

結構方程模式於建立生態水質水文指標之研究

Structural Equation Modeling for Establishing the Multipurpose Hydrologic Indicators

國立成功大學水利及海洋工程學系
碩士

張 參 麒
Tsung-Chi Chang

國立成功大學水利及海洋工程學系
助理教授

孫 建 平*
Jian-Ping Suen

摘 要

自然流態的變化特性對於溪流生態具有相當大的影響性，藉由溪流生態、水質與水文特徵變化關係的探討，可了解不同生物和流態間的連結，顯示生態水質水文指標的建立對於生態流量的管理十分重要。本研究利用主成份分析、結構方程模式等統計方法逐步篩選，挑選出具有代表水文氣候、水質狀況與生物多樣性等多重資訊的水文指標。結構方程模式主要運用於因果關係之分析探討，並具有多項的模式評鑑指標，使研究者可以進一步檢驗研究模式的整體適切性，達到提高研究精確度之目的，相當適合於探討水文指標與魚類生態之關聯性。本研究利用結構方程模式建立出五個水質模式與一個生物多樣性模式，水質模式探討了水文指標與河川污染指標間之因果關係，指出了水文指標與水質情況的相關性；生物多樣性模式則是探討了水文指標與夏農指數之因果關係，指出了反應水文特性、水質狀況之水文指標與生物多樣性之相關性，藉由水質模式與生物多樣性模式分析的結果，則可挑選出具有代表多重資訊之水文指標。此外，本研究亦採用了羅吉斯回歸分析，利用了魚類於五個流域之出現情況，將水文指標與魚類族群分佈情況加以連結，探討特定魚類族群偏好之水文特性。而藉由計算魚類族群在各個水文指標影響下於五個流域之出現機率，則可以了解多重資訊之水文指標與特定魚類族群之相關性。本研究所得的指標，除了能獲得魚類族群對於特定水文、水質環境需求的資訊，並可提供水利單位作為生態流量管理的參考，期許在水資源管理層面上可以對溪流生態系統的維護達到更大的幫助。

關鍵詞：自然流態，溪流生態，生態水文指標，主成份分析，結構方程模式，生物多樣性，羅吉斯回歸。

*通訊作者，國立成功大學水利及海洋工程學系助理教授，70101 台南市大學路 1 號，jpsuen@mail.ncku.edu.tw

ABSTRACT

The variability of the natural flow regime has a significant influence on the river ecosystems. By examining the relationships between stream ecosystems, water quality, and hydrologic characteristics, we can understand the preference of different organisms to flow regimes. The development of the multipurpose hydrological indicators is quite important to the management of ecological flow. By using principal component analysis and structural equation modeling, we select the hydrological indicators that could express the significance of hydro-climate, water quality and fish species diversity. Then the logistic regression analysis model is used to examine the relation between fish and hydrologic indicators by using fish's present conditions. The structural equation modeling provides examination of a set of relationships between one or more independent variables and one or more dependent variables, so the modeler could explicitly capture the unreliability of measurement in the model, which in theory allows the structural relations between latent variables to be accurately estimated.

In this study, the structural equation model is used to build five water quality models and one biodiversity model. The water quality model examines the causality of hydrologic indicators and River Pollution Index, which expresses the relationship between the hydrological indicators and water quality condition, and the biodiversity model examines the causality of hydrological indicators and Shannon Index, which expresses the relationship between hydrological indicators and biodiversity. By analyzing water quality and biodiversity models, a suite of hydrological indicators representing multiple characteristics can be obtained. The multipurpose hydrological indicators selected from this research can not only provide the specific hydrologic and water quality information that fish requires, but also can provide the guidance for water resources authorities to achieve the goal of ecological restoration.

Keywords: Natural Flow Regime, Stream Ecology, Eco-hydrological Indicator, Principal Component Analysis, Structural Equation Modeling, Logistic Regression Analysis, Biodiversity.

一、前言

流態(flow regime)為河川流量隨著不同時空變化而產生的水文特徵，自然流態(natural flow regime)為未受人為控制與干擾之自然水文變化情況。自然流態有五個重要之組成要素影響著河流生態系統之生態完整性，分別為量、時間、頻率、延時、變化率等五個要素，這些要素可以用來表現出大尺度範圍的流態與特定水文現象的特徵，圖 1-1 為五個要素對生態完整性之影響關係圖(Poff *et al.*, 1997)。將流態納入溪流生態系統

管理是相當重要的，而首先就是必須先了解人類對溪流流態所造成的改變，反應出對地貌與生態系統造成極大影響。在逐漸了解流量在生態上所產生的影響之後，對於溪流生態系統的管理便必須以自然流態為方向逐漸加以發展，才能達到流量管理與生態復育的目標。而河川的自然流態會隨著不同時間而有所變化，這些變化性對生態系統的功能與棲息地之生物多樣性是非常重要的。就生態系統管理的方向而言，欲了解河川流態的自然變化性，必須對量、時間、頻率、延時、變化率等五個要素加以考量。現今大部分的流量

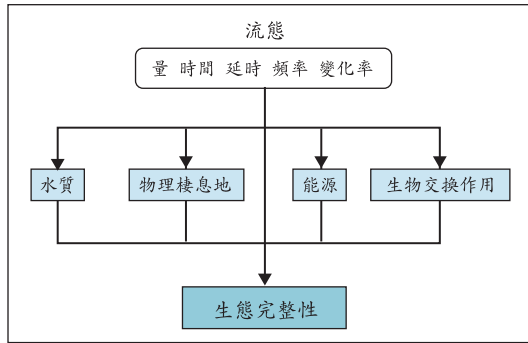


圖 1-1 流態對生態完整性之影響關係圖

管理僅侷限於最小流量與標的物種的復育，如以自然流態之概念作為生態流量管理的出發點，對於溪流之生態復育將會有很大的助益(Suen and Eheart, 2006)。

