

# 卡爾森「營養狀態指數(TSI)」

周國鼎

行政院環境保護署科長

## 摘要

我國判定湖泊或水庫水質優養化與否乃依據行政院環境保護署所訂「卡爾森指數(Carlson Trophic State Index, CTSI)」,「卡爾森指數(CTSI)」值超過 50 者,該水庫就被歸類為「優養」(eutrophic)類別;低於 40 者,歸類為「貧養」(oligotrophic)類別;介於 40 與 50 之間者,則歸類為「普養」(mesotrophic)類別。我國使用「卡爾森指數(CTSI)」迄今已有超過 30 年的歷史。

我國所採用之「卡爾森指數(CTSI)」,顧名思義該指數發明者為卡爾森。惟實際上,「卡爾森指數(CTSI)」與卡爾森於 1977 年所發表「營養狀態指數(Trophic State Index, TSI)」相較,僅水質的透明度、葉綠素 a 濃度、磷濃度等 3 個參數之計算方程式雷同(亦非完全相同),二者判斷水質營養狀態之方式則不同。我國使用「卡爾森指數」之名稱,容易誤導使用者或閱聽者認為其與卡爾森所研發之「營養狀態指數(TSI)」完全無異。

磷進入水體,易使藻類滋生,進而導致水質透明度下降。

卡爾森根據所收集之數據,發現透明度、總磷及葉綠素 a 三個參數間具有高度相關性,因此所研發的「營養狀態指數(TSI)」只需要量測透明度,即可透過方程式計算得知水質的

營養狀態及其他營養參數數值,無需量測所有營養參數。

卡爾森指出,「營養狀態指數(TSI)」不適用含有大量非藻類顆粒物質的湖泊或高色度的湖泊之狀況;此外,如生物性營養狀態指數值與總磷營養狀態指數值不同的情況下,將這些不同數值加總求其平均值是不宜的。

唯有正確了解卡爾森於 1977 年所發表「營養狀態指數(TSI)」之意涵,我國判定湖泊或水庫水質優養化之指標才不會發生引喻失義的情形。

## 1. 前言

我國判定湖泊或水庫水質好壞與否乃依據行政院環境保護署所訂「卡爾森指數(Carlson Trophic State Index, CTSI)」,水質之「卡爾森指數(CTSI)」值超過 50 者,該水庫就被歸類為「優養」(eutrophic)類別;低於 40 者,歸類為「貧養」(oligotrophic)類別;介於 40 與 50 之間者,則歸類為「普養」(mesotrophic)類別。我國使用「卡爾森指數(CTSI)」迄今已有超過 30 年的歷史。

我國所採用之「卡爾森指數(CTSI)」,顧名思義該指數發明者之名字為卡爾森,惟實際上,「卡爾森指數(CTSI)」與卡爾森於 1977 年所發表「營養狀態指數(Trophic State Index, TSI)」相較,僅湖泊水質的透明度、葉綠素 a 濃度、磷濃度等 3 個

參數之計算方程式雷同（亦非完全相同），二者判斷水質營養狀態之方式則不同。我國使用「卡爾森指數」之名稱，容易誤導使用者或閱聽者認為其與卡爾森所研發之「營養狀態指數(TSI)」完全無異。

為充分了解卡爾森發展「營養狀態指數(TSI)」之緣由及該指數之意涵，俾利政府相關機關正確判斷我國湖泊或水庫水質的營養狀態，進而採取適當措施及投入資源改善水質，以免水質惡化而影響飲用水安全，乃本文之目的所在。

## 2. 「營養狀態指數(TSI)」之緣由

### 2.1 出處

卡爾森「營養狀態指數(TSI)」係出自卡爾森於 1977 年所發表「A Trophic State Index for Lakes」（中譯：湖泊營養狀態指數）之論文。卡爾森全名為 Robert E. Carlson，時任職於美國明尼蘇達大學湖沼學研究中心，後為美國肯特州立大學(Kent State University)生物學系教授。卡爾森已於 2010 年退休，畢生致力於湖泊營養狀態之研究，並曾發表多篇相關學術論文，其中「A Trophic State Index for Lakes」論文被引用次數迄今已高達 5,000 次。

