4	62.2	59.9	25.1	24.3
10	8.9	9.6	57.8	35.3	1.8	3.0	4.7	7.2	2.8	5.5	8.8	10.6	3.0	2.6
11	1.6	4.0	5.8	10.4	0.0	0.0	1.4	3.6	1.0	2.8	1.9	4.9	0.5	1.1
12	0.6	2.2	1.6	4.0	0.2	1.0	0.6	2.0	0.4	1.8	0.8	2.6	0.2	0.5
平均	38.9	29.4	327.6	209.6	1.4	1.7	13.7	12.8	6.0	6.1	33.4	29.8	13.7	11.9

表 3 曾文水庫興建前後洪枯流量日數比較

日流量 (CMS)	建庫前 (日)	建庫後 (日)	歷年平均 (日)
400	7.4	5	5.7
< 0.3	86	49	60.8

肆、輸沙量變化

根據前述資料可知，曾文水庫興建後確實造成下游流量的明顯改變，並可能進而影響河流輸沙，同時也攔阻了部分泥沙於水庫中。陳翰霖、張瑞津(2001)統計曾文水庫下游河道實測剖面得知，水庫興建後主流下游河床確有侵蝕的現象；石再添等(1995)、劉祖乾等(Liu, 1998)的研究亦曾提及曾文溪口海岸變化可能與水庫興建後的河流輸沙減少有關。然而，在眾多研究成果顯示曾文水庫確實影響下游輸沙量，進而導致河道及海岸地形變遷的同時，卻缺乏歷年輸沙量的推估數據提供研究推論上的支持，經濟部水利署各水文年報上的官方數據也一直以歷年平均值3100萬噸當作是各年輸沙量值。本研究為了解曾文水庫興建後曾文溪主流下游輸沙量是否改變，歷年輸沙量各為多少，因而進行歷年輸沙量推估。

本研究考量曾文溪下游及菜寮溪、後岷溪河床輸沙顆粒組成均以懸移質為主，因此採用率定曲線法(Rating curve method) (Crawford, 1991; Ferguson, 1987)，並參考經濟部水利署推估台灣西部各河川年平均輸沙量的方法(經濟部水利署, 1985)，分別推估曾文溪主流下游及其重要支流後岷溪及菜寮溪的各年輸沙量，以了解曾文水庫建壩攔水，對下游河流輸沙的實際影響。

一、資料來源

本文引用水利署各年度水文年報中的推估日懸移質輸沙量(MT/day)與流量(CMS)的歷年資料，分別選取曾文溪、菜寮溪及後岷溪最下游的西港、左鎮與玉田等測站為代表⁵，進行各年輸沙量推估。

懸移質輸沙量係由含沙量(Sediment concentration)取樣推估而得，取樣工具係採用美國標準儀器DH-48及DH-58型水平式含沙量取樣器，於河流中取樣後帶回室內測得含沙量(PPM)。以該取樣日流量(CMS)乘以含沙量再乘以86400秒，就是當日的推估輸沙量。水文年報中每年大約有10至30組懸移質實測紀錄，記載當日的推估流量及輸沙量。此一資料提供本研究建立懸移質輸沙量率定曲線。

二、推估步驟

本研究採用上述各測站歷年實測流量及輸沙量資料求出各年率定曲線，以作為當年輸沙量推估的依據，其推估步驟如下：

1. 將水文年報中各年所有推估懸移質輸沙量及流量資料輸入電腦中建立基本資料庫。
2. 篩選各流量及懸移質輸沙量數據若為0時，大多是取樣時之人為誤差，因此不列入統計分析。
3. 以Microsoft SPSS 10.0套裝軟體，求取冪次回歸方程式、決定係數R-Squared及統計檢定值，並繪出回歸趨勢線(率定曲線)。

$$\text{方程式：} Q_s = a (Q_d)^b$$

a、b為常數，

Q_s 為日懸移質輸沙量

Q_d 為日平均流量

⁵ 各水文測站資料年份期間如下：曾文溪的西港大橋 1960 至 1981 年，麻善大橋 1982 至 1999 年，新中 2000 年；菜寮溪的左鎮 1971 至 2000 年；後岷溪的玉田 1959 至 2000 年。其中西港大橋、麻善大橋及新中等站均為曾文溪主流下游最近河口之測站，且集水面積相當，資料年份相承接，故本研究為便利資料分析處理均以西港稱之。