水文指標在溪流生態的發展已有相當多的研究，可以利用與生態相關之水文變數來描述特定地區之溪流特性、區域性或全球性之水文變化特性，還有描述受各種人為因素干擾之後的流態特徵。早期的研究主要著重於平均流況(Hawkes *et al.*, 1986)、平均日流量變化(Horwitz, 1978)、流量之預測(Bunn *et al.*, 1986)、短期洪水頻率估計(Cushing *et al.*, 1983)、月流量之季節性分佈(Haines *et al.*, 1988)、流量與洪水延時分佈曲線與年流量時間序列(McMahon *et al.*, 1992)，目前有較多的研究已經開始著重於同時檢測整套的水文指標，並利用多重變數的方式來描述水文情況(Poff and Ward, 1989; Poff and Allan, 1995; Richter *et al.*, 1996, 1997)。

Richter *et al.* (1996)提出水文變化指標(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)來評估人類對生態系統所造成的水文改變度，使用以量、時間、頻率、延時及變化率等水文特性為基礎的 32 個水文指標來表現每年中水文變動的特徵。此 32 個水文指標並提供了地表水與地下水對於水生物、溼地與河岸生態系統造成影響的生態資訊。Richter *et al.* (1997)並提出變化範圍法(Range of Variability Approach, RVA)，不但整合了水文變化與水域生態系統之關聯性，並進一步建立了河川管理機制。此法即利用 32 個水文改

變指標來評估河川在量、時間、頻率、延時及變化率之改變程度，以瞭解河川流量受到水利設施的影響程度，以及是否能保有水利設施興建前之自然流態變化。

Olden and Poff (2003)從 13 篇已發表的文章中，找出 171 個水文指標，用來代表在生物上重要的溪流流量特性，並利用全美多達 420 個流量站點進行分析。研究目的希望能萃取重要水文資訊，找到真正具有生態水文特徵之水文指標，提供溪流生態學家在指標選擇上的參考；而該研究亦發現一個重要結論，IHA 之 32 個指標可以代表 171 個水文指標大部份之水文資訊，並且均勻分佈於五個水文指標類別，可以提供研究者在進行生態水文分析時相當良好的參考。

蕭政宗與吳富春(2004)利用 32 個水文改變指標(IHA)來評估河川流量在量、時間、頻率、延時及變化率的改變情況，以瞭解河川流量受攔河堰影響的程度是否能保有攔河堰興建前之自然流量變化。蕭政宗與吳富春(2005)另將 32 個水文改變指標的水文改變度整合成單一的整體水文改變度(overall degree of hydrologic alteration)，以代表水利設施對河川水域的整體影響，藉由缺水率來評估在水利設施的營運效率，並且以多標的妥協規劃來尋求同時對河川水域環境影響最小且缺水率最少的水利設施最佳營運策略。

自然流態的概念一直以來主要於研究水文在河流生態系統影響，在過去十年間，研究者已經測試出一些水文指標來表達出不同組成之流態的特徵，可以相當明確地指出流態在受水工結構物完成前後的影響，確實對生態流量的管理有相當大的助益，然而單從水文狀態的觀點並無法了解單一物種對於流態的偏好情況，而另一影響物種生存環境的重要因素則是水質，如溶氧、生化需氧量、氨氮與懸浮固體等等，都會影響物種的棲息地環境。探討水文狀態與水質情況的關聯性，可以明確的找到對水質情況影響最明顯的水文指標，進而找出具有代表水文氣候、水質情況與生物多樣性之水文指標，更能將水文指標做更廣泛的應用。結構方程模式(structural equation modeling, SEM)主要可以用於因果關係之分析探

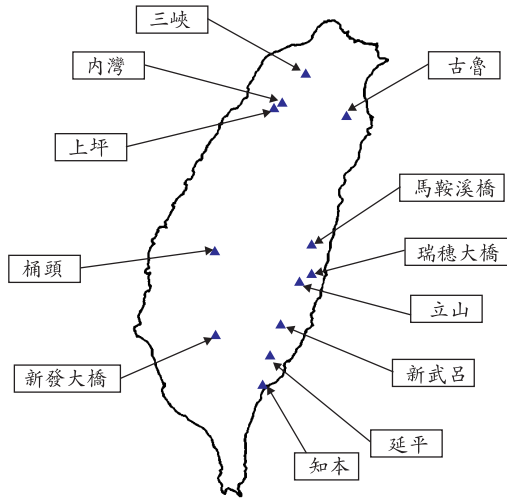


圖 2-1 本研究之水文測站分佈圖

討，並且方便研究者應用於理論模式，藉由特定的估計程序產生各項參數的估計，進而可以檢驗理論模式的整體適切性，因此相當適合本研究對於各個生態水文指標的討論與應用，採用 32 個水文指標進行與各項水質參數、魚類生物多樣性之因果分析，藉由所建構的模式可以清楚的了解水文指標與生態系統的關聯性。最後，羅吉斯回歸分析模式(logistic regression model)的建立，從魚類於各個生物站點出現的情況，可以求得特定魚類族群在各個流域中與水文指標的相關性，並找出具有代表性意義的魚類物種，不但可了解各個流域之水文、水質情況，更能進一步提供相關單位作為生態流量管理之參考。

二、研究方法

2.1 水文資料之蒐集

由於本研究欲探討自然流態下之水文特性，因此挑選水文測站第一條件就是必須尋找中上游未受或較少受人為控制之天然流量測站，挑選之水文測站皆位於溪流之中上游，水質受到污染的情況也相對比下游來得少；第二條件就是必須與水質測站有所對應，才能提高水質之 SEM 模式的正確性，在本研究中則是選取與水質測站相近之水文測站做為研究站點；第三條件則是水文測站必須具備 20 年以上之流量資料，根據

Richter *et al.* (1997)之研究中，提出要能代表整體流域之水文特性，則須具備有 20 年以上之流量資料，才能提升研究的準確度，而本研究所採用之水文資料為日流量資料。

經由以上三個條件加以篩選之後，共有 12 個水文測站符合條件，分別為三峽、內灣、上坪、桶頭、新發大橋、古魯、馬鞍溪橋、瑞穗大橋、立山、新武呂、延平、知本等水文測站，而水文指標之中英文代號對照可參考表 3-1。若以水資源分區將台灣本島分為四個主要區域，北部地區有 4 個測站，中部地區有 1 個測站、南部地區有 1 個測站、東部地區則有 6 個測站，圖 2-1 即為本研究 12 個水文測站分佈圖。