### 2.2 目的

卡爾森當年之所以要開發一種新的湖泊營養分類方法，是因為在 1970 年代時，傳統的湖泊營養分級系統無法簡單明瞭的向公眾說明湖泊的當下性質或狀態以及未來湖泊整治後的狀況，所以需要新的系統藉以溝通。卡爾森所開發的這個系統稱為

「營養狀態指數(TSI)」，內容包括了定義營養狀態和判定湖泊狀態的方法。

## 3. 營養狀態指數之參數

### 3.1 湖泊營養狀態的意涵

要正確選擇湖泊營養狀態具有代表性的指標，應該要先了解湖泊營養狀態的意涵為何。

湖泊營養狀態，一般常稱之為優養化。根據維基百科，優養化又稱作富營養化，是指湖泊、河流、水庫等水體中氮、磷等植物營養物質含量過多所引起的水質污染現象。由於水體中氮、磷營養物質的富集，引起藻類及其他浮游生物的迅速繁殖，使水體溶解氧含量下降，造成植物、水生物和魚類衰亡甚至絕跡的污染現象。

根據上述的意涵，水中溶氧、營養物濃度、底棲動物、浮游植物、生物質量或其它產物的量測值，皆可作為判斷湖泊營養狀態的參數或指標。

### 3.2 「單一參數指標」或「多參數指標」

用於判定營養狀態的大量標準促使人們認為營養概念是多面向的，涉及包括營養負荷、營養物濃度、生產力、動物和植物之數量和質量，甚至湖泊形態測量等方面。因此，營養狀態無法只透過檢查一個或兩個參數來評估，而這種論點可能助長了多參數指標的產生，惟當考量需要測量參數的數量時，多參數指標的實用性就會受到限制。此外，某些指標中參數之間假設的線性關係並不成立。

相對於多元營養的概念，就是單一參數指標，例如有機物質或營養物

質進入到湖中的速率。單一參數指標可能既明確又對變化敏感，然而，當時對於營養狀態單一參數的選擇尚未達成共識，並且單一參數指標未來能否被廣泛接受也是令人質疑的。

「單一參數指標」及「多參數指標」，二者各有利弊，應視使用者之實際狀況及條件作選擇。

### 3.3 國際間常用指標

對於湖泊營養狀態之指標及分類方式，國際上並無一致的標準及作法。就以指標參數的數目而言，國際間常用指標就分為「單一參數指標」及「多參數指標」二種。「單一參數指標」係以單一參數來判斷湖泊營養狀態，而「多參數指標」之判斷方式則涉及不只 1 項參數。國際間採用「單一參數指標」及「多參數指標」之案例分別說明如下。

#### 3.3.1 單一參數指標

「單一參數指標」者係以單一參數來判斷湖泊營養狀態，採用者包括美國環保署、堪薩斯州、經濟合作暨發展組織(OECD)及日本等。

##### 3.3.1.1 美國環保署

美國環保署判斷湖泊營養狀態之參數（詳表 1）有 3 項，包括透明度、葉綠素 a 及總磷，可以選擇其中之一來判斷。

表 1 美國環保署判斷湖泊營養狀態之參數及標準

營養狀態	總磷 (µg/L)	透明度 (m)	葉綠素 a (µg/L)
貧養	< 10	> 3.7	< 4
普養	10-20	2-3.7	4-10
優養	> 20	< 2	> 10

