

石門水庫集水區河川系統之研究

阮香蘭¹ 何智武² 呂建華³

摘 要

逕流洪峯量與河道輸砂一直為水文研究之重要課題，對於其相關之研究，傳統上係利用水力演算，但因受限於自然環境之變異性，只能求得局部之解決。依據河相學之基本理論，每一集水區均有其獨特之地形、地質、地貌等特性，而此地文環境或直接、或間接地影響水文環境，導致集水區內河川之逕流、沖刷，亦展現獨特之效應。1945年，Horton氏首倡河川級序之定義，並利用數百河川對其河川型態之統計分析而導衍河川級序定律，對於河相之探討頗有助益。又近年來地理資訊系統發展蓬勃，對於集水區地文特性之計算及三度空間之分析，均可精確且快速求得，使得此方面之研究又見推廣。本研究即利用地理資訊系統及計量地形之技術，分析石門水庫集水區之地文及河道特性，希望以集水區為單元，對其洪流與輸砂特性作整體性之輸出。

A Study on the Stream System of Shi-Meng Reservoir Watershed

Hsiang—Lan Juan

Graduate student, Graduate Institute of Soil & Water Conservation,
National Chung Hsing University.

Neal—Chihwu Ho

Professor, Graduate Institute of Soil & Water Conservation,
National Chung Hsing University.

Cheng—Hua Leu

Associate Professor, Graduate Institute of Civil Engineer,
National Chung Hsing University.

ABSTRACT

For a watershed, the hillslope receives precipitation and supplies overland surface flow. These overland flows merge into stream and thus channels grow and develop to drain the runoff. It is nevertheless true that growing channels dissect the landscape and hence fix the hillslope patterns. In other words, for a stream network to exist, there must be sufficient water delivered and corresponding sediment removed from the watershed.

The use of stream ordering in stream morphology presented by E.R. Horton in 1945 initiated the studies on stream morphology. This concept is the main frame in modern

-
1. 國立中興大學水土保持學研究所博士班研究生
 2. 國立中興大學水土保持學研究所教授
 3. 國立中興大學土木工程研究所副教授

stream morphology. Recently, geographical information systems technologies have been widely used in analyzing spatial data in order to better manage natural resources on the world. Since GIS is able to do the 3-D analyses on both watershed geomorphology and morphology, the quantitative concerns in watershed topographical features can be reasonably managed. This research thus selects Shi-Meng reservoir watershed and used Horton's stream order concept together with the morphometric analysis based upon GIS to find the relationships between flood runoff and stream system.

一、前言

地貌之形成，乃自然環境中作用力（如沖蝕力）與抗阻力（如抗蝕力）互相消長之綜合效應，其影響因子錯綜複雜，舉凡降雨量、降雨強度、降雨延時、地形、土壤、地質、土地利用與覆蓋等皆屬之。此等因子又直接或間接地相互影響，因而更增加問題之複雜程度。而河川運行於地表上，更是此等自然力綜合效應之結果。河川之存在，猶如人體之血管一般，藉其流動，集水區之泥砂得以運移。但以目前而言，水文現象並非為吾輩所能輕易掌握與控制者，然而河相之演進，雖受水文、地文之雙重影響，但以時間尺度（Time scale）而言，可概略視其為一恆態（Steady state），以不變應萬變，統計歸納集水區之水力特性，乃為本文之重點。是以本文中，將以河相形態之研究為基礎，除了初步探討石門水庫集水區之河相特性外，並期望以地文研究為出發點，結合水文之分析，據以建立簡化之推估模式。

二、前人研究

在集水區域內之河川上，多有水文站之設立，以收集流量資料；此乃為基本水文資料獲得之方法，然維持費用高，需要時間長，而在統計學上而言僅為一點取樣，如何利用此類資料推而廣之，使整個河川系統之水力特性能作為系統之表達，則有Leopold與Maddock、Horton與Strahler及霍雨時等所發展理論，以為指南。Horton氏於1945年首倡河川級序定律，繼之有Strahler氏之修正；河川級序之研究，乃將河川予以級序化，使得河川系統得以作為系統之歸類。Horton利用數百河川進行統計分析，得到河川形態與級序間存在一特定之關係，而導引出河川級序定律，計有河川數目、河段長度、河川坡度、流域面積及河川密度與河川級序

之迴歸關係式。自Horton-Strahler之級序定律發展後，河相之研究已從定性之探討而轉為量化之推求。在這方面之研究，包括河源數目之數學特性探討；藉河川網路之分析，探討河川之排列及河源數目與河川等級數之關係（姜善鑫，1989；何智武，1990）、河川級序定律與流域特性之探討；除利用級序定律分析各河川系統之幾何特性外，並利用靜態之地文特性，與動態之水流特性相結合（霍雨時，1968，1969，1970；塚本良則，1991）、河相與潛能之探討；藉由能量之觀點，探討河川網路形態之演進（Yang，1971）等等。綜合其所得結果，各河川流域，在分岔比（Bifurcation Ratio）、河段長度比、流域面積比等因子，皆顯示呈一定數之現象，且多在3~5之範圍內；而Yang利用熱力學觀念，以熱系統與河川系統之相似性，提出河川系統熵之定義，並以理論求證，當河川到達動態平衡時，各級次河川之落差將呈一定數，即各級次之落差比恰等於1。由上述前人之研究所得結論，河川網路系統之發展，似乎具有一定之法則，河川系統受水文及地文環境之影響，若能藉由河川系統之研究，了解流域地文、水文及水力之特性等，將可簡化複雜之水文學研究。

三、相關理論

3.1 河川級序（Stream Order）

Horton氏於1945年提出河川級序之定義，繼之有Strahler氏之修正，其定義為在一規定比例尺之地形圖上可目睹之最原始不分歧之河段為一級河川（First Order Stream），俟兩同等級河相會合後，河川級數增加一級，若相會兩河之等級不同，則會合後之河川等級仍保持會合前之較高等級數。藉由此歸類，則河川系統之大小及數量得以作為系統之表達。

Horton循級序定義，將數百河川歸類統計，

並歸納得河川級序定律如下：

$$\text{河川數目定律：} \ln N_u = a_n - b_n U \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\text{河段長度定律：} \ln L_u = a_l - b_l U \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\text{河川坡度定律：} \ln S_u = a_s - b_s U \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$$\text{河川面積定律：} \ln A_u = a_a - b_a U \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

$$\text{河川密度定律：} Dk = \Sigma \Sigma L_u / \Sigma A_u \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

式中， $a_n, b_n, a_l, b_l, a_s, b_s, a_a, b_a$ 為待定係數， U 為河川級序， N_u 為 u 級次之河川數目， L_u 為 u 級河川之平均河段長， S_u 為 u 級河川之平均坡度， A_u 為 u 級河川之平均面積， Dk 則為河川密度。

3.2 有理化河川級序

Horton 及 Strahler 兩氏之河川級序定義最大之弱點在級序之演進為不連續性，因僅應用整數級序單位所致，即其所分析之河川系統著重之處在點而不在線。根據前述定義，凡兩支一級河川匯流後之河段為二級河川，由此可知其關鍵在於匯流點。但一般工程設施及水文站之選定均避免在匯流點上，即水文站之設立多在較平直少變化之河段上，因此為便利水文資料之運用，河川級序之定義得有所更改，俾使上下游之水文站資料均能合理表達於河川級序系統之中。霍雨時（1969）曾利用一級河川為最小單位，推演出有理化河川級序之定義如下：

假設於河段上某點 X ，其河川級序依 Horton-Strahler 氏之法則定為 U_i ，則該點之有理化河川級序 U_r 定義為：

$$U_r = U_i + U_x \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

其中

$$U_x = \frac{N_{ix} - N_{is}}{N_{is} - N_{is}} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

