

迷你管柱吸附之表面擴散模式

顏有利* 王根樹** 吳敏成*** 涂瑞澤***

*大葉大學環境工程學系

***大葉大學食品工程系暨研究所

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

**國立台灣大學公共衛生學研究所

臺北市羅斯福路四段 1 號

摘要

台灣地區的水源普遍遭受有機物污染，水中有機物的存在會影響淨水處理之加氯消毒程序。為確保飲水之品質，以活性炭吸附飲用水中之有機物為最常用的方法之一。本研究之目的是建立迷你管柱吸附模式來描述活性炭對飲用水中微量有機物的吸附，並探討活性炭用量、水樣流量、擴散係數等對吸附量的影響。研究方法為利用有限差分方法將微量有機物於活性炭迷你管柱中之質傳方程式，重新改寫為一階聯立微分方程式，然後以 Runge-Kutta fourth-order method 求解。再與實驗室中迷你管柱實驗之結果比較，校正模式之參數；推求最佳表面擴散係數、介面膜傳輸係數及等溫吸附曲線常數。模擬的貫穿曲線與實驗所得之貫穿曲線有相似的趨勢。

關鍵詞：活性炭，微量有機物，吸附，迷你管柱試驗，表面擴散模式

A Surface Diffusion Model for Adsorption in A Rapid Small Scale Column

YEOU-LIH YAN*, GEN-SHUH WANG**, MIN-CHENG WU***, and JUI-RZE TOO***

**Department of Environmental Engineering, Da-Yeh University*

****Department of Food Engineering, Da-Yeh University*

112, Shan-Jeau Rd., Da-Tsuen, Chang-Hwa, Taiwan

***Department of Public Health, National Taiwan University*

1, Jen-Ai Rd., Sec. 1, Taipei, Taiwan

ABSTRACT

Most of Taiwan's water resources are polluted by organic matter, which disrupts the chlorination process in water treatment. To assure the quality of drinking water, the adsorption by activated carbon is one of the most commonly used methods to remove organic matter. The purpose of this study was to develop a mini-column adsorption model for removal of trace organic matter in drinking water by activated carbon. The effects of dosage, flow rate and diffusion properties on adsorption capacity were explored. The finite difference method was introduced to rewrite the

transport control equation into a system of first-order differential equations, which would then be solved by the Runge-Kutta fourth-order method. Simulation results are compared to those of rapid small-scale column tests (RSSCT). The best fitted values for column diffusion and surface diffusion coefficients, and isotherm adsorption constants were obtained by calibrating the model to experimental data. This model can be served as a guide to design experiments and to estimate pertinent parameters.

Key Words: activated carbon, trace organic matter, adsorption, rapid small scale column test (RSSCT), surface diffusion model

一、前言

水資源的開發與利用，隨著人口與工業快速成長而巨幅增加。相對的，水體受污染的情況也日益嚴重。典型之活性炭去除飲用水中微量有機物結合傳統之混凝、沈澱、過濾程序，其方法包括(1)將粉狀活性炭(PAC)加入混凝池之完全混合反應槽(CSTR)和(2)利用吸附管柱以粒狀活性炭(GAC)之推流式反應槽(PFR)兩種，活性炭吸附有機質的量直接影響飲用水之品質，因此如何有效的提高活性炭之吸附量乃成為活性炭應用研究之重要課題。利用活性炭吸附管柱模型來探討水力停留時間和活性炭吸附量之相關性，可作為實廠設計和操作之依據；然而模型廠操作至活性炭吸附飽和往往需要很長的時間，而利用迷你管柱進行活性炭吸附之研究，可於短期內達吸附飽和，其效果與模型廠同[5]。

均勻表面擴散模式(homogeneous surface diffusion model, HSDM)應用在預測活性炭去除有機物的吸附速率已有多年[7-11]，而且此模式常用來描述有機質自混合液中進入活性炭固體孔隙內吸附之動力行為。Fettig 和 Sontheimer [7] 以 HSDM 來描述灰黃黴酸中不同成分之吸附情形，有相當不錯的結果。被吸附物質自混合液傳輸經過活性炭表面介面膜層(liquid film layer)後，進入活性炭中之孔隙，再藉由孔隙內表面擴散作用，進入孔隙之內部而被吸附，此現象可用 HSDM 來描述，如圖 1 所示。當被吸附質自混合液擴散經過介面膜層，假設在被吸附質與活性炭表面有短暫的平衡存在，並假設被吸附質隨後藉由濃度梯降局部地沿著活性炭顆粒孔隙內部之表面而擴散，且被吸附質移動的行為僅藉由擴散來進行，並遵循 Fick 第一定律。

建立模式之目的，主要是希望模式能運用來解決或補足實驗上無法得到之訊息，應用模式之結果可作為實驗設計之參考，並可作為實廠和操作之依據。有關迷你管柱吸附情形之探討，在實驗部份，王 [1] 以迷你管柱探討不同管徑、

初始濃度等對活性炭吸附量之影響。本研究提出迷你管柱吸附之表面擴散模式，再與迷你管柱實驗之結果相比較，透過模式參數之檢定與驗證，求取最佳之模式參數組合，以推估活性炭吸附微量有機物之特性。

