

濁度對水庫優養化指標辨識度之影響

Effect of Water Turbidity on the Eutrophication Index for Reservoir Water Quality

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
副教授

張嘉玲*
Chia-Ling Chang

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
教授

王傳益
Chuan-Yi Wang

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
研究生

劉虹志
Hung-Chih Liu

摘要

近年來台灣地區水庫隨著經濟發展、農業活動頻繁及集水區地質條件不良崩塌地多等影響，對水庫水質造成嚴重的負荷。因此，在水庫水質日益惡化下，判定水庫水質的指標尤為重要，而台灣普遍使用的是卡爾森優養指標，卡爾森指標之參數為透明度、葉綠素 a、總磷所組成。然而卡爾森指標在高濁度下，會使透明度及總磷參數產生偏差，而使卡爾森指標產生高估的情形，而影響卡爾森指標的辨識度。本研究選用翡翠水庫、石門水庫以及曾文水庫為研究區域，探討卡爾森優養指標辨識度的問題。由分析結果可以證實，在高濁度時，卡爾森優養指標確實會受到干擾，造成指標辨識力的下降，石門水庫高濁度現象較為顯著，卡爾森優養指標辨識力下降的情形較為顯著。

關鍵詞：卡爾森優養指標，優養化，水庫水質，濁度。

ABSTRACT

Economic development impacts environment. Increased pollution worsens reservoir water quality. It is significant to apply eutrophication index to evaluate reservoir water quality. Carlson's trophic state index (CTSI), calculated by chlorophyll (Chl), phosphorus (P), and Secchi depth (SD), is a popular eutrophication index. When water turbidity is high, it may highly raise the value of CTSI and influence the recognition of CTSI. This study selects Feitsui, Shihmen, and Tsengwen reservoirs for case area. The objective is to discuss the influence of environmental factor, such as turbidity, on the recognition of CTSI. The results demonstrate that the recognition of CTSI is certainly influenced by

*通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授，40724 台中市西屯區文華路 100 號，clchang@fcu.edu.tw

water turbidity. When water turbidity is high, it decreases the recognition of CTSI. Because the water turbidity is higher in the Shihmen reservoir than in the other two reservoirs, this situation in the Shihmen reservoir is more noticeable.

Keywords: Carlson's trophic state index (CTSI), eutrophication, reservoir water quality, turbidity.

一、前言

台灣雨量豐沛，但由於地形陡峭、河川短促，造成雨量分佈不均，而興建水庫的方式蓄水，是確保水源供應穩定的方法之一。由於人類活動頻繁，且對於物質生活上的要求提升，相對於民生用水量也不斷增加；但相對地，由於人口、經濟快速成長及水庫集水區過度開發，暴雨後將磷、氮沖流入水庫內，使水庫水體中之營養源濃度過高，加速水庫形成優養化的現象，使得藻類增加，進而影響淨水廠操作及維護功能(溫清光等，1995；蔡福永，2007)，造成飲用水的處理問題，甚至影響飲用水水源(Owen *et al.*, 1995; Volk *et al.*, 2000)。台灣在先天自然條件不佳的狀況，在加上後天的人為開發因素，使得水資源管理更顯重要。

台灣現有四十餘座水庫，其中近七成水庫係做為一般民眾飲用水水源，而行政院環保署自八十二年，每年即針對 20 餘座重要水庫進行水域水質監測。由環保署資料顯示目前國內有 40% 以上的水庫全年有一半時間處於優養狀態，或正處於加速優養化的狀態中，因此，急需以更積極之措施對尚未優養化之水庫加強防範，並改善已優養化水庫的水質(溫清光等，2005)。在水庫優養化的防範方面，強化各水庫水質監測，並建立健全的水質狀況判定方法，則成為水庫水質管理相當重要的課題。

有關水質優養化的評估，目前國內多數採用卡爾森多變數指標法；台灣常使用的卡爾森優養指標是由三個水質項目所計算而得，包括透明度、葉綠素 a、總磷。然而，在許多文獻資料指出，卡爾森優養指標的辨識力會受到周圍環境特

