

# 廢水處理費用綜合分析

張玉明\*

## 摘要

廢水污染的防制或處理需要動用鉅大的費用。因此，廢水處理的執行或管理者應具備廢水處理費用的分析與計算方法，以利管理。本文根據國內外數據資料，分析並組成廢水處理費用與廢水流量、污染物輸入量、及處理程度等變數的方程式二則，分別用來計算廢水處理的建廠及操作費用。費用方程式是由一個流量函數、一輸入量函數、及一處理程度函數相乘而組成。以上三個函數的形式不同，三個變數未能歸一成一個去除質量的變數，顯示廢水處理費用的變化因多重變數的組合而定。本文的函數式是根據廢水處理各項原理與實際表現情形詳加分析而組成，完整合理，並且具有實用及經濟分析能力。

### 【關鍵字】

1. 廢水處理(wasterwater treatment)
2. 費用分析(cost analyses)
3. 建廠投資(capital investment)
4. 操作管理費(operation and maintenance costs)

---

\*大葉工學院環境工程系副教授

## 一、前　　言

人們生活因衛生需要而造成的污水，或是因事業生產而排放的廢水，是人類追求文明生活及經濟成長必然產生的問題。廢水排放到生活週遭的環境中，造成環境污染，可以轉而危及人們身體健康及環境往後的經濟利用，因此廢水污染必須加以防制或處理。而廢水污染防治或處理的措施，必須動用鉅大的費用，進而牽動許多經濟（學）方面的問題。

污染的來源可以追溯到某一個人或機構為主要生產者。為了達到社會的公平性，污染者付費的原則必須遵守之。目前在一般自由經濟及民主政治體制下，對於廢水污染防治較具代表性的實施方法，是由行政區域政府負責社區污水處理；事業廢水方面，由於其個別的廢水量較大，則由事業單位來做好污染處理，減少其污染的輸出。

有關污染改善費用的收付，在社區污水方面，仍由地方政府設立處理設施，以收費方式由污染者付費。此付費應得民意機構的監督，故其費率必須合理。另外事業單位因防治污染所付出的費用，必定會反映在其成品出售的價格中；如此提高產品的價格由消費大眾來吸收，亦達到使用者付費的原則。而廠商對於其產品銷售所面臨諸多的競爭，必得對其產品的價格費心控制，對於污染防治所付出之“代支性”費用高低的控制，當是廠商的責任。因此，事業廠商對於防治費用的分析，同樣必須更加注意。

根據上述討論，可見社會上兩個污染防治的主要執行單位對於污染防治費用分析與計算的方法都有迫切的需要；政府單位對於政策的制訂與推行，事業廠商對於生產管理，都應正確地掌握污染防治費用估算的方法。政府單位決策者或事業管理者對於廢水處理建廠、操作及管理費等，在獲得正確，可靠及易於瞭解的收據之後，才能減少他們對於廢水處理的疑惑，其環保的用心才足以落實。此外，管理者正確的決策提高其管理效率，對其個人的能力表現及社會整體形象都有幫助。

本文針對一般廢水處理的費用問題，作一綜合的分析。廢水處理費用與廢水流量、污染物輸入量（濃度）、及處理程度有關。本文參考國內外數據資料與各種表示方法，研判各別的原理與合理性，以建立國內廢水處理費用模式，

## 44 廢水處理費用綜合分析

並組成處理費用與上述各變數間的具體方程式；有了這些式子，則在各種廢水處理情況下，包括不同流量及不同處理方式等，其費用都可據以估算。

本文適用的範圍及於政府及事業單位等廢水處理執行者；對於國內個別業者而言，目前多是按照個案詢價，再以投標比價辦理。用這種作業方式或可找到較低的費用，但此費用不一定合理。另外對於要負責地區性環保決策的工作者來說，其面對較廣範的問題，當不能以個案方式處理。欲補正以上的缺憾，則要利用可行模式方程式的計算值來比照判斷詢得的費用是否在合理的範圍。本文所述的分析方法，以及由分析所得結論，能給廢水處理計劃管理人員作為一個正確的參考。此外，由於這些合理化費用函數的建立，亦可供作環境經濟分析的基礎。

### 二、處理費用的估算模式

處理費用包括投資費（Cap，即建廠與設備費）及操作管理費(Om)兩項，通常應該成立二組函數。廢水處理費用的函數應包括最少四個變數：一為流量(Q)，二為處理程度(S)，三為進流濃度(L)，四為處理方式(P)。

以上各個變數各有不同的性質，故在函數化時各有不同的處理辦法：首先在廢水流量Q方面，由於流量的連續性，且其對於廢水的量化直接而明顯，常為廢水處理費用函數的首要變數，可以引用的相關資料充足；其次，處理程度S雖為連續的實數量，但實際上是無法自由定量者，只能根據特定處理方式定義出有限個處理程度為指標數；進流濃度L是連續變數，且其對處理質量有關，應根據其對費用影響的合理性質分析之。另外，處理方式P為不連續量，甚難成為座標量，通常每個方式都要分別作成多個流量與處理費用的方程式來表達，因此必須歸納入其他變數中。關於處理方式此一變數將在“處理程度與處理費用”一節中說明。

對於以上的諸多項變數，最佳的處理效果是將之歸一成一個變數。本文希望達成的目標，是要求得污染物處理質量(M)與費用的關係。處理質量是廢水流量，處理流程，與進流濃度的乘積。因此，對於流量、處理程度及進流濃度