2.2 水質資料之蒐集

本研究挑選水質測站之第一條件必須與水文測站有所對應，挑選出與水文測站相近之水質測站；第二條件則是必須有 20 年以上之水質資料，才能與水文資料進行結構方程模式之建立；第三條件則是考量水質測站受污染程度的情況，本研究採用之水質指標為河川污染指標(RPI)，其數值越大表示污染越嚴重，而如果達到中高度污染，表示受人為干擾因素影響過大，並無法明確找出水文指標與水質之相關性，因此在站點選擇上，盡可能選取少未受污染或稍受污染之水質測站，因此挑選出來的 12 個水質站點分別為三峽大橋、內灣吊橋、瑞豐大橋、南雲大橋、月眉橋、崙埤、萬里溪橋、瑞穗大橋、太平溪橋、初來橋、鹿鳴橋、知本橋等站點，圖 2-2 為 12 個水質測站之分佈圖。

在水文資料與水質資料於結構方程模式對應的方式上，主要以年為單位加以對應，水文資料原為日流量資料，經由 IHA 軟體計算後的 32 個水文指標值均為每年水文改變的情況；水質資料則依每年每個站點之水質資料筆數加以平均，因此可求得每年之水質參數(溶氧、生化需氧量、氨氮、懸浮固體)與水質指標(RPI)的平均值，接著進一步將 12 個水文站點與 12 個水質站點之 20 年資料加以對應，以建構結構方程模式。

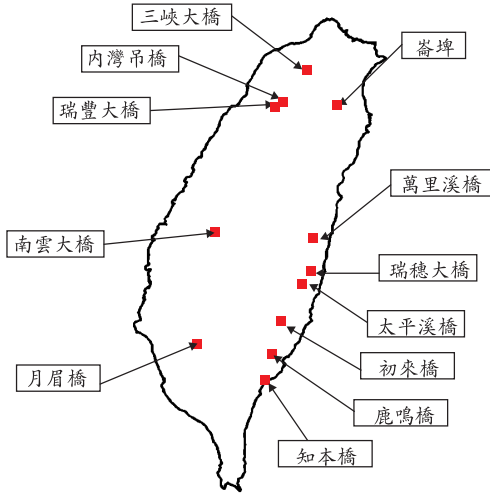


圖 2-2 本研究之水質測站分佈圖

2.3 生物資料之蒐集

由於歷史之生物資料有限，本研究分析的魚類物種為分佈於淡水河流域、濁水溪流域、高屏溪流域、蘭陽溪流域、花蓮溪流域等五個流域之淡水魚類，生物站點的選擇主要以與水文測站可以互相對應為主，經由多方蒐集之後共可取得五個流域中 20 個生物採樣站點資料。魚類資料來源為台灣河川河口魚類分佈資料庫、淡水河流域底棲生物與魚類調查及水質評估(經濟部水資源統一規劃委員會，1983)、淡水河流域水生物調查及水質評估之研究(經濟部水資源統一規劃委員會，1994)、環境調查研究年報(環保署環境檢驗所，1993)、台灣河川水質魚類指標之研究(王漢泉，2002)等。

羅吉斯回歸分析主要利用了 65 種於台灣溪流常見之淡水魚種進行分析，藉由 65 種淡水魚類在五個流域之各個生物測站之出現情況，來探討水文指標與魚類族群分佈之相關性。

三、研究方法與採用指標

3.1 主成份分析

主成份分析具有簡化多變量維度之特性，且能保有原有資料大部份之資訊。由於本研究分析採用 32 個 IHA 水文指標，太多的變數並不利於 SEM 模式之建立，因此使用主成份分析進行簡

化變量之工作，找出可代表在 12 個水文測站之 32 個水文指標特性的主成份，再利用比例原則依一定比例挑出各主成份之重要水文指標，進一步利用挑選之水文指標建構 SEM 模式。

Olden and Poff (2003)指出欲代表流域整體特性，須藉由主成份分析從 32 個 IHA 水文指標中，選出至少十個水文指標來加強分析的情況。而挑選指標的方式即以各主成份之特徵值(即解釋變異量)大小在特徵值總和所佔之百分比，然後依百分比大小以一定比例選取各主成份中因素負荷最大之水文指標，此即為比例原則，其數學式如下所示：

$$\text{每一主成份挑選之水文指標數} = \frac{\lambda_i}{\lambda} \times 10 \quad \dots(1)$$

λ_i ：每一主成份解釋變異量

λ ：總解釋變異量

3.2 結構方程模式

一個完整的結構方程模式(SEM 模式)，包括了測量模式(measurement model)與結構模式(structural model)兩部份，前者係指實際測量變項與潛在特質的相互關係，後者則說明潛在變項之間的關係(陳順宇，2007)。圖 3-1 為 SEM 模式之概念圖，測量變項 V_1 、 V_2 與 V_3 受到同一個潛在變項(F_1)的影響，形成一個獨立的測量模式，而測量變項 V_4 、 V_5 與 V_6 則受到另一個潛在變項(F_2)的影響，形成另一個獨立的測量模式。兩個潛在變項之間具有因果關係的假設，以單向箭頭來表示。因此，從 F_1 到 F_2 之間是一個結構模式，對於潛在變項 F_2 ，無法被 F_1 解釋的干擾部分為 D ，此外， $E_1 \sim E_6$ 為 $V_1 \sim V_6$ 所受到的干擾部分。

在 SEM 當中，如果單獨使用測量模式，也就是只有測量模式而沒有結構模式的回歸關係假設時，即為驗證性因素分析(confirmatory factor analysis)，因其檢測的內容是測量题目的因素結構(factorial structure)與測量誤差。進一步地，單獨看待結構模式，其實就是一個傳統的路徑分析(path analysis)模式，可以多元回歸的概念來說明變項的因果或預測關係。事實上，如果一個 SEM