##### 3.3.1.2 美國堪薩斯州

採用葉綠素 a 之「營養狀態指數 (TSI)」值作為判定指標。

##### 3.3.1.3 經濟合作暨發展組織(OECD)

OECD 判斷湖泊營養狀態之參數（詳表 2）亦有 3 項，項目完全相同於美國環保署者，可以選擇其中之一來判斷，惟其各參數之判斷標準值，則不相同於美國環保署者。

表 2 OECD 判斷湖泊營養狀態之參數及標準

營養狀態	總磷 (mg/m <sup>3</sup> )	透明度 (m)		葉綠素 a (mg/m <sup>3</sup> )	
	平均值	平均值	最小值	平均值	最大值
超貧養	< 4	> 12	> 6	< 1.0	< 2.5
貧養	< 10	> 6	> 3	< 2.5	< 8.0
貧養	10-35	6-3	3-1.5	2.5-8	8-25
優養	35-100	3-1.5	1.5-0.7	8-25	25-75
超優養	> 100	< 1.5	< 0.7	> 25	> 75

##### 3.3.1.4 日本

採用 OECD 葉綠素 a 之年平均值判定水庫營養狀態（優養：Chl-a > 8 µg/L）。

#### 3.3.2 多參數指標

「多參數指標」者係以不只一項參數來判斷湖泊營養狀態，採用者包括我國、美國佛羅里達州、中國大陸等。

##### 3.3.2.1 我國

採用透明度、葉綠素 a 及總磷各參數 TSI 值之加總平均值，也就是 [TSI(SD)+TSI(Chl-a)+TSI(TP)]/3，作為水庫營養狀態之判定指標。

### 3.3.2.2 美國佛羅里達州

當總磷(TP)為限制營養源時 $[(TN/TP) > 30]$ ，採用總磷、及葉綠素 a 二參數之 TSI 值加總平均值，也就是 $[TSI(Chl-a)+TSI(TP)]/2$ ，作為水庫營養狀態之判定指標。

### 3.3.2.3 中國大陸

採用「綜合營養狀態指數」(TLI)，此指數選用葉綠素 a (Chl-a)、總磷(TP)、總氮(TN)、透明度(SD)、化學需氧量(COD)等 5 項參數，計算出綜合營養狀態指數(TLI)值，該值的範圍為 0 至 100，據此對湖泊或水庫的營養狀態分類。

## 4. 「營養狀態指數(TSI)」參數之選擇

如前所述，水中溶氧、營養物濃度、底棲動物、浮游植物、生物質量或其它產物的量測值，皆可作為判斷湖泊營養狀態的參數或指標，而卡爾森選擇了透明度、總磷及葉綠素 a 等 3 項參數，分別代表了物理性、生物性及化學性指標。此外，卡爾森還整理出 3 項參數指數的計算公式。

### 4.1 背景

卡爾森當年開發新的湖泊營養分類方法，是為了能夠簡單明瞭的與公眾溝通。

藻類生物質本身的數值不易在指數中使用，因為生物質是一個定義不明確的術語，通常是依次由一個或多個參數估計而得，例如乾重或濕重、細胞體積、顆粒碳、葉綠素或沙奇盤透明度。卡爾森採用沙奇盤透明度的可能範圍來構建指數，除了沙奇

盤透明度值易於轉換為方便使用的尺標之外，沙奇盤透明度是最簡單且最常用作湖泊量測工具之一，所量測的數值很容易被理解。

## 4.2 各參數之意涵

### 4.2.1 透明度

對於社會大眾而言，水質的透明度應該是最容易了解的指標。直覺上，水質清澈往往代表水中物質少，透明度愈高，就表示湖泊營養物質愈少；反之，則代表湖泊營養物質愈多。

透明度是一種物理性指標，不僅簡單易懂，且操作容易（如操作上安全無虞）。標準檢測方法為「水體透明度測定方法(NIEA E220.51C)」，只要利用沙奇盤(Secchi disk)或沙奇管，量測水面至其可見之距離，即為水體之透明度，又稱沙奇透明度(Secchi Transparency)。

鑒於透明度之簡易性，完全符合卡爾森發展「營養狀態指數(TSI)」之初衷，雖然卡爾森一共列出了透明度、葉綠素 a 及磷等 3 項參數指數的計算公式，實際上透明度才是卡爾森主要想使用作為判定水庫營養狀態之參數，其緣由將於後續章節說明。