與處理費用的關係，應分別建立之。上述各項變數與費用的數學分析，以建廠費Cap為例，若以 $f_n$ 代表某函數，可以表示如下：

$$Cap_q = f_1(Q)$$

$$Cap_s = f_2(S)$$

$$Cap_l = f_3(L)$$

以處理質量(M)為變數時，則是 $Cap = f_{total}(M)$ 。因 $M = Q \times S \times L$ ，故得

$$Cap = f_{total}(Q \times S \times L)$$

由一般工程原理或經驗可以知道費用的影響因素如處理設備的大小、繁雜度等，卻與Q、S或L直接相關，因而可以獨立建立 $f_1$ 、 $f_2$ 或 $f_3$ 。物質質量雖是最基本的物理量，但在廢水處理中污染物質質量去除多少，卻可由以上變數控制；在數學上， $M = Q \times S \times L$ ，M反倒成為因變數，使得 $f_{total}(Q \times S \times L)$ 有可能無從求得。換句話說，根據這些f等函數，及應用不同的Q、S、L組合，可計算出相對的Cap；而組合中 $Q \times S \times L$ 形成的M值，才與該Cap值對應。 $M$ 對 $Cap(f_{total})$ 是否為唯一函數，要看Q、S、L在其各別函數( $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ )的組合中是否可以歸一成一個變數 $M_0$ 要達成這個要求有二個條件：一是 $Cap = f_1(Q) \times f_2(S) \times f_3(L)$ ；二是 $f_1(Q)$ 、 $f_2(S)$ 與 $f_3(L)$ 為單項式，且各式的指數皆相同。若不能達成這些要求，則不同的Q、S、L組合可能形成相同的M值，而計得的Cap卻可能不同。

根據上述討論，本文首先要分別建立 $f_1$ 、 $f_2$ 及 $f_3$ 。而Cap是以 $f_1(Q)$ 為主體， $f_2(S)$ 與 $f_3(L)$ 是 $f_1$ 的乘數，因而得到

$$Cap = f_1(Q) \times f_2(S) \times f_3(L) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (1)$$

以上是以建廠費Cap為例，而操作管理費Om的分析亦同。

本文針對數據資料呈現的現象，按照經濟學原理、環工單元原理及實際表現、與數學簡易合理等原則進行分析。換言之，分析的作業方式依次是：展開相關數據；檢討如何符合經濟及／或環工的原理；以最簡潔的曲線描述之。有關廢水流量 $f_1$ 、處理程度 $f_2$ 及負荷率 $f_3$ 三者的分析方法，分別詳述於後。

## 2.1 廢水流量與處理費用

廢水流量Q實際上是隨意變數。Q的大小，常是處理設施大小的決定因素；Q與處理設施大小對應，因此Q與處理費用可用某種連續函數來表示， $f_1$ 當可建立。本文引用國內外報導資料中，常見Q對費的數學模式是

的形式（C是費用，Q是廢水流量，A、b是常數）。式(2)函數在全對數座標中呈直線形狀。美國ECAS(Environmental Cost Analysis System，一個電腦專家系統) (Cunningham等 1986)及國內(1995)所用的模式是這種形式。另Steel And Mcghee(1979)以單位流量作費用的計算，即

$$\frac{dC}{dO} = f(Q) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

此  $f(Q)$  函數隨流量增加而遞減。這樣的函數與經濟學上的（邊際）需求曲線相等(Samuelson, 1995)，符合稀少律，即量少物貴之意。要使(2)(3)二式一致，要求式(2)中  $b$  應小於 1.0，即  $f(Q) = bA / Q^{(1-b)}$  可得式(3)的遞減函數。在此條件下，用式(2)的形式作為  $Q$  與處理費用的函數，符合經濟學上的即有定義。

除此之外，有美國EAP(1984)的模式以圖形表示，其在全對數座標中呈曲線形狀，表現出另一種函數形式，將於後述。

關於處理費用與廢水流量的關係，綜合以圖 1 表示之。圖 1 所顯示的資料包括美國EPA及ECAS書本著述各一則，另歐洲資料(IAWQ, 1993)一則；國內綜合資料一則。以上資料分別列舉說明如下。利用這種舉例說明方式，檢討各種表達方式的實用性，並用這些資料建立所需的 $f_i(Q)$ 方程式。

1.美國EPA就其經常補助地方建廠經費的經驗，得到許多的數據（1980年度資料），因此對於各種處理方式可以分別綜合成廢水流量與處理費用的曲線（未提供函數式）。其中活性污泥的建廠及操作管理費用曲線，在圖1的全對數座標中呈曲線形狀，與 $C = AQ^b$ 的形式不同；這是因為該系統考慮流量所帶來不同的處理需求。例如在正常情形下，以機械壓乾污泥；而流量低於1mgd（每日百萬加侖，約等於每日3,790立方公尺，CMD）時，污泥以乾燥

床處理可降低費用33%；超過10mgd時污泥以焚化處理則增加費用16%。這樣的模式已包括流量Q以外的變數，但其對費用的影響卻已歸入Q中。若照曲線以Q逕行公式化也可（原數據甚符合三階多項式），但是其意義不明顯，且無法分析其合理性。本文尚且利用不同變數的獨立特性，分別列出來分析之。

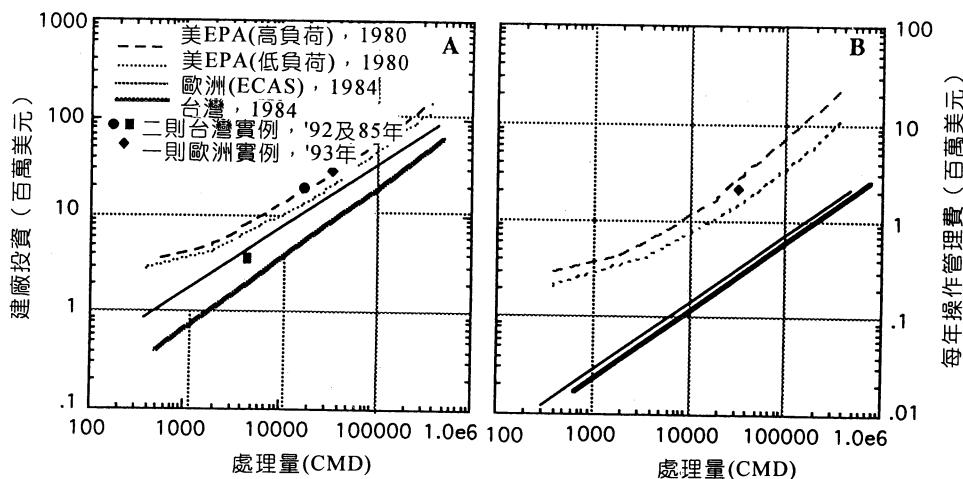


圖1 廢水處理建廠費及操作管理費與流量的關係。圖中表示活性污泥處理法個案，包括函數化及數據點多則。

本美國EPA資料是用城鎮污水廠(POTW)為基礎（工業廢水經前處理後可導入POTW）；有關工業廢水EPA是以較高進流BOD濃度來代表，因此引用本項資料作為工作業廢水處理費用的計算，還能適用、詳見“進流濃度與處理費用”一節的討論。