4. 若有資料未達顯著水準者，則合併相鄰年份樣本，增加樣本數後再進行步驟3分析，以求得最適合的回歸方程式。歷年方程式如表4。
5. 將各日平均流量值代入當年回歸方程式中，試算求得各日的懸移質輸沙量。
6. 累計各日懸移質輸沙量為全年懸移質輸沙量。
7. 根據藍繁盛(經濟部水利署，1985)在河床實地取樣分析後，以蕭克立胥(Schocklitsch)公式推估台灣地區推移質輸沙量約為懸移質的3.5%至50.6%，平均值約為15%，則曾文溪年輸沙量應為：
推估全年輸沙量 = 全年懸移質輸沙量 × 1.15。
8. 對照各年流量資料，如果有推估輸沙量與流量資料極不吻合者，則回至步驟4，重新推估計算當年輸沙量。

三、成果分析

根據上述方法求得曾文溪主流下游歷年平均輸沙量為1128萬噸，菜寮溪為774萬噸，後堀溪136萬噸，則菜寮與後堀兩溪輸沙量佔主流比例將超過80%，其中菜寮溪甚至將近70%，輸沙比重之大，可能與其流域內多泥質惡地地形有關。歷年輸沙量中，1965、1966、1990均因曾文溪流域豪大雨較多，故年輸沙量均超過三千萬噸。1980、1993、1995，以及1984至1987年間均因雨量偏低，所以造成主流下游輸沙量普遍低於一百萬噸。

1973年曾文水庫啟用蓄水後，主流下游的年平均輸沙量由建庫前的1480萬噸減少為965萬噸，顯示曾文水庫啟用蓄水後下游輸沙量減少515萬噸(-33%)。同時期菜寮溪雖無水庫建壩影響，但因流量較前明顯減少，故造成年平均輸沙量亦由1110萬噸減為750萬噸，平均每年減少360萬噸(-32%)。後堀溪則因流量增加，故輸沙量反而由120萬噸增為144萬噸，平均每年增加24萬噸(20%)。相較之下同期來自主流及其他支流的輸沙則巨幅減少174萬噸(-71%)，其主要原因即為曾文水庫建壩攔沙所造成(表6)。

根據1973至2000年的曾文水庫淤積量統計顯示(經濟部水利署南區水資源局，2001)，自建庫以來並未實施庫底淤積物清除工作，且平日水庫並未特地實施排沙，若遇颱風進水量暴增時進行洩洪，水流從大壩上方溢洪道排出，除了少數懸移質可能排出水庫外，幾乎大部分淤積物均仍留存於庫區中，因此，水庫淤積量應能反映出集水區上游的長期輸沙淤積量。累計至2000年止曾文水庫庫底淤積量達1億6仟萬噸⁶，平均每年淤積量為570萬噸，一般年淤積量普遍低於500萬噸，但在豐水年時淤積量亦可暴增至1000萬噸以上，推估水庫剩餘容量尚佔總容量的85%。

假設這些土石在沒有水庫阻截的狀況下可以完全輸送至下游供應河床及河口補充沙石，則此時期下游年平均輸沙量應為1535萬噸(1973年以後主流的年平均輸沙量992萬噸加上水庫年淤積570萬噸)，比建壩以前的1475萬噸多了55萬噸，顯見曾文水庫攔阻了主流下游近三分之一的輸沙量。