性變化的干擾，例如：在吳俊宗(2011)研究中，提到在高濁度的水質條件下，卡爾森優養指標值則無法真實呈現實際的水質狀況；在陳金花和歐麗苓(2007)研究中，提到濁度長期偏高，透明度不佳，優養程度判定需進一步檢討；及顏沛華等(1999)研究中，亦提到採樣時逢暴雨後 1-3 日水質最為混濁，故使得優養化指數升高，此為短暫現象，因此在台灣優養的判定加上總磷及透明度或許並不適合。由於台灣降雨時間空間分佈不均，在降雨強度大的暴雨頻傳的水文環境條件下，原水濁度高是很常見的，若用來判斷水庫水質優養狀況的指標，受環境干擾而導致辨識力不佳，將無法發揮指標的功能，因此，完整檢討傳統卡爾森優養指標則倍顯重要。本研究將彙整近年來翡翠水庫、石門水庫及曾文水庫監測數據進行分析、比較，探討卡爾森優養指標是否會受到環境因素的干擾，導致辨識力的下降；若有此情況存在，未來在卡爾森優養指數的應用上，則須更為謹慎，甚至有重新檢討此指標的必要性。

二、研究方法

2.1 研究範圍

本研究選定台灣的三座水庫為研究區域，分別為翡翠水庫、石門水庫及曾文水庫。翡翠水庫是一個以供應自來水水源為單一目標的水庫，主要其功能在於調節新店溪的水量，以穩定大台北地區的源水供應量，由於供水範圍相當廣，除台北市區外，尚包括新北市三重、新店、中和、永和、淡水、三芝地區；水庫本身同時兼具發電的功能，並可增加下游河道枯早期的流量，以稀釋河川污染物濃度，對改善大台北都會區的環境品質具有深遠的影響；石門水庫主要標的為灌溉與

表 1 三座水庫基本資料

水庫	計畫有效蓄水量 (萬立方公尺)	現在有效蓄水量 (萬立方公尺)	集水區面積 (平方公里)	水質測站數量 (座)	卡爾森指標(CTSI) 平均值
翡翠水庫	32700	33551	303	6	43.17
石門水庫	23567	20969	763.4	6	49.74
曾文水庫	59550	49059	481	6	47.80

資料來源：本研究彙整

防洪，目前其調節供應公共給水之功能愈形重要；其公共給水除下游鳶山堰攔引送板新淨水場外，另有於大壩上游取水經石門大圳送平鎮、龍潭、石門淨水廠，及於後池堰取水經桃園大圳送大滴淨水廠者，主要供應新北市、桃園縣及新竹縣湖口鄉之公共用水；曾文水庫直接效益為發電及防洪，其給水與灌溉效益則由所串聯之烏山頭水庫提供。

本研究將此三座水庫之基本資料彙整分析如表 1 所示，以集水區面積來看，石門水庫上游集水區範圍最大，而翡翠水庫上游區集水區為台北水源特定區的一部分，在水源特定區內有較嚴格的土地管制，因此，翡翠水庫水質相較於其他兩座水庫水質，平均而言有較佳的水質狀況，根據近年來卡爾森指標的平均狀況來看，石門水庫水質優養狀況較其他兩座水庫嚴重。

本研究使用行政院環保署提供之水質測站資料，水庫水質監測頻率每季一次，根據水庫水質監測數據分析結果顯示，在單一水庫中，各水質監測站的監測結果差異不大，且水質變化趨勢相同；因此，本研究採用庫區內各水質測站的監測資料平均值，以 1994 年至 2012 年之水質資料作為原始資料，刪除掉資料不齊全之部分，進行本研究相關分析與討論。

2.2 水庫優養指標分析

當大量的污染物質排入水庫中，在適當的水溫、酸鹼度、日照及水位等環境因素下，將導致水庫中藻類大量異常繁殖、死亡，消耗水中溶氧，造成優養化；優養程度依所含營養物質多寡，分為優養、普養及貧養三類。一般評判水庫水質的優養指標，可分為單一參數指標法及多變

