

# 結合衛星影像與模糊理論於水庫水質優養判釋與管理

楊明德<sup>1</sup> 林佑昌<sup>2</sup> 蔡婷鈺<sup>2</sup> 楊暉芬<sup>2</sup>

關鍵詞：模糊理論、衛星影像、影像處理、水質管理。

## 摘要

目前水庫水質優養程度的評估，主要使用卡爾森優養指標針對點狀的水質採樣數據進行評等。然而點狀採樣成果可能不足代表全水域優養程度，且既有指標對各優養程度的數值規範明確，無法全然詮釋氣候變化或人為觀點改變時水質潛在的優劣。本研究以翡翠水庫為研究區域，利用 2004 年二月 SPOT 4 衛星影像萃取之水體影像，推求與葉綠素 *a*、總磷及透明度等水質相關參數，以建立衛星影像轉換水質參數回歸模式，達成全水域優養評估；並引入模糊理論方法於傳統卡爾森指標，考慮使用者注重水質安全與管理者注重管理成本的立場設計對應的隸屬函數，以模糊綜合評價討論兩者對同一優養評等下的差異認定。研究成果顯示翡翠水庫在 2004 年二月時兩種觀點之綜合評價大多呈現貧養，僅有以總磷濃度認定之優養程度較有差異，於水庫上游與匯入支流處有部分水域為優養，其優養水域面積在使用者立場與管理者立場下分別佔總面積 27% 與 16%，顯示總磷污染為翡翠水庫的主要污染型態。由於水源管理者對水質認定趨向寬鬆標準，顯示在管理者隸屬函數下所判定之 16% 優養水域之水質確實不佳，應優先致力於該區水質改善，此種模糊優養判釋模式未來可考慮季節水質變化趨勢於隸屬函數中，作為不同時節制定水質改善策略之依據。

## INTEGRATION OF SATELLITE IMAGERY AND FUZZY THEORY INTO EUTROPHICATION INTERPRETATION AND MANAGEMENT FOR RESERVOIR WATER QUALITY

Ming-Der Yang Yu-Chang Lin Ting-Yu Yeh Yeh-Fen Yang

*Department of Civil Engineering  
National Chung Hsing University  
Taichung, Taiwan 40227, R.O.C.*

*Key Words:* fuzzy theory, satellite imagery, image process, water quality management.

## ABSTRACT

At present the eutrophic status of reservoir water quality in Taiwan is classified by Carlson index on point-basis sampling data. However, a limited number of water samples are insufficient to represent the entire waters, and the crisp eutrophic criteria can not reflect all aspect from different viewpoints varying with human's altitude and seasonal change. Taking a SPOT satellite image of Feitsui Reservoir in February 2004 for

<sup>1</sup> 國立中興大學土木工程學系教授

<sup>2</sup> 國立中興大學土木工程學系研究生

example, this paper addresses how to transform a satellite image into a two-dimensional distribution of water quality variables, such as chlorophyll *a*, total phosphorus and Secchi depth, and subsequently to employ fuzzy criteria in Carlson index for eutrophic dispute between water suppliers and users. The Feitsui Reservoir in February 2004 is evaluated consonant as oligotrophe from both producer's and user's viewpoints. However, based on the criteria of total phosphorus there is 27% and 16% of total water area being considered as eutrophe from the user's and the producer's standpoints, respectively, that also implies that total phosphorus is the major factor of Feitsui's eutrophication problem and those 16% water area should be paid great attention to in the first priority. Through a proper design of membership functions, the fuzzy evaluation model of eutrophication can also be adjusted for standing at different time points during a year while considering the seasonal eutrophication pattern in the water quality management strategy in the future.

## 一、前言

近年台灣經濟發展生活水平提升，在尋求休憩與資源開發等因素下，人群的活動擴及山群，河川上游地區的開發與利用衝擊集水區的保育與水資源的涵養，為此政府整合各類水體檢測工作，明定檢測項目、頻率與位置，以定量描述水體品質與建立環境背景資料 [1]。其中水庫水質優養監測乃由現場水質採樣後再透過評價指標作水質優養化程度 (Eutrophic state) 的判斷，常用如 OECD (Organization of Economical and Cooperative Development) 優養標準、多變數卡爾森 (Carlson) 綜合指標等。但前述指標常遭遇地區適用性與指標界定明確性的質疑 [2-4]，同時因水資源使用者與管理者在面對水質的立場不同，對於優養化程度會有不同的關注與反應，水資源管理者必須考量管理成本問題；而水資源使用者較在意水質的安全使用性，其間的模糊地帶僅以傳統剛性指標來詮釋並不夠周全。

傳統優養判斷的另一問題，為水質現地採樣受限於成本，採樣點位較少且以點的樣式呈現，無法了解全面水庫整體優養狀況。國內外均積極應用衛星遙測技術提高大範圍水資源監測之效果，國內早期研究如德基水庫集水區內土地利用型態變遷分析 [5]，結合 DEM 資料建立之數值地形模型與不同時期衛星影像，進行土地利用變遷監測；以及利用衛星影像轉換水質參數等技術，進行水庫水質污染預測 [6-8]、優養監測的研究 [6,9,10] 以及卡爾森營養狀態指標 (Carlson Trophic Status Index, CTSI) 的討論與校正 [2,11]。國外的相關研究則有 Stumpf 利用衛星影像進行藻華與懸浮物質分佈監測 [12]；Gordon 透過衛星影像進行海洋水色分佈應用研究，探討海洋水色分佈與衛星影像光譜輻射之關係 [13]；荷蘭的 Dekker 等人透過南弗利然湖泊進行現地採樣資料與影像波段之迴歸分析，以推估水庫水質懸浮物質與衛星波段之相關性 [14]；以及德國 Thiemann 等人透過空載多光譜資料分析，以 Mecklenburg 湖泊為示範區域進行水庫水質優養化評估 [15]。

本研究以翡翠水庫為研究對象，利用 SPOT 4 衛星所接收之多光譜影像 (綠光、紅光、近紅外光、短波紅) 來轉換為優養參數，包含葉綠素 *a* 濃度 (chlorophyll *a*)、沙奇氏

盤深度 (Secchi depth) 及總磷濃度 (total phosphorus) 等。透過採樣點水質測值與光譜反射值之間的關係求得適合翡翠水庫的回歸公式，再輸入衛星影像水體萃取成果以轉換成為全面水質參數資料。並利用模糊理論進行水質優養分類，透過使用者與管理者不同觀點的評等模式加入模糊綜合評估進行比較，最後將分類結果轉換為影像資料模式以供決策者參考。