⁶ 水庫淤積量由曾文水庫管理局採用日本製 RS-122 型精密測深儀，於庫區建立 22 道主要橫斷面及 20 道支流橫斷面施測，每年依測量結果建立各斷面間的淤積深度，並求得水庫年度總淤積量。

表 4 歷年流量輸沙量方程式 $Q_s = a(Q_d)^b$ 中的各係數值、解釋率 (R^2) 及樣本數對照表

西元年	曾文溪				菜寮溪				後岷溪			
	a	b	R^2	n	a	b	R^2	n	a	b	R^2	n
1959									5.292	1.761	0.959	29
1960	15.185	1.608	*0.830	38					5.451	1.830	0.960	16
1961	2.026	1.949	0.913	14					8.025	1.777	0.882	16
1962	20.981	1.600	0.824	9					7.525	1.658	0.881	13
1963	28.657	1.515	*0.843	19					10.482	1.770	0.922	13
1964	10.652	1.660	0.496	14					7.079	1.760	*0.867	40
1965	5.832	1.837	0.886	15					15.247	1.575	*0.594	22
1966	2.354	1.928	*0.780	23					2.631	1.837	0.928	8
1967	2.354	1.928	*0.780	23					7.364	1.666	*0.782	30
1968	1.584	1.932	0.878	10					7.364	1.666	*0.782	30
1969	1.854	1.959	0.933	23					5.594	1.807	0.923	19
1970	4.574	1.677	0.825	21					3.879	1.930	0.908	20
1971	5.501	1.774	0.928	12	17.591	1.987	*0.904	32	4.438	1.886	0.909	13
1972	1.459	1.848	0.912	20	15.392	2.123	0.928	19	2.285	1.879	0.865	19
1973	2.240	2.018	0.785	15	29.449	2.200	0.897	16	7.961	1.663	0.744	16
1974	0.446	2.354	0.871	19	28.144	2.003	0.727	12	7.344	1.596	0.721	12
1975	1.936	1.871	0.933	17	17.872	1.924	0.880	15	2.352	1.949	0.946	14
1976	0.301	2.203	0.838	11	7.761	1.952	0.963	11	1.253	2.128	0.945	11
1977	2.457	1.870	0.935	11	16.181	2.046	0.939	12	2.644	1.994	0.964	9
1978	1.013	2.157	0.905	15	29.171	2.013	0.884	14	2.906	2.061	0.931	12
1979	2.283	1.784	0.839	12	21.214	1.984	0.880	10	4.361	1.582	0.841	11
1980	2.032	1.877	*0.844	18	26.915	1.959	*0.866	27	5.538	1.711	*0.836	42
1981	14.412	1.482	0.819	14	37.567	1.783	0.900	13	5.538	1.711	*0.836	42
1982	3.190	1.827	0.868	21	21.631	2.138	0.896	21	9.529	1.697	0.930	21
1983	0.469	2.209	0.774	29	13.321	2.008	0.760	26	5.330	1.219	0.571	27
1984	0.301	1.997	0.538	27	4.148	2.355	0.782	20	1.868	1.504	0.762	19
1985	0.746	1.839	0.757	20	5.822	2.458	*0.733	46	1.358	1.923	0.740	22
1986	2.793	1.686	*0.770	29	5.920	2.084	0.893	13	9.402	1.685	*0.787	39
1987	2.962	1.767	0.838	16	18.102	2.307	0.871	13	15.343	1.764	0.890	14
1988	11.371	1.624	0.794	9	77.003	1.610	0.805	11	2.025	1.981	0.747	13
1989	6.629	1.695	*0.827	14	32.166	1.858	*0.794	34	1.722	2.150	*0.812	38
1990	1.296	1.993	0.857	11	29.513	1.952	*0.724	21	1.722	2.150	*0.812	38
1991	1.615	1.961	0.824	6	30.762	1.899	0.906	7	1.722	2.150	*0.812	38
1992	0.762	1.995	0.908	16	32.235	1.779	0.888	13	1.722	2.150	*0.812	38
1993	21.544	1.323	0.876	5	128.120	1.980	0.899	5	16.287	1.612	*0.844	36
1994	75.802	1.355	0.776	8	116.060	1.603	0.783	11	16.287	1.612	*0.844	36
1995	18.102	1.518	0.790	7	49.313	2.208	0.982	4	16.287	1.613	*0.844	36
1996	2.750	2.144	0.908	15	19.566	2.100	*0.833	27	8.786	2.068	0.817	14
1997	1.601	2.153	0.879	7	40.943	1.823	0.862	11	16.287	1.613	*0.844	36
1998	1.298	2.216	0.937	15	48.432	1.962	0.809	14	21.195	1.643	0.851	13
1999	10.245	1.717	0.930	10	67.810	1.824	0.911	12	7.897	1.786	*0.770	28
2000	0.103	2.466	0.944	11	5.635	1.863	0.972	17	1.143	1.931	0.897	7
歷年	2.109	1.908	0.818	537	17.407	2.087	0.847	384	5.334	1.780	0.848	539