式中， N_{ix} 為 X 點以上之一級河川數目， N_{is} 為 U_i 河段起始點以上之一級河川數目， N_{is} 則為 U_i 河段終點以上之一級河川數目。

3.3 河川系統水力特性

Leopold 與 Maddock 於 1953 年之論文中指出，流域中之流速、河寬及水深三者各與流量成幂函數（Power Function）之關係，而流量頻率（ F ）則為構成此一關係之主要因素。該文中亦指出，流量雖在位置上有量之變化，即上游流量小於下游流量，但若從上游某一水文站所記錄之流量作出流量頻率曲線，與下游之某一站所求得者作比較，則可發現由上游之流量所得到之頻率 F ，往往與下游之頻率

相近，即流量頻率在同一時間內可謂具有其一致性。Stall 及 Fok（1970）曾將此一觀念結合集水區地文特性而建立 $Q-(F, U_r)$ 之關係模式，即以 U_r （有理化河川級序）代表其地文特性，而 U_r 與流域面積相關之因。

四、資料之整理與分析

4.1 水文資料之整理與分析

本文在水文資料方面，採用石門水庫管理局所提供之六處水位流量站資料及懸浮質含砂量資料作為分析之用。所採站別為霞雲、高義、稜角、玉峯、三光、秀巒等站（如圖1所示）。



圖1. 流量站及水系分佈圖

4.1.1 流量資料

根據王如意、易任（1982）對淡水河流域作均勻性檢定之結果，得知淡水河乃屬水文一致性區域。據此流量資料來源，乃採自集水區內之六處水位流量站資料予以分析，所取各站資料記錄年限如

表1，經統計分析得各站日流量一頻率曲線圖，如圖2(a)~(f)所示。由六站之流量一頻率曲線可知， $\ln Q$ - F 之間略呈一S曲線之關係，然在相當大之範圍內（ $F=20\%-80\%$ ），幾乎呈一線性關係。據此，將流量資料依頻率分佈分成三段，即 $F < 20\%$ ， $20\% < F < 80\%$ ， $F > 80\%$ 分別予以分析。其中，除了頻率於 $20\% \sim 80\%$ 之範圍，屬於線性關係之外，其餘兩區間之曲線關係，可視為指數型關係，惟 $F > 80\%$ 之流量極小，故不予討論。今依此方法分析結果，求得各區段之流量迴歸式如下：

$F < 20\%$ ：

$$\text{秀巒 } \ln \ln Q = 1.45 - 0.05 F (R^2 = 0.91) \cdots \cdots (4-1a)$$

$$\text{玉峯 } \ln \ln Q = 1.67 - 0.04 F (R^2 = 0.81) \cdots \cdots (4-1b)$$

$$\text{三光 } \ln \ln Q = 1.65 - 0.03 F (R^2 = 0.84) \cdots \cdots (4-1c)$$

$$\text{稜角 } \ln \ln Q = 1.46 - 0.04 F (R^2 = 0.89) \cdots \cdots (4-1d)$$

$$\text{高義 } \ln \ln Q = 1.80 - 0.04 F (R^2 = 0.83) \cdots \cdots (4-1e)$$

$$\text{霞雲 } \ln \ln Q = 1.82 - 0.03 F (R^2 = 0.86) \cdots \cdots (4-1f)$$

$20\% < F < 80\%$

$$\text{秀巒 } \ln Q = 2.30 - 0.02 F (R^2 = 1.00) \cdots \cdots (4-2a)$$

$$\text{玉峯 } \ln Q = 3.15 - 0.02 F (R^2 = 1.00) \cdots \cdots (4-2b)$$

$$\text{稜角 } \ln Q = 3.38 - 0.02 F (R^2 = 0.99) \cdots \cdots (4-2c)$$

$$\text{高義 } \ln Q = 2.35 - 0.02 F (R^2 = 0.97) \cdots \cdots (4-2d)$$

$$\text{霞雲 } \ln Q = 3.84 - 0.02 F (R^2 = 0.99) \cdots \cdots (4-2e)$$

$$\text{霞雲 } \ln Q = 3.97 - 0.02 F (R^2 = 1.00) \cdots \cdots (4-2f)$$

表1.各水文站所取資料記錄年限

站名 年數	秀巒	玉峯	三光	稜角	高義	霞雲
起	1957	1957	1957	1957	1957	1963
迄	1989	1989	1989	1989	1989	1989

4.1.2河道輸砂量

本集水區各水文站之泥砂資料，包括日和年懸浮載在內，均係根據每年之輸砂量率定曲線計算而來。輸砂量率定曲線則根據DH-48取樣器（全深取樣器）取得懸浮質資料，每月通常測量2~3次以建立率定曲線，並每年重新校正。至於推移質輸砂量

，除於支流霞雲溪曾進行河道斷面測量及粒徑採樣分析外，餘均無現場河道粒徑採樣分析及河道斷面測量資料，筆者曾以霞雲水文站之流量資料，配合此粒徑資料推估推移質輸砂量（1992），推估結果以懸浮質量之30%作為各水文站推移質之估算依據，並整理出六水文站之泥砂產量分析結果表，如表2(a)~(f)。

4.2主題圖之製作

將各種來源之地圖先予數化，並將其資料轉換至基本規格上。在地理資訊系統之自然環境資料庫中，資料是以一層一層方式儲存，每一層資料又可分為空間資料與屬性資料兩大類，兩者透過地理索引（Geographic ID）相互連結。本文之主題圖製作如下所列：

(1)等高線之數化：採用內政部經建第二版1/25,000地形圖，以每100m之高差點入，並對每一等高線依其高程給予地理索引之編號，再依控制點之實際座標進行轉換。在數化過程中，利用分幅予以數化，再於電腦加以接合，在ARC/INFO軟體內，有EDGEMATCH之指令，可將圖幅之邊緣予以修正，達到接合之完整。依此所完成之石門水庫集水區等高線圖，如圖3所示。

(2)水系與集水區分區之數化：自1/25,000地形圖將水系予以描繪，並將集水區邊界及分區，以人為判釋方法，依稜線繪出，並加以數化，再進行轉換。本研究中各子集水區之劃分，乃以六個水文站為出口，將集水區劃分成七個子集水區，如圖1所示。

4.3河川網路系統分析

已數化之集水區水系圖中，因該數化圖檔所含之位向屬性檔，記錄了每一條線段（ARC）之起始端點（FNODE）及末端點（TNODE），故以自撰之程式配置河川系統中每條河川之級序，並將級序屬性載入原屬性檔。其次，利用ARC/INFO本身空間分析之功能，取得各河段之落差、長度及坡度等資料，同樣載入屬性檔中。經分析結果，石門水庫集水區乃為一五級河川系統，而各子集水區之河川幾何特性，以上述方法分析結果，詳列如表3(a)~3(g)所示。