表 2 卡爾森優養指標範圍

等級	卡爾森優養指標(CTSI)
貧養	<40
普養	40-50
優養	>50

數指標法等，其中單一參數指標是採用各種營養鹽濃度、物理參數及藻類或浮游動物，其判斷是以該單項指標是否超過界限值為準，常被使用的分別有總磷、葉綠素 a、透明度、氮、溶氧等；多變數指標則包括有卡爾森 TSI 指標、修正型 TSI 指標、Morihiro TSI 指標(Aizaki, 1981)、LEI 指標及北卡 TSI 指標等；國內許多研究曾針對卡爾森 TSI 指標、Morihiro TSI 指標及北卡 TSI 指標之適用性作過分析，發現 Morihiro TSI 指標及北卡 TSI 指標都不適用於國內水庫，而以卡爾森優養指標相對而言，較適合用來評估台灣水庫水體水質優養化的狀態(郭振泰和吳俊宗，1990&1991)。

以單一參數為基礎的評價，指標雖然簡單明瞭，但因水庫優養化成因複雜，在使用時常因環境因子影響，往往難以反應水質全貌，又可能發生不同參數評價同一水體結果互異的現象，故以多變數評估水質較佳(古煥林，2005；黃富昌等，2006)，所以發展出多參數的多變數評價指標，其中又以卡爾森水庫優養指標(Carlson's trophic state index, CTSI)為國內研究水庫優養化最常被採用的判定指標，表 2 為判斷水庫水質優養化程度。卡爾森優養指標(CTSI)之計算公式如式(1)，CTSI 是以水中透明度(SD)、葉綠素 a (Chl-a)及總磷(TP)三種水質分別帶入式(2)~(4)，分別求出三水質項目之 TSI 值，再平均得到 CTSI 值，計算出之 CTSI，依 CTSI 值的大小

水庫優養化程度分為三等，卡爾森指標範圍對照表如表 2 所示。

$$CTSI = \frac{TSI(Chl - a) + TSI(SD) + TSI(TP)}{3} \quad (1)$$

$$TSI(SD) = 60 - 14.41 * \ln(SD) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$TSI(Chl - a) = 9.81 * \ln(Chl - a) + 30.6 \quad \dots\dots(3)$$

$$TSI(TP) = 14.42 * \ln(TP) + 4.15 \quad \dots\dots\dots(4)$$

根據(吳俊宗, 2011)研究計畫指出，濁度偏高是造成優養指標數值偏差的主因，在濁度高於 6NTU 時，差異值隨總磷測值增高而上升，而使葉綠素 a 和總磷及透明度之相關性偏低加大。所以在濁度低於 6NTU 時，可適用一般卡爾森優養指標模式，但高於 6NTU 時，總磷及透明度二參數即不能適用，應只用葉綠素 a 為優養評估參數。由 Vollenweider (1969)、Dillon and Rigler (1974)、Carlson (1977)等優養指標的理論依據，在一般狀況下，總磷和葉綠素 a 在正常水體中會有線性相關，相關係數數值高；然而，在國內由於季節性降雨的影響而導致濁度偏高，導致總磷、葉綠素 a 及透明度間的相關性不高，相關係數數值偏低。

本研究根據文獻中所提出之現象，決定以台灣三座主要水庫為研究對象，檢視卡爾森優養指標(CTSI)是否會受到水中濁度上升因素的干擾。因此，本研究選擇三項指標來判定優養指標干擾的狀況，第一個判定指標為「皮爾森相關係數」，分析卡爾森指標(CTSI)與三個水質項目之 TSI 值間之相關性，當相關係數低於.5 之情況，則判定為 CTSI 受干擾的現象存在，皮爾森相關係數 r 計算如式(5)，式中 x 及 y 分別為 CTSI 及 TSI 值。

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

本研究所採用的第二及第三個判定指標，主要是從水質項目差異度的角度，判定 CTSI 是否

受環境因素干擾而導致辨識力下降。由於 CTSI 值為三個水質項目取 TSI 值後平均而得，因此，TSI(SD)、TSI(chl-a)及 TSI(TP)之間的標準差若過大，則代表 CTSI 受干擾的現象存在。此兩判定指標分別為 TSI(SD)、TSI(chl-a)及 TSI(TP)之間的標準差 STD(TSI)及最大值減去最小值所得的指標 MAX(TSI)-MIN(TSI)，STD(TSI)定義及計算式如式(6)所示，式中 n=3，TSI_i 分別為 TSI(SD)、TSI(chl-a)及 TSI(TP)。

$$STD(TSI) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TSI_i - \overline{TSI})^2}{n-1}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