二、數學模式

圖 1 為迷你管柱的示意圖，右下為活性炭顆粒表面擴散模式之示意圖。假設在迷你管柱中僅有軸向的濃度梯降，所以微量有機物於迷你管柱內，活性炭顆粒空隙之混合液的傳輸變化可表示為：

$$e_B \frac{\partial C_B(t, y)}{\partial t} = e_B D_B \frac{\partial^2 C_B(t, y)}{\partial y^2} - e_B v \frac{\partial C_B(t, y)}{\partial y} - (1 - e_B) A(t, y) \quad (1)$$

其中

$C_B(t, y)$ = 微量有機物於活性炭顆粒間空隙混合液中之濃度

v = 混合液之流速

D_B = 微量有機物於活性炭顆粒間空隙混合液中之擴散係數

$A(t, y)$ = 時間 t 時，於 y 處每單位活性炭體積吸附微量有機物之速率

e_B = 管柱內孔隙度

欲解式(1)，尚需初始條件及邊界條件。在時間 $t = 0$ 以前，假設迷你管柱充滿純水(不含任何有機物)，因此初始條件可寫成

$$C_B(0, y) = 0 \quad (2)$$

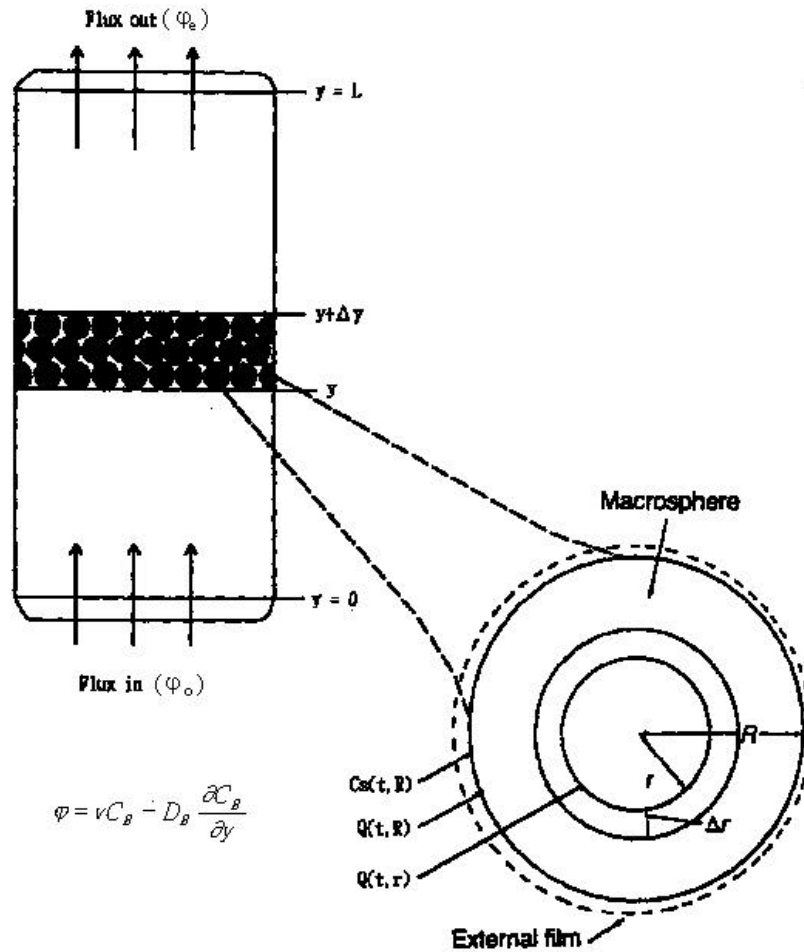


圖 1. 表面擴散模式之圖示

此外，假設微量有機物在迷你管柱兩端以外的範圍之擴散可以忽略，則其邊界條件可寫成 [9, 12]

$$vC_B(t, 0^-) = vC_B(t, 0^+) - D_B \frac{\partial C_B(t, 0^+)}{\partial y} \quad (3)$$

$$C_B(t, L^-) = C_B(t, L^+) \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_B(t, y)}{\partial y} \Big|_{y=L} = 0 \quad (5)$$

上式中 L 表示迷你管柱內活性炭吸附床的高度。以上的邊界條件是基於濃度與流通量的連續性而得。

每單位床體積之活性炭吸附微量有機物的速率， $A(t, y)$ ，亦可表為微量有機物傳輸至活性炭內之速率，其傳輸速率可以如下的方程式表示

$$A(t, y) = \left(\frac{3k_f}{R}\right)(C_B - C_S)_{r=R} \quad (6)$$

其中 C_S 為微量有機物於活性炭顆粒表面之濃度，而 k_f 為介面膜質傳係數。

假設表面擴散通量遠比孔隙擴散通量大（被吸附物質迅速擴散至吸附劑表面而被吸附），吸附為均質，且遵循 Fick 第一定律，則微量有機物於活性炭顆粒孔隙內之表面的傳輸變化可表示為：

$$\frac{\partial Q(t, r)}{\partial t} = D_S \left(\frac{\partial^2 Q(t, r)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial Q(t, r)}{\partial r} \right) \quad (7)$$