## 二、研究方法

### 2.1 水質優養化評估原則

地表水資源一般依據水體所含生物量之多寡與營養鹽濃度高低，區分為貧養水域 (Oligotrophe)、普養水域 (Mesotrophe) 與優養水域 (Eutrophe) 三個等級。水質優養化評估方法可分為單一參數指標法及多變數指標法，常見單一參數指標法如世界經濟合作發展組織 OECD 的公告標準、卡爾森指標 [16] 及美國環境保護署制定的單項營養鹽濃度優養判定標準，各水質參數與水體優養程度之關係如表 1 所示。然前述單項指標在參數不同時常產生結論差異，為求統一而整體的評估，整合多水質參數的多變數指標法因應而生，其水質參數依據指標公式合併計算，常見如卡爾森優養指數 CTSI，透過總磷、葉綠素 *a* 及透明度三項測值之合併以反應水庫水質優養化程度，計算方法及對照基準 (如表 2) 為目前最簡便易用之優養評估指標。

然世界各地各水域環境特性不一，常使指標在參數權重上與指標計算時易失之偏頗。張尊國等以卡爾森優養指數針對德基水庫優養問題進行研究結果顯示，CTSI 在台灣適用性並不盡理想，更可靠且本土化的綜合評判方法仍為專家學者之努力目標 [17]。駱尚廉等應用專家系統在水庫優養化進行探討，尋求較卡爾森單一參數指標更客觀的優養分級結果 [18]；盧瑞山等以模糊綜合評判進行台灣地區水庫優養化判定，提出較卡爾森單一參數指標合理之優養化分級成果 [19]。此外，由於面對多參數問題時必須確定各參數相對重要性，胡景堯依據歷來優養研究成果，指出葉綠素 *a* 最為重要、總磷次之、透明度最後 [20]。

表 1 單一參數指標標準

指標種類	水質參數	總磷	葉綠素 a	透明度
		(µg/L)	(µg/L)	(m)
OECD	貧養	< 7.9	< 2	> 4.6
	貧養—普養	8 ~ 11	2.1 ~ 2.9	4.5 ~ 3.8
	普養	12 ~ 27	3 ~ 6.9	3.7 ~ 2.4
	普養—優養	28 ~ 39	7 ~ 9.9	2.3 ~ 1.8
	優養	> 40	> 10	< 1.7
Carlson	貧養	< 12	< 2.6	> 4
	普養	12 ~ 24	2.6 ~ 7.2	2 ~ 4
	優養	> 24	> 7.2	< 2
US PEA	貧養	< 10	< 4	> 3.7
	普養	10 ~ 20	4 ~ 10	2 ~ 3.7
	優養	> 20	> 10	< 2

表 2 卡爾森優養指數 (CTSI)

$CTSI = (TSI(SD) + TSI(Chl-a) + TSI(TP)) / 3$	
$TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln(SD)$	SD — 透明度 (m)
$TSI(Chl-a) = 9.81 \ln(Chl-a) + 30.6$	Chl-a — 葉綠素 a 濃度 (µg/L)
$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15$	TP — 總磷濃度 (µg/L)

## 2.2 衛星影像轉換水質參數

水質參數的轉換乃根據影像中的波段比，尋求優養化之參數與光譜反射值之間相關性，以多元回歸模式計算其回歸相關係數來評估其回歸公式的可靠度，執行程序如圖 1 所示。過去研究結果指出，波段比值與水質參數值取自然對數之線性相關模式為佳 [4,21,22]。

$$\ln Y_i = a + b \ln X_j \quad (1)$$

其中  $Y_i$  是水質現地參數 (葉綠素 a、總磷與透明度)； $X_j$  為波段值； $a$  與  $b$  是常數。為建立具可信度之轉換模式，須檢視衛星影像之拍攝角度、水面反射狀態、及拍攝時間與水質採樣時間差異。透過幾何校正、研究區切割等影像預處理確保定位精度，並針對研究區域進行水體萃取 [23]，以將衛星影像的水體透過回歸公式轉換成二維的水質參數分佈，並依水質指標判斷水庫的優養狀態。

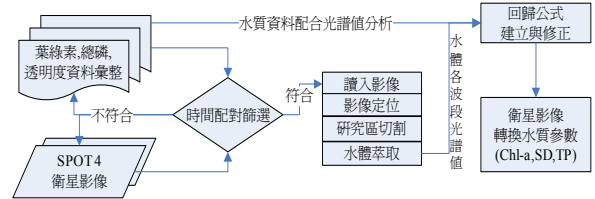


圖 1 衛星影像轉換水質參數流程圖

## 2.3 模糊集合理論與模組架構

常被使用之模糊理論分類方法有模糊綜合評價與模糊聚類分析兩種，其差別在於模糊綜合評價法是在分類中心已知的情況下做分類分析，模糊聚類分析法則用於樣本分類中心未知的情况下，以各樣本間之相關性做分類 [24]。由於單一參數的卡爾森指標屬分類中心已知，本研究運用模糊綜合評價方法對單一參數卡爾森指標進行水質優養程度分類。

### 2.3.1 隸屬函數

隸屬函數 (membership function) 又稱為模糊分佈，一般為線性或非線性的模式，可根據實際問題的狀況加以選擇 [4,25]。藉由對數函數的調整，本研究針對管理者與使用者立場，使原本屬非模糊分類的卡爾森指標，變為非線性隸屬函數曲線。圖 2 中線條 1 即為傳統非模糊分類，其單一的門檻界定概念常導致門檻值兩側差距微小之數值界定成不同等級，一般經模糊化後可發展出線條 2 之線性梯形模式，藉由線性機率變化描述分類的機率，但實質上最大模糊程度 (Degree of Membership = 0.5) 仍定義為舊有門檻值 [26,27]；本研究為描述不同觀點者對門檻值的修正意向，使用下凹型 (線條 3) 與上凸型 (線條 4) 嚴格遞減函數等非線性模式。

### 2.3.2 模糊綜合評價

模糊綜合評價即為多種因素所影響的事物或現象，給予評價標準與實測值後，透過模糊變換對事物進行評價 [4,28]。影響水質優養化的因素集合  $U$  如：

$$U = \{\text{葉綠素 } a、\text{總磷、透明度}\} \quad (2)$$

評價等級為所有評價可能產生的結果總和的集合，通常以  $V$  表示，集合  $V$  所包含的元素代表最後評判結果的分類，因此集合  $V$  中的元素如：

$$V = \{\text{貧養、普養、優養}\} \quad (3)$$

## 三、案例應用

### 3.1 翡翠水庫簡介

翡翠水庫匯集北勢溪、逮魚溪、金瓜溪、後坑子溪、火燒樟溪 (圖 3)，為大台北地區重要的水資源，因此訂有一套長期的水質監測計畫，以確保水質安全及供水正常。翡

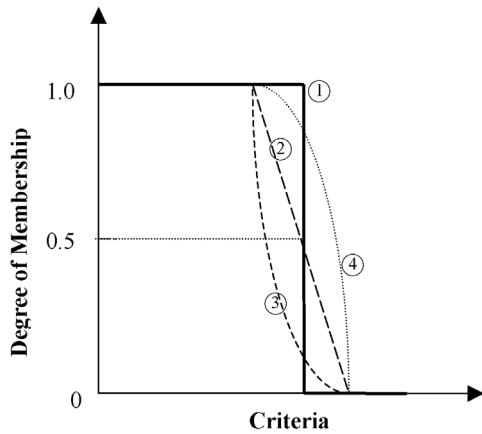


圖 2 幾何特徵函數圖形



圖 3 翡翠水庫地理位置圖

翠水庫管理局規劃了六個水體採樣測站 (2090-2095)，樣點位置如圖 4，每季採樣內容包括葉綠素 *a*(chl-*a*)、透明度 (sd) 與總磷 (tp)。近年由於道路開發與上游集水區域農業活動，造成土石與有機物由上游河川帶進水庫中。根據翡翠水庫管理局之 94 年度年報統計，總磷平均值在 81 年至 86 年為 11.5  $\mu\text{g/L}$ ；87 年至 94 年 7 月平均為 25.0  $\mu\text{g/L}$ ，濃度增逾二倍，大量的營養鹽促使藻類繁殖，優養化的監測與水質管理為當下重要課題。