說明：*為未達 $p < 0.01$ 顯著水準或經試算後與流量資料不吻合者，經與相鄰各年合併運算後求得之修正值。

表 5 歷年輸沙量推估值

輸沙量單位：百萬噸

西元年	曾文溪	菜寮溪	後崛溪*	水利署推估 曾文溪	曾文水庫 淤積量	曾文溪 還原後
1959			2.55			
1960	14.65		1.90	31		
1961	8.75		1.87	31		
1962	16.08		0.54	31		
1963	16.11		2.51	31		
1964	1.48		0.30	31		
1965	35.76		0.94	31		
1966	35.27		1.20	31		
1967	7.24		0.21	31		
1968	7.52		0.21	31		
1969	14.30		1.10	31		
1970	2.28		0.64	31		
1971	16.79	5.78	1.34	31		
1972	16.20	16.43	1.42	31		
1973	5.79	6.19	0.59	31	0.00	5.79
1974	28.47	7.42	0.48	31	0.44	28.91
1975	17.29	5.14	1.56	31	10.55	27.84
1976	11.55	2.68	2.58	31	14.55	26.10
1977	24.09	15.06	4.57	31	6.73	30.81
1978	7.07	4.46	2.38	31	4.63	11.70
1979	2.11	5.24	0.30	31	4.27	6.38
1980	0.34	0.37	0.14	31	5.00	5.33
1981	7.52	5.15	1.12	31	14.61	22.13
1982	6.02	12.07	1.42	31	3.89	9.90
1983	4.96	2.12	0.04	31	2.88	7.84
1984	0.29	1.29	0.04	31	3.62	3.91
1985	0.57	13.14	0.25	31	1.99	2.55
1986	0.59	0.51	0.69	31	2.64	3.23
1987	0.81	6.20	0.84	31	3.32	4.13
1988	4.35	3.89	0.89	31	8.07	12.42
1989	5.26	6.11	3.15	31	15.56	20.81
1990	32.63	12.76	2.62	31	3.69	36.32
1991	5.03	4.55	2.73	31	4.15	9.18
1992	11.45	8.71	3.69	31	2.96	14.41
1993	0.40	9.12	0.09	31	8.25	8.65
1994	8.55	9.95	0.31	31	1.72	10.27
1995	0.25	2.30	0.03	31	1.33	1.58
1996	29.63	53.29	0.36	31	31.81	61.44
1997	25.24	3.33	2.27	31	-4.52	20.72
1998	25.51	3.78	0.25	31	4.43	29.94
1999	2.96	5.10	2.94	31	1.61	4.57
2000	1.47	0.19	3.95	31	1.38	2.85
歷年平均	11.28	7.74	1.36	31	5.70	15.16
建庫前	14.80	11.10	1.20	31	0.00	14.80
建庫後	9.65	7.50	1.44	31	5.70	15.35
前後差值	-5.15	-3.60	0.24	0		0.60
變化比例	-35%	-32%	20%	0		4%