2. ECAS對廢水處理廠的建廠與操作費用的表示方法，符合 $C = AQ^b$ 的函數形式。ECAS是一則專家系統，可以讓使用者組配各種單元來計算費用，因此

## 48 廢水處理費用綜合分析

它對各單元的費用計算都得分別列出計算方程式。圖 1 中 ECAS 所表達的活性污泥費用，是串聯初沉、曝氣、終沉、及污泥濃縮而計得。若就該組合曲線取其方程式，則得標準活性污泥建廠費用方程式為：

$$Cap_q = 2.48 \times 10^{-2} \times Q^{0.603} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

而操作費用方程式為：

$$Om_q = 2.58 \times 10^{-4} \times Q^{0.674} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

式中 Cap 費用是以百萬美元計； Om 費用是每年百萬美元；廢水流量以 CMD 計。

上二式中  $b < 1.0$ ，在經濟學上的意義已說明，是本文中所稱的合理模式，因此本文的  $f_i(Q)$  函數即遵守這個模式。

本 ECAS 是 1984 年度資料（1972 年數據再以 Engineering News Records -ENR 指數修正）。方程式計得之建廠費用與 EPA 所列者比較相差約 1.5 倍；操作費用則相差約 3 倍。其中差異的原因之一是 EPA 案例包括污泥機械壓乾處理，ECAS 只列出掩埋，其費用甚廉。若以污泥處理費用佔總費用的 60% 估計，則二倍的差異還算合理。

ECAS 對各單元的費用計算都得分別列出計算方程式。工業廢水前處理常用的單元亦有各自的費用方程式。由於各單元的費用是以流量為變數，因此除了少數會改變流量的單元之外，需要前處理的工業廢水的總處理費用，是各串連單元費用的總和。

3.IAWQ 出版有關歐洲方面的廢水處理費用資料一則，是以每天單位流量的費用來表示者。IAWQ 的資料列於表 2。就僅有的 40,000CMD 單位價計算得一個數據點，一併繪於圖 1 中。由於只有一個數據點，僅供作價位參考之用。本項是 1993 年度資料，其與 1984 年度的 ECAS 資料相差 2.5 倍。除了幣值的時間因素之外，不同國家物價差異亦是可能的原因。

4. 關於廢水處理費用資料，在國內仍有不足。原因之一是國內大型的廢水處理廠建造起步不出十五至二十年，而較具規模者首以工業區廢水處理廠為主。此外，有關環保設施費用的差異性，在國內恐怕更為顯著，標準化的工作困難。雖然如此，國內具有專業規模的環工顧問機構還是回歸出廢水處理費用

方程式，以便在廢水處理實施規劃時作為費用估算之用。筆者訪問某大環工顧問機構(1995)，得到有關國內廢水處理廠建廠費用方程式，其形式與ECAS的 $C = AQ^b$ 相似。各處理方式的費用方程式如表1所示。表中方程式是根據1981年（民國70年）數據回歸而得。數據主要來源是當時工業區廢水處理廠建廠費用，因此以上方程式是根據一定數量的數據組成，但如是資料實是難能可貴，且甚符合本文之目的，為本文模式函數的根據。

在以上資料中，活性污泥法的方程式為

$$Cap_q = 1.41 \times 10^5 \times Q^{0.729} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

式中費用單位為新台幣元；廢水流量單位為CMD。根據本式計算所得，除於當時台幣與美元轉換率40.0，並調整1981年至1984年三年的物價（以每年6%計算，三年複合因數為 $(1.0 + 0.06)^3 = 1.2$ ），得到一條以美元為基礎的曲線，於圖1繪出。此曲線的數值與ECAS者相較約低1.5倍。以當時我國的物價與當時工程的層次，此差異應可接受。

表1 我國之各項廢水處理方式之建廠費用方程式

（民國70年價位）

處理型式	方程式	方程式號
初級處理	$Y = 3.16 \times 10^4 Q^{0.798}$	(7)
二級處理（活性污泥）	$Y = 1.41 \times 10^5 Q^{0.729}$	(6)
二級處理（滴濾池法）	$Y = 9.44 \times 10^4 Q^{0.743}$	(8)
深氧化渠法	$Y = 4.65 \times 10^4 Q^{0.801}$	(9)
高級處理	$Y = 4.65 \times 10^4 Q^{0.940}$	(10)
各處理單元		
過濾（二級處理後）	$Y = 2.32 \times 10^4 Q^{0.714}$	(11)
細篩（二級處理後）	$Y = 2.51 \times 10^3 Q^{0.902}$	(12)
混凝沉澱	$Y = 3.96 \times 10^3 Q^{0.883}$	(13)
活性碳吸附（三級處理）	$Y = 7.70 \times 10^4 Q^{0.732}$	(14)
生物硝化處理	$Y = 2.24 \times 10^4 Q^{0.767}$	(15)