根據臺北自來水事業處檢驗之水質資料 [29]，近 20 年來複合式卡爾森指標、葉綠素 *a*、透明度與總磷等逐月變化如圖 5，顯示翡翠水庫各項水質之季節起伏略有不同，於雨季與作物生長期較差，由於總磷易刺激藻類生長導致葉綠素 *a* 濃度上升，故總磷濃度高峰較葉綠素 *a* 提早一至二個月 [30]，透明度則易在雨季呈現較低的情形。賀伯風災後集水區農地茶園面積仍持續上升，降雨沖刷挾帶之泥沙常含有氮及磷，累積於水中易刺激藻類繁殖 [31]。另外交通道路建設亦為影響集水區土石沖刷量的原因之一，陳孝行等針對北宜高工地所造成的水質污染調查顯示自 1996 年起集水區污染量有逐漸增加之趨勢 [32]。

### 3.2 衛星影像分析

翡翠水庫之 SPOT4 衛星影像攝於 2004 年 2 月 11 日下午 2 時 58 分，多頻影像中的綠光、紅光及紅外光波段分別以藍色、綠色及紅色表示之假色影像如圖 6，由於葉綠素 *a*

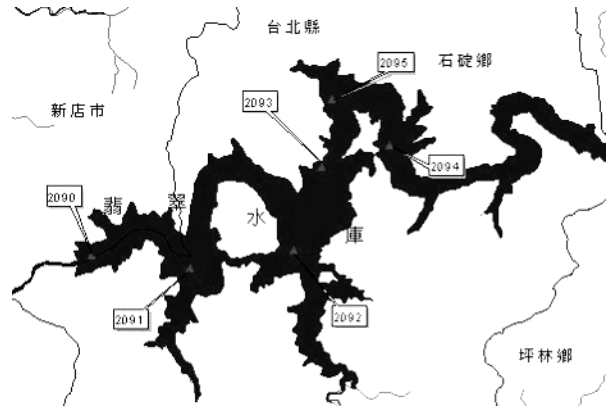
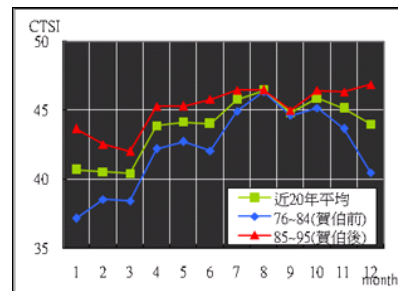
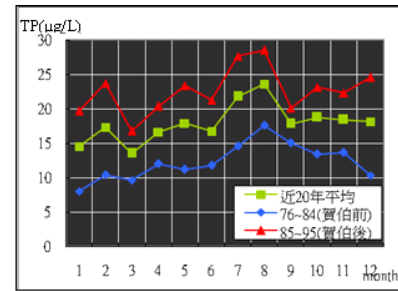


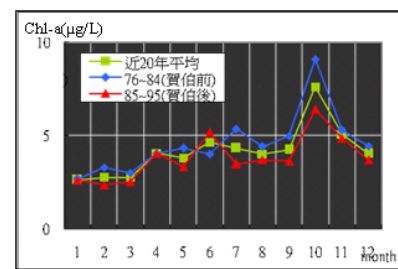
圖 4 翡翠水庫現場採樣點圖



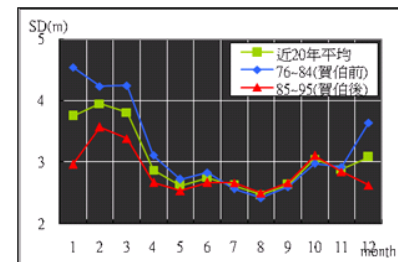
(a) CTSI 值



(b) 總磷



(c) 葉綠素-a



(d) 透明度

圖 5 翡翠水庫水質優養變化趨勢

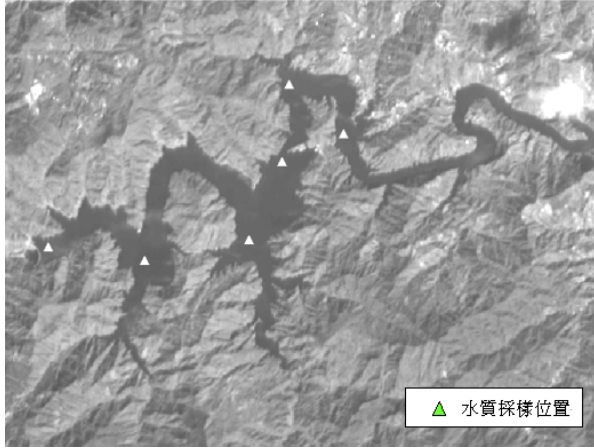


圖 6 翡翠水庫衛星影像圖

反射紅外光較強，故影像整體呈現紅色。衛星影像經定位後切割出涵蓋翡翠水庫區域，並再萃取水體後執行水質採樣點坐標對位，存取對應位置上之光譜反應值進行相關性分析，以建立葉綠素 a、總磷與透明度的回歸模式 [23]。由於水體邊緣與湖岸土壤在影像上易形成混合像元，不單純為水體反應易影響判斷，故剔除最外圍像元以避免混合像元影響後續分析。

### 3.3 回歸模式

本研究所用的水質資料為 2004 年 2 月 10 日上午 10 時至下午 3 時逐點採樣之檢驗結果。表 3 為 SPOT4 影像於採樣站位置上之光譜數值，其中 G、R 與 NR 與 SR 分別代表綠光、紅光、近紅外光與短波紅外光影像像元值。經由各水質參數與各波段之對數相關性分析建構轉換模式，並作皮爾森相關性 (Pearson Correlation) 計算與雙尾檢定如表 4。

依據表 4 之統計分析與光譜特徵建構光譜數值至水質參數之轉換公式，選擇以短波紅外光波段轉換總磷，以紅光波段轉換透明度，以近紅外光波段轉換葉綠素 a，得到轉換公式如下：

$$\ln\text{Chl} = 2.819 \times \ln(\text{NR}) - 6.085; \quad R^2 = 0.734 \quad (4)$$

$$\ln\text{SD} = 1.805 \times \ln(\text{R}) - 4.382; \quad R^2 = 0.827 \quad (5)$$

$$\ln\text{TP} = 2.810 \times \ln(\text{SR}) - 4.068; \quad R^2 = 0.653 \quad (6)$$