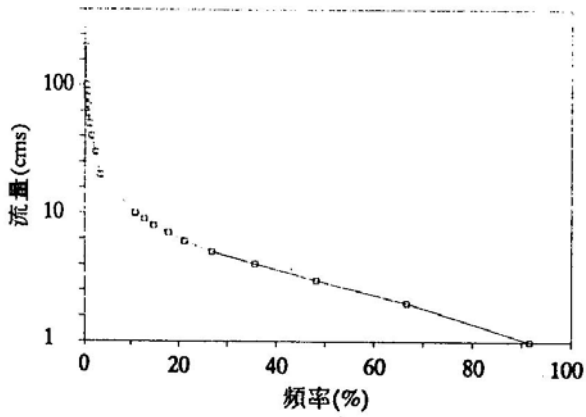


圖2(a).秀巒水文站日流量—頻率曲線圖

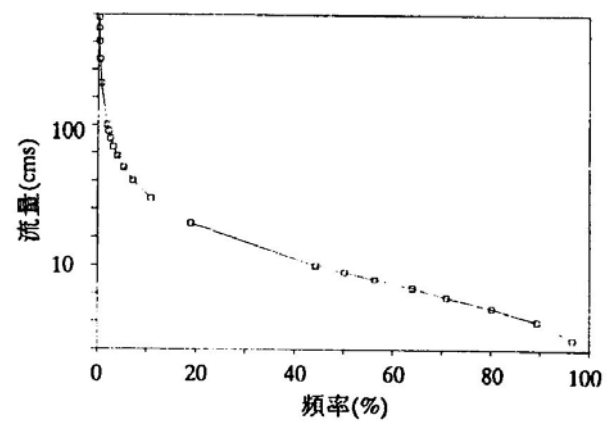


圖2(b).玉峯水文站日流量—頻率曲線圖

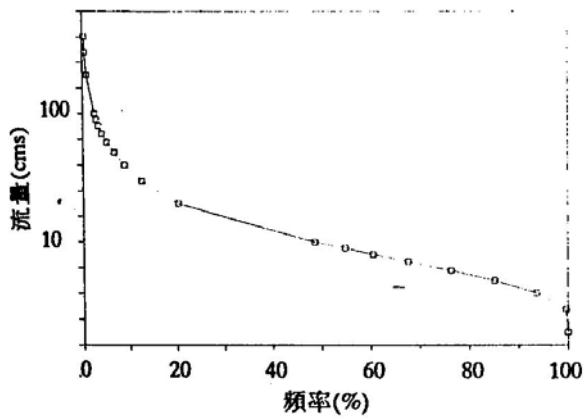


圖2(c).三光水文站日流量—頻率曲線圖

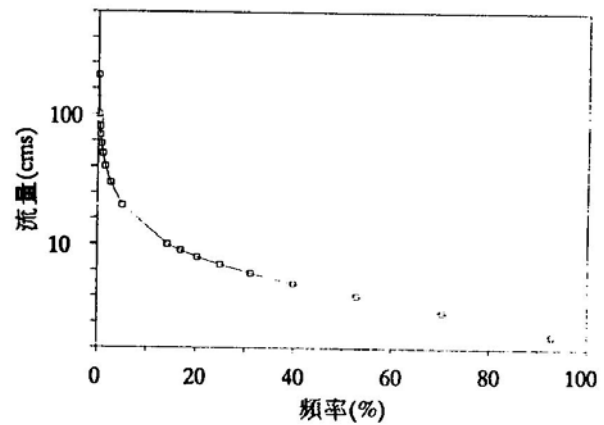


圖2(d).稜角水文站日流量—頻率曲線圖

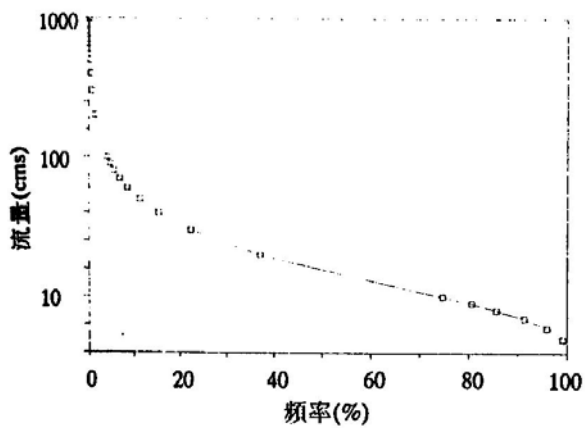


圖2(e).高義水文站日流量—頻率曲線圖

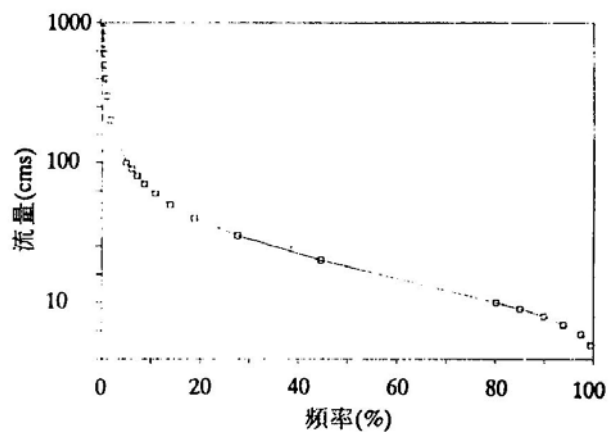


圖2(f).霞雲水文站日流量—頻率曲線圖

表2a. 秀樹子集水區之年泥砂產量

年	年尖峰 流 量 cms	年逕流量 cubic m	年泥砂 輸出量 tons
1957	17	110149632	4234
1958	124	156510144	48905
1959	422	230470358	56693
1960	254	225927187	78867
1961	460	166098124	29956
1962	540	221166720	74864
1963	1590	301447008	25208227
1964	16	85715366	116965
1965	224	104664701	618479
1966	125	172304410	658297
1967	180	97697059	28652
1968	57	227661705	8273
1969	305	232703366	173810
1970	506	166806432	271330
1971	267	159963811	146940
1972	466	178072128	77949
1973	100	118447488	65437
1974	137	195152544	8906
1975	267	250038403	276385
1976	506	137195596	561555
1977	88	153580320	121170
1978	86	153742752	39985
1979	369	236903961	212295
1980	182	106289452	20610
1918	315	247046716	227223
1982	217	153928425	46535
1983	71	192232569	36504
1984	770	189098236	245138
1985	976	286888435	234974
1986	357	220548096	34965
1987	171	200749795	47129
1988	16	104975136	3089
1989	495	181823616	43961

表2b. 玉峯子集水區之年泥砂產量

年	年尖峰 流 量 cms	年逕流量 cubic m	年泥砂 輸出量 tons
1957	84	412873632	69627
1958	978	471601440	175568
1959	912	643170240	202012
1960	1395	763699104	855460
1961	2140	643971168	545479
1962	1566	716289696	559709
1963	4220	671375520	8355166
1964	54	283201920	623701
1965	630	299513376	1169554
1966	685	465367680	1903173
1967	500	375988608	454537
1968	286	683043840	826461
1969	2090	710929440	1971070
1970	1520	812553512	543188
1971	2030	556861824	1482612
1972	2118	563588216	2090409
1973	246	331308576	160235
1974	428	666955296	227257
1975	712	686176704	446157
1976	2630	403335072	1275955
1977	1310	454118400	684074
1978	213	478839168	90956
1979	974	662553216	408216
1980	589	374184576	247351
1918	713	610615584	463061
1982	571	485907552	219866
1983	247	648273024	181262
1984	1092	564380352	789148
1985	2093	736816608	1127143
1986	1432	782617250	34965
1987	596	6382601	240825
1988	205	365616288	28787
1989	2221	577560672	636147

表2c.三光子集水區之年泥砂產量

年	年尖峯 流 量 cms	年逕流量 cubic m	年泥砂 輸出量 tons
1957	106	538108704	86589
1958	991	702839808	278490
1959	986	711736400	278450
1960	1840	964037376	513167
1961	3030	763265376	661913
1962	2510	857369664	574289
1963	5740	904572576	18352957
1964	64	315218304	662081
1965	920	376256448	2218685
1966	1090	566079840	2281820
1967	527	415417248	610958
1968	304	787562784	1002091
1969	1570	845030016	3289955
1970	2085	619459488	1281186
1971	1343	595223424	1318596
1972	3581	752433408	2970813
1973	235	389901600	248794