## 50 廢水處理費用綜合分析

當今一般業者用每CMD值2.5萬（南部）至3萬（北部）元來粗估活性污泥的建廠費用。用式(6)計算10,000CMD流量建廠費用，得新台幣11,538萬元，即每CMD約值一萬元，故推估如今的廢水處理建廠價格約民國七十年的2.2倍至2.6倍。七十年至今（八十四年）為十四年。若使此期間價格上升2.2倍，則每年上升至少6% ( $(1.0 + 0.06)^{14} = 2.26$ )。根據行政院主計處的物價統計報告（主計處，八十四年），台灣地區營建工程物價指數在80至84年之間的總指數平均年增率約3.7%，但材料類的砂石及木材則年增超過9%，勞務費超過5.5%。此外，第(6)式有關用地價格不甚明確，一般工業區地價較區外市價低。因此若再考慮年來的地價變動，則式(6)價格修正到當今價位的係數為2.2，應符合坊間業者對於廢水處理建廠價格已有的認知。以當今價位表示，式(6)修正為

$$Cap_q = 3.1 \times 10^5 \times Q^{0.729} \quad \dots \dots \dots \quad (6')$$

關於國內的廢水處理操作管理費用的模式，則缺少資料。若再以業者對於廢水處理操作管理費用估算方法以每CMD若干元計算時，在全對數座標中的直線斜率為1.0，即 $C = AQ^b$ 式中的 $b$ 為1.0。為合於費用隨流量增加而遞減的原理，則 $b$ 應小於1.0；以 $b = 0.7$ 可略與ECAS者平均。用5,000CMD時，每CMD每日費用為四元作為基礎，可得國內廢水處理操作管理費用的方程式為：

$$Om_q = 1.88 \times 10^4 \times Q^{0.7} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

式(16)中費用單位是每年新台幣元，為當今價位；廢水流量單位為CMD。式(16)的數值除去轉換率；物價=2.0，台幣兌美元=40.0所得之商數，可成一直線如圖1B所示者，其數值幾乎與ECAS者重疊。

本項費用方程式以工業區廢水處理廠費用(式6)為基礎，應適用於工業廢水處理費用的計算無疑。但是在這裡應有二點值得注意：一、工業區廢水處理廠多接受經過前處理的工業廢水，且以往工業區廢水處理廠的設計，多少還是照生活污水處理的方法。二、有關一般業者對廢水處理費用的估算，仍是依據生活污水性污泥處理法為根據。以上二點如何影響本文的方程式在工業廢水處理上的適用性，將在以下各節的討論中，慎加考慮。

第(6)式即是本文要求的 $f_1$

$$f_1 = Cap_q = 3.1 \times 10^5 \times Q^{0.729} \quad \dots \dots \dots \quad (6'')$$

## 2.2 處理程度與處理費用

根據質量不滅的原則，所謂污染物處理，誠然是該物質物化狀態的轉換。因此欲處理多少質量的污染物，就必須提供相當的能量或物質作為轉換的因素或承接者。由此可看出污染處理量的多寡與費用可成一種比例關係。而除了這種直接費用之外，污染物處理通常要在人工的環境下進行，因此工程單位需要建造適當的反應設施或場所；此反應設施的簡易或繁雜直接影響效果（處理量）的良窳，亦牽涉費用的高低。這個討論引出污染物處理量（處理程度）與處理費用之間，須整理出其中關係，並加以模式化。

關於處理程度與處理費用之間的模式，文獻上的資料尚稱不足。Downing氏(1984)在作環境經濟分析時，使用污染物質去除量（以公斤BOD計）與費用的曲線（所用的數值為假設值，只重其走勢），是為一例。前述污染物處理程度(S)無法自由定量，因此有關污染物質去除量的問題要從另一角度來分析。

一般技術已成熟的處理單元常表現一致的去除率(R)；也就是說有一典型百分率的污染物質得以在處理單元中去除。（化工生產的效率亦用百分率表示）。各種處理單元對某污染物質的去除率範圍已是已悉知的知識，易於接受：如標準活性污泥法（經初沉、曝氣、終沉）的BOD去除率公認在90%範圍，是為一例。其他處理方式之去除率亦可查得，這點就是本文應用的根據。

各種處理單元(P)的費用與流量有關，造成許多個別的方程式。若在某固定流量之下，比較各種處理方式與常用處理方式（如活性污泥）的費用，可得一比例值。在同一系統之下，此種比例數據與物價基數、費用表示方法無關。經過這樣的處理之後，去除率與費用的關係是流量方程式的乘數。而流量與費用的方程式只要保持活性污泥一式即可（如第6式）。如此可得 $f_2(S) = f_2(R)$ ，另外處理方式(P)的許多費用方程式，則得到歸一；P變數包含R於中，P因而得以摒除。

從已有的國內外資料（已於上節引述）中，整理出處理方式、處理效率及與活性污泥比較的費用比值(R)，分別列於表2（我國，實例），表3（美

## 52 廢水處理費用綜合分析

國），及表4（歐洲）三表之中。這些數據代表不同的流量背景；另外以表1我國廢水處理費用方程式中，可以得到一定流量下的費用比值。圖2表示在 $Q = 10,000\text{CMD}$ 之下，BOD處理效率與活性污泥的費用比值：數值包括我國（表1公式）及美國EPA曲線（表3）所求得者。

圖2的數據點模式化的考慮，由數據點的走勢觀察，呈現處理率較低時費用和緩，高處理率時費用急速上升。若是為了M的歸一考慮，R與Q的指數應相同，即 $f_2(R) \propto R^{0.729}$ （式6）。但是 $R^{0.729}$ 呈向下變曲(convex)的形狀，不符實情。在此處即看出一個影響M歸一的地方，造成Cap不能成為M的唯一函數。

考慮可資適用且簡易的數學函數是指數函數(exponential)。經回歸結果指數函數無法在高處理率時達到較高的費用比例，尤其在100%處理率時只得有限低的費用，無法表現剩餘BOD處理的困難及其極高費用。為了表達處理率在100%時有極高（趨近無限）的相對費用，及規範處理率在100%時的不連續性（處理率-X軸的定義域在 $0.0 < X < 100.0$ ），可用下列函數式：

**表2 各種處理方式的BOD與SS去除率、其建廠費與活性污泥處理法費用比較值。  
本表列出有關我國實例一則及表1方程式計算數據一則**

處理 程序	去除率		與B項比 建廠費 <sup>②</sup>	與B項比 操作費 <sup>③</sup>	公式值 <sup>④</sup>
	BOD	SS			
調和池	30		0.25	0.14	
初沉池	55	80	0.74	0.4	0.4
活性污泥(B)	90	90	1		
二沉池(B+C)			0.85	1	1
高級處理*	95	95	1.33	1.72	2
污泥濃縮			0.51	0.28	
污泥消化(好氧)			0.91	0.49	
污泥乾燥床			0.49	0.26	