說明：*後崛溪南化水庫於 1994 年啟用後雖呈現少數淤積的現象，然因缺乏歷年庫底淤積測量資料，故本表曾文溪還原後輸沙量推估值暫不包含南化水庫淤積值。

表 6 曾文水庫興建前後歷年平均輸沙量對照表

輸沙量單位：萬噸

年平均輸沙量	曾文溪 (全流域)	%	菜寮溪 (支流)	%	後崛溪 (支流)	%	主流及 其他支流	%
流域面積	1177 km ²	100	121 km ²	10	161 km ²	14	895 km ²	76
歷年平均	1128	100	774	69	136	12	218	19
建庫前	1480	100	1110	75	120	8	245	17
建庫後	965	100	750	78	144	15	71	7
前後差值	-515		-360		24		-174*	
增減比例	-35%		-32%		20%		-71%	

說明：*包含水庫淤積-570萬噸、主流及其他輸沙+396萬噸。

伍、討論

本研究採用水利署水文年報的日流量與含沙量資料，以率定曲線法推估歷年的輸沙量，其方法雖然可行(Walling, 1977; Ferguson, 1987; Crawford, 1991; Kao, 2001)，但因取水樣本大致位於河面上層附近，難以深入水底深層取樣；且颱風暴雨流量遽增時，往往因為安全考量而無法及時於洪峰到達時取得實際樣本，稍等洪水消退安全時再行取樣，因此，推估輸沙量可能遠低於實際輸沙量。故水利署(1985)除了以實測含沙量及流量建立率定曲線以推估輸沙量外，並根據自然環境及經驗修正率定曲線後，推估曾文溪主流年平均輸沙量約為2915萬噸，既是經驗修正率定曲線則不免受個人主觀經驗所影響。但是此一推估值卻與水文年報中的平均年輸沙量3100萬噸大致相當，而水文年報中此一數據卻是從民國25年以迄90年間完全一樣，數十年來未曾修正過，當初以何種方法求得年平均輸沙量3100萬噸無從得知，實在難以論斷究竟高估或低估輸沙量。且水文年報此一數值每年均為3100萬噸而未曾修正，自然無法得知歷年的輸沙量變化。

本研究以歷年水文年報中的懸移質輸沙量及流量資料，經過統計檢定分析修正後，以率定曲線法推估曾文水庫興建以前，曾文溪主流下游年平均輸沙量應為1480萬噸，約為水文年報推估值3100萬噸的48%，相當於年平均沖蝕深度8.4公釐；又以曾文水庫集水面積481平方公里而實測年平均淤積量為570萬噸，換算年平均沖蝕深度約7.9公釐。此二數據均與王如意(1984)推估高雄台南地區各河流的年平均沖蝕深度8.5公釐相近。

設若水利署推估輸沙量3100萬噸趨近於事實，則以曾文水庫的集水面積約佔全流域面積近41%，而歷年實測平均年淤積量570萬噸，卻僅相當於18%，此一現象頗不尋常。以曾文水庫集水區上游地質環境條件的脆弱而言(張石角, 1971、1972)，應該是曾文溪主流下游輸沙量的重要供應來源，而目前水庫內每年平均淤積量亦應相當於水庫集水區的年平均輸沙量。設若曾文溪全流域為一均質的地質區，侵蝕速率各處大致一致且地形特徵相同，則以水庫集水區面積的淤積量推論曾文溪全流域輸沙量應為1390萬噸，與本研究水庫興建前之推估年輸沙量1480萬噸較為接近。