表2d.稜角子集水區之年泥砂產量

年	年尖峯 流 量 cms	年逕流量 cubic m	年泥砂 輸出量 tons
1957	165	245658528	35100
1958	136	140586624	11501
1959	97	195714144	29637
1960	76	187832736	21278
1961	165	208198080	39346
1962	314	271080000	302286
1963	2180	254119680	11664010
1964	64	159291360	494235
1965	248	171169632	756791
1966	160	207137952	1191401
1967	222	211498560	724116
1968	226	282190176	713783
1969	137	248328288	1174327
1970	105	204426720	652639
1971	305	259616448	1366384
1972	322	247309632	1323613
1973	146	156955104	608427
1974	152	303595776	464096
1975	110	258774912	468127
1976	540	159507360	694553
1977	152	204037920	663520
1978	105	199484600	467723
1979	262	233051040	533240
1980	235	155995200	575898
1918	245	251296128	493803
1982	238	203973120	719219
1983	103	203627520	579637
1984	228	237793536	480685
1985	705	292614336	605159
1986	379	297519264	50993
1987	345	256687488	32685
1988	369	229838688	8693
1989	—	236892384	1197758

表2e.高義子集水區之年泥砂產量

年	年尖峯 流 量 cms	年逕流量 cubic m	年泥砂 輸出量 tons
1957	170	789201792	216732
1958	1390	906822432	377092
1959	1536	1096499808	946746
1960	2177	1377582336	1084506
1961	3900	929265696	1169929
1962	2900	1112944320	1164480
1963	8120	1259625628	22151418
1964	105	526779072	2130505
1965	1290	580044672	2805932
1966	1640	849037248	3928660
1967	868	701128224	1928555
1968	801	1202184288	2608787
1969	4260	1275588864	5793941
1970	2620	870264864	2980037
1971	3380	1020205152	4546452
1972	3770	1169658144	6158425
1973	496	598397760	1082762
1974	604	1108252800	1202170
1975	1150	1137039552	1187174
1976	3730	655390656	3451545
1977	2090	766324800	1922939
1978	353	795968640	796806
1979	1330	1015558560	1168575
1980	871	606148704	918606
1918	1031	1006636032	1566198
1982	901	777446208	1015786
1983	311	974572128	915563
1984	1328	1118379744	2010547
1985	3254	1198280736	2938242
1986	1442	1279511424	1033165
1987	1194	1055031264	1192265
1988	—	720587232	55216
1989	—	1010194848	2614136

表2f.霞雲子集水區之年泥砂產量

年	年尖峯 流 量 cms	年逕流量 cubic m	年泥砂 輸出量 tons
1957	400	1021040640	75434
1958	1970	1138786530	397714
1959	2184	1468121760	916127
1960	2820	1858317120	1746485
1961	4730	1180027008	1852954
1962	3690	1710698400	3585243
1963	9110	1592266464	23249073
1964	108	639819648	2335078
1965	1510	699875424	5610874
1966	1810	987434496	6299901
1967	955	810923616	3251535
1968	950	1415924928	3630111
1969	4440	1635040512	10053781
1970	2830	1065502080	5239541
1971	4290	1310400288	7402557
1972	4990	1449759168	10434837
1973	647	688365216	2004166
1974	737	1287817056	1985408
1975	1460	1376116992	2175386
1976	4550	782903262	5785116
1977	2220	955540800	3206822
1978	547	941258016	1533501
1979	1610	1195108992	2530564
1980	995	776126880	1890161
1918	1186	1224424512	2480223
1982	1038	993796128	2021171
1983	399	1130565600	1883163
1984	1692	1342149696	3405089
1985	3985	1482222240	5188282
1986	1842	1505780064	997603
1987	1310	1259588448	145287
1988	433	789609600	44950
1989	2960	1137084480	2953285



圖3.石門水庫集水區等高線圖

五、模式之建立與討論

5.1 模式之建立

模式之建立將依兩方向進行，即(一)河相特性之探討：除將以河川系統中，靜態幾何之地文資料，建立本集水區之特性模式外，並將流量套合河相之分析，建立一簡便之流量推估模式；(二)輸砂特性之探討。

5.1.1 河相特性之建立

本文將石門水庫集水區內之河川，依子集水區之劃分進行統計分析，其分析結果如表3(a)~(f)，所建立之二型推估模式臚列如下：

(1)Horton-Strahler型模式：地文因子與河川級序之關係式，其型式如下：

$$\ln Y = a + bU \dots\dots\dots (5-1)$$

式中，Y代表地文因子，計有河川數目(Nu)、河段平均長度(Lu)、河川平均坡度(Su)等，U為級序，a,b則為待定係數。各子集水區之係數值如表4所示。

(2)Stall-Fok型式：首先建立有理化河川級序與地文因子之關係式，如下所示：

$$\ln N = -10.776 + 3.019U, (R^2 = 0.6980) \dots\dots\dots (5-2a)$$

$$\ln L = -6.949 + 2.090U, (R^2 = 0.6558) \dots\dots\dots (5-2b)$$

$$\ln Ad = -7.463 + 2.588U, (R^2 = 0.5740) \dots\dots\dots (5-2c)$$

其中，N表示自河川原始點至x點之河川總數，L及Ad則分別代表自河川原始點向下游延伸至x點之河川長度及流域面積。

利用有理化河川級序修正Horton-Strahler之級序定律，理論上應較能反應各河段之特性，然由(5-2a)~(5-2c)式顯示，相關係數不佳。究其原因，乃不同整數級序間之河川具有一相關性(Horton之級序定律)；而同一級序間之各河段，因其所在位置之不同，亦存在一定之差異性，Stall-Fok已究得此點，並應用有理化河川級序，將各河段之差異特性予以表達，但根據本文對石門水庫集水區河川系統分析結果發現，Stall-Fok之理論只適用於同一整數級次內之各河段，即雖將各河段之差異性予以數值表現，卻未將不同整數級序河川之差異予以考慮，據此，為以面積定律為例，修正如下：

$$\ln Ad = a' + b' \ln Au + c' U, u \leq u_r < u_r + 1 \dots\dots\dots (5-3a)$$

將(3-4)式代入(5-3a)式，得：

$$\ln Ad = a'' + b'' U + c' U, u \leq u_r < u_r + 1 \dots\dots\dots (5-3b)$$

由(5-3b)式推論各河川特性，則可表示如下：

$$\ln Y = a + bU + cU, u \leq u_r < u_r + 1 \dots\dots\dots (5-3c)$$

式中各符號之定義同前所述。

利用此一關係型式求得石門水庫集水區之河相特性如下：

$$\ln Ad = -6.497 + 1.211U + 1.277U_r,$$

$$u \leq u_r < u_r + 1 (R^2 = 0.9806) \dots\dots\dots (5-4a)$$

$$\ln N_t = -9.841 + 1.062U + 1.869U_r,$$

$$u \leq u_r < u_r + 1 (R^2 = 0.9773) \dots\dots\dots (5-4b)$$

$$\ln L = -6.260 + 0.783U + 1.243U_r,$$

$$u \leq u_r < u_r + 1 (R^2 = 0.9533) \dots\dots\dots (5-4c)$$

表3(a).秀巒子集水區河川系統分析表

order(u)	Nu	Lu	Hu	Su	Rb	Rl	Rh	Rs	Dk
1	36	1275.95	356.16	0.28	3.60	0.76	1.18	1.56	
2	10	1668.96	302.51	0.18	3.33	0.71	0.82	1.13	
3	3	2342.84	367.47	0.16	3.00	0.14	0.53	4.00	
4	1	17298.74	695.87	0.04					
5	—	—	—	—					
平均					3.31	0.74	1.03	1.34	0.727