其中 $Q(t, r)$ 表示微量有機物被活性炭孔隙表面吸附之量，而 D_S 為孔隙表面擴散係數，欲解式 (7)，尚須初始條

件及邊界條件。在時間 $t = 0$ 以前，假設迷你管柱之活性碳孔隙內不含任何有機物，因此初始條件可寫成

$$Q(0, r) = 0, 0 \quad (8)$$

此外，假設活性碳中心並沒有負荷，且固、液介面為連續流況，停滯介面膜中擴散通量可以用線性推動力來估算，則其邊界條件可寫成 [6]

$$\frac{\partial Q(t, 0)}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

$$D_S \frac{\partial Q(t, R)}{\partial r} = \frac{k_f}{r_S} (C_B - C_S)_{r=R} \quad (10)$$

其中 r_S 為活性碳密度 $[g/cm^3]$ ， k_f 為介面膜傳輸係數 $[1/min]$ 。

為聯合固相與液相中各等式，求出貫穿曲線之濃度變化， $C_S(t, R)$ 必須以 $Q(t, R)$ 之函數表示，因此須假設在活性碳表面有局部的吸附平衡存在，而以非線性之 Freundlich 等溫吸附線表示如下：

$$Q(t, R) = K_F [C_S(t, R)]^n \quad (11)$$

其中 K_F 為等溫吸附曲線常數。

三、研究方法

(一) 迷你管柱實驗 (rapid small scale column test, RSSCT)

本實驗所用的活性碳是 Nacalai Tesque (Tokyo, Japan) 粒狀活性碳。先以鉢磨碎，再以篩網過濾，所用的粒徑為 70×100 (通過 70 mesh 篩孔，但通不過 100 mesh 篩孔，平均粒徑 $180 \mu m$) 水樣是台北板新與六堵水廠處理過 (但尚未加氯消毒) 的水。實驗流程如下：

1. 先將水樣以孔徑為 $0.45 \mu m$ 濾紙過濾，以免水樣中較大固體顆粒堵塞活性碳管。
2. 取適量的活性碳裝於迷你管柱中，兩端以玻璃棉、玻璃砂固定。
3. 水樣置於 10 L 的玻璃瓶中，放入攪拌石，置於攪拌器上，以 HPLC pump 將水樣泵經過迷你管柱。
4. 在管柱出口採集水樣，分析總有機碳 (TOC)，其頻率為

每天二至三次。TOC 的分析是用總有機碳分析儀 (Shimadzu TOC 5000A) 進行。

實驗裝置如圖 2 所示，詳細實驗流程參看文獻 [1]。

(二) 模式參數搜尋

本研究係利用有限差分方法，將微量有機物在活性碳迷你管柱中之傳輸控制方程式 (transport control equation)，式 (1)，重新改寫成一階聯立微分方程式，搭配式 (7) 與 (11)，然後以 Runge-Kutta fourth-order method [10] 加以求解。將電腦模擬所得結果和迷你管柱實驗數據相比較，校正模式之參數，以推求得最佳模式參數組合。其步驟如下：

1. 假設於吸附過程中，孔隙表面擴散是速率控制因素， K_F 和 n 是以批次實驗所得之等溫吸附曲線常數 [3]，利用模式結果與實驗數據推求孔隙表面擴散係數 D_S 。
2. 假設於吸附過程中，表面擴散與介面膜傳輸皆是速率控制因素， K_F 和 n 仍以批次實驗的結果所得，利用模式推求表面擴散係數 D_S 與介面膜傳輸係數 k_f 。
3. 因本實驗之吸附並未達到平衡，故調整等溫吸附曲線常數 K_F 和 n ，使模擬結果更接近實驗數據，以推求得最佳參數。於推求最佳參數的過程，將比較模擬結果和實驗數據，以不同之參數值輸入模式，求取最小均方根 (value of the minimization function, FMIN)，作為調整參數大小之參考。最小均方根的計算如下所示：

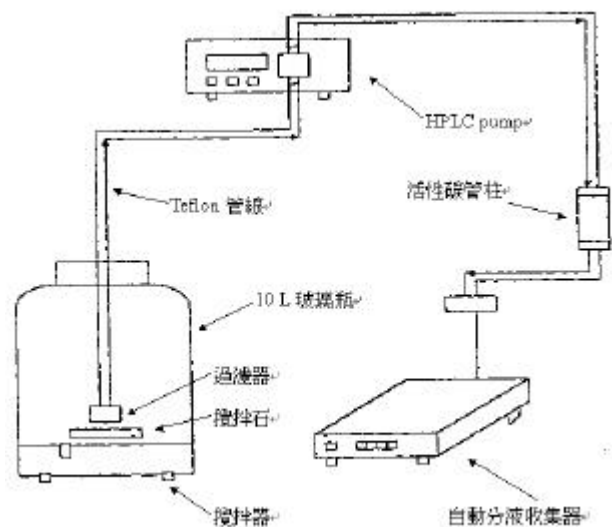


圖 2. 迷你管柱 (RSSCT) 裝置 [1]

$$FMIN = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{i,model} - C_{i,measured})^2}{N}} \quad (12)$$

其中 $C_{i,model}$ 及 $C_{i,measured}$ 分別為在同一時間的模擬值與實驗值，而 N 為樣本數。

四、結果與討論

(一) 模式相關參數靈敏度分析

通常利用數值方法解微分方程式時，需考慮時間間距 (t) 大小對模式穩定性之影響。若 t 太小則模擬所需時間增加；若 t 太大則會造成模擬值之誤差增大，而得到一個不正確之解，影響模式之穩定性，因此，選擇恰當的 t 是非常重要的。