三、結果與討論

3.1 三座水庫水質現況分析

本研究首先根據 1994 到 2012 年水庫水質監測資料，分析此翡翠、石門及曾文三座水庫歷年來之水質狀況。由水質監測數據分析結果(如表 3)可知，在三座水庫中，以翡翠水庫的透明度 3.07 m 為最高，曾文水庫的透明度 1.67 m 為最低；葉綠素 a 部分則是以石門水庫的 5.32 μg/L 為最高，翡翠水庫的 2.62 μg/L 為最低；總磷則是石門水庫的 28.46 μg/L 為最高，翡翠水庫的 19.77 μg/L 為最低；平均濁度以石門水庫的 7.33 NTU 為最高，翡翠水庫的 2.59 為最低；三座水庫的卡爾森指標平均值都在 50 以下，但是石門水庫的卡爾森指標平均值為 49.74 已經相當接近優養之狀態，三座水庫之中以翡翠水庫的指標平均值 43.17 為最低，石門水庫 49.71 為最高。

以優養時間比例來看，在 1994 年到 2012 年的資料中，翡翠水庫的優養百分比為 3.1%，普養百分比為 78.5%，貧養百分比為 18.4%，石門水庫的優養百分比為 40.8%，普養百分比為 59.2%，貧養百分比為 0%，曾文水庫的優養百分比為 23.4%，普養百分比為 76.6%，貧養百分比為 0%；由此可得知，石門水庫優養化情況較嚴重，曾文水庫次之，翡翠水庫的優養化情況較不嚴重。

表 3 三座水庫之平均水質現況

水庫	透明度(m)	葉綠素 a (µg/L)	總磷 (µg/L)	平均濁度 (NTU)	卡爾森指標 (CTSI)平均值	優養百分比 (%)	普養百分比 (%)	貧養百分比 (%)
翡翠水庫	3.07	2.62	19.77	2.59	43.17	3.1	78.5	18.4
石門水庫	1.72	5.32	28.46	7.33	49.74	40.8	59.2	0
曾文水庫	1.67	3.60	24.63	4.91	47.80	23.4	76.6	0

資料來源：本研究彙整 1994 年至 2012 年之水質資料；原始水質監測資料來源為環保署

3.2 卡爾森優養指標受干擾之現象分析

本研究主要研究重點在探討卡爾森優養指標受高濁度水質狀況之干擾現象。表 4 為三座水庫之卡爾森指標(CTSI)及三個水質參數(透明度、葉綠素 a、總磷)計算所得之 TSI 值的皮爾森相關性分析，即第一個判定指標之分析結果。由相關性分析結果可知，翡翠水庫的三項水質項目之 TSI 對於卡爾森指標之相關係數均高於 0.5，其中又以 TSI(TP)的相關係數 0.78 為最高，曾文水庫的三項水質項目之 TSI 對於卡爾森指標之相關係數也是均高於 0.5，其中也以 TSI(TP)的相關係數為最高，而石門水庫的卡爾森指標對 TSI(chl-a)的相關係數為 0.42 低於 0.5；因此，可以判定石門水庫之卡爾森優養指標受到干擾之程度較其他兩座水庫高。

本研究除相關性分析外，亦採兩指標評估 TSI 差異度，當三個水質項目之 TSI 值差異度較大時，表示干擾現象較顯著。表 5 為 TSI(SD)、TSI(chl-a)及 TSI(TP)三項數值之 STD(TSI)與 MAX(TSI)-MIN(TSI)的分析結果，即第二及第三個判定指標之分析結果。由差異度分析結果可知，以翡翠水庫的 STD(TSI)為 5.02 為最小，石門水庫的 STD(TSI)為 7.48 最大，曾文水庫的 STD(TSI)為 6.69 則次之；MAX(TSI)-MIN(TSI)以翡翠水庫的 9.53 為最小，石門水庫的 14.3 為最大，曾文水庫為 12.9 則次之；整體而言，石門水庫之三個 TSI 值的差異度較大，因此，可以判定石門水庫之卡爾森優養指標有受到干擾之情形較其他兩座水庫顯著。