其中， $Rb(\text{分岔比}) = N_u / N_{u+1}$

$Rl(\text{河段長度比}) = L_u / L_{u+1}$

$Rs(\text{河段坡度比}) = S_u / S_{u+1}$

$Rh(\text{河段落差比}) = H_u / H_{u+1}$

表3(b).玉峯子集水區河川系統分析表

order(u)	N	Lu	Hu	Su	Rb	Rl	Rh	Rs	Dk
1	84	1325.40	371.6	0.28	3.36	0.59	1.01	1.01	
2	25	2249.64	367.8	0.16	5.00	0.36	0.73	0.73	
3	5	6225.11	503.7	0.08	2.50	0.40	1.01	1.01	
4	2	15470.4	497.6	0.03	2.00	2.30	2.43	2.43	
5	1	6725.54	205.1	0.03					
平均					3.22	0.45	0.92	2.14	0.690

表3(c).三光子集水區河川系統分析表

order(u)	Nu	Lu	Hu	Su	Rb	Rl	Rh	Rs	Dk
1	98	1278.40	361.8	0.28	3.50	0.54	0.92	1.65	
2	28	2365.83	394.5	0.17	5.60	0.38	0.78	2.13	
3	5	6225.11	503.7	0.08	2.50	0.40	1.01	2.67	
4	2	15470.4	497.6	0.03	2.00	0.82	1.25	1.50	
5	1	18869.2	399.4	0.02					
平均					3.40	0.44	0.90	2.15	0.696

表3(d).稜角子集水區河川系統分析表

order(u)	Nu	Lu	Hu	Su	Rb	Rl	Rh	Rs	Dk
1	23	1110.80	338.42	0.30	2.88	0.44	0.91	2.00	
2	8	2513.85	371.13	0.15	2.67	0.39	0.81	2.14	
3	3	6460.61	456.26	0.07	3.00	0.99	7.58	7.00	
4	1	6525.07	60.23	0.01					
平均					2.82	0.42	0.86	2.07	0.668

表3(e).高義子集水區河川系統分析表

order(u)	Nu	Lu	Hu	Su	Rb	Rl	Rh	Rs	Dk
1	138	1191.93	344.78	0.29	3.45	0.48	0.85	1.81	
2	40	2486.89	403.93	0.16	4.44	0.44	0.94	2.00	
3	9	5618.57	431.95	0.08	3.00	0.44	1.24	2.67	
4	3	12648.16	347.83	0.03	3.00	0.44	0.58	1.50	
5	1	28546.56	603.49	0.02					
平均					3.47	0.46	1.01	2.16	0.704

表3(f).霞雲子集水區河川系統分析表

order(u)	Nu	Lu	Hu	Su	Rb	Rl	Rh	Rs	Dk
1	17	1086.16	318.9	0.29	3.60	0.43	0.77	1.78	
2	48	2502.85	412.1	0.16	4.80	0.45	0.92	2.06	
3	10	5602.37	448.3	0.08	3.33	0.44	1.29	2.91	
4	3	12648.1	347.8	0.03	3.00	0.30	0.44	4.47	
5	1	42612.0	798.6	0.02					
平均					3.68	0.44	0.99	2.25	0.708

表3(g).石門子集水區河川系統分析表

子集水區別	級序U	有理化級序U _r	Nt	L	Ad
秀 巒	4	4.990	50	25.39	115.93
玉 峯	5	5.016	116	41.93	335.29
三 光	5	5.059	133	54.07	398.18
稜 角	4	4.990	35	18.41	107.76
高 義	5	5.184	191	63.75	542.03
霞 雲	5	5.293	235	77.82	644.53
石 門	5	5.626	371	96.79	763.40

表4.各子集水區Horton-Strahler型模式〔(5-1)式〕之係數值（ R^2 ：相關係數）

係數 區別	Y 數值	Nu			Lu			Su		
		a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	R^2
秀 巒		4.813	-1.242	0.9997	6.836	0.304	0.9955	-1.047	-0.280	0.8995
玉 峯		5.694	-1.282	0.9902	6.225	0.839	0.9849	-0.436	-0.739	0.9836
三 光		5.904	-1.340	0.9879	6.214	0.845	0.9916	-0.406	-0.745	0.9795
稜 角		4.141	-1.018	0.9995	6.111	0.880	0.9983	-0.465	-0.728	0.9993
高 義		6.222	-1.298	0.9969	6.270	0.790	0.9994	-0.401	-0.750	0.9863
霞 雲		6.408	-1.300	0.9960	6.180	0.817	0.9990	-0.331	-0.783	0.9801
石 門		7.080	-1.438	0.9999	6.047	0.804	0.9999	-0.413	-0.827	0.9700

Stall-Fok定律經過(5-3c)式修正後之結果由(5-4a)~(5-4c)式顯示，其相關係數大為提高，此乃表示修正式(5-3c)可有效地代表該河川之地文特性。

由Leopold, Maddock及Stall-Fok之推論，流量頻率在同一時間而言，具有一致之特性，故上、下游流量之差異，主受集水面積之影響。今將六站之流量以流量頻率 F 及集水面積 Ad 為自變數，求得流量推估式如下：

20% < F < 80%

$$\ln Q = -2.04 - 0.02F + 0.919 \ln Ad$$

$$(R^2 = 0.9796) \dots\dots (5-5a)$$

以(5-4a)式代入，得：

$$\ln Q = -9.010 - 0.02F + 1.238U + 1.305U_r,$$

$$u \leq u_r, < u + 1 \dots\dots (5-5b)$$

傳統水文站之水文資料獲得，在統計學上而言，僅為一點取樣。(5-5b)式乃於集水區內，利用有限水文站之水文資料，獲取其流量一頻率曲線，復套合河川系統之分析，將此有限點之資料，推而廣之而達於線，乃至於面；據此，針對任一水文站之流量資料，只需查得其流量頻率，即可推求集水區內任一河段之流量值，相當簡便。

5.1.2集水區泥砂輸出量模式之建立

首先根據各水文站之泥砂輸出量結果(表2(a)~2(f))，對集水區年泥砂輸出量與年洪水尖峯流量及年逕流量之關係加以探討。如眾所皆知，任何

一場暴雨必將引起地表逕流而發生土壤沖蝕，若逢颱風，則因氣流關係引來更大強度之暴雨，其所發生之土壤沖蝕更為嚴重，加以河川流量劇增，其輸砂能力更不可忽視。在圖4(a)~4(f)中分別表示出秀巒、玉峯、三光、稜角、高義及霞雲等集水區年泥砂輸出量與年逕流量之關係。由圖中可知在資料記錄期間，兩者並未維持一致之關係。此外參考圖5(a)~5(f)，此六圖各代表六子集水區之年泥砂輸出量與年洪水尖峯流量之關係。由圖中可知集水區泥砂輸出量與年最大尖峯流量則有較為一致之關係，依此乃建立各子集水區之泥砂輸出量與最大尖峯流量之關係式如下：