\*混凝+沉澱、過濾

②本表根據流量5,600CMD； $\text{BOD}_5 \sim 500\text{mg/L}$ ，我國例(1985)

③根據公式7、6及10計算，流量為 $Q = 5,000\text{CMD}$

表3 各種處理方式的BOD與SS去除率、其建廠及操作費與活性污泥處理法的費用比較值。本表列出有關美國計算例一則

處理 程 序	去 除 率		與B項比 建廠費	與B項比 操作費
	BOD	SS		
活性污泥 (B)	90	90	1	1
高級處理	95	95	2	2
曝氣氧化塘	60	60	0.1*	0.1
穩定池	70		0.85	0.8

\*氧化塘價格廉，惟易受地價的影響

本表根據流量10,000CMD；BOD<sub>5</sub>~210mg/L，美國例(EPA, 1984)

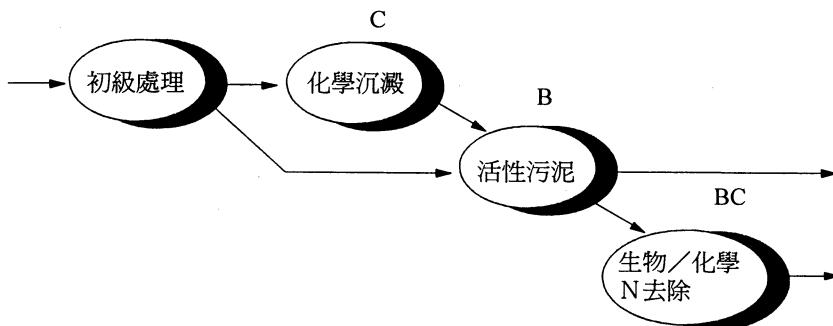


表4 各種處理方式的BOD與SS去除率、其單位流量之建廠及操作費、及建廠及操作費與活性污泥處理法的費用比較值。本表列出有關歐洲實例一則

處 理 程 序	去 除 率		建廠費 \$ m <sup>3</sup> /年	操作費 \$ m <sup>3</sup> /年	與B項比 建廠費	與B項比 操作費
	BOD	SS				
初級(P)	45	60	0.9	0.06	0.54	0.6
化學沉澱(C)	75	80	0.98	0.1	0.59	0.97
活性污泥(B)	90	90	1.65	0.11	1	1
(B)+(C)	90*	90	1.54	0.14	0.93	1.35
(B)+(C)+生物／化學N <sub>2</sub> 去除	95*	95	1.92	0.17	1.16	1.58

\*強化磷去除

本表根據流量40,000CMD；BOD<sub>5</sub>~250mg/L，歐洲例(1993)

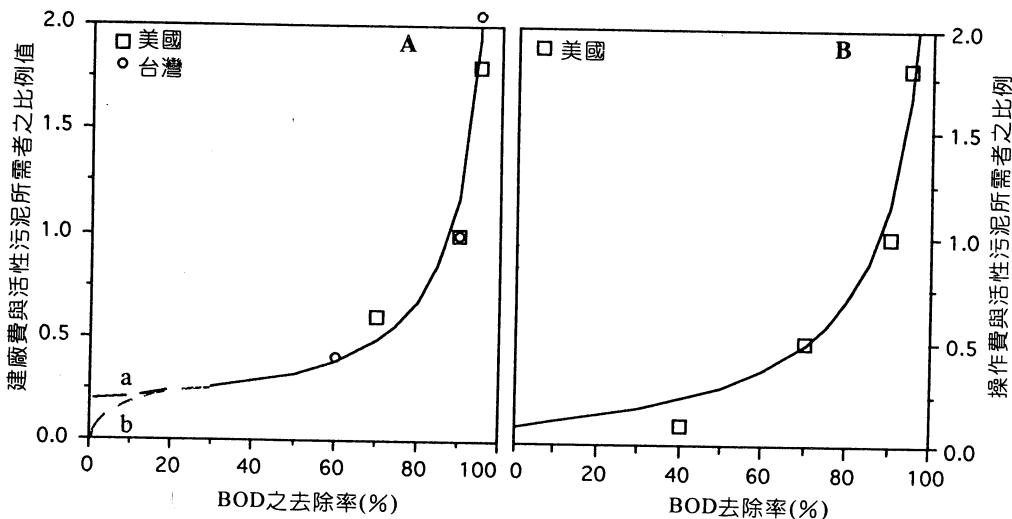


圖 2 BOD去除率與建廠及操作費的關係：圖中曲線是回歸數據點而得。縱軸所表示的費用是根據10,000CMD進流率時，某處理方式之費用與活性污泥處理法費用的比例值（詳見內文）

$$y = \frac{ax}{b-x} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

式(17)為本節所用的模式主體。圖 2 的數據點回歸到(17)式中，得到(18)及(19)式。

$$Cap_r = \frac{0.13 \times R_B}{102.1 - R_B} + 0.2 = \left( \frac{20.4 - 0.07R_B}{102.1 - R_B} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

$$30.0 < R_B < 100.0$$

$$Om_r = \frac{0.21 \times R_B}{107.9 - R_B} + 0.1 = \left( \frac{10.8 - 0.11R_B}{107.9 - R_B} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

上式之 $R_b$ 為BOD去除率（以百分比%計），Cap為建廠投資，Om為操作費用；二者皆為式(6)的比例乘數。

第(18)及(19)式的模式曲線繪入圖2中。由(18)及(19)式可算出當 $R_b$ 為零時，Cap及Om不為零。對於建廠費言，這點應不具合理性（無流量不須建廠）。圖2 A所示的數據點視為正確，但要顧及這些數據點，且要經過(0,0)點時依式(17)回歸的相依性不佳（ $R^2$ 決斷值低）；用圖2 A的b線則最理想，但是如此做法則是將就數學方程式（簡易方程式缺），其實際意義並未加強。因此，使用式(18)時X軸的定義域規定在 $30.0 < R_b < 100.0$ 。第(19)式Om不為零尚可接受；此式代表設廠之後，即需付出某種固定操作費用。