由本研究所訂的三個判定卡爾森優養指標受干擾現象的指標，包括：相關性分析及差異度分析兩個面向，均可以歸納出石門水庫之卡爾森

表 4 CTSI 與 TSI 之皮爾森相關係數分析

水庫	r1	r2	r3	平均濁度 (NTU)
翡翠水庫	0.64	0.64	0.78	2.59
石門水庫	0.77	0.42	0.71	7.33
曾文水庫	0.51	0.69	0.88	4.91

註：r1 為 CTSI 與 TSI(SD)之皮爾森相關係數，r2 為 CTSI 與 TSI(chl-a)之皮爾森相關係數，r3 為 CTSI 與 TSI(TP)之皮爾森相關係數。

表 5 TSI 差異度分析

水庫	STD(TSI)	MAX(TSI)-MIN(TSI)	平均濁度 (NTU)
翡翠水庫	5.02	9.53	2.59
石門水庫	7.48	14.3	7.33
曾文水庫	6.69	12.9	4.91

優養指標確實有受干擾的狀況，且干擾的現象較翡翠水庫及曾文水庫嚴重；當指標受干擾現象存在時，指標的可信度則會降低，因此，本研究進一步從石門水庫水質監測數據中，挑選出濁度較高的極端事件，探討在高濁度事件下，卡爾森優養指標受干擾之現象，如表 6 所示。

本研究選出的四筆水庫水質監測數據，其濁度均高於 50NTU，相較於平均濁度而言，屬於極高濁度事件。由此等數據中可以看出，總磷、透明度及 CTSI 指標均判定水庫水質呈現優養化，但葉綠素 a 卻判定水庫水質呈現貧養狀態；從監測數據該月的降雨記錄亦顯示，水體濁度上升為暴雨事件所導致，大量的泥沙造成無機顆粒上升，許多營養鹽(如總磷等有機污染物)附著在泥沙上，導致總磷、透明度指標上升，但水庫水質實際的優養狀態並不會受到泥沙增量有顯著的

表 6 石門水庫高濁度案例優養判定分析

資料時間	濁度 (NTU)	葉綠素 a 優養判定	總磷 優養判定	透明度 優養判定	CTSI 優養判定	STD(TSI)	MAX(TSI)-MIN(TSI)
1993/12/16	55	貧養	優養	優養	優養	33.1	58.9
2004/02/09	54	貧養	優養	優養	優養	23.8	45.0
2004/08/31	160	貧養	優養	優養	優養	31.4	62.6
2007/11/08	55	貧養	優養	優養	優養	19.4	38.6

變化，由葉綠素 a 指標的貧養判定結果則可知悉；因此，可以推論，在高濁度的狀況下，CTSI 指標的判定確實受到干擾，導致優養判定結果與實際水質狀況不盡相同。

由此等事件的差異度指標分析結果可知，四筆高濁度事件的 STD(TSI)值及 MAX(TSI)-MIN(TSI)值，均遠大於石門水庫之平均值，此等數值亦可證實，在極高濁度時，CTSI 受干擾的程度較平時高；根據上述現象可推論，由於外界環境變化影響，如暴雨事件，水庫水體水質可能出現無機懸浮固體短暫上升的現象，進而造成透明度降低，而並未造成藻類大量繁殖的優養化現象，此時卡爾森優養指標的優養判定可信度將下降。

台灣雖已廣泛應用卡爾森優養指數來判斷水庫優養化程度，但本研究證實卡爾森指標在高濁度的情況下，卡爾森優養指數可能受到干擾，造成辨識度下降，也就是無法呈現出水質實際的優養狀況，因此，若要合理評估水庫優養化程度，則必須採用其他受濁度干擾較低的指標，例如藻類相關指標等，對水庫水體水質進行較為客觀的評估，以免因 CTSI 受干擾，而高估水庫優養程度，造成人民飲用水的不安全感。