$$\text{秀巒 } Q_s = -230571 + 9967 Q_p$$

$$(R^2 = 0.5234) \dots\dots (5-6a)$$

$$\text{玉峯 } Q_s = -433354 + 1158 Q_p$$

$$(R^2 = 0.5347) \dots\dots (5-6b)$$

$$\text{三光 } Q_s = -1372422 + 2221 Q_p$$

$$(R^2 = 0.5876) \dots\dots (5-6c)$$

$$\text{稜角 } Q_s = -720726 + 5052 Q_p$$

$$(R^2 = 0.8613) \dots\dots (5-6d)$$

$$\text{高義 } Q_s = -1268944 + 1947 Q_p$$

$$(R^2 = 0.6841) \dots\dots (5-6e)$$

$$\text{霞雲 } Q_s = -868326 + 1927 Q_p$$

$$(R^2 = 0.7121) \dots\dots (5-6f)$$

由以上各模式所顯示之相關係數觀之，集水區之泥砂輸出量，多數未具有與年總逕流量呈一致之

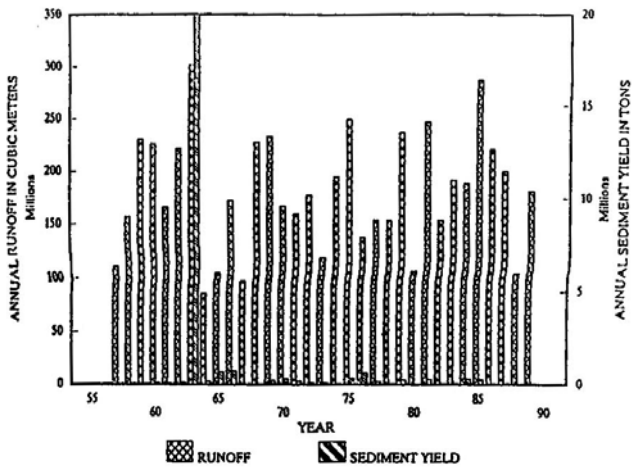


圖4(a).秀巒子集水區年逕流量及泥砂輸出量

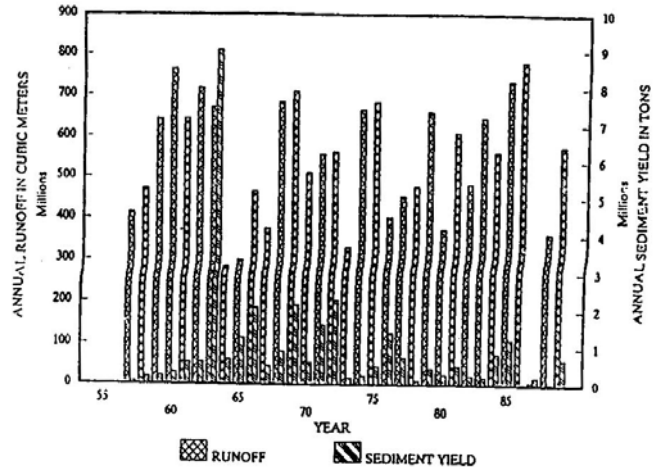


圖4(b).玉峯子集水區年逕流量及泥砂輸出量

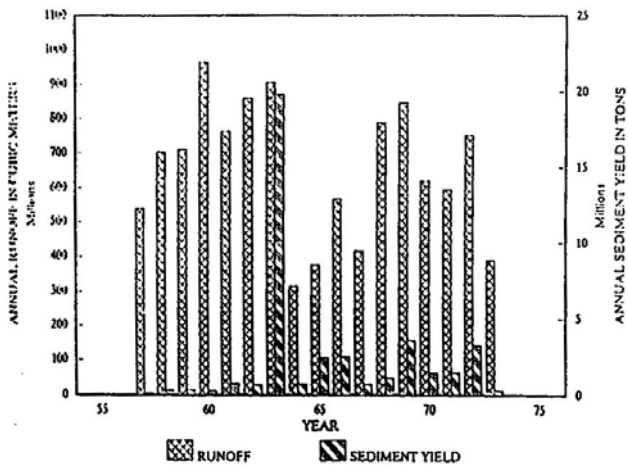


圖4(c).三光子集水區年逕流量及泥砂輸出量

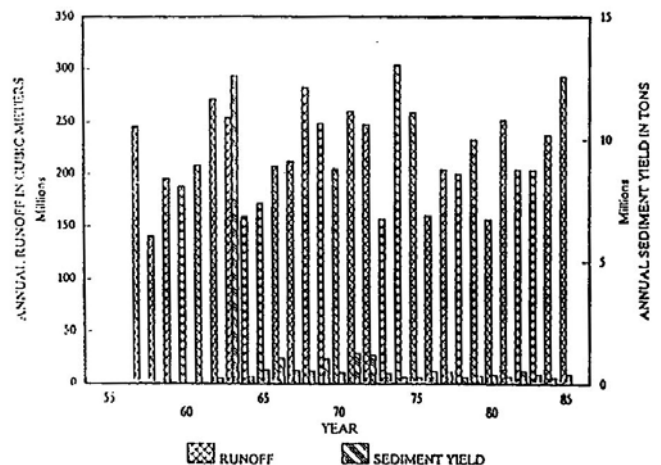


圖4(d).稜角子集水區年逕流量及泥砂輸出量