在選擇 t 大小時，必須先面對一些相矛盾的因素，譬如， t 必須小到使模擬結果準確到足以滿足問題所需，但 t 又不能太小，使執行時間能減少。為了滿足以上縮短時間與提高準確度兩方面的考量， t 大小之選擇，可由其誤差是否可以被容忍來決定。如圖 3 所示，三條模擬之貫穿曲線所用之 t ，分別為 0.0125、0.025 及 0.05 min。若以 t 為 0.0125 min 模擬所得之貫穿曲線為基準， t 為 0.025 min 所得的貫穿曲線最小均方根 (FMIN) 值為 0.003081，而 t 為 0.05 min 之貫穿曲線所得的 FMIN 值則為 0.00853，兩者之 FMIN 值差距相當小，故選擇 0.05 min 當做模擬之時間間距 t 是合適的。

藉由模式相關參數之靈敏度分析，可得知模式中各參數對模擬結果影響程度，且經由此步驟之分析，可求得模式之最佳參數組合，用來推估最佳參數組合所需之實驗數據為板新水廠水樣所做之吸附貫穿曲線。各最佳參數分別為：管柱擴散係數 D_B 為 $7.63E-5$ (cm^2/min)，表面擴散係數 D_S 為 $5.5488E-16$ (cm^2/min)，介面膜傳輸係數 k_f 為 $8.9735E-3$ ($1/min$)，Freundlich 參數 K_F 為 875.3 ($mg/g_{GAC})(cm^3/mg)^{1/n}$ ， n 為 1.23。該最佳參數組合最小均方根 (FMIN) 為 $6.22714E-2$ ，其貫穿曲線如圖 4 所示。

表 1 所列為模式中各參數值改變 $\pm 2\%$ 對模擬結果之影響。Freundlich 參數 n 改變 $\pm 2\%$ ，其平均偏差絕對值為 $8.59895E-3$ ，影響模擬結果最為顯著，在模式相關參數中，可謂最靈敏，其次為 k_f ，又以 D_B 最不靈敏。當 D_B 值設為 0 時，模式之模擬結果所得最小均方根只改變 $1.0E-7$ ，故管柱擴散係數 D_B 為最不靈敏。為推求最佳之參數組合，因

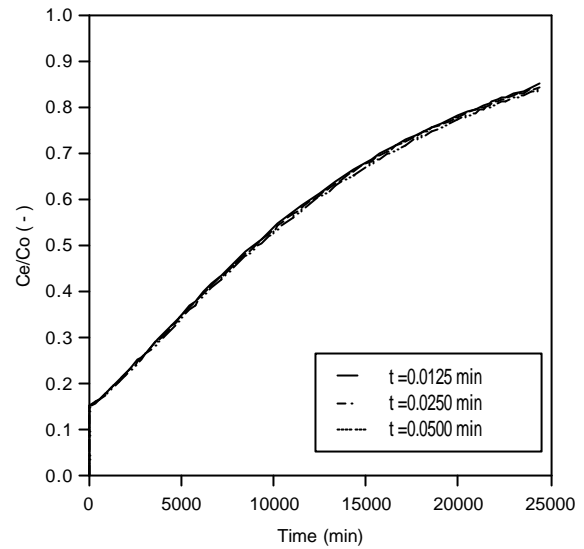


圖 3. 表面擴散模式中，使用不同時間間距 (t) 所得貫穿曲線

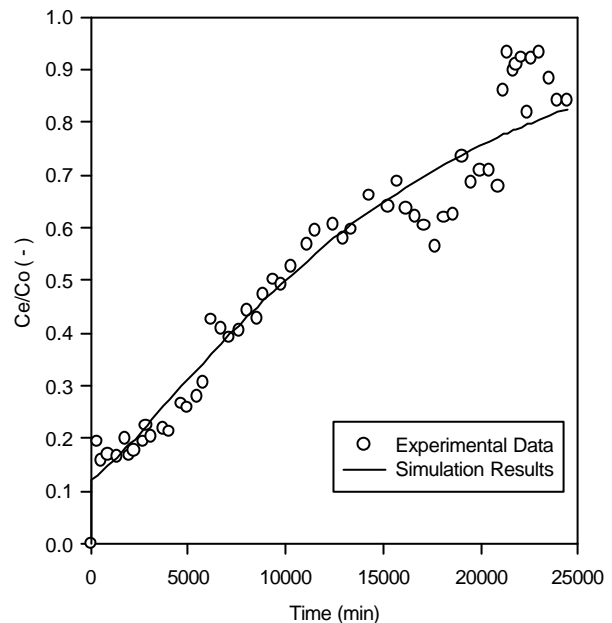


圖 4. 表面擴散模式之最佳參數組合所得的貫穿曲線 [1]

此，所得之表面擴散係數 D_S 之參數值相當小，且當改變表面擴散係數 D_S 值 $\pm 2\%$ ，其偏差值並無改變，其原因可能是因為本研究之靈敏度分析所用之實驗資料有誤差，以致表面擴散係數 D_S 改變 $\pm 2\%$ ，而偏差值並未改變。實驗誤差來自於 TOC 分析儀之不穩定及實驗過程中可能有小顆粒的活性碳流失所致。未來於實驗資料應用時，將利用移動平均 (moving average) 加以適當的修正，應可克服此問題。根