### 3.4 模糊範圍設定

本研究基於卡爾森單一參數優養化判斷標準，將三個等級的參考指標依據模糊邏輯角度觀念，以等分法 (Split-half method) 界定指標範圍，圖 7 以葉綠素 a 為例，取原優養等級分界 2.6 μg/L 與 7.2 μg/L 等分處理。將原有卡爾森標準的普養範圍中點 (4.9 μg/L) 視為普養分類的中點，並往左右推展一普養分類的明確範圍；而原有分界 2.6

表 3 現地測值與衛星影像資料表

測站編號	現地水質採樣值			SPOT 衛星影像光譜值			
	TP (μg/L)	SD (m)	Chl-a (μg/L)	G	R	NR	SR
2090	30	5.1	1.2	41	28	10	13
2091	10	4	0.5	37	24	7	9
2092	27	5.2	0.9	42	28	9	13
2093	10	5.1	1.3	42	27	9	11
2094	16	4.1	1.3	44	26	9	11
2095	13	5.1	1.4	43	28	9	12

表 4 相關性分析表

	Lntp	Lnsd	Lnchl-a	LnG	LnR	LnNR	LnSR
Lntp   Correlation	1.000	0.425	0.204	0.273	0.608	0.646	0.809
Sig. (2-tailed)		0.401	0.698	0.601	0.201	0.166	0.051
Lnsd   Correlation		1.000	0.532	0.398	0.910	0.693	0.809
Sig. (2-tailed)			0.277	0.434	0.012	0.127	0.051
Lnchl-a   Correlation			1.000	0.904	0.737	0.857	0.637
Sig. (2-tailed)				0.014	0.095	0.029	0.174

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

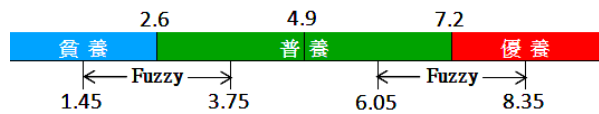


圖 7 等分法界定葉綠素 a 之模糊範圍

μg/L 與 7.2 μg/L 作為分類上最大模糊度的位置，即視為模糊區域的中心往左右推展一分類模糊範圍。故兩模糊範圍與普養明確範圍交會於 3.75 μg/L 與 6.05 μg/L 的位置，再透過對原有分界映射處理可知貧養普養模糊區定義在 1.45 μg/L 至 3.75 μg/L 間，普養優養模糊區定義在 6.05 μg/L 至 8.35 μg/L 間。依上述流程判定各水質參數的模糊範圍，並定義模糊範圍內隸屬度值域為 [0,1]，建立不同觀點之變項隸屬函數以描述不同濃度範圍之隸屬度。

### 3.5 使用者立場隸屬函數

水資源品質對使用者 (如自來水公司) 是首要考量因子，水質污染程度的增加表示使用的安全程度降低與處理成本增加。透過下凹型嚴格遞減函數可描述貧普模糊區之貧養隸屬函數與普優模糊區之普養隸屬函數，使水質優養化評等傾向嚴格的認定，可用圖 8 來模擬使用者觀點下之隸屬函數。嚴格遞減函數常見形式如二次函數、指數與對數型態等，本研究採用對數型態之公式來描述使用者對於水質優養分析的隸屬函數，如式(7)-(9)[25]：

$$\mu_o = 4a(\log x_i)^2 \quad (7)$$



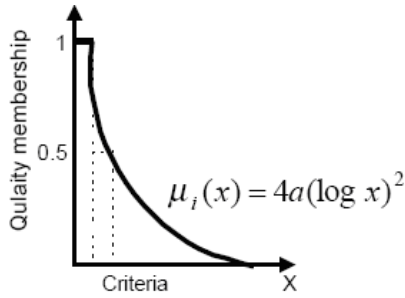


圖 8 使用者幾何隸屬特徵函數

$$\mu_e = 1 - 4a(\log x_2)^2 \quad (8)$$

$$\mu_m = 1 - \mu_0 - \mu_e \quad (9)$$

其中  $\mu_0$ ,  $\mu_e$ ,  $\mu_m$  為貧養、優養及普養的隸屬函數； $a$  是依指標分類上下限求得常數； $x_1, x_2$  是當  $\mu(x) = 0.5$  時，最大模糊程度之濃度。若且為若，當隸屬函數  $\mu(x) = 0$  或  $1$  時，有最小模糊程度。

利用非線性函數可分別得到葉綠素  $a$ 、總磷及透明度相對於優養、普養、貧養三種程度之隸屬函數  $\mu$  如下：

(1) 葉綠素  $a$  隸屬函數  $\mu_{chl}$

$$\mu_{chl-o}(x) = 1, \quad chl < 1.45 \quad (10)$$

$$\mu_{chl-o}(x) = 4a \left[ \log \left( \frac{chl}{3.75} \right) \right]^2, \quad 1.45 \leq chl < 3.75 \quad (11)$$

$$\mu_{chl-o}(x) = \mu_{chl-e}(x) = 0, \quad 3.75 \leq chl < 6.05 \quad (12)$$

$$\mu_{chl-e}(x) = 1 - 4a \left[ \log \left( \frac{chl}{8.35} \right) \right]^2, \quad 6.05 \leq chl < 8.35 \quad (13)$$

$$\mu_{chl-e}(x) = 1, \quad chl \geq 8.35 \quad (14)$$

$$\mu_{chl-m}(x) = 1 - \mu_{chl-o}(x) - \mu_{chl-e}(x) \quad (15)$$

(2) 總磷隸屬函數  $\mu_{tp}$

$$\mu_{tp-o}(x) = 1, \quad tp < 9 \quad (16)$$

$$\mu_{tp-o}(x) = 4a \left[ \log \left( \frac{tp}{15} \right) \right]^2, \quad 9 \leq tp < 15 \quad (17)$$

$$\mu_{tp-o}(x) = \mu_{tp-e}(x) = 0, \quad 15 \leq tp < 21 \quad (18)$$

$$\mu_{tp-e}(x) = 1 - 4a \left[ \log \left( \frac{tp}{27} \right) \right]^2, \quad 21 \leq tp < 27 \quad (19)$$

$$\mu_{tp-e}(x) = 1, \quad tp \geq 27 \quad (20)$$

$$\mu_{tp-m}(x) = 1 - \mu_{tp-o}(x) - \mu_{tp-e}(x) \quad (21)$$

(3) 透明度隸屬函數  $\mu_{sd}$

$$\mu_{sd-o}(x) = 1, \quad sd \geq 4.5 \quad (22)$$

$$\mu_{sd-o}(x) = 4a \left[ \log \left( \frac{sd}{3.5} \right) \right]^2, \quad 3.5 < sd < 4.5 \quad (23)$$

$$\mu_{sd-o}(x) = \mu_{sd-e}(x) = 0, \quad 2.5 \leq sd < 3.5 \quad (24)$$

$$\mu_{sd-e}(x) = 1 - 4a \left[ \log \left( \frac{sd}{1.5} \right) \right]^2, \quad 1.5 < sd \leq 2.5 \quad (25)$$

$$\mu_{sd-e}(x) = 1, \quad sd < 1.5 \quad (26)$$

$$\mu_{sd-m}(x) = 1 - \mu_{sd-e}(x) - \mu_{sd-o}(x) \quad (27)$$

將所得隸屬函數以矩陣  $R$  表示如：

$$R = \begin{bmatrix} \mu_{tpe} & \mu_{tpm} & \mu_{tpo} \\ \mu_{chle} & \mu_{chlm} & \mu_{chlo} \\ \mu_{sde} & \mu_{sdm} & \mu_{sdo} \end{bmatrix} \quad (28)$$