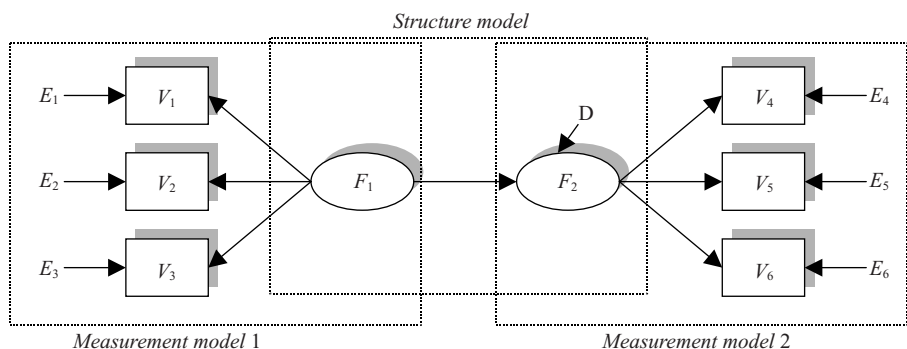


圖 3-1 SEM 模式圖

模式當中沒有任何潛在變項的假設(亦即沒有測量模式)，只存在有測量變項，並探討這些測量變項的因果/預測關係時，就與傳統的路徑模式無異。

值得注意的是，SEM 模式與傳統的回歸分析的不同，除了在於 SEM 可以同時處理多組回歸方程式的估計，更重要的是變項關係的處理更具有彈性。在回歸分析當中，變項僅區分為自變項與依變項，同時這些變項都是無誤差的測量變項，但是 SEM 模式中，變項的關係除了具有測量關係之外，還可以利用潛在變項來進行觀察值的殘差估計，因此，SEM 的模式中，殘差的概念遠較傳統回歸分析複雜。其次，在回歸分析中，依變項被自變項解釋後的殘差是被假設與自變項之間的關係是相互獨立，但是 SEM 分析中，殘差項是允許與變項之間帶有關聯，但是前提是這些特殊的假設也應具有一定的理論邏輯基礎。

3.3 羅吉斯回歸分析

羅吉斯回歸(logistic regression)類似線性回歸模式。回歸分析是描述一個依變數與一個或多個預測變數之間的關係，然而一般回歸分析時，依變數與自變數通常均為連續變數，但羅吉斯回歸所探討結果的依變數是離散型，特別是其分類只有二類(例如“成功與失敗”)時。利用羅吉斯回歸的目的是在於建立一個最精簡和最能配適的分析結果，而且在實用上合理的模式，建立模式後可用來預測依變數與一組預測變數之間的關係。令 p 表示某種事件成功的機率，它受因素 x

的影響，即 p 與 x 之關係如下：

$$p = \frac{e^{f(x)}}{1 + e^{f(x)}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$f(x) = \ln \frac{p}{1-p} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots\dots\dots + \beta_k X_k$$

式(3)稱之為羅吉斯回歸模式， β 為回歸係數， k 為因素 X 之項數。

3.4 採用之指標

3.4.1 水文指標(IHA)

本研究採用之水文指標為 Richter *et al.* (1996) 提出之 32 個水文指標(IHA)，關於 IHA 水文指標之發展於前言中已有相當多的介紹，在此便不做進一步的闡述。而本研究為了方便運算與說明，將每個 IHA 水文指標均給予一個英文代號，如表 3-1 所示。

3.4.2 河川污染指標(RPI)

RPI 之水質參數為溶氧量、生化需氧量、懸浮固體及氨氮四項，指標即為四項水質點數之算術平均值。溶氧值越大表示水質越好，生化需氧量、懸浮固體與氨氮等則是數值越小表示水質越好。計算公式如式(4)所示：

$$RPI = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Q_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

RPI ：污染指標值

Q_i ：污染點數值

i ：水質項目

表 3-1 IHA 水文指標與代號

組別	內容	IHA	代號
1	每個月之流量	各月份之流量平均值	月份(英文)
2	年極端值之量	年最小 1 日流量平均值	1-day min
		年最大 1 日流量平均值	1-day max
		年最小 3 日流量平均值	3-day min
		年最大 3 日流量平均值	3-day max
		年最小 7 日流量平均值	7-day min
		年最大 7 日流量平均值	7-day max
		年最小 30 日流量平均值	30-day min
		年最大 30 日流量平均值	30-day max
		年最小 90 日流量平均值	90-day min
		年最大 90 日流量平均值	90-day max
		年最小 7 日流量平均值對年平均流量比值	Base flow
3	年極端值之發生時間	年最大 1 日流量發生時間	Date max
		年最小 1 日流量發生時間	Date min
4	高及低流量之頻率及延時	每年發生高流量之次數	Hi pulse #
		每年發生低流量之次數	Lo pulse #
		高流量平均延時	Hi pulse L
		低流量平均延時	Lo pulse L
5	流量變化之改變率及頻率	流量平均增加率	Rise rate
		流量平均減少率	Fall rate
		每年流量逆轉次數	Reversals

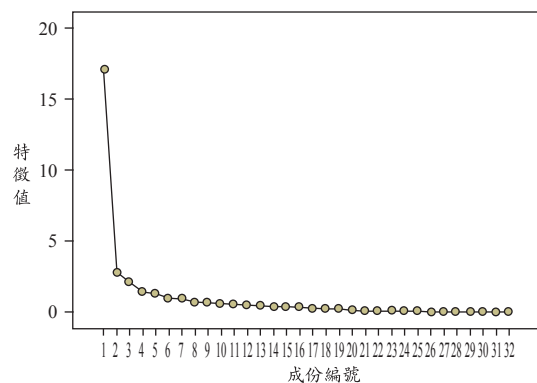


圖 4-1 主成份之陡坡圖

3. 當考慮生物分類的等級特徵時，能夠把多樣性分離為幾個不同的組成部分。

夏農指數的計算公式如式(5)所示：

$$SI = -\sum_{i=1}^s (P_i \ln(P_i)) \quad \dots\dots\dots(5)$$

s ：物種總數

i ：物種編號

P_i ：第 i 物種數量佔所有數量之比例

四、結果與分析

4.1 主成份分析與比例原則篩選之水文指標

Kaiser (1958)提出選取特徵值大於 1 之主成份，可以得到較佳之解釋變異量。本研究，總共有五個主成份特徵值大於 1，解釋變異量達到 77%左右，原則上主成份分析達到 70%便算是不錯的分析結果。圖 4-1 為各主成份之陡坡圖，可以發現特徵值呈現逐漸減少的情況，在 PC5 之後其特徵值慢慢趨近於 0，即解釋變異量相當少。經由比例原則可計算五個主成份各自應挑選之