污染的另一重要指標為SS。一般處理方式中BOD與SS的去除相輔相成，以BOD代表與用SS極為接近。工業廢水方面，若用COD作為工業廢水有機污染的指標，除了部份生物難分解物質之外，一般COD的處理效率大致與BOD相當；提高難分解物質的處理效率要用附加處理單元，其費用以額外附加的方法處理。

各種處理方式的處理費用與流量的關係方程式 $f_i(Q)$ 雖然已歸納成同一種數學形式，但是由於 $f_i$ 常是非線性方程式，對於各種處理方式的費用比例計算，是兩式相除 $f_a^l(Q)/f_b^l(Q)$ 。相除的結果是否可以摒除流量，須加以研究：用式(2)為例，兩式相除可否得到一個常數，要看式中b指數是否相等。圖3是根據我國的方程式（表1）以及美國EPA資料所載的數據，繪出各種處理方式在不同流量下的費用，與活性污泥費用為基數的比值。圖3顯示上述比值與流量可以形成一種上升函數。因此，去除率與費用的模式仍應包括流量的因素在內；函數的自變數是去除效率 $R_b$ 與流量Q，其圖形是一個三維的曲面。（式17只是此曲面上的一曲線）。圖3所示數據的一致性不是很高，但此乃根據許多方面統計資料而得，加上環工的原理尚難分析這個現象是否正確<sup>(1)</sup>，無法棄之不顧，故本文持採信態度。而因此減低了數學上的簡易性，及增加建立三維模式的困難度，實為不得已。

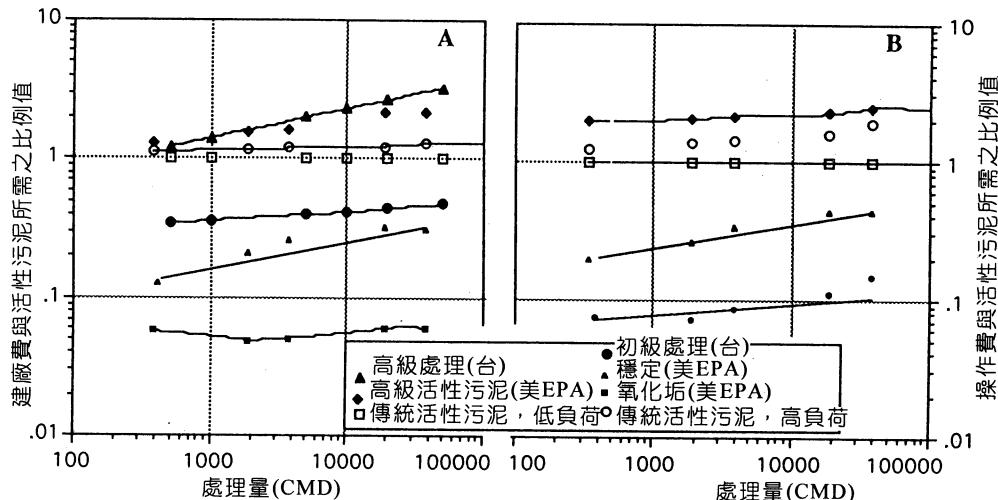


圖 3 各種處理方式的建廠及操作費，在各種流量下，分別與同流量活性污泥處理法的費用比例值。

由圖 3（對數座標下繪成直線）看出各處理方式的費用與基數的比例值呈現不同的斜率。以建廠費用而言，大致上是較高的處理程度斜率較高。因此，三維Cap函數採用 $R_b$ 與Q二函數相乘（相加時Q向斜面的斜率相同）。

圖 3 曲線斜率的計算，仍依各處理方式費用公式與活性污泥的方程式相除而得。如用  $C = AQ^b$ ，即  $C' = A_1 Q^{b_1} / A_2 Q^{b_2}$ ，而  $b' = b_2 - b_1$ 。如第(7)式  $b_2 = 0.94$ ，第(6)式  $b_1 = 0.73$ ，則  $b' = 0.94 - 0.73 = 0.22$ 。此即為圖 3 A 中最上方曲線的斜率，是各式中最高者。為取得較緩的斜率，採用美EPA所顯示者，其  $b'$  值約為 0.1。以第18式  $Q = 10,000\text{CMD}$  為基數，則 Cap 的 Q 因數  $P_c$  為

<sup>(1)</sup>可考慮的解釋是：同一處理方式，在大流量時，其處理效率提高。此說法尚難確立。

前述  $b' = 0.1$ ，則

$$P_c = 0.39Q^{0.1}$$

同理，有關操作管理費（圖3 b，一般曲線斜率皆較平緩）亦得

$$P_o = 0.57Q^{0.06} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

綜合第18及第21式，有關去除率與建廠費用的關係方程式，是前者乘於Q因數

$$\text{Cap}_r = \left( \frac{20.4 - 0.07R_b}{102.1 - R_b} \right) \times 0.39Q^{0.1}$$

$$= \frac{Q^{0.1}(7.9 - 0.03R_b)}{102.1 - R_B}$$

$$30.0 < R_b < 100.0$$

$$500.0 < Q < 50,000.0 \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

操作管理費亦同

$$\begin{aligned} \text{Om}_r &= \left( \frac{10.8 + 0.11R_b}{107.9 - R_b} \right) \times 0.57Q^{0.06} \\ &= \frac{Q^{0.06}(6.2 + 0.06R_b)}{107.9 - R_B} \quad \dots \dots \dots \quad (24) \end{aligned}$$

第23式代表本文要求的 $f_2$ ，亦即

$$f_2 = \frac{Q^{0.1}(7.9 - 0.03R_b)}{102.1 - R_b} \dots \dots \dots \quad (23')$$