表 1. 表面擴散模式相關參數之靈敏度分析

Parameter	Percentage of Change	FMIN	Deviation	Mean Deviation
D _B	+2	6.22714E-02	0.00000E+00	0.00000E+00
	-2	6.22714E-02	0.00000E+00	
	+2	6.22714E-02	0.00000E+00	
D _S	+2	6.22714E-02	0.00000E+00	0.00000E+00
	-2	6.22714E-02	0.00000E+00	
	+2	6.30409E-02	7.69500E-04	
k _r	+2	6.22714E-02		6.19100E-04
	-2	6.27401E-02	4.68700E-04	
	+2	6.28039E-02	5.32500E-04	
K _F	+2	6.22714E-02		2.88550E-04
	-2	6.23160E-02	4.46000E-05	
	+2	7.14706E-02	9.19920E-03	
n	+2	6.22714E-02		8.59895E-03
	-2	7.02701E-02	7.99870E-03	

據靈敏度分析可知，微量有機物大部份都在活性碳顆粒外層被吸附，活性碳顆粒深層並無太大之吸附量。

(二) 迷你管柱管徑與微量有機物初始濃度對貫穿曲線之影響

為探討迷你管柱管徑尺寸對貫穿曲線之影響，本研究改變模式中之管徑尺寸（填充床長度亦會不同），而其它之操作條件則完全相同，再進行模式之模擬。如圖 5 所示，三條模擬所得之貫穿曲線，其迷你管柱之管徑尺寸分別為 0.3、0.4 及 0.5 cm。由於活性碳填充量固定，管徑較大時長度較短，管徑較小時，其長度較長，而水樣在活性碳床的平均滯留時間則一樣，所以其貫穿曲線完全一致，對吸附量並無影響。迷你管柱之管徑尺寸大小並不會對貫穿曲線有所影響。圖 6 為實際實驗中，只針對管徑尺寸做調整（填充床長度也會不同），其它操作條件並未改變所做之貫穿曲線圖，由此圖中兩條貫穿曲線幾乎重疊的情況，可知迷你管柱實驗中，若改變管徑尺寸並不會影響吸附行為。由實驗結果與模擬結果之比較可知，迷你管柱管徑尺寸並非影響吸附之因子。

進流水中微量有機物之初始濃度與貫穿曲線的關係，如圖 7 所示，可知，當微量有機物之初始濃度改變時，其貫穿曲線也會跟著變化。由此圖可看出，當時間為 5,000 min 時，

微量有機物的初始濃度為 0.8 mg/L 之貫穿曲線，其出流水濃度與進流水濃度之比值為 0.1778；初始濃度為 1.6 mg/L 之貫穿曲線，其出流水濃度與進流水濃度之比值為 0.1650；初始濃度為 2.4 mg/L 之貫穿曲線，其出流水濃度與進流水

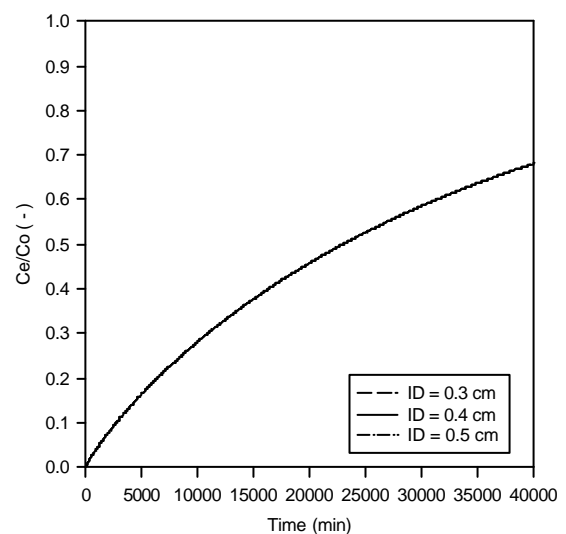


圖 5. 表面擴散模式中，使用不同管徑所得之貫穿曲線

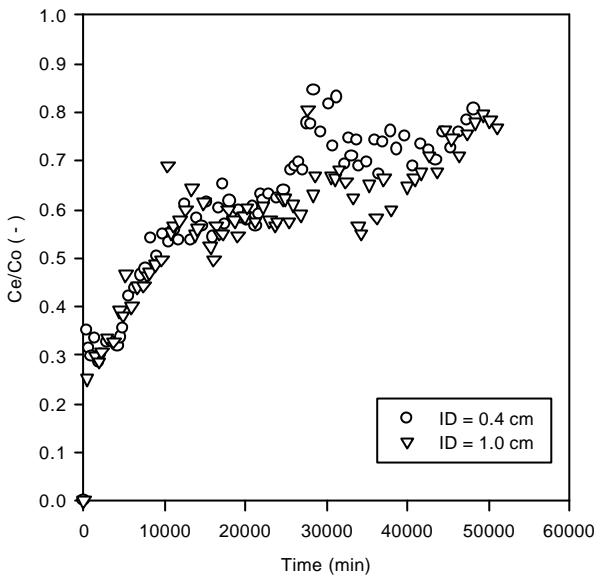


圖 6. 迷你管柱管徑大小對貫穿曲線之影響 (水樣為六堵水廠原水) [1]