3.4.3 夏農指數(SI)

夏農指數(Shannon index, SI)在族群生態學上的應用相當多。該指數有以下三點生態意義：

1. 對於已知種類數的一個群體，當所有的種，其個體數以相同的比例存在時，其總體的多樣性最高。
2. 對於兩個完全均勻的種分佈的總體，有較多種的，其多樣性較高。

表 4-1 依比例原則挑選出之水文指標(括弧中數字為因素負荷值)

PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
3-day min (0.93)	Lo pulse # (0.55)	Date max (0.46)	Hi pulse # (0.54)	Lo pulse L (0.51)
7-day min (0.93)	Reversals (0.55)			
30-day min (0.93)				
7-day max (0.93)				
30-day max (0.94)				
90-day max (0.96)				

表 4-2 水質之 SEM 模式中各 Factor 的路徑係數

	溶氧	生化需氧量	懸浮固體	氨氮	RPI
Factor 1	-0.10	-0.03	-0.08	-0.06	-0.21
Factor 2	-0.52	-0.47	0.25	0.46	0.57
Factor 3	0.35	-0.52	-0.04	-0.52	-0.26
Factor 4	-0.06	-0.33	0.27	-0.22	-0.06
Factor 5	0.05	0.04	-0.12	0.05	-0.02
Factor 6	-0.15	0.09	0.10	0.12	0.12
Factor 7	-0.03	0.45	-0.20	0.22	0.17

指標數，依因素負荷大小總共可挑出 11 個水文指標，如表 4-1 所示，選出之水文指標的因素負荷值依 Tabachnick and Fidell (2007) 提出之選取指標準則都有普通到好的程度，從 PC1 選出的指標更達到甚為理想的程度。

爲了探討台灣天候與流量變化的情況可能對水質造成的影響，因此將主成份分析中所得到的 11 個水文指標，將較同類型的指標歸類，分成七組主要影響因素(7 個 Factor)：

1. Factor 1：3-day min、7-day min、30-day min
表示乾旱、枯水期等因素影響的極端流量最小值。
2. Factor 2：7-day max、30-day max
表示颱風、梅雨季節等因素影響的極端流量最大值。
3. Factor 3：90-day max
表示較長時的氣流、季風所影響的極端流量最大值。
4. Factor 4：Hi pulse #、Lo pulse #
表示受暴雨、洪水、乾旱發生次數影響的情況。
5. Factor 5：Date max
表示年最大流量發生時間影響的因素。

6. Factor 6：Lo pulse L

表示枯水期、乾旱的時間長度。

7. Factor 7：Reversals

表示流量的變化情況，反應出降雨特性。

4.2 水質與生物多樣性之 SEM 模式

水質模式建立目的在於探討水文指標與水質情況之相關性，本研究採用之水質指標爲河川污染指標(RPI)，根據其四個水質參數分別建立 SEM 模式，分別爲溶氧模式、生化需氧量模式、懸浮固體模式與氨氮模式，最後再建立 RPI 模式，分析各個 SEM 模式之中七組水文氣候因素與水質之間的因果關係。藉由四個水質模式之因果關係，可以清楚了解到可能影響水文特性、水質情況的要素，而這些要素都是可能會影響生物多樣性的變化，像是溶氧值可能受流速快慢影響、有機物分解等情況影響，BOD 值則是可能受污染物影響，懸浮固體值則是可能受大雨沖刷地表而增加，氨氮值亦說明水質受污染的情況，而 RPI 值可以說明河川整體受污染的程度，表 4-2 爲五個水質之 SEM 模式中各 Factor 的路徑係數值，路徑係數值愈大表示有較大之相關性，並可依此來選出對水質有較大影響力的水文