第23式的圖樣，繪如圖4。圖中加繪個別的數據點，其適用性應屬合理。

## 58 廢水處理費用綜合分析

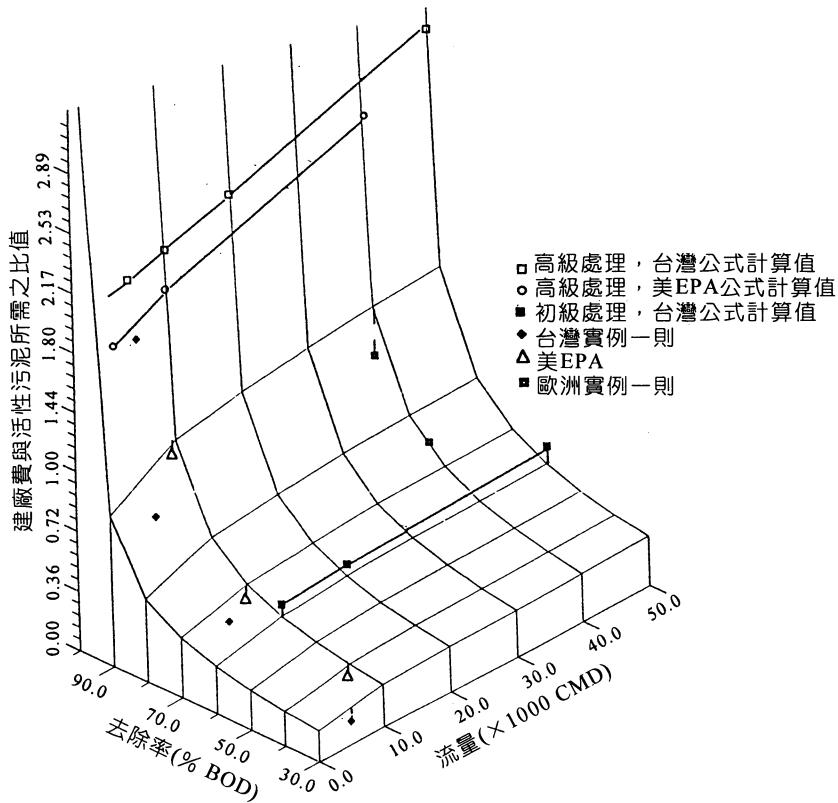


圖4 建廠費與BOD去除率及流量的三維函數關係

### 2.3 進流濃度與處理費用

污染物質的去除量是流量Q、去除率R及進流濃度L的乘積。前二者已經建立。致於L與的關係仍需探討。

一般廢水處理單元的尺寸(Sizing)，是由流量與進流濃度決定。流量與濃度相乘為負荷量，處理單元以單位負荷為設計基準時流量與濃度共同決定單元尺寸。然而一般單元還需遵守停留時間的規範，亦有只重水力負荷者，因此決定尺寸以Q為優先。例如沉澱單元用Q為決定性參數；活性污泥方面，按照一般設計規範，可估計 $L\text{-BOD}$ 大於300mg/l時才可能修正曝氣池尺寸<sup>(2)</sup>。根據註2的(a)式，略見 $\text{Size} = f_4(L \times Q)$ ，而費用 $= f_s(\text{size}) = f_5(L \times Q)$ 。遵照本文的要求，組成 $f_3$ 方程式仍要使用一個修正值來修正Q費用函數 $f_1$ （即用一個以1.0為基數的因子來乘於Q費用函數）。

費用 =  $f_5(L \times Q) = f_1(Q) \times f_3(L)$ ，則  $f_3 = f_5(L \times Q) / f_1(Q)$ 。 $f_5$ 的形式尚無資料可循，相對地  $f_3$  亦要根據數據資料建立之。根據美國EPA的資料（圖1），傳統活性污泥的BOD為210mg/l，高率活性污泥的BOD則為1,000mg/l。二者的費用在圖3中有所比較：建廠費用方面，二者相較為1.25；操作管理費用為1.35。（由圖3可看出此比值與流量Q的關係不明顯）。在此二數值當中，相關數據則缺少。 $f_3$ 是  $f_5$ 與  $f_1$ 相除，已知  $f_1$ 為非線性，因此判斷在  $L = 210$  與  $1,000\text{mg/l}$  之間的  $f_3$  應非直線遞增，且在較低  $L$  階段的影響較微，向上彎曲（Concave）。考慮  $L$  修正的最簡易曲線方程式，應屬拋物線（其他函數一如指數函數－無法達到要求的曲度）。要求  $f_3$  與  $f_1$  同形式以達  $Q$ 、 $S$ 、 $L$  歸一成  $M$  的目標，在此也無法完成。

$$Cap_i = 1.0 + 2.48 \times 10^{-7} \times L^2 \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

L為進流BOD濃度，mg/l

以上爲本文要求的 $f_3$ 函數，亦即

以上所示進流BOD濃度為1,000mg/L者，美國EPA用來代表工業廢水；因此，若處理前與處理後的BOD與COD的比值相同，則工業廢水的處理效率可以同樣用BOD來表示，其費用已可由上式一併表達。

## 2.4 處理費用綜合方程式

綜合以上三節的分析，可得廢水處理建廠費用，與處理建廠操作管理費用的完整方程式，即如式1

綜合整理如下：

<sup>(2)</sup>以設計條件：F/M = 0.3，MLSS = 3333mg/l，HRT = 0.3days；

$$\text{满足 } F/M \text{ 要求 : } \frac{L \times Q}{3333 \times V} = F/M = 0.3V = 1.0 \times 10^{-3} LQ \quad (a)$$

$$\text{HRT需求: } V \geq 0.3Q \quad (b)$$

(a)=(b),  $1.0 \times 10^{-3}LQ \geq 0.3Q$ , 使得

$L \leq 300 \text{ mg/l}$

— 2 —

## 60 廢水處理費用綜合分析

$$\begin{aligned} \text{Cap} &= \frac{Q^{0.1}(7.9 - 0.03R_b)}{102.1 - R_b} \times (1.0 + 2.48 \times 10^{-7} \times L^2) \times (3.1 \times 10^5 \times Q^{0.729}) \\ &= Q^{0.829} \left( \frac{7.9 - 0.03R_b}{102.1 - R_b} \right) \times (3.1 \times 10^5 \times 7.7 \times 10^{-2} \times L^2) \quad \dots \dots \dots \quad (27) \end{aligned}$$

再整理得

$$\text{Cap} = Q^{0.829} \left( \frac{291.4 - R_b}{102.1 - R_b} \right) \times (8.5 \times 10^3 \times 2.1 \times 10^{-3} \times L^2) \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