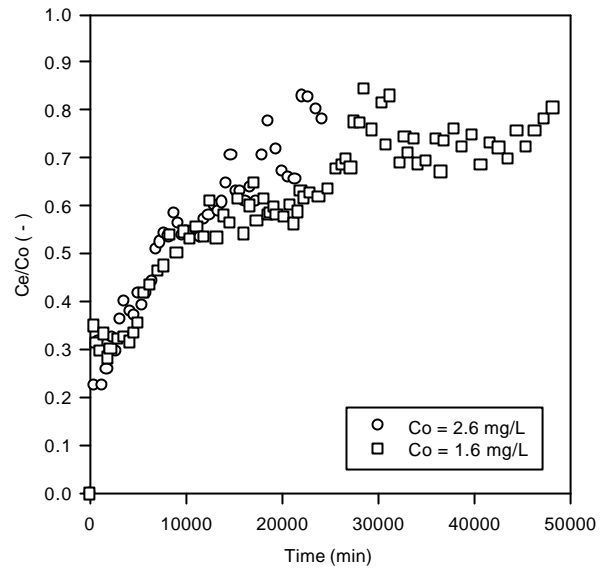


圖 8. 進流水濃度對迷你管柱實驗貫穿曲線之影響 (水樣為六堵水廠原水) [1]

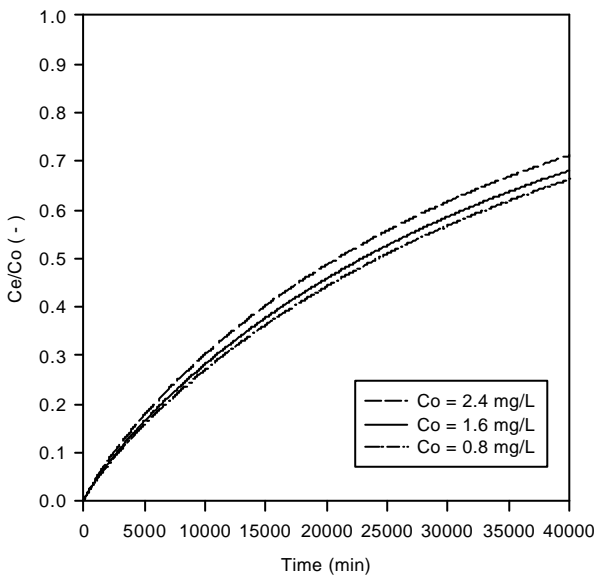


圖 7. 表面擴散模式中，不同初始濃度所得之貫穿曲線

濃度之比值為 0.1579，三條曲線之出流水濃度與進流水濃度之比值相差並不大。隨著操作時間增加，其出流水濃度與進流水濃度之比值差距則逐漸拉大，且可看出，初始濃度減為 0.8 mg/L 時貫穿曲線上升較快；反之初始濃度增為 2.4 mg/L 時，則有較低之貫穿曲線。圖 8 為六堵水廠原水在不同採樣時間所做之迷你管柱試驗結果[1]，不同初始濃度之兩條貫穿曲線在時間為 15,000 min 前，兩條曲線幾乎重疊，可知，在出流水濃度與進流水濃度之比值為 0.6 之前，初始濃度變

化並不影響貫穿曲線之升降，操作時間中後期才逐漸有影響。

比較圖 7 與圖 8 之結果可發現，有機物之初始濃度對於活性炭吸附後期，即對於貫穿曲線後段，會有較明顯的影響。表面擴散模式之模擬結果與實驗結果相符。

(三) 活性炭用量及水樣流量對貫穿曲線之影響

活性炭之使用量不同，管柱中之填充高度也會跟著改變，而空床接觸時間 (empty bed contact time, EBCT) 也會有所不同。本研究之目的在於提供實驗設計與實廠運用之參考，故需將模擬結果予以標準化。圖 9 與圖 10 中橫座標為單位吸附劑所處理之水樣，流量皆為 1.0 mL/min，故其圖形可應用於大型活性炭管柱。由圖 9 之貫穿曲線所示，可知活性炭使用量的多寡 (即 EBCT 長短) 會大大影響到貫穿曲線之特性。當活性炭使用量增加時，每單位活性炭能處理的水樣體積會增加；活性炭使用量減少時，每單位活性炭能處理的水樣體積會減少。在實驗方面，如圖 10 所示，使用活性炭劑量不足時 (即 EBCT 太短) 活性炭管柱實際上並無法發揮吸附之功能，水中微量有機物將很快達到 50% 之貫穿濃度，但在活性炭使用劑量超過 300 mg 時，吸附床已發揮應有之吸附功能。

在比較圖 9 與圖 10，可發現活性炭用量對貫穿曲線特性之影響，具有相同的趨勢。模擬結果顯示，活性炭用量對於貫穿曲線特性有較大的影響，可能是因為低估表面擴散係

數 DS 值，表面擴散係數太小，導致吸附都存於顆粒外層，因此，當活性炭用量稍改變時，對於貫穿曲線之影響頗為顯著。

流量增大會使貫穿時間縮短，對吸附量的影響似乎不大 [12]，但流量之大小亦可能影響到吸附之管柱擴散係數 DB，若流量太大，水樣中微量有機物之傳送可能為壓力降所造成，而非為擴散之傳送，若流量太小則會增加操作之時間。圖 11 所示，將流量改變 $\pm 25\%$ ，其貫穿曲線有明顯之