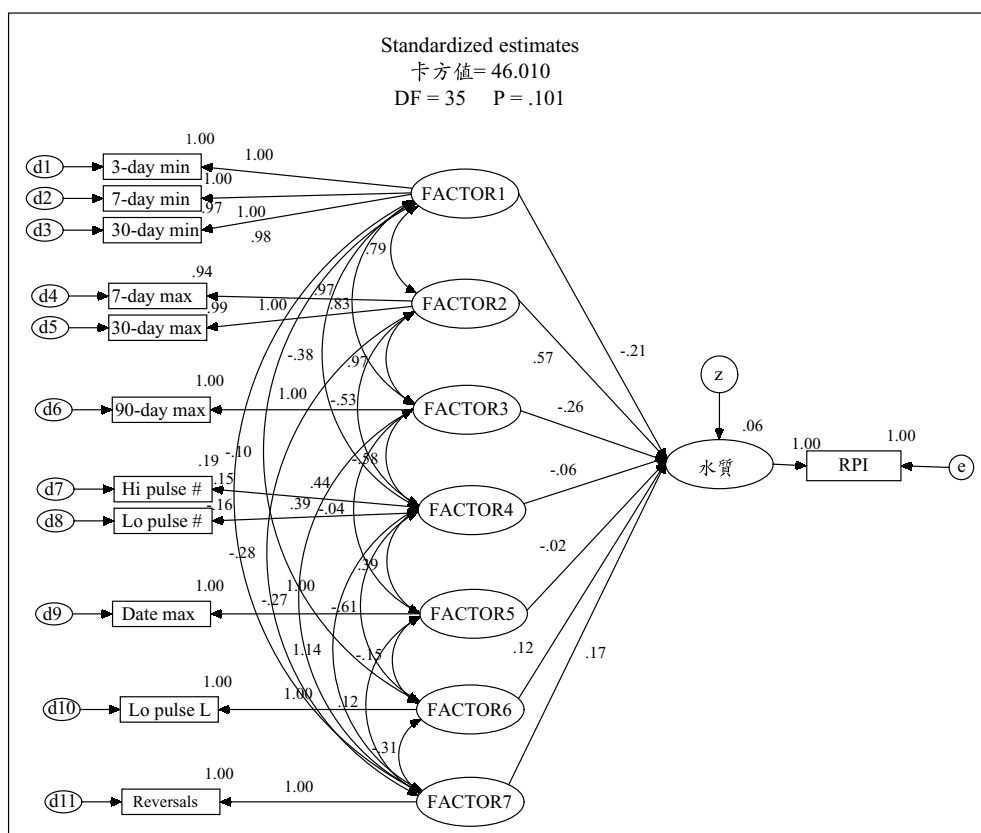


圖 4-2 RPI 之 SEM 模式

指標；圖 4-2 即以 RPI 之 SEM 模式為例繪出模式圖。接下來再利用生物多樣性模式來探討水文指標與魚類多樣性之相關性，將五個水質模式中所挑選之水文指標與生物多樣性指數(夏農指數)進行生物多樣性之 SEM 模式的建立，可找出與生物多樣性相關性較高之水文指標，進一步找出具備多重意義之水文指標。

根據溶氧、生化需氧量、懸浮固體與氨氮檢測值與 RPI 的 SEM 模式結果，可以發現在 IHA 的 32 個水文指標中，最可能影響水質的水文指標，總共有三組 Factor，包含了五個水文指標，分別是 Factor 2 為 7-day max、30-day max，表颱風、梅雨季節影響之極端流量最大值，與溶氧、氨氮與 RPI 等檢測值相關性最高(請參考表 4-2)；Factor 3 為 90-day max，表示受較長時之氣流與季風影響的極端流量最大值，與生化需氧量之檢測值相關性最高；Factor 4 為 Hi pulse # 與

Lo pulse #，表示受暴雨、洪水、乾旱發生次數影響的情況，與懸浮固體值相關性最高，再以包含這五個水文指標的三組 Factor 進行生物多樣性模式之建立，即如圖 4-3 所示。

經由水質與生物多樣模式總共挑出來三個水文指標，分別為 7-day max、30-day max、90-day max，挑選出來的水文指標能夠代表水文特性，更能表示溪流中魚類生態的情況。而從各個 SEM 模式所得到之結果與分析，所選的水文指標主要提供了以下四個部份之資訊：

1. 水文情況與氣候特性：

7-day max 表示可能由於颱風、豪大雨所造成的極端流量，30-day max 表示可能由於梅雨季節造成之極端流量，90-day max 則表示可能由於較長時間之氣流與季風所造成之極端流量。

2. 水質情況：

不同之水文指標代表不同之水文特性，在颱

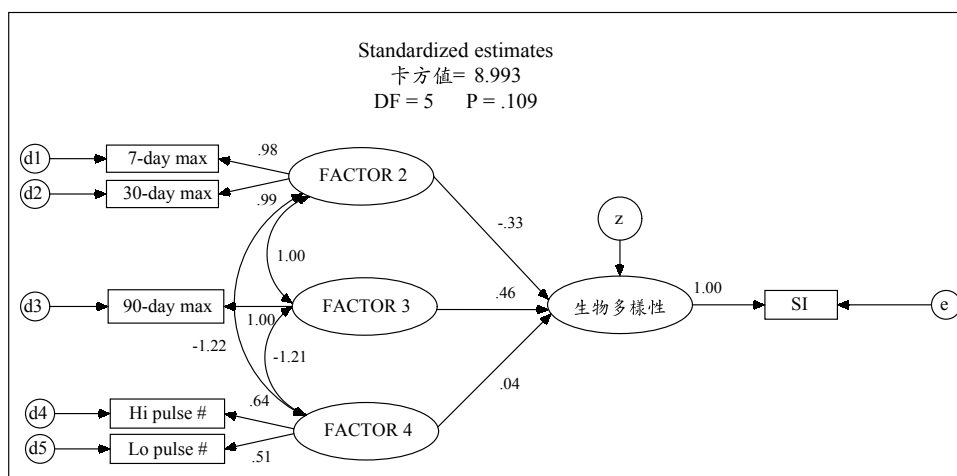


圖 4-3 生物多樣性之 SEM 模式

風、梅雨、季風等不同氣候因素影下，會因為地表沖刷、營養鹽沉澱、懸浮固體改變、溶氧增減等等因素而使水質產生變化。

3. 魚類多樣性：

經由生物多樣性模式可以發現五個水文指標與溪流魚類多樣性之間的相關性，可以了解到可能對水質優劣造成影響的水文指標，亦會明顯牽動著魚類多樣性的變化。

4. 生態流量管理之參考：

由於本研究的水文測站為未受控制之天然流量測站，因此藉由三個指標所提供的水文、水質與生物多樣性的資訊，我們可以了解在自然流況下，魚類對於水文、水質環境的偏好情況，並且提供各個水利生態單位對於流量管理時生態考量之參考。

4.3 羅吉斯回歸分析

經由上述之水質、生物多樣性模式的探討後，可以發現水文指標的選擇確實可以提供許多資訊有助於分析水文特性、水質情況與生物多樣性之間的相關性，但對於物種的復育似乎依舊無法找出更明確的方法去進行，因此羅吉斯回歸的目的除了藉由勝算比探討 7-day max、30-day max、90-day max 等三個多重意義的水文指標與單一物種之相關性，更進一步計算出魚類物種在這三個多重意義之水文指標的影響下，於全台五

個流域中的出現機率，可以了解不同魚類族群在不同水文特性的出現情況，也能找出在全台與三個多重意義之水文指標相關性最高的魚類物種，以利於水質評估、生態復育、水文特性等的參考。