另外，依照葉綠素  $a$ 、總磷及透明度之間相對重要性，得到一判斷矩陣 (Comparison Matrix)  $J$ 。就優養程度而言，葉綠素  $a$  比總磷及透明度為重要，因此給予葉綠素  $a$  權重為 3，總磷為 2，透明度為 1 [4,7,20]，表示如下式：

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

判斷矩陣  $J$  正規化後得矩陣  $D$ ：

$$D = \begin{bmatrix} 0.2857 & 0.2727 & 0.3333 \\ 0.5714 & 0.5455 & 0.5 \\ 0.1429 & 0.1818 & 0.1667 \end{bmatrix} \quad (30)$$

將加總正規化後之矩陣各行個數得一特徵矩陣  $Y$ ：

$$Y = [0.8917 \quad 1.6169 \quad 0.4914] \quad (31)$$

並再做一次正規化可得權重分佈  $W$  如下：

$$W = [W_{tp} \quad W_{chl} \quad W_{sd}] = [0.2972 \quad 0.5390 \quad 0.1683] \quad (32)$$

再利用權重分配結合模糊集合理論之隸屬函數計算，可得評價矩陣  $B$  如下：

$$B = W \times \mu = [W_1 \ W_2 \ W_3] \times \begin{bmatrix} \mu_{tpe} & \mu_{tpm} & \mu_{tpo} \\ \mu_{chle} & \mu_{chlm} & \mu_{chlo} \\ \mu_{sde} & \mu_{sdm} & \mu_{sdo} \end{bmatrix} = [B_1 \ B_2 \ B_3] \quad (33)$$

### 3.6 管理者立場隸屬函數

水質維護需要龐大的人力、金錢與時間成本，管理者在水資源保護上受限於成本因此可採上凸型嚴格遞減函數如圖 9 及式(34)-(36)。

$$\mu_o = -4a(\log x_1)^2 + 1 \quad (34)$$

$$\mu_e = 4a(\log x_2)^2 \quad (35)$$

$$\mu_m = 1 - \mu_o - \mu_e \quad (36)$$

式(34)-(36)之說明與式(7)-(9)相同，利用非線性函數可分別得到葉綠素  $a$ 、總磷及透明度相對於優養、普養、貧養三種程度之隸屬函數  $\mu$  如下：

(1) 葉綠素  $a$  隸屬函數  $\mu_{chl}$

$$\mu_{chl-o}(x) = 1, \quad chl < 1.45 \quad (37)$$

$$\mu_{chl-o}(x) = 1 - 4a \left[ \log \left( \frac{chl}{1.45} \right) \right]^2, \quad 1.45 \leq chl < 3.75 \quad (38)$$

$$\mu_{chl-o}(x) = \mu_{chl-e}(x) = 0, \quad 3.75 \leq chl < 6.05 \quad (39)$$

$$\mu_{chl-e}(x) = 4a \left[ \log \left( \frac{chl}{6.05} \right) \right]^2, \quad 6.05 \leq chl < 8.35 \quad (40)$$

$$\mu_{chl-e}(x) = 1, \quad chl \geq 8.35 \quad (41)$$

$$\mu_{chl-m}(x) = 1 - \mu_{chl-o}(x) - \mu_{chl-e}(x) \quad (42)$$

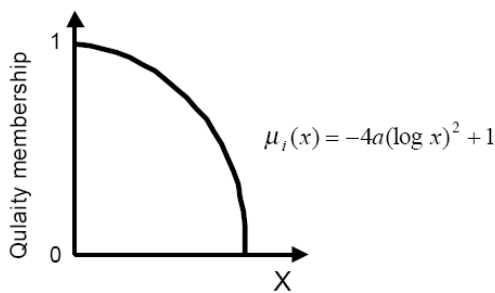


圖 9 管理者幾何隸屬特徵函數

(2) 總磷隸屬函數  $\mu_{tp}$

$$\mu_{tp-o}(x) = 1, \quad tp < 9 \quad (43)$$

$$\mu_{tp-o}(x) = 1 - 4a \left[ \log \left( \frac{tp}{9} \right) \right]^2, \quad 9 \leq tp < 15 \quad (44)$$

$$\mu_{tp-o}(x) = \mu_{tp-e}(x) = 0, \quad 15 \leq tp < 21 \quad (45)$$

$$\mu_{tp-e}(x) = 4a \left[ \log \left( \frac{tp}{21} \right) \right]^2, \quad 21 \leq tp < 27 \quad (46)$$

$$\mu_{tp-e}(x) = 1, \quad tp \geq 27 \quad (47)$$

$$\mu_{tp-m}(x) = 1 - \mu_{tp-o}(x) - \mu_{tp-e}(x) \quad (48)$$

(3) 透明度隸屬函數  $\mu_{sd}$

$$\mu_{sd-o}(x) = 1, \quad sd \geq 4.5 \quad (49)$$

$$\mu_{sd-o}(x) = 1 - 4a \left[ \log \left( \frac{sd}{4.5} \right) \right]^2, \quad 3.5 < sd < 4.5 \quad (50)$$

$$\mu_{sd-o}(x) = \mu_{sd-e}(x) = 0, \quad 2.5 \leq sd < 3.5 \quad (51)$$

$$\mu_{sd-e}(x) = 4a \left[ \log \left( \frac{sd}{2.5} \right) \right]^2, \quad 1.5 < sd \leq 2.5 \quad (52)$$

$$\mu_{sd-e}(x) = 1, \quad sd < 1.5 \quad (53)$$

$$\mu_{sd-m}(x) = 1 - \mu_{sd-e}(x) - \mu_{sd-o}(x) \quad (54)$$

水資源管理者之隸屬函數以矩陣  $R$  表示、判斷矩陣 (Comparison Matrix)  $J$  及權重分佈  $W$ ，皆如使用者立場模式。

## 四、研究結果分析

衛星資料經前處理，包含幾何校正、輻射校正與水體萃取等步驟，求取轉換公式係數後，於影像處理軟體 EDRAS Imagine 中轉換影像光譜數值成水質參數，而模糊評價與邏輯判斷等處理步驟則於 Matlab 上進行。