變化。流量為 0.75 mL/min 時，到達 20% 之貫穿濃度，需 34,650 min；流量為 1.00 mL/min 時，到達 20% 之貫穿濃度，需 6,400 min；流量為 1.25 mL/min 時，到達 20% 之貫穿濃度，只需 2,100 min，因此流量之改變會影響到貫穿的時間。

如圖 12 所示，將橫座標經過標準化（以通過濾床之水樣體積數為橫座標）之後。當床體積數為 20,000 時，流量為 1.25、1.00 及 0.75 mL/min 所得之貫穿濃度分別為 58、33 及 11%。由此可知，當流量較小時，吸附性能較佳，但流量

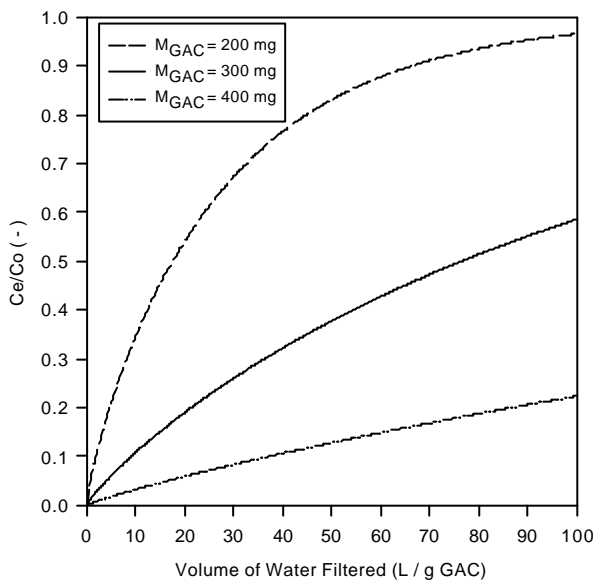


圖 9. 表面擴散模式中，不同之活性炭使用量所得貫穿曲線

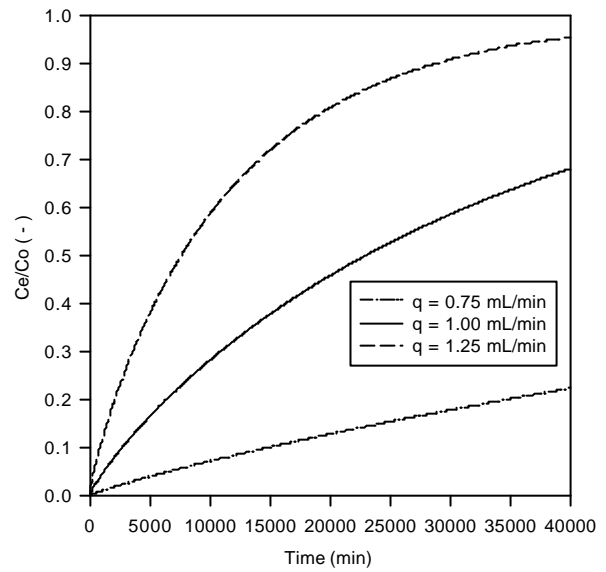


圖 11. 表面擴散模式中，不同流量所得之貫穿曲線

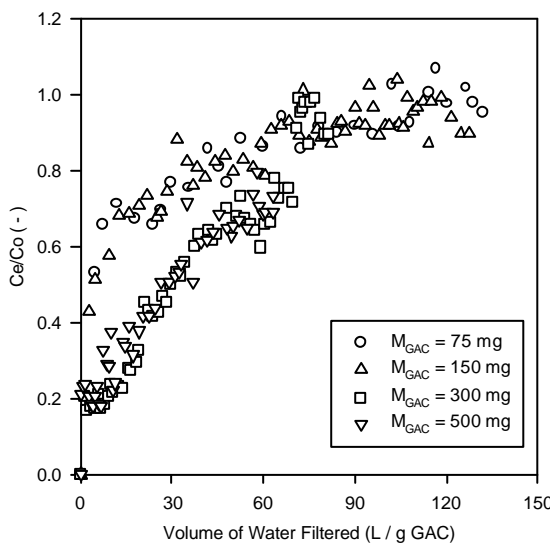


圖 10. 迷你管柱實驗中，不同活性炭使用量所得之貫穿曲線（水樣為板新水廠原水）[1]