本研究利用 65 種魚在台灣溪流常出現之淡水魚種進行羅吉斯回歸分析，探討經由水質模式、生物多樣性模式挑選出來的三個多重意義之水文指標與 65 種魚類進行羅吉斯回歸分析，而勝算比表示單位水文變動量魚類出現機率的增加倍數，也是說勝算比越大，魚類族群之出現機率也越大，而當勝算比大於 1 時，表示魚類出現機率是增加的；相對的，當勝算比小於 1 時，出現機率則是減少的。經由羅吉斯回歸分析之後，可以發現 65 種魚類之中，發現有八種魚類與主成份分析所挑選的 11 個水文指標有顯著相關，其中有兩種魚類對三個多重意義之水文指標呈現顯著情況(p-value<0.05)，即粗首鱖與鯽魚，將在以下做更進一步的說明。

粗首鱖(*Zacco pachycephalus*)為初級淡水魚，主要分佈於河川的中下游及溝渠中，喜好棲息在水流較緩慢的潭區或淺灘區域。幼魚時以藻類、有機碎屑、水生昆蟲等為食，為雜食性；成長後主要以水生昆蟲、小魚及小蝦為食，偏肉食性；表 4-3 為粗首鱖之羅吉斯回歸分析，可以發現 7-day max、30-day max、90-day max 之勝算比

表 4-3 粗首鱖之羅吉斯回歸分析

指標	回歸係數	常數	顯著性	勝算比	R ²
7-day max	-0.005	1.807	0.035	0.995	0.317
30-day max	-0.012	1.801	0.036	0.988	0.310
90-day max	-0.020	1.766	0.037	0.980	0.307

表 4-4 鯽魚之羅吉斯回歸分析

指標	回歸係數	常數	顯著性	勝算比	R ²
7-day max	0.007	-2.321	0.011	1.007	0.502
30-day max	0.018	-2.359	0.011	1.018	0.510
90-day max	0.030	-2.305	0.011	1.030	0.506

表 4-5 粗首鱖在三個水文指標影響下於五個流域之出現機率

	水文站點	7-day max	30-day max	90-day max
大漢溪流域	三峽	0.801	0.796	0.798
濁水溪流域	桶頭	0.662	0.687	0.686
高屏溪流域	新發大橋	0.282	0.286	0.287
蘭陽溪流域	古魯	0.850	0.849	0.845
花蓮溪流域	馬鞍溪橋	0.785	0.784	0.781

分別為 0.995、0.988 與 0.980，其值均小於 1，顯示粗首鱖於該三個多重資訊之水文指標影響下，其出現機率均有下降之趨勢，而 7-day max、30-day max 兩個水文指標在水質溶氧模式為與水質參數為負相關，在生化需氧量模式、氨氮模式與 RPI 模式則是呈現正相關，表示粗首鱖喜歡生存於水質較佳之溪流。

鯽魚(*Carassius auratus auratus*)為初級淡水魚，常生活於河川中、下游之各種水域，對環境適應力非常強，耐污染及低溶氧，對鹽度之容忍力強。自河川中游的深潭，至含氧量極低的污濁水域均可生長，喜棲息於各種水草繁生的淺水域，亦可生活在優養化之水域。雜食性，主要攝食浮游生物、水生植物，亦食有機物碎屑及底棲動物等。繁殖力強，成長較緩慢。表 4-4 為鯽魚之羅吉斯回歸分析，可以發現 7-day max、30-day max、90-day max 之勝算比分別為 1.007、1.018 與 1.030，其值均大於 1，顯示鯽魚於該三個多重資訊之水文指標影響下，其出現機率均有增加之趨勢，而 7-day max、30-day max 兩個水文指標在水質溶氧模式為與水質參數為負相關，在生化需氧量模式、氨氮模式與 RPI 模式

則是呈現正相關，表示鯽魚能生存於水質較差之溪流。

欲進一步探討該三個水文指標在不同流域影響魚類出現機率的情況，則可以藉由計算魚類之出現機率值來加以判斷，而分析的五個流域分別為大漢溪流域、濁水溪流域、高屏溪流域、蘭陽溪流域與花蓮溪流域。表 4-5 為粗首鱖於三個水文指標影響下在五個流域之出現機率，可發現除了高屏溪流域以外，其餘四個流域之出現機率都相當高，因為粗首鱖喜歡較佳水質，而高屏溪流域則是屬於污染情況較明顯的地區，因此粗首鱖在該流域出現機率不高，與實際現象吻合，也驗證了勝算比分析中 7-day max 與 30-day max 兩個水文指標之探討。

表 4-6 為鯽魚於三個多重資訊之水文指標影響下在五個流域之出現機率，可以發現鯽魚在高屏溪流域三個水文指標出現機率均超過 80%，顯示鯽魚在高屏溪流域出現機率較高，由於鯽魚對環境適應能力非常強，因此在三個水文指標影響下其出現機率還是都相當高，與實際情況吻合，亦驗證了勝算比分析中 7-day max 與 30-day max 兩個水文指標之探討。

表 4-6 鯽魚在三個水文指標影響下於五個流域之出現機率

	站點	7-day max	30-day max	90-day max
大漢溪流域	三峽	0.150	0.152	0.150
濁水溪流域	桶頭	0.330	0.293	0.296
高屏溪流域	新發大橋	0.827	0.833	0.831
蘭陽溪流域	古魯	0.098	0.095	0.100
花蓮溪流域	馬鞍溪橋	0.169	0.166	0.170

五、結 論

生態水文指標的探討已有相當多前人的研究，本研究主要目的在於利用不同之統計分析，以找出具有多重資訊之水文指標。研究方法採用了主成份分析、結構方程模式與羅吉斯回歸等三種統計方式，主成份分析目的在於萃取重要水文變量之資訊、以利結構方程模式之建立；結構方程模式的建立則主要是利用於因果關係之探討，其中水質模式目的在於找出七組水文氣候因素與水質指標之相關性，生物多樣性模式則是探討了水文指標與魚類多樣性之相關性，進一步找出具水文氣候、水質情況與魚類生態等特性之水文指標。羅吉斯回歸則是計算了各種淡水魚類於不同水文指標影響下，在台灣五個流域之出現機率，藉由魚種之出現情況可以找出反應水文特性、水質狀況之標的物種，作為生態流量管理之參考。經由本研究之分析可得以下之結論：