### 4.1 水質參數轉換成果

圖 10 為衛星影像轉換成水質參數成果，顯示 2004 年 2 月葉綠素  $a$  多介於  $1 \mu\text{g/L}$  至  $2 \mu\text{g/L}$ ，透明度多在 5 公尺左右，總磷則較不一致介於  $10 \mu\text{g/L}$  至  $30 \mu\text{g/L}$ 。以卡爾森單一指標來看，此時期葉綠素  $a$  與透明度反應較佳水質，多為貧養狀態，總磷濃度因區域而有差異，於水面開闊處較

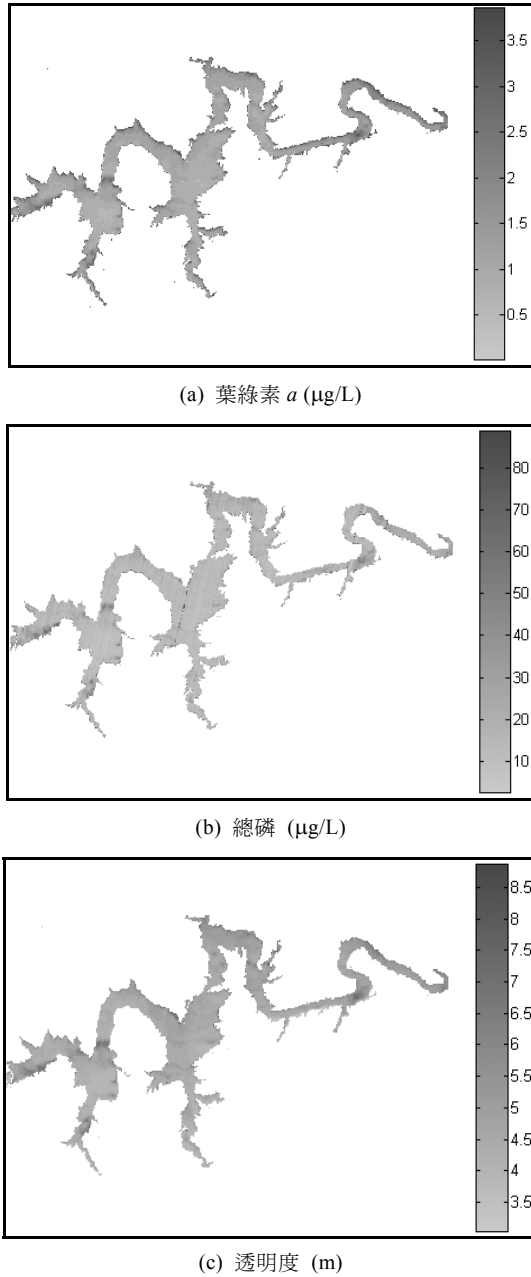


圖 10 水質參數轉換成果

低而上游水域與河道轉折處較高，顯示總磷濃度與水體擾動有關。總磷一直是翡翠水庫優養控制因子，水質轉換成果顯示部分水域總磷濃度超越 30 µg/L，同樣反應總磷控制仍是一重要課題。

#### 4.2 模糊評價隸屬函數成果

圖 11 與圖 12 為使用者立場與管理者立場下，葉綠素 *a*、總磷與透明度之貧養、普養與優養隸屬度對應水質數值變化。由於葉綠素 *a*、總磷濃度越低而透明度越高時，優養化的程度越低，故使用者觀點下葉綠素 *a*、總磷濃度之隸屬函數，其優養分級之最大模糊度位置將朝向較低濃度方向移動，而管理者觀點下最大模糊度移動趨勢則相反。以葉

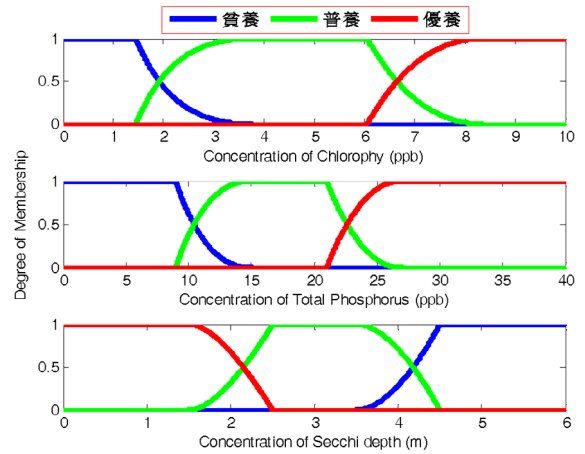


圖 11 使用者立場隸屬函數方程變化圖

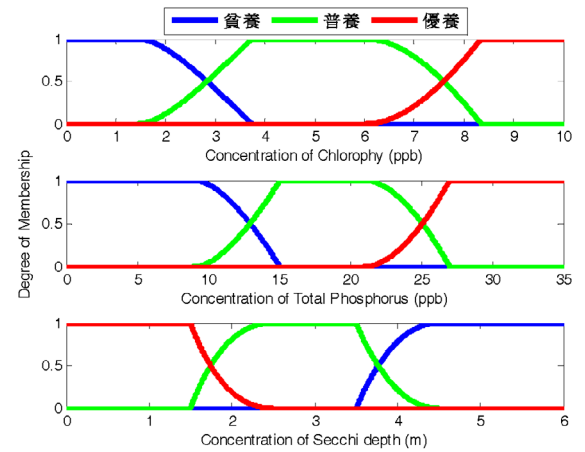


圖 12 管理者立場隸屬函數方程變化圖

綠素 *a* 的貧養分界值為例，在卡爾森指標中將濃度 2.6 µg/L 以下歸類為貧養，而圖 11 顯示使用者貧養隸屬函數之最大模糊度對應葉綠素 *a* 濃度為 1.92 µg/L，即當水質檢測值高於該濃度值時，使用者就應醒覺水質趨近普養狀態的警訊，加強監控及提早因應；在總磷部分，卡爾森指標定義在 12 µg/L 以下屬於貧養狀態，如以模糊理論模擬使用者較嚴格的態度，顯示當總磷濃度約 10.1 µg/L 時使用者已對水體歸類為貧養感到不安，反應出使用者希望水體含磷量更低之傾向；而在透明度部分，卡爾森指標對透明度要求在 4 公尺以上可歸類為貧養，但使用者觀點下最大模糊度對應深度為 4.23 公尺，反應使用者心態上認為更為清澈的水體以確保水質。

反而言之，管理者基於管理成本控制會傾向較寬鬆之評斷標準。以葉綠素 *a* 貧養隸屬函數為例，圖 12 所示當隸屬度為 0.5 時，所呈現的葉綠素濃度值為 2.9 µg/L，即當葉綠素 *a* 到達該濃度前，管理者觀點仍視水體水質為貧養；此外，圖 12 顯示管理者觀點之總磷最大模糊度對應值為 12.9 µg/L，而透明度最大模糊度對應值為 3.75 公尺。總而言之，在同樣採用原始卡爾森標準下，模糊理論詮釋了兩個角色應有的態度與立場，對整體優養程度內涵上有認定差異。