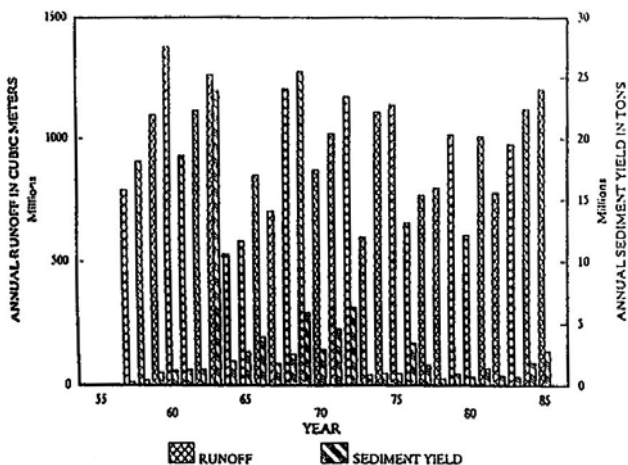


圖4(e).高義子集水區年逕流量及泥砂輸出量

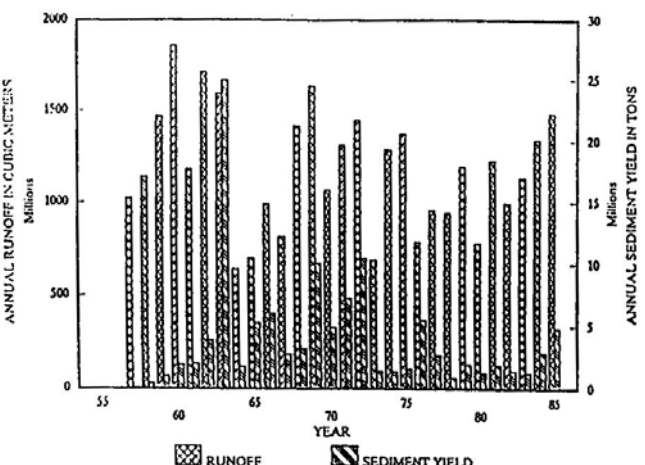


圖4(f).霞雲子集水區年逕流量及泥砂輸出量

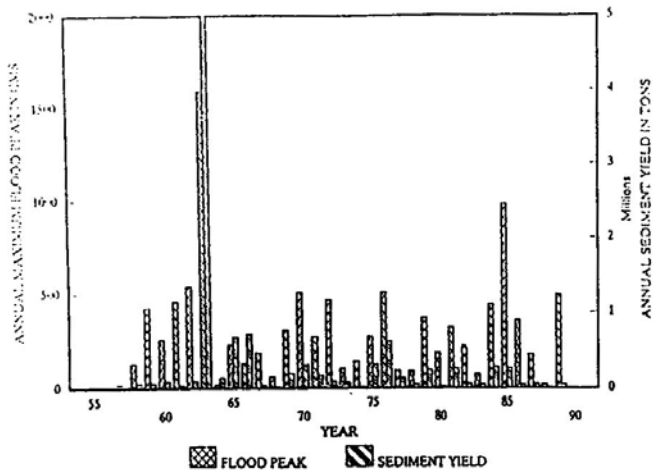


圖5(a).秀櫟子集水區最大洪峯量及泥砂輸出量

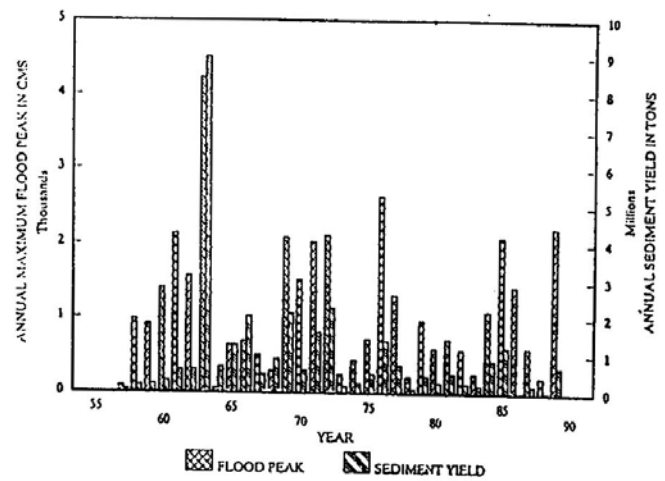


圖5(b).玉峯子集水區最大洪峯量及泥砂輸出量

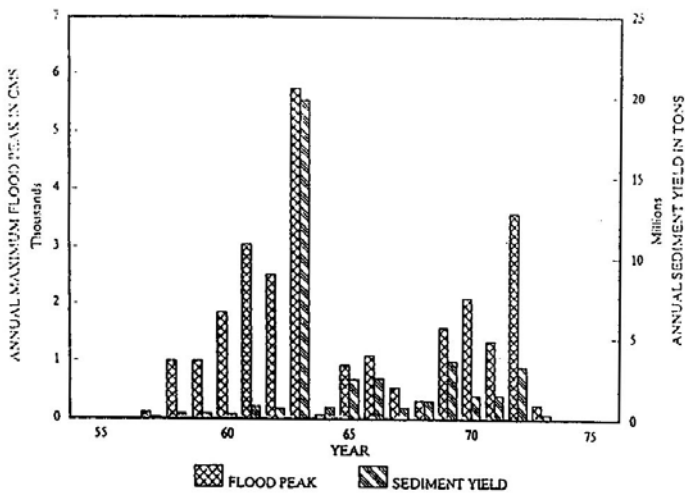


圖5(c).三光子集水區最大洪峯量及泥砂輸出量

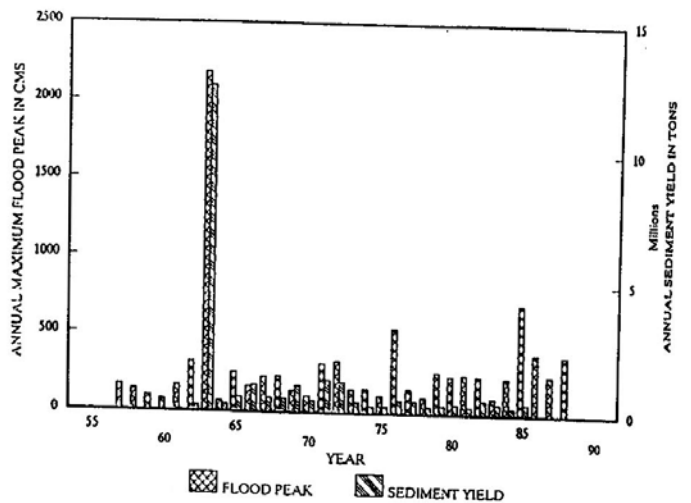


圖5(d).稜角子集水區最大洪峯量及泥砂輸出量

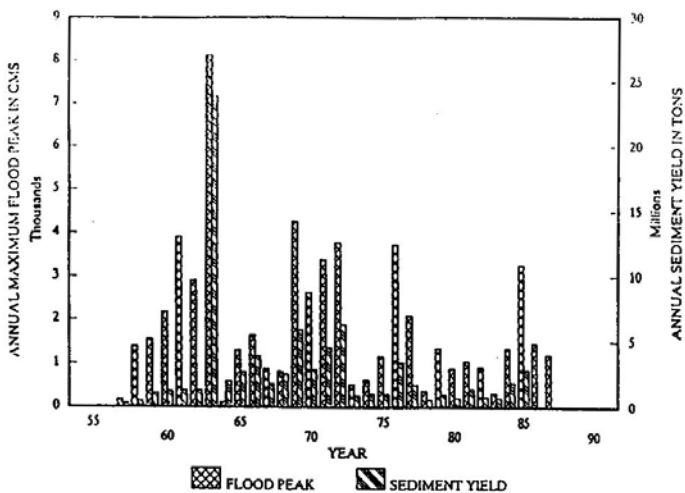


圖5(e).高義子集水區最大洪峯量及泥砂輸出量

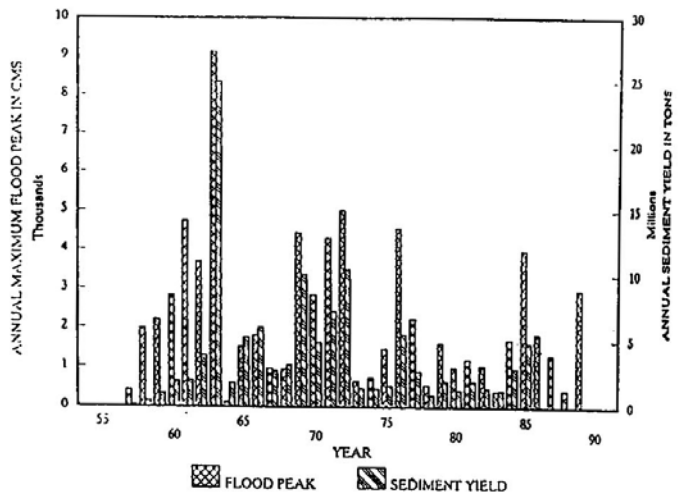


圖5(f).霞雲子集水區最大洪峯量及泥砂輸出量

相關性，而較偏向與某一特定流量相關，此觀念與建槽流量 (Dominate Discharge) 之觀念相仿。建槽流量係指長期性觀測下，某一流量恰可使河床約達不沖不淤之動態平衡狀況之流量。以此引申，吾人之目的乃尋找該水文站之一代表流量，而此流量可足以推估該年之泥砂輸出量者。在此，將引用前述流量頻率曲線之方法求得一支配流量。根據筆者對六水文站分別求得之頻率為20%、10%、5%、3%、2%及1%之流量與年泥砂量之迴歸分析中，以頻率為10%之流量可得到最佳之結果，其相關式如下所示：