1. 本研究建構之 SEM 水質模式共有五個，分別為溶氧模式、生化需氧量模式、懸浮固體模式、氨氮模式與 RPI 模式，分別指出七組因素與各個水質參數之間的因果關係，以了解水文氣候特性與水質情況的相關性，而與水質相關性最高之水文指標共有三組因素，包含了五個水文指標，分別為 7-day max、30-day max、90-day max、Lo pulse #、Hi pulse #，表示了不同水文氣候與水質之間的相關性。
2. 生物多樣性模式利用水質模式所篩選出來的三個因素與生物多樣性指標進行 SEM 之建立，目的除了探討水文指標與生物多樣性之相關性外，更能進一步找出最具多重意義之水文指標，而與生物多樣性指標相關性最高的水文指標為 7-day max、30-day max、90-day max，

這三個水文指標主要可提供以下三個層面之資訊：

- (1) 水文氣候特性。
 - (2) 水質情況，可表示魚類棲息地狀況。
 - (3) 魚類多樣性情況。
 - (4) 作為生態流量管理之參考。
3. 羅吉斯回歸分析是一種二元因變數之統計分析，本研究利用該方法將水文指標與魚類族群分佈情況加以連結。單一魚種於五個流域出現之機率，可以判斷水文指標對於魚類出現情況的影響情形，進而找出作為生態復育之標的物種。在本研究中可以發現在 7-day max、30-day max、90-day max 三個水文指標影響下鯽魚在高屏溪出現機率達到 80% 左右，粗首鱖則是在大漢溪流域、濁水溪流域、蘭陽溪流域與花蓮溪流域均有達到 60% 以上之出現機率，反應出兩種物種偏好之水質特性，而 7-day max、30-day max 在水質模式之分析，更能反應出兩種物種偏好之水文與水質特性，而粗首鱖適合生存於水質較佳之生態環境，則相當適合作為生態復育之標的物種。

六、誌 謝

本研究承蒙國立成功大學「標竿創新暨新進學者計畫 C0133」及國科會計畫 96-2221-E-006-264-MY3 經費補助，特此申謝。另外，感謝審查委員細心審閱，提供諸多寶貴的意見和建議，使本文更臻完整。

七、參考文獻

1. 王漢泉，2002，「台灣河川水質魚類指標之研究」，環境檢驗所環境調查研究年報。
2. 內政部營建署太魯閣國家公園管理處，

- 1983,「太魯閣國家公園動物生態資源調查」,內政部營建署。
3. 陳順宇, 2007,「結構方程模式」,心理出版社。
4. 經濟部水資源統一規劃委員會, 1983,「淡水河流域底棲生物與魚類調查及水質評估」,經濟部水資源統一規劃委員會。
5. 經濟部水資源統一規劃委員會, 1994,「淡水河流域水生生物調查及水質評估之研究」,經濟部水資源統一規劃委員會。
6. 蕭政宗、吳富春, 2004,「集集攔河堰最佳引水與河川生態流量之研究」,第十四屆水利工程研討會論文集,新竹,第 C1-C8 頁。
7. 蕭政宗、吳富春, 2005,「變異範圍法 RVA 應用於河川生態流量之規劃」,第二屆生態工程學術研討會論文集,台北,第 33-58 頁。
8. 環保署環境檢驗所, 1993,「環境調查研究年報」,環保署環境檢驗所。
9. Bunn, S. E., D. H. Edward, and N. R. Loneragan, 1986, "Spatial and temporal variation in the macroinvertebrate fauna of streams of the Northern Jarrah Forest, Western Australia: community structure", *Freshwater Biology* 16: 67-91.
10. Cushing C. E., C. D. McIntire, K. W. Cummins, G. W. Minshall, R. C. Petersen, J. R. Sedell, and R. L. Vannote, 1983, "Relationships among chemical, physical and biological indices along a river continua based on multivariate analyses", *Archiv für Hydrobiologie* 98: 317-326.
11. Haines, A. T., B. L. Findlayson, and T. A. McMahon, 1988, "A global classification of river regimes", *Applied Geography* 8: 255-272.
12. Hawkes, C. L., D. L. Miller, and W. G. Layher, 1986, "Fish ecoregions of Kansas: stream fish assemblage patterns and associated environmental correlates", *Environmental Biology of Fishes* 17: 267-279.
13. Horwitz, R. J., 1978, "Temporal variability patterns and the distributional patterns of stream fishes", *Ecological Monographs* 48: 307-321.
14. Kaiser, H., 1958, "The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis", *Psychometrika* 23(3):187-200.
15. McMahon, T. A., B. L. Finlayson, A. T. Haines, and R. Srikanthan, 1992, "Global Runoff-Continental Comparisons of Annual Flows and Peak Discharges". Catena: Cremlingen-Destedt, Germany.
16. Olden, J. D. and N. L. Poff, 2003, "Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes", *River Research and Applications* 19: 101-121.
17. Poff, N. L. and J. D. Allan, 1995, "Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability". *Ecology* 76: 606-627.
18. Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks, and J. C. Stromberg, 1997, "The natural flow regime", *Bioscience* 47: 769-784.
19. Poff, N. L. and J. V. Ward, 1989, "Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns", *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 46: 1805-1818.
20. Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell, and D. P. Braun, 1996, "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems", *Conservation Biology* 10: 1163-1174.
21. Richter, B. D., J. V. Baumgartner, R. Wigington, and D. P. Braun, 1997, "How much water does a river need?" *Freshwater Biology* 37: 231-249.
22. Suen, J. P. and J. W. Eheart, 2006, "Reservoir management to balance ecosystem and human needs: incorporating the paradigm of the ecological flow regime", *Water Resources Research*, 42(3), W03417.
23. Tabachnick, B. G. and L. S. Fidell, 2007, *Using Multivariate Statistics*, 5th ed. Boston: Allyn and Bacon.

收稿日期：民國 98 年 2 月 20 日

修正日期：民國 98 年 3 月 12 日

接受日期：民國 98 年 4 月 1 日