假設水利署修正後推估的曾文溪輸沙量3100萬噸趨近於事實，則流域平均年沖蝕深度將高達18公釐；若以同樣的方法推估菜寮溪年平均輸沙量約為2100萬噸，相當於沖蝕深度高達115公釐。以相同方法推估賀伯颱風8月1日當天，菜寮溪的日輸沙量將高達1億1241萬噸，相當於單日沖蝕深度高達620公釐，無疑地將造成菜寮河流域坡地的大量崩塌災害，但是經資料蒐集與現地訪查後得知，當日雖然雨勢滂沱，但是

並未有明顯的崩塌災害。此一輸沙量推估值顯然偏高，與當時菜寮溪流域所造成的災情不相吻合。若以本研究推估菜寮溪年平均輸沙量774萬噸換算，相當於年平均沖蝕深度約為42公釐，而此數據雖遠高於中國大陸黃土高原土壤侵蝕最嚴重的晉陝蒙鄰接區每年平均侵蝕25公釐(黃春長，2000)，但是卻足以適度地凸顯出台灣西南地區降雨量大且集中，對菜寮溪流域泥岩惡地土壤侵蝕所造成的嚴重影響。

各界對於輸沙量推估的方法與結果向來頗為分歧，其誤差量亦由學者們以工程、數學及統計等方法予以修正(Walling, 1977; Cohn, 1989; Ferguson, 1987; Crawford, 1991; Cordova, 1997; Pilotti, 1997; Sickingabula, 1998)。本研究以率定曲線法試算曾文溪及其重要支流菜寮溪及後崛溪的歷年輸沙量，並經統計檢定修正後，得知曾文水庫興建前主流下游年平均輸沙量為1480萬噸，相當於年平均沖蝕深度為8.4公釐；菜寮溪歷年平均輸沙量774萬噸，年平均沖蝕深度為42公釐。此一數據經上述分析及討論得知應比水文年報推估值合理。

陸、結論

曾文溪三角洲受到長期輸沙影響，近三百年來向西堆積進夷，但自1973年曾文水庫完工啟用後，主流河水多數被引入烏山頭水庫，造成下游流量較過去減少近25%，並阻截上游河道搬運物，平均每年庫底淤積570萬噸，同時造成水壩下游輸沙供應明顯減少。

流量分析顯示，曾文水庫興建前後造成平均日流量由39 CMS降為29 CMS；各月最大日流量平均值由328 CMS降為210 CMS；各月最小日流量平均值由1.4 CMS提升為1.7 CMS。且每年日流量大於400 CMS的日數也由7.4日降為5日；日流量小於0.3 CMS的日數也由86日降為49日，顯示曾文水庫確實降低洪水及乾旱流量的規模與頻率，發揮防洪與調節水量的功能。

本研究採用曾文溪主流最下游西港站1960至2000年的流量及含沙量資料，以率定曲線法經統計檢定修正後，推估曾文溪歷年平均輸沙量為1120萬噸，菜寮溪約佔70%。其間高輸沙量與豪大雨所引起的高流量有密切相關。比較曾文水庫啟用蓄水前後的輸沙量，由1480萬噸縮減為965萬噸，約少1/3。減少的輸沙量除了有水庫攔截淤積年平均570萬噸外，菜寮溪輸沙量年平均減少360萬噸，也是重要的原因。

謝辭

本研究為國科會經費補助編號NSC-91-2116-M-277-001研究計劃之部分成果。感謝經濟部水利署藍繁盛先生提供輸沙量推估之寶貴意見，並承蒙第六河川局郭建宏、第九河川局陳彥旭先生以及台灣師範大學地理系沈淑敏博士提供寶貴意見，許駿璋、劉慧敏等同學協助室內資料處理，謹此一併致謝。