四、結論與建議

1. 由於國內外文獻在評估卡爾森優養指標的適用性時，出現些許矛盾現象，因此，本研究以評估卡爾森優養辨識力為主要目的，證實卡爾森優養指標在水體水質濁度較高時，確實有辨識力下降的情形發生。
2. 水體中的濁度，可能會造成卡爾森優養指數計算值偏高，造成對水庫水體優養化程度高估的

情形發生。

3. 本研究採用 CTSI 和 TSI 間之相關性及 TSI 間之差異度進行分析，設計三個判定指標，用以判斷卡爾森優養指標受干擾的狀況。當 CTSI 和 TSI 間之相關性較低或 TSI 間之差異度較大時，則表示卡爾森指標受到環境因素干擾，導致辨識力下降。
4. 在本研究所討論的三座水庫中，石門水庫平均濁度較其他兩座水庫高，由分析結果亦可發現，石門水庫卡爾森優養指標受到濁度干擾的現象較其他兩座水庫顯著。
5. 本研究透過相關性分析及各指標與濁度的比較確定出，濁度對於卡爾森優養指標之影響，未來將持續探討何時會發生指標干擾現象及其影響的程度，並針對各別水庫進行更完整之分析，提出水庫優養化指標修正之建議，以供社會大眾及研究單位參考使用。

參考文獻

1. 行政院環保署，<http://www.epa.gov.tw/>。
2. 古煥林，2005，水庫水質優養化最適指標之探討，國立中央大學環境工程研究所，碩士論文。
3. 吳俊宗，2011，水庫水質優養化相關參數合理性研究報告，台灣自來水股份有限公司。
4. 郭振泰、吳俊宗，1990，台灣地區給水水源優養化評估法之建立及其優養化程度調查(一)，行政院環境保護署。
5. 郭振泰、吳俊宗，1991，台灣地區給水水源優養化評估法之建立及其優養化程度調查(二)，行政院環境保護署。
6. 陳金花、歐麗苓，2007，澄清湖底泥清除對

- 水庫水質影響之探討研究報告，台灣自來水股份有限公司。
7. 黃富昌、林嘉鴻、顏冠忠，2006，以多變量統計分析探討石門水庫水質優養化，2006 年台灣環境資源永續發展研討會。
 8. 溫清光、高銘木、林財富、張穗蘋、李志賢、吳佳正，2005，以生態工法去除水庫集水區營養源研究計畫，行政院環境保護署。
 9. 溫清光、高銘木、郭文健、莊淑滿、張穗蘋、黃家勤、楊磊、鄭幸雄，1995，鳳山水庫曝氣工程效益評估，台灣省自來水公司。
 10. 蔡福永，2007，台灣水庫之優養化指標評析，國立中山大學環境工程研究所，碩士論文。
 11. 顏沛華、蔡長泰、呂珍謀，1999，南化水庫防淤清淤方案研究，成大水利海洋研究發展基金會。
 12. Aizaki, M., 1981. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationships to other parameters related to trophic state (in Japanese with English summary). Research Report from the National Institute for Environmental Studies Japan, 23, 13-31.
 13. Carlson, R. E., 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.
 14. Dillon, P. J., and Rigler, F. H., 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology and oceanography*, 19(5), 767-773.
 15. Owen, D. M., Amy, G. L., Chowdhury, Z. K., Paode, R., McCoy, G., and Viscosil, K., 1995. NOM: characterization and treatability: Natural organic matter. *Journal-American Water Works Association*, 87(1), 46-63.
 16. Volk, C., Bell, K., Ibrahim, E., Verges, D., Amy, G., and LeChevallier, M., 2000. Impact of enhanced and optimized coagulation on removal of organic matter and its biodegradable fraction in drinking water. *Water Research*, 34(12), 3247-3257.
 17. Vollenweider, R. A., 1969. Possibilities and limits of elementary models concerning the budget of substances in lakes. *Archiv fuer Hydrobiologie*, 66(1), 1-36.

收稿日期：民國 103 年 3 月 13 日

修正日期：民國 103 年 6 月 11 日

接受日期：民國 103 年 6 月 29 日