### 4.2.2 磷

水質優養化是指氮、磷等植物營養物質含量過多，導致藻類及其他浮游生物的迅速繁殖的現象，因此水中氮、磷的濃度可作為預期未來藻類繁殖狀況的參數。

不過，氮主要以硝酸鹽氮的型式進入水體，通常是河口優養化的最主要的限制性因數之一；磷則是以溶解

態與顆粒態的型式進入水體，通常是湖泊優養化的最主要的限制性因數之一。

磷是一種化學性指標，採樣檢測上較透明度複雜許多。水中磷之標準檢測方法有 2 種，包括「分光光度計／維生素丙法(NIEA W427.53B)」、「分立式分析系統比色法(NIEA W463.50B)」。

#### 4.2.3 葉綠素 a

水質優養化是指水體中植物營養物質含量過多所引起的水質污染現象，具體呈現的就是藻類及其他浮游生物的迅速繁殖。卡爾森之所以選擇藻類生物量作為營養狀態指數的參數之一，主要是因為藻類大量繁殖（又稱藻華）是公眾關注的問題，選擇這種公眾關注特別敏感的指數有助於湖沼學家與公眾之間的溝通，而水中葉綠素 a 的濃度可代表藻類繁殖的狀況。

葉綠素 a 是一種生物性指標，與磷的檢測一樣需在實驗室中進行，採樣檢測不似透明度簡易。水中葉綠素 a 之標準檢測方法有 2 種，包括「丙酮萃取法／分光光度計分析法(NIEA E507.04B)」、「乙醇萃取法(NIEA E508.00B)」。

### 5. 「營養狀態指數(TSI)」參數間之相關性

理想的「營養狀態指數(TSI)」應包含「多參數指標」及「單一參數指標」兩種方式中的各自優點，不僅保留多參數指標對於營養狀態的多面向表達方式，且同時具有單一參數指標的簡單性。如果常用的營養標準是相互關聯的，就可以達到這個目標，

而以下 2 個卡爾森所舉案例即可說明。Sakamoto (1966)以及 Dillon 和 Rigler (1974)找出春季磷濃度和藻類生物量之間的關係，而該藻類生物量係以葉綠素 a 濃度表示；Lasenby (1975)使用沙奇盤透明度值來預測區域底層湖水的缺氧狀況。

如果許多常用的營養標準可能與一系列的預測方程式有關，就不再需要測量所有可能的營養參數來判定營養狀態。單一的營養標準，例如藻類生物量、營養物濃度或營養物負荷量都可以作為指數的基礎。從這個指數，藉由已建立的關係式，可以估算或預測出其他營養標準；同樣的，也可以使用任何一個營養標準的量測值來判定營養狀態為何。

#### 5.1 「營養狀態指數(TSI)」建構基礎

「營養狀態指數(TSI)」將大多數湖泊納入 0 至 100 的範圍內，從 0 開始，數值每增 10 個單位代表藻類生物量的倍增；由於生物質濃度與沙奇盤透明度之間的倒數關係，藻類生物量的每次倍增都會導致透明度減半。指數數值可以從幾個參數中的任何一個計算，參數包括透明度、葉綠素和磷等。

#### 5.2 透明度

雖然葉綠素是最能夠直接代表水體營養狀態的指標，不過卡爾森選擇了透明度作為主要判定參數，除了沙奇盤透明度值，也就是湖泊透視深度（以公尺計），易於轉換為方便使用的尺標之外，沙奇盤透明度是最簡單且最常用作湖泊量測工具之一，所量測的數值很容易被理解。