### 4.3 優養程度模糊綜合評價成果

經過衛星影像轉換水質參數與優養程度之隸屬函數計算後，翡翠水庫之優養程度判定成果如圖 13 至圖 16，初步可見此時期之水質狀態以總磷較有區域差異，葉綠素  $a$  與透明度則以貧養為主，由於圖 16 中三參數之綜合成果是以葉綠素  $a$ 、總磷與透明度權重為 3:2:1 下計算，故總磷之區域差異影響受到弱化，綜合評價成果並無優養區域出現。在葉綠素  $a$  評估成果中，兩觀點下之水庫水質幾乎全域呈現貧養狀態，依據翡翠水庫統計資料（圖 5.c），顯示 2 月份葉綠素  $a$  值在一年中屬較低狀態，故本研究建構之葉綠素  $a$  水質轉換與評價模式計算結果與歷來統計無異；在透明度方面，由歷史資料顯示 2 月份屬一年中透明度較高

之時期，亦與本研究透明度成果吻合；總磷成果以貧養與普養狀態為主，在上游部分偶有優養區域出現，與歷史統計中 2 月份總磷較高也相符合。

表 5 為管理者與使用者立場下各水質參數優養程度面積百分率，顯示兩種觀點大致上有一至二成水域出現認定上的差異，此變異處可有助了解細微的水質變化，如葉綠素  $a$  濃度受水庫河畔林、濕地植物生長影響，在水域邊緣濃度較高，故在使用者觀點已歸類為普養區；透明度在後坑子溪、火燒樟溪兩支流匯入處以及河道彎折處，可能因河水流動時水體擾動，故使用者觀點之透明度成果已歸類為普養區；總磷濃度則在水面較寬闊且水位較深的區域呈現貧養狀態，而上游與水體邊緣兩觀點下均為優養狀態，顯示此區之優養化較為明確。

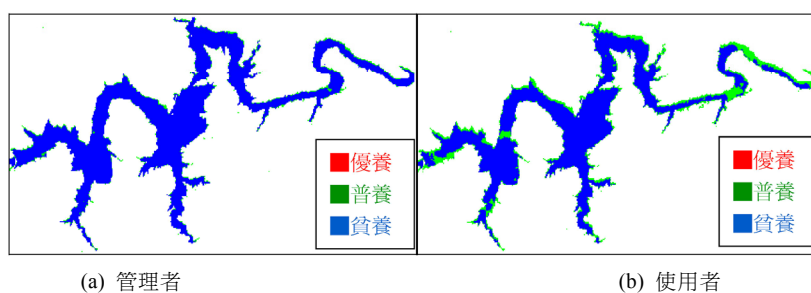


圖 13 葉綠素  $a$  模糊評價成果

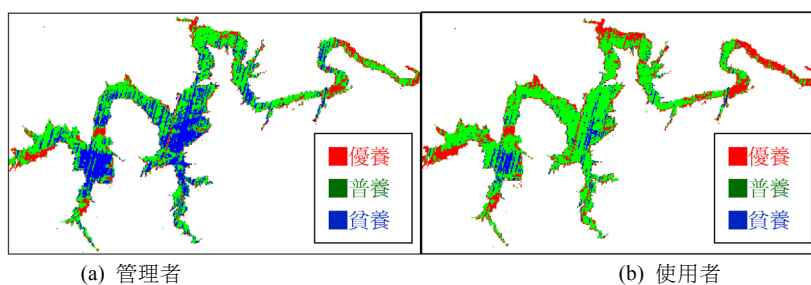


圖 14 總磷模糊評價成果

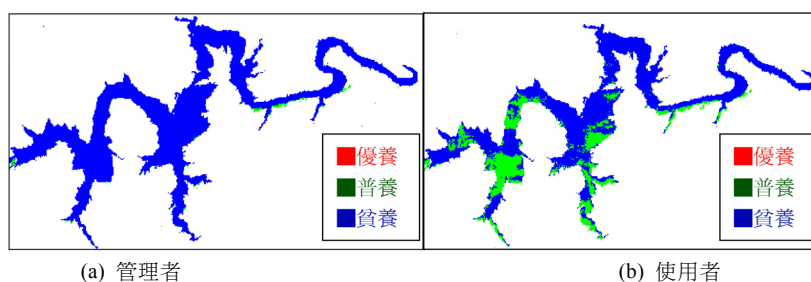


圖 15 透明度模糊評價成果

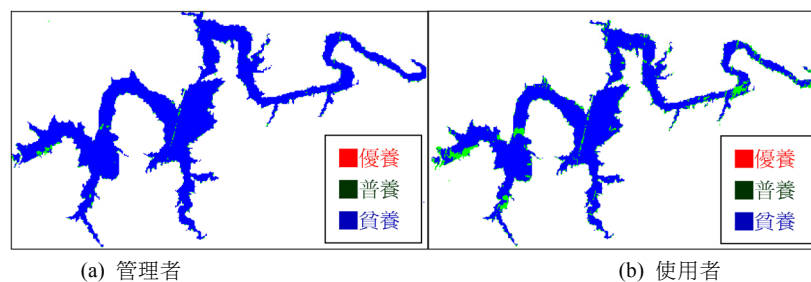


圖 16 模糊綜合評價成果

表 5 不同觀點成果異同比較

水質參數	立場	貧養	普養	優養	主要變動區
葉綠素 <i>a</i>	使用者	78%	22%	-	水庫上游水域與水體邊緣區域 (貧—普)
	管理者	94%	6%	-	
總磷	使用者	9%	64%	27%	水庫上游水域 (普—優) 水面較開闊區域 (貧—普)
	管理者	30%	54%	16%	
透明度	使用者	77%	23%	-	下游支流與水面較開闊區域 (貧—普)
	管理者	98%	2%	-	
綜合	使用者	85%	15%	-	水庫上游河道彎折處、支流火燒樟溪 與近壩體區域 (貧—普)
	管理者	97%	3%	-	

## 五、結論與建議

傳統水質監測只能由點的採樣資料粗略了解局部水質情形，無法反應水庫整體的變化，此亦會影響整體水質評估的可靠度。衛星遙測能有效地快速而全面觀測水質優養化之分布，本研究利用回歸模式，將 SPOT 4 衛星中之水體各波段反射光譜數值轉換成水質參數，其水質轉換成果與歷來 2 月份水質特性一致。由於本研究現採用單時期影像轉換水質參數在樣本數上仍嫌不足，故欲提升回歸模式之可靠度，仍須仰仗現地採樣點位數量的增加或採用多時期影像。

研究成果顯示翡翠水庫在該時期水質優養程度以貧養為主，模糊綜合評價的結果在觀點改變時並無造成大區域的差異，對三項單一水質參數之影響則較為明顯，約有 2 成以內水域之優養程度判斷結果發生改變。本模糊評價結果可提供水資源管理與維護之參考，水資源管理者應對於寬鬆標準下水質反應不良區設為首要探討與處理目標，即水質優養化程度之底線；而在寬鬆標準與嚴謹標準間之差異區域，管理者因應成本考量可將此差異區設定為次要改善目標區，並釐清造成優養程度判斷差異之原因。