參考文獻

《中文部份》

- 王如意、易任(1984)：水文學(下)，國立編譯館出版，36-38 頁。
- 張石角(1971)：曾文溪上游崩塌地之地質學研究(上)(下)，礦業技術，9(3、4)，7-15 頁及 21-31 頁。
- 張石角(1972)：曾文水庫集水區淤沙問題之定量性研究，中華水土保持學報，3(2)，50-69 頁。
- 張瑞津、石再添、陳翰霖(1996)：臺灣西南部台南海岸平原地形變遷之研究，國立台灣國立台灣師範大學地理系地理研究報告，26，19-56 頁。
- 陳翰霖、張瑞津(2001)：曾文水庫對河道形態變化的效應，第五屆台灣地理學術研討會論文集，20-37 頁。
- 黃春長(2000)：環境變遷，中國科學出版社，181 頁。
- 經濟部水利署(1959 至 2000)：水文年報。
- 經濟部水利署(水資源統一規劃委員會，1985)：台灣河川輸沙量推估研究，經濟部 74 年度研究發展專題，共 57 頁。
- 經濟部水利署南區水利署(2001)：曾文水庫八十九年淤積測量報告，共 30 頁。
- 蔡長泰等(1995)：河川利用對河川環境衝擊之研究(二)，經濟部水利署委託，國立成功大學水利及海洋工程學系執行。
- 蔡長泰等(1999)：水庫對河流環境影響，經濟部水利署委託，國立成功大學水利及海洋工程學系執行。

《英文部份》

- Abam, T.K.S. (1999): Impact of dams on the hydrology of the Niger Delta, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57, 239-251.
- Andrews, E.D. (1986): Downstream effects of Flaming Gorge Reservoir on the Green River, Colorado, Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 97, 1012-1023.
- Cohn, T.A., DeLong, L.L., Gilroy, E.J., Hirsch, R.M. & Wells, D.K. (1989): Estimating constituent loads, *Water Resources Research*, 25(5), 937-942.
- Cordova, J.R. & Gonzalez, M. (1997): Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements, *Soil Technology*, 11, 57-65.
- Crawford, C.G. (1991): Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads, *Journal of Hydrology*, 129, 331-348.
- Ferguson, R.I. (1987): Accuracy and precision of methods for estimating river loads, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 95-104.
- Garland, G. & Moleko, L. (2000): Geomorphological impacts of Inanda Dam on the Mgeni estuary, north of Durban, South Africa, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 59, 119-126.
- Inbar, M. (1990): Effect of dams on mountainous bedrock rivers, *Physical Geography*, 11(4), 305-319.
- Kao, S.J., Liu, K.K. (2001): Estimating the suspended sediment load by using the historical hydrometric record from the Langyang-Hsi watershed, *TAO*, 12(2), 401-414.

- Kondolf, G.M. (1997): Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels, *Environmental Management*, 21(4), 533-551.
- Ligon, F.K., Dietrich, W.E. & Trush, W.J. (1995): Downstream ecological effects of dams: a geomorphic perspective. *Bioscience*, 45(3), 183-192.
- Liu, J.T.; Yuan, P.B.; Hung, J.-J. (1998): The coastal transition at the mouth of a small mountainous river in Taiwan, *Sedimentology*, 45, 803-816.
- Loizeau, J.L. & Dominik, J. (2000): Evolution of the upper Rhone River discharge and suspended sediment load during the last 80 years and some implications for Lake Geneva, *Aquatic Sciences*, 62, 54-67.
- Pilotti, M. and Bacchi, B. (1997): Distributed evaluation of the contribution of soil erosion to the sediment yield from a watershed, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 1239-1251.
- Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P. and Bilodeau, L. (2000): Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada, *Hydrological Processes*, 14, 21-36.
- Shields, Jr. F. D. (2000): Reservoir effects on downstream river channel migration, *Environmental Conservation*, 27(1), 54-66.
- Sichingabula, H. M. (1998): Factors controlling variations in suspended sediment concentration for single-valued sediment rating curves, Fraser River, British Columbia, Canada, *Hydrological Processes* 12(12), 1869-1894.
- Walling, D. E. (1977): Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin, *Water Resources Research*, 13(3), 531-538.

收稿日期：92年9月12日

修正日期：92年9月28日

接受日期：92年10月20日