卡爾森認為尺標上的零點應該

是大於任何沙奇盤透明度值中曾經記錄過的值，而當時紀錄最大值是日本 Masyuko 湖的 41.6 公尺，該值是由 Hutchinson (1957) 所記錄的。而在以 2 為底的對數刻度上，下一個最大整數值是 64 公尺。在 64 公尺時的營養狀態指數(TSI)值為 0，此值可從指數數值 6 減去  $\log_2 64$  而得之，進而產生 TSI 方程式如方程式(1)：

$$TSI = 10(6 - \log_2 SD) \quad (1)$$

該數值之所以還要乘以 10，是因為卡爾森要使尺標的範圍是從 0 到 100，而不是 0 到 10。

尺標刻度從 0 開始，代表沙奇盤透明度值是 64 公尺；32 公尺時為 10；16 公尺時為 20；8 公尺時為 30；依此類推。

該方程式是一個理論方程式，其透明度理論上限值是可以無限的大，但實務上的極限值是 100 或 110（分別代表 6.25 公分和 3.125 公分）。

### 5.3 透明度與葉綠素 a

卡爾森繪製沙奇盤透明度與藻類生物量參數（例如葉綠素 a）之關係時，獲得一個雙曲線（見圖 1），而不具有線性關係，因此將數據進行雙對數轉換，得到方程式(2)。

$$\ln SD = 2.04 - 0.68 \ln Chl \quad (2)$$

由於透明度與葉綠素 a 之線性關係，因此只要知道了透明度值，除了可以得知其「營養狀態指數(TSI)」值，亦可得到對應的葉綠素 a 濃度值。

### 5.4 透明度與磷

卡爾森因為沒有足夠磷與透明

度的可用數據，無法得到有意義的迴歸分析。然而，將葉綠素對總磷進行迴歸分析，可以得到方程式(3)。

$$\ln Chl = 1.449 \ln TP - 2.442 \quad (3)$$

卡爾森再將得到的方程式(3)與方程式(2)組合，產生了「磷—透明度」方程式(4)。

$$\ln SD = 3.876 - 0.98 \ln TP \quad (4)$$

惟筆者發現，卡爾森推導之方程式(4)有誤，應修正為方程式(4\*)：

$$\ln SD = 3.701 - 0.985 \ln TP \quad (4^*)$$

由方程式(4\*)可得到透明度與磷之線性關係，因此只要知道了透明度值，除了可以得知其「營養狀態指數(TSI)」值，亦可得到對應的磷濃度值。

### 5.5 營養狀態指數對照表

完整的營養狀態指數數值及其相關參數如表 3 所示。

表 3 營養狀態指數對照表

營養狀態指數 (TSI)	沙奇盤透明度 (m)	表水磷 (mg/m <sup>3</sup> )	表水葉綠素 (mg/m <sup>3</sup> )
0	64	0.75	0.04
10	32	1.5	0.12
20	16	3	0.34
30	8	6	0.94
40	4	12	2.6
50	2	24	6.4
60	1	48	20
70	0.5	96	56
80	0.25	192	154
90	0.125	384	427
100	0.0625	768	1,183