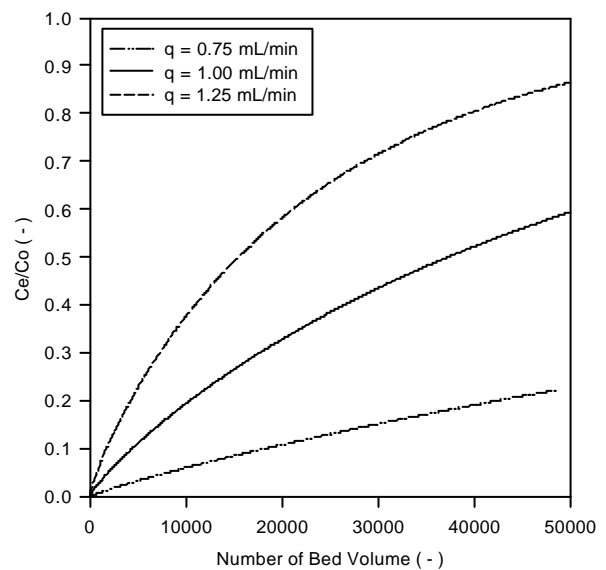


圖 12. 表面擴散模式中，橫座標經過標準化後不同流量所得之貫穿曲線

增加，則貫穿時間縮短以及所能處理水樣之體積減少。流量稍改變時，其貫穿曲線有顯著之變化，其原因乃跟活性碳用量改變對貫穿曲線之影響相同。

五、結論

本研究的結論可簡單歸納如下：

1. 經由時間間距與模式穩定性關係之探討得知，為縮短模擬時間，本模式之 t 可選用 0.05 min。
2. 在靈敏度分析中，可知管柱擴散係數 D_B 對於迷你管柱中活性碳的吸附能力並無顯著的影響，由水樣流量改變對貫穿曲線之影響分析中可知，流量若太大會造成 D_B 對吸附之影響力變小。表面擴散係數 D_S 之最佳參數值相當小，其原因可能是因所選取對照之實驗數據本身有誤差所造成，由模擬結果可知，活性碳吸附都存於顆粒外層，活性碳顆粒深層並無太大之吸附量。
3. 迷你管柱之管徑大小，並不會影響貫穿曲線之特性。而在初始濃度對貫穿曲線影響之分析上，模擬結果與實驗結果相符。微量有機物之初始濃度對貫穿曲線後段影響較明顯。
4. 由活性碳用量對貫穿曲線影響之分析上，可知空床接觸時間 EBCT 對於貫穿曲線有顯著之影響，為一重要之操作條件，EBCT 增加則吸附量提高，反之則減少。

參考文獻

1. 王根樹 (民 86)，以活性碳迷你管柱評估活性碳吸附自來水中微量有機物之研究(II)，行政院國家科學委員會委託研究報告 (NSC 86-2211-E-002-015)，台北。
2. 余光昌、何先聰(民 81)，以活性碳吸附腐植酸之研究，技術學刊，7(3)，頁 315-325。

3. 黃安岑(民 85)，自來水中背景有機物吸附特性之研究，國立台灣大學，公共衛生學研究所碩士論文，台北。
4. 張珣杰(民 86)，活性碳吸附法，化工技術，5(8)，頁 169-180。
5. Alben K. T., E. Shpirt, L. Mathevet, J. Kaczmarczyk, and G. Wang (1991) Predicting Capacities for SOCs in GAC Pilot Columns, *Proceedings 1991 The American Water Works Association (AWWA) Annual Conference*, (AWWA, Denver, CO), 545-564.
6. Davis, M.E. (1984) *Numerical Methods and Modeling for Chemical Engineers*, Wiley, New York.
7. Fettig, J., and H. Sontheimer(1987) Kinetics of Adsorption on Activated Carbon: II. Multisolute System, *Journal Engineering Environment*, 113(4), p. 780-794.
8. Fettig, J., and H. Sontheimer(1987) Kinetics of Adsorption on Activated Carbon: III. Natural Organic Material, *Journal Engineering Environment*, 113(4), p. 795-810.
9. Nauman, E. B. (1987) *Chemical Reactor Design*, Wiley, New York.
10. Traegner, U. K., and M. T. Suidan (1989) Parameter Evaluation for Carbon Adsorption," *Journal Engineering Environment*, 115(1), p. 109-128.
11. Traegner, U. K., and M. T. Suidan (1989) Evaluation of Surface and Film Diffusion Coefficients for Carbon Adsorption," *Water Research*, 23(3), p. 267-273.
12. Wen, C. Y., and Fan, L. T.(1975) *Models for Flow Systems and Chemical Reactors*, Marcel-Dekker, New York.

收件：88.06.30 修正：88.10.13 接受：88.10.27

符號說明

$A(t, y)$	時間 t 時，於 y 處每單位活性碳體積吸附微量有機物之速率 [mg/L min]
$C_B(t, y)$	微量有機物於活碳顆粒間空隙混合液中之濃度 [mg/L]
C_e	迷你管柱之出流水濃度 [mg/L]
C_o	迷你管柱之進流水濃度 (初始濃度) [mg/L]
$C_S(t, R)$	微量有機物於活性碳表面上之濃度 [mg/cm ³]
D_B	微量有機物於活性碳顆粒間空隙混合液中之擴散係數 [cm ² /min]
D_S	微量有機物於活性碳顆粒表面上之擴散係數 [cm ² /min]
ID	管柱內徑 [cm]
K_F	等溫吸附曲線常數[(mg/g _{GAC})(cm ³ /mg) ^{1/n}]
k_f	介面膜傳輸係數 [1/min]
M_{GAC}	迷你管柱中活性碳之總量 [mg]
n	等溫吸附曲線常數 [-]
q	混合液流量 [mL/min]
$Q(t, r)$	微量有機物於活性碳孔隙表面之吸附量 [mg/g _{GAC}]
R	活性碳半徑 [cm]
r	迷你管柱球座標[cm]
t	時間 [min]
v	混合液之流速 [cm/min]
y	迷你管柱座標 [cm]
r_S	活性碳密度 [g/cm ³]
e_B	管柱內孔隙度 [-]