應用模糊理論在優養化分級門檻上之調整，可增加反應全區域水質變化與優養程度之敏感度，並由使用者與管理者之立場解讀優養分級上的模糊地帶，採取不同的水資源管理策略。由於卡爾森指標中三種檢測項目的水質數值與優養程度的趨勢函數的型式仍可進一步探討，在僅知正負相關性而未知明確趨勢函數的情形下，本研究暫選用簡便的等分法，以線性趨勢建構出模糊化的範圍。未來在隸屬函數的設計上，可加入對曲線曲率的控制因子，供優養評估者依不同目的或因應季節變化來設定曲線型式或最大模糊度位置。例如對四季水質變化趨勢加以了解，於一年中藻類生長旺季來臨前 (如春季) 採較嚴謹的立場，於藻類生長淡季前 (如秋季) 採較寬鬆的立場，加入對未來水質的變化預期，可較彈性且有效地控制水庫水質優養問題。

## 參考文獻

1. 行政院環境保護署，「全國環境水質監測資訊網」，<http://wqshow.epa.gov.tw/> (2006)。
2. 雷祖強，「衛星遙測及隨機變域模擬於水庫優養之機率評估」，國立臺灣大學農業工程學研究所博士論文，台

北 (2001)。

3. Lu, R.S., Ho, J.Y., and Lo, S.L., "An alternative tool to reservoir eutrophication index: fuzzy synthetic evaluation," *Computational Methods in Water Resources XII*, Vol. 2, Computational Mechanics Publications Southampton, Boston, U.S.A. (1997).
4. Yang, Y.F., "Application of remote sensing and fuzzy set theory on eutrophic status determination," *master thesis, Department of Construction Engineering, Chaoyang University of Technology, Taichung, County, Taiwan*, June. (1999).
5. 工業技術研究院能源與資訊研究所，「德基水庫集水區土地利用變遷分析及資訊系統之建立—總報告」，經濟部德基水庫管理委員會，台北 (1994)。
6. Yang, M.D., Sykes, R., and Merry, C., "Estimation of algal biological parameters using water quality modeling and SPOT satellite data," *Ecological Modelling*, Vol. 125, pp. 1-13 (2000).
7. Kuo, J.T., and Yang, M.D., "Chapter12: Water quality modeling in reservoirs," *Environmental Fluid Mechanics*, ASCE, Virginia, pp. 377-420 (2002).
8. Kuo, J.T., Liu, W.C., Lin, R.T., Lung, W.S., Yang, M.D., Yang, C.P., and Chu, S.C., "Water quality modeling for the Feitsui reservoir in northern Taiwan," *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3, pp. 671-688 (2003).
9. 楊明德、楊曄芬、郭振泰，「SPOT4 衛星影像監測翡翠水庫水質優養化之應用」，第五屆地理資訊系統學術研討會，台中 (1999)。
10. Yang, M.D., and Yang, Y.F., "Eutrophic status assessment using remote sensing data," *The EOS/SPIE Symposium on Remote Sensing*, Italy. (1999).
11. 吳俊穎，「衛星影像監測永和山水庫水質之研究」，中華大學土木工程學系研究所碩士論文，新竹 (2001)。
12. Stumpf, R.P., "Satellite detection of bloom and pigment distribution in estuaries," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, pp. 385-404 (1988).
13. Gordon, H.R., "Ocean color remote sensing systems: radiometric requirements," *Recent Advances in Sensors, Radiometry, and Data Processing for Remote Sensing*, Slater Ed., SPIE, Vol. 924, pp. 151-167 (1998).
14. Dekker, A.G., Vos, R.J., and Peters, S.W.M., "Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter TSM in the southern Frisian lakes," *The Science of the Total Environment*, Vol. 268, pp. 197-214(2001).
15. Thiemann, S., and Kaufmann, H., "Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data—a

- semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 81, pp. 228–237 (2002).
16. Carlson, R.E., “A trophic state index for lakes,” *Limnology Oceanography*, Vol. 22, No. 2, pp. 361–369 (1977).
  17. 張尊國、余忠賢、徐明麟，「德基水庫優養問題之研究」，*台灣水利*，第 45 卷，第 2 期，第 30–37 頁 (1997)。
  18. 盧瑞山、胡景堯、駱尚廉，「模糊綜合評判在台灣地區優養化判定上之應用」，第八屆環境規劃與管理研討會論文集 (1995)。
  19. 駱尚廉、蔡淑芬，「水庫優養化專家系統初探—水質評估」，*中國環境工程學刊*，第二卷，第一期，第 33–41 頁 (1992)。
  20. 胡景堯，「模糊理論在水庫優養化判別上的應用」，國立台灣大學環境工程研究所碩士論文，台北 (1996)。
  21. Cheng, K.S., and Lei, T.C., ” Reservoir trophic state evaluation using landsat TM Image,” *Journal of the American water resources association*, Vol. 37, No. 5, pp. 1321–1334 (2001).
  22. Yang, M.D., Yang, Y.F., and Kuo, J.-T., “Application of fuzzy theory to satellite data for determining eutrophic status,” *2004 IEEE International Geoscience and Remote sensing Symposium*, pp. 4897–4900 (2004).
  23. 國立台灣大學水工試驗所，「衛星技術應用於水庫優養化預測與防治 (2/2)」，經濟部水利署，台北 (2005)。
  24. 陳永祥、吳建民、洪銘監，「模糊理論於水庫水質綜合評判之應用」，*台灣水利*，第 45 卷，第 1 期，第 33–45 頁 (1997)。
  25. Liou, Y.T., “The establishment of factor water quality index and fuzzy water quality index,” *master thesis*, Graduate Institute of Environmental Engineering, National Taiwan University, Taiwan, June (2004).
  26. 蓋墟，實用模糊數學，亞東書局，台北 (1991)。
  27. Ross, T.J., “Fuzzy logic with engineering applications,” *McGraw-Hill*, America, p. 592 (1995).
  28. Sarkar, M., and Yegnanarayana, B., “Rough-fuzzy membership functions,” *Fuzzy systems proceedings*, Vol. 1, No. 2, pp. 796–801 (1998).
  29. 臺北市政府翡翠水庫管理局，「翡翠水庫管理局網站」，[http://www.feitsui.gov.tw/cgi-bin/SM\\_theme?page=41f9b75f](http://www.feitsui.gov.tw/cgi-bin/SM_theme?page=41f9b75f) (2007)。
  30. 王泰盛，「季節性翻轉與春秋藻華水體之卡爾森優養指標應用與水質預測之研究-以翡翠水庫為例」，中華大學土木工程研究所碩士論文，新竹 (2003)。
  31. 台灣大學生態工程研究中心，「翡翠水庫水源保護區污染源調查計畫」，行政院環境保護署環境檢驗所，台北 (2005)。
  32. 陳孝行、黃正義、張添晉，翡翠水庫集水區非點源污染特性調查之研究，*臺北科技大學學報*，Vol. 33, No. 2, pp. 25–42 (2000)。

---

	96 年 3 月 8 日	收稿
	97 年 1 月 15 日	修改
	97 年 3 月 31 日	接受