$$Q_s = 6555 \times Q_{0.1}^{1.394} \quad (R^2 = 0.9621) \dots\dots\dots (5-7)$$

式中， Q_s 為集水區年泥砂輸出量 (ton)； $Q_{0.1}$ 為頻率10%之流量 (cms)。

5.2綜合討論

5.2.1河川網路系統級序配置之檢討

本文利用Horton及Strahler之河川級序系統理論，建立石門水庫集水區之河川網路演進模式，顯示了石門水庫集水區河川系統確有其演進特性；然而，Horton之理論，僅得以推論河川級序系統中，各級次河川之平均概勢，對於集水區之特性描述或可做為參考，而於實際水文應用卻有其難處。蓋兩同等級次之河川匯流後，級序始得以進級，而在未進級前，各河段均視為“均一”，此則明顯與事實相矛盾。本文以Fok對級序系統之修正，建立分佈型之河川級序系統模式，在石門水庫集水區中，得到極佳之結果（見5-4a~5-4c式）。由於此等河川形態之分析過程，牽涉大量之地形計量工作，以傳統人力方法分析，將因過於繁瑣而令人卻步，所幸電腦科技進步神速，數位化地文資訊之建立，簡化了分析工作，同時亦減少了可能之人為誤差，使此等分析更科學化。台灣由於自然條件特殊，河川多流短坡陡，與大陸型國家之河川形態迥異。河相之研究，雖是舊藥新吃，但與電腦科技之結合，可使此類研究得以大大發展。本文已建立數值地形資料庫，若能與河系之位向資料配合，建立集水區自動化搜尋技術，對於河相量化分析研究，將更能達到快速、準確且具處理大量資料之可能性，或可為集水區特性研究之另一發展途徑。

5.2.2流量與頻率之檢討

流量乃降雨與地文、植生等因子反應之輸出結

果。河川地文若視為集水區之靜態幾何特性，而流量則可相對視為動態幾何之表現。據Maddack與Leopold之研究，流量與頻率間，存在一冪函數之關係。在本研究中，乃針對六水文站，三十三年之日流量資料進行統計分析，求得其流量頻率曲線。由於水文資料所取記錄超過三十年，此頻率曲線應可代表該水文站之水文特性。各站之流量頻率曲線明顯呈現S形，故將此曲線分段分析 ($F > 80\%$ ， $20\% < F < 80\%$ ， $F < 20\%$ 等三段)，據以建立流量之推估模式。此外頻率在20%與80%之間者，由於流量與頻率呈半對數之直線關係，較為單純，故本文乃嘗試與河川系統套合，建立分佈型流量推估模式。水文站之設立及具代表性水文資料之獲得，對於自然環境科學研究者而言，乃一相當重要之基本工作。本文所建立之流量推估模式，乃由過去發生之事件中，建立某一頻率下各河段之流量推估值，利用有限點之資料，求得目的區之結果，其潛力雖有待後人之進一步證實，但仍可作為水文站配置規劃之參考依據。

5.2.3泥砂輸出量估算模式之檢討

本文經由對單一水文站分析其泥砂輸出量結果，輸出量與總逕流量並未呈現一致性之關係，反而與年洪水尖峯流量有較為一致之相關。此乃顯示年泥砂產量或可以某一特定之流量予以推估，而較總逕流量所得者為佳。本文以流量之統計分析結果，藉由頻率之分佈，尋求一代表性流量，對於支配流量之決定，得一有系統之決定。此一推論，或可作為後續研究者進一步探討之課題。

六、結論與建議

依據河相學之基本理論，每一集水區均有其獨特之地形、地質、地貌等特性，而此地文環境或直接、或間接地影響水文環境，導致集水區內河川之逕流、沖刷，展現獨特之效應。本文以Horton-Strahler之級序定律為基礎，以石門水庫集水區之河川系統，進行河相之定量分析，並獲致下列之結論與建議：

(1)針對石門水庫集水區河川系統進行量化之分析結果（見表4），顯見該水庫集水區河川網路發展型態，確有其規則性；即網路發展型態隨級序之演進而呈一定之反應。本文根據相關之學理及現場

現場資料建立了石門水庫上游集水區河相之地文幾何模式，並藉由此之分析，修正了Fok之有理化河川級序定律，如(5-3c)式所示。

(2)利用集水區內各水文站過去之流量資料，建立完成流量與頻率之關係模式，其型式如下：

$$\begin{aligned} F < 20\% \quad \ln(\ln Q) &= a + bF \\ 20\% < F < 80\% \quad \ln Q &= c + dF \end{aligned}$$

其中對於常流量（頻率在20%~80%之間者），藉由Maddock之頻率係一致性之結論，建立了石門水庫集水區分佈型流量之實用推估模式如下：

$$\begin{aligned} \ln Q &= -9.010 - 0.02F + 1.238U + 1.305U_r, \\ U &\leq U_r < U + 1 \cdots \cdots (5-5b) \end{aligned}$$

一般水文站之設立，限於交通、設備、維護與資料需長期性蒐集之因素，乃一高成本之投資，而研究者在資料之取得卻仍常感不足之苦，水文站址之設立，若能選定在具代表性之位置，如隨著河川級序配置，並依此方式建立該集水區之特性模式，則可利用此有限水文站之資料，得知該集水區內任一河段之流量值，對於研究集水區之洪流輸出或泥砂運移者而言，將可有效且迅速地取得所需之水文量，簡化分析工作。

(3)本文利用地理資訊系統軟體ARC/INFO，對石門水庫集水區進行自然環境資料庫之建立工作，並對所建立之地理資訊，進行地形計量之分析，證實利用主題圖套合與地理索引功能，能快速取得所需之各項資料。

參考文獻

1. 王如意、易任，1982，「應用水文學」（下），pp.241-256。
2. 何智武，1983，「湍流渠槽沈滓運移特性之研究」，國立臺灣大學土木工程研究所博士論文。
3. 阮香蘭，1992，「石門水庫集水區之河相與輸砂特性研究」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
4. 黃宏斌，1992，「陡坡水槽之輸砂量模式研究」，臺灣水利，第四十卷，第一期，pp.44-51。
5. 臺灣省石門水庫管理局，1968，「石門水庫集水區治理調查報告」。
6. 臺灣省石門水庫管理局，1989，「石門水庫集水區治理效益評鑑」。
7. 霍雨時，1968，「河川系統水力特性之分析」，臺灣水利，第十六卷，第一期，pp.10-13。
8. 霍雨時，1969，「河相學—河川階序定律與流域特性之研究」，臺灣水利，第十七卷，第二期，pp.11-18。
9. 霍雨時，1970，「河川高程定律及其應用」，臺灣水利，第十八卷，第一期，pp.7-10。
10. 蔡長泰、王文江、沈學汶，1992，「石門水庫集水區產砂量分析」，集水區泥砂產量與輸砂問題研討會，pp.5.1-5.37。
11. 塚本良則，1991，「森林水文學」，pp.15-19，文永堂。
12. Bhowmik Nani G. and John B. Stall, 1979, "Hydraulic Geometry and Carrying Capacity of Floodplains", University of Illinois Water Resources Center, Urbana, Research Report 145.
13. Ho Neal c. and John Manker, 1991, "Geometric Properties of The Altamaha River System, Georgia", Proceedings of The Chinese-American Academic and Professional Association in Southeastern United State, 15th Annual Conference (at Orlando, Florida), pp.58-68.
14. NCGIA Core Curriculum, 1989, "Technical Issues in GIS-Lecture 39, The TIN Model", National Center for Geographic Information and Analysis, USA.
15. Stall John B. and Yu-Si Fok, 1968, "Hydraulic Geometry of Illinois Streams", University of Illinois Water Resources Center, Urbana, Research Report 15.
16. Simons Dzryl b. and Fat Senturk, 1977, "Sediment Transport Technology", Water Resources Publications Fort Collins, Colorado 80522, USA.
17. Swain, P.H., Davis (eds), 1978, Remote Sensing, "The quantitative Approach", McGraw-Hill, New York.
18. Yang C.T., 1971, "Potential Energy And Stream Morphology", Water Resources Research, Vol.7, No.2, pp.311-322.