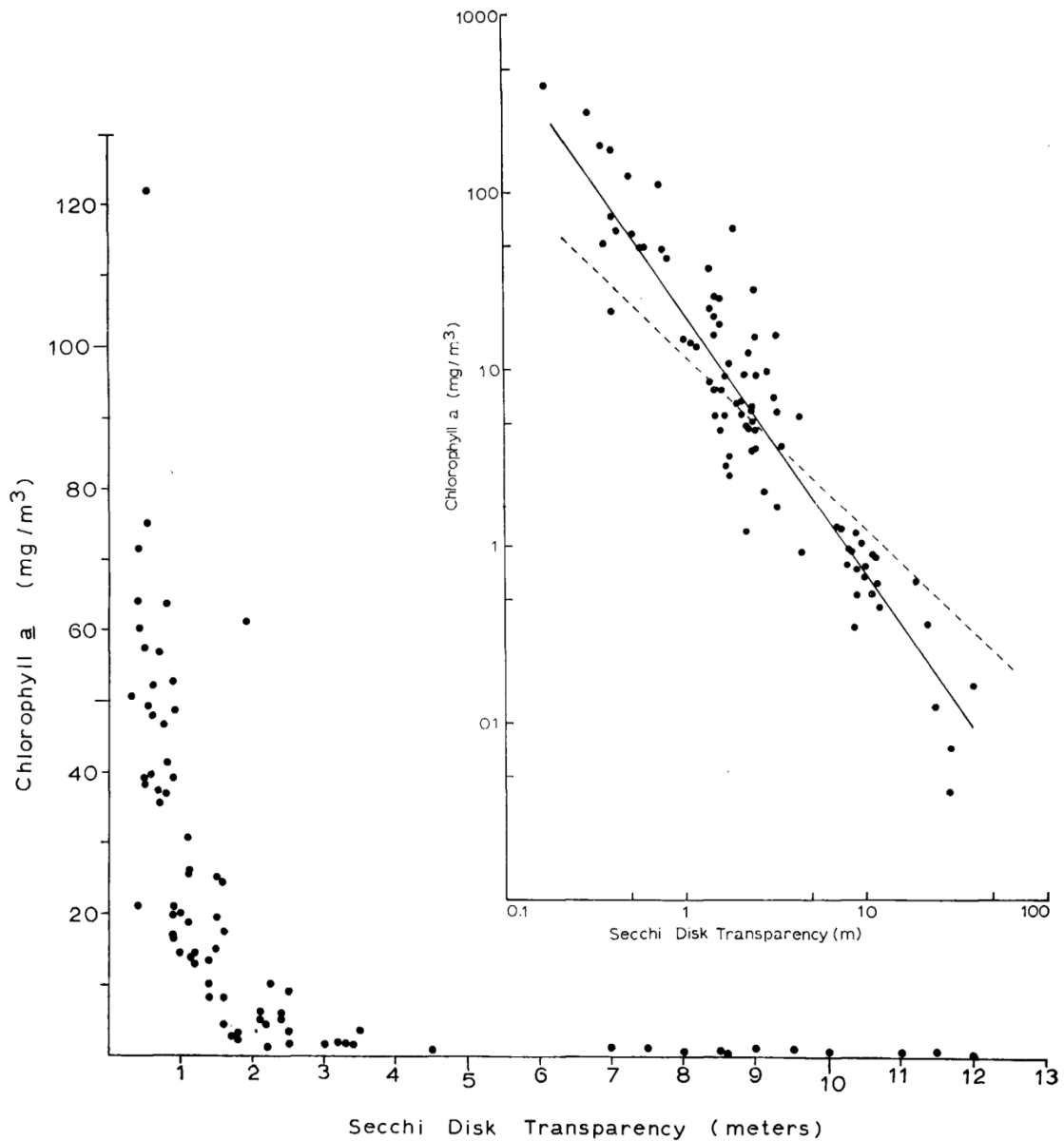


圖 1 沙奇盤透明度與葉綠素 a 濃度之關係。內圖為圖 1 之數據取對數後之結果，虛線者代表斜率為 1。(取自 Carlson, R. E (1977), A Trophic State Index for Lakes, Limnology and Oceanography)

## 6. 結論

### 6.1 只需量測透明度

如果不同營養狀態參數間具有高度相關性，就無需測量所有營養參數來判定營養狀態。

卡爾森所採用判定湖泊營養狀態的 3 項參數，包括透明度、總磷及葉綠素 a，根據其收集之數據加以線性迴歸，參數相互間具有高度相關

性。因此，要判定湖泊營養狀態只需擇 1 參數檢測，再藉由其指數方程式計算可得，無需全數為之。當然，就透明度、總磷及葉綠素 a 三者而言，透明度不僅量測方式最為簡易，且如委託專業人士量測，價格也最為低廉，自然也就會成為首選的參數。

### 6.2 不適用情況

卡爾森所設計之「營養狀態指數

(TSI)」，在以下水質狀況並不適用：

- 對於含有大量非藻類顆粒物質的湖泊或高色度的湖泊，透明度可能會給出錯誤的 TSI 值。
- 水中生物質量之主要產出為附著的藻類或水生植物，而非浮游植物。
- 當磷並不是浮游植物生長的營養限制因子。

### 6.3 加總平均值是不宜的

如生物性營養狀態指數值與總磷營養狀態指數值不同的情況下，將這些不同數值加總求其平均值是不宜的，因為該平均值既不代表營養物濃度所預測的營養狀態，也不能代表根據生物標準所估計的生物狀況。