若以  $M = Q \times L \times R_b \times 10^{-5} \text{kg/day}$  為 BOD去除量（每天公斤量），則式 (28) 為

$$\text{Cap} = M \left( \frac{291.4 - R_b}{102.1 - R_b} \right) \left( \frac{8.5 \times 10^{-2}}{Q^{0.171} \times L \times R_b} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (29)$$

第29式顯示Cap無法摒除Q、R及L而只為M的函數。

有關操作管理費用則為

$$\text{Om} = Q^{0.76} \left( \frac{98.2 + R_b}{107.9 - R_b} \right) \times (1.2 \times 10^3 \times 5.8 \times 10^{-4} \times L^2) \quad \dots \dots \dots \quad (30)$$

第28式的圖形繪於圖5。圖5以除BOD公斤數M為橫座標，然而費用變化則要追隨Q、R及L的軌跡。Q、R或L三個變數對造成M的成長率相等 ( $\frac{\partial M}{\partial Q} = \frac{\partial M}{\partial R} = \frac{\partial M}{\partial L}$ )，但各自對費用的影響率不同 ( $\frac{\partial \text{Cap}}{\partial Q} \neq \frac{\partial \text{Cap}}{\partial R} \neq \frac{\partial \text{Cap}}{\partial L}$ )，因此當其他二者保持固定時，此三個變數在圖5中各別的曲線斜率差別甚巨。Q、R及L對費用的邊際效應值得深入探討。

由圖5可見傳統活性污泥( $Q = 10,000 \text{CMD}$ ；進流BOD = 200mg/l，BOD去除率 = 90%)的建廠費用每CMD約為2.9萬元。另外有關操作管理費用方面，由式(30)可計算得每CMD每日費用約為3.86元；以上數據與前述當今環工業者的估價大致相符。

有關工業廢水如何適用以上方程式的問題，應在這裡綜合討論。本文根據之一美國EPA的模式，是用較高的BOD進流濃度來代表工業廢水。若處理前與

處理後的BOD與COD的比值相同，則工業廢水的處理費用可直接用本文的方程式來計算；若處理前後的比值不一，則應用本文的方程式當要轉換成爲BOD處理效率來代入。難處理的工業廢水COD需要增加前處理或附加處理時，Q應保持不變，後處理的進流濃度經過調整後計算費用；整體費用則是各單的費用相加。

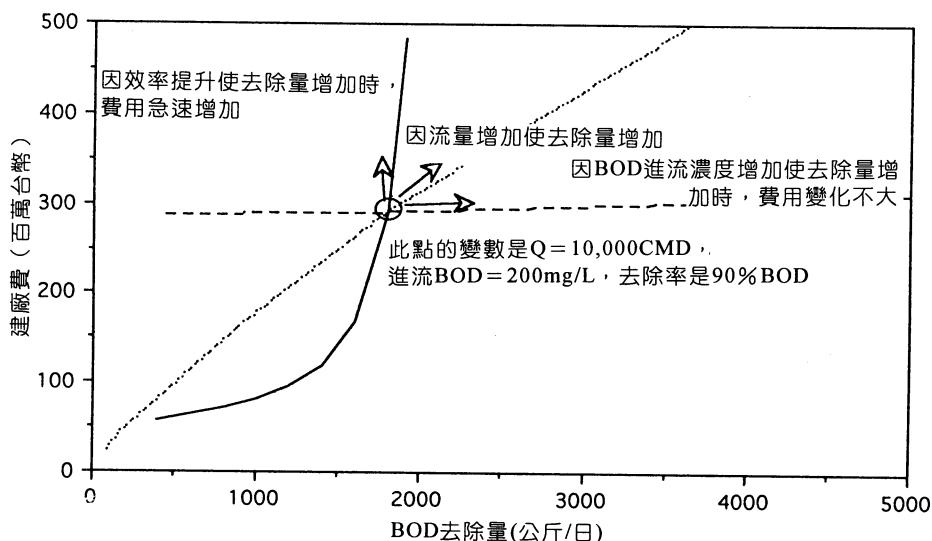


圖5 建廠費與BOD去除質量的函數關係。BOD去除質量由進流濃度、去除率及流量組成，但每個變數各自對費用有不同的影響。

### 三、結論

經過詳細研讀分析國內外資料，關於廢水處理費用的模式，得在本文中建立。代理本模式的具體計算方程式可供作實際應用；其實用性與廠商按個案詢

價不一樣，而是對於一個廢水處理計劃，在一額定流量與處理（程度）要求之下，管理者都應該可以根據如同本文的費用方程式，計算得一個可資參考的資訊。本文所述的分析方法，以及由分析所得的結論，能給相似情況工廠管理人員作為一個正確的參考。

廢水處理費用是多個變數的函數，一般以去除量為單一變數的函數應屬簡化作業的結果。本文對廢水處理各項原理與實際表現情形詳加分析而組成了多個變數的函數式，其分析結果與單一變數式不同。本文的分析堪稱完整合理，因此較之單一變數的簡化式會有深入的解析能力，對於廢水處理經濟分析亦呈不同的結果，值得深入探討。有關本節將另文討論。

## 參考文獻

1. 不具名，個人溝通資料，台北，1995年3月。
2. 行政院主計處，“物價統計月報”，第289期，八十四年一月。
3. IAWQ. (1993). "Looking over the environmental legacy." Water Quality International, No.4, P.17.
4. Cunningham V.L, Patterson J.W. and McGough J.P. III. (1986). "Environmental Cost Analysis System," Van Nostrand Reinhold Co. New York.
5. Downing P.B.(1984). "Environmental Economics and Policy," Little, Brown and Co., Boston.
6. J.M. Motgomery consulting Engineers, Inc.(1985). "Waste Treatment Principles and Design," John Wiley and Sons, New York.
7. Samuelson P.L., and Nordhaus W.D.(1995). "Economics," McGraw-Hill Book Co., New York.
8. Steel E.W., and McGhee T.J.(1979). "Water Supply and Sewerage," McGraw-Hill Book Co., New York.
9. US EPA (1984). "The Cost Digest: Cost Summaries of Selected Environmental Control Technologies," EPA-600/8-84-010 Washington DC, October 1984.