不過國際間仍時有所見將透明度、總磷及葉綠素 a 三者根據卡爾森推導營養狀態指數方程式所計算之數值，不論其數值間之差異性為何，一律取其加總平均值作為判斷依據。

卡爾森推導營養狀態指數方程式所計算之數值為取對數後之數值，再將取對數後之數值予以加總平均，其數值是否具有意義，值得商榷。例如再依特定環境內有 2 個音源，其音量分別為 70 分貝及 50 分貝，該特定環境內之平均音量應該不是直接取其加總平均而為 60 分貝。（註：分貝是通過把測量值與參考量值之比計算基於 10 的對數，再乘以 10。）

### 6.4 大自然也會發生優養化

湖泊或水庫集水區由於人為活動增加，帶入大量營養鹽，導致水體浮游動植物迅速繁殖，造成水體生態系變化，使水質嚴重惡化，這是屬於

人為的優養化。

不過湖泊於自然生態系中，因降雨逕流沖刷，導致富有營養鹽之地質基質或土壤流入水體，亦會逐漸造成湖泊水質優養化，此乃是自然生態系必然的演替過程。換言之，湖泊優養化並非只肇因於人為，實際上大自然也會發生的。

### 6.5 「營養狀態指數」與「水質指數」是不同的

「營養狀態指數」與「水質指數」是不同的，質量一詞代表了一種主觀判斷，最好要與營養狀態的概念分開。

優養化通常被視同於水質差，實際上，水質良莠與否的判斷，應取決於該水的使用方式和當地人的態度。例如，某水庫水質長年被列為「優養」類別，惟該水庫用水僅供農業灌溉使用，原則上，富有營養的水質用於農業灌溉，是優於被列為「貧養」類別之水源。

卡爾森認為營養狀態的定義及其指數應該是保持一個免於受到這種主觀判斷影響的框架，而在其中可以進行各種水質評估。此外，卡爾森希望「營養狀態指數」可以作為營養量測的標準及有價值的湖泊管理工具，也可以在湖泊系統的許多化學和生物組成部分之間進行比較，而這些組成部分與營養狀況有關。

## 7. 參考文獻

1. 行政院環境保護署全國環境水質監測資訊網，卡爾森指數，檢自 <https://wq.epa.gov.tw/Code/Business/Standard.aspx> (Dec. 15, 2019)



2. 行政院環境保護署全國環境水質監測資訊網，相關詞彙及定義—卡爾森指數(Carlson's TSI)，取自  
<https://wq.epa.gov.tw/Code/Business/Vocabulary.aspx> (Dec. 15, 2019)
3. 維基百科，優養化，檢自  
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%AF%8C%E8%90%A5%E5%85%BB%E5%8C%96> (Jan. 1, 2020)
4. 周國鼎(2019)，卡爾森「營養狀態指數(TSI)」方程式之正確性，自來水協會會刊，第38卷第4期，頁65-73
5. Carlson, R. E., A trophic state index for lakes, *Limnology and Oceanography*, V. 22(2), 361-369, March 1977
6. Carlson, R. E. (1984), The Trophic State Concept A Lake Management Perspective, *Lake and Reservoir Management*
7. Carlson, R. E. and J. Simpson (1996), A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods, North American Lake Management Society
8. Robert Carlson - Google Scholar Citations , Retrived from  
[https://scholar.google.com/citations?user=\\_0fG4ucAAAAJ&hl=en](https://scholar.google.com/citations?user=_0fG4ucAAAAJ&hl=en) (Jan. 5, 2020)
9. Trophic Classification of Texas Reservoirs, 2016 Texas Integrated Report for Clean Water Act Sections 305(b) and 303(d), Retrived from  
[https://www.tceq.texas.gov/assets/public/waterquality/swqm/assess/16txir/2016\\_trophic.pdf](https://www.tceq.texas.gov/assets/public/waterquality/swqm/assess/16txir/2016_trophic.pdf) (Jan. 5, 2020)