

# 粉狀活性碳吸附原水中 Geosmin 與 2-MIB 之研究

黃毓茹<sup>1</sup>、林財富<sup>2</sup>、黃智<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立成功大學環境工程學系碩士、<sup>2</sup>國立成功大學環境工程學系教授

<sup>3</sup>中興顧問社環工中心副經理

## 摘要

自來水中的臭味問題在南台灣地區存在已久，常被民眾抱怨的臭味有氯味、魚腥味及土霉味，其中前兩者可分別藉由調整加氯劑量和氧化劑的使用得到良好的控制，但傳統處理程序卻難以有效去除土霉味。先前的研究發現粉狀活性碳(powdered activated carbon, PAC)可有效控制土霉味物質 2-MIB，同時也成功的以一組動力吸附實驗配合均勻表面擴散模式(homogeneous surface diffusion model, HSDM)模擬及預測 PAC 對 2-MIB 之吸附動力。由於兩種土霉味物質 2-MIB 與 Geosmin 常同時存在，因此本研究探討應用 HSDM 模擬與預測 PAC 同時吸附此兩種物質之適用性。研究結果顯示 HSDM 模式能合理模擬 PAC 對 2-MIB 及 Geosmin 之吸附動力，並能預測不同土霉味物質濃度及不同 PAC 添加劑量下之動力實驗結果，同時模式預測結果也能合理的推估瓶杯試驗與實廠流程對 2-MIB 與 Geosmin 之去除效果。

**關鍵字：**2-MIB、Geosmin、粉狀活性碳(PAC)、均勻表面擴散模式(HSDM)

### 一、前言

臭味一直為南台灣地區民眾所關切的問題之一，雖然一些造成臭味的物質對人體的健康無虞，但是卻會直接影響到民眾評判自來水水質的優劣，進而使的民眾擔心自來水是否遭受污染而無法

安心飲用。南部自來水中的臭味問題主要是以氯味、魚腥味，土霉味為主，其中氯味可藉由加氯量控制減輕其強度，魚腥味可經由氧化劑去除，但一般傳統的處理程序卻無法有效的去除土霉味，常見於台灣的土霉味物質包括 2-MIB

(2-methylisoborneol) Geosmin (trans-1,10-dimethyl-trans-p-decalol)。國內外的研究中發現粉狀活性碳 (powder activated carbon, PAC) 可有效的去除土霉味物質，且其設置的成本較其他高級處理程序為低(Butterworth, 1998)，因此適合國內的水場使用。

本實驗室從事臭味控制相關研究已有一段時間，楊氏(2001)利用一組等溫線及一組動力線的資料結合均勻表面擴散模式 (homogeneous surface diffusion model, HSDM) 模式有效預測 PAC 對 2-MIB 的吸附動力。劉氏(2002)利用一組動力實驗結合 HSDM 模式合理的預測瓶杯試驗的結果以及實場處理流程中 PAC 對 2-MIB 的去除效果，由於 Geosmin 與 2-MIB 兩種土霉味物質常同時存在於原水中(例如鳳山原水)，而先前的研究在活性碳對 Geosmin 的控制方面較為缺乏，因此急需了解 HSDM 模式對於活性碳同時吸附 2-MIB 與 Geosmin 時，預測其吸附動力的適用性。本研究的目的是結合 HSDM 模式預測在不同的 PAC 添加劑量下，不同原水中 2-MIB 與 Geosmin 的吸附動力線以及使用實驗室的實驗預測實廠添加不同活性碳劑量時，對於 2-MIB 與 Geosmin 的去除效果。

## 二、實驗設備及方法

### 2-1 實驗材料

本實驗中採用之水樣為鳳山原水以及澄清湖原水，原水的水質資料如表 1，所使用之活性碳為鳳山水廠所使用之粉狀活性碳，在此將之簡稱為 FS-PAC，和美國 Calgon 公司所生產之商業活性碳 (WPH)，其特性如表 2。

### 2-2 分析方法

本實驗建立 SPME 土霉味分析方法，使用 Supelco 公司所製的 No.57328-U 吸附纖維，其吸附纖維材質為 divinylbenzene/carboxen/polydimethylsiloxane。本實驗參照 Standard methods 6040D. Solid-Phase Microextraction 之分析方法，但是將實驗氣提瓶改為內外瓶，外瓶流過定溫水流，以使實驗過程中有更穩定的恆溫環境。氣提瓶之內瓶體積為 60ml，分析水樣為 45ml，並加入 13.5g 的 NaCl，經 15 秒鐘攪拌均勻後於 65°C 恆溫水浴中氣提，然後插入吸附纖維在頂部空間吸附平衡 30 分鐘。

分析時將吸附後之纖維打入氣相層析儀(gas chromatograph, GC, HP 6890)配合質譜儀(mass selective detector, MSD, HP 5973)分析，以 250°C 脫附分析。所用之管柱為 HP-5，GC 的烘箱升溫程式為

60°C 維持 2.5 分鐘，然後以每分鐘 8°C 升溫至 250°C，在 250°C 維持 4 分鐘，以確定揮發性有機物完全分離，分析時間共為 31.25 分鐘。以 He 為載流氣體(carrier gas)，固定流量 20 ml/min，並且不分流(splitless)，注入口壓力則為 8.2 psi，管柱流量為 1 ml/min。

### 2-3 動力吸附實驗

動力實驗採用 5 升並附有取樣口的玻璃瓶為反應瓶。在 2-MIB 及 Geosmin 濃度已知的原水中添加活性碳後，加入磁石攪拌子幫助攪拌，轉速控制在 150 rpm，使活性碳能均勻分布並懸浮在水樣中，並在 20°C 的恆溫箱中進行吸附動力反應。然後分別在吸附時間 0、15、30、60、90、120、180、240 分鐘進行取樣，每次取樣 60ml，取樣後立刻用 0.45 μm 的濾紙進行過濾後分析 2-MIB 及 Geosmin 的濃度。過濾後將活性碳注入回反應瓶，並回補大約相體積的水樣，以減少實驗誤差。

### 2-4 瓶杯試驗

瓶杯實驗主要模擬鳳山水廠流程作修改。實驗中首先取兩個燒杯各加入一升鳳山原水，其中一瓶添加 FS-PAC 10mg/L 於原水中，使其反應 15 分鐘後

再加入 60mg/L NaOCl，反應時間約 1 分鐘後，再加入硫酸鋁 35mg/L 進行混凝沉澱，其中快混轉速 120rpm 維持 1 分鐘，慢混轉速為 15rpm 經過 20 分鐘，然後停止攪拌，靜置 1.24 小時以待沉澱後取其上澄液，每一程序的水樣經 0.45 μm 濾紙過濾及硫代硫酸鈉去氯後進行 2-MIB 分析。

### 2-5 鳳山淨水廠現場實驗

為了解鳳山實廠各處理程序對 2-MIB 與 geosmin 之去除效果，本實驗分別在原水取水口、PAC 添加口、前加氯後、沉澱後及過濾後進行取樣。各流程接觸時間請參考劉氏(2002)。現場取樣時，分別於現場以針筒過濾器立即過濾水樣，以分離活性碳，並添加適量 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 進行去氯。鳳山實廠當天之活性碳添加劑量為 5、10、20mg/L，每個劑量維持 3 小時，每個劑量的採樣 3 次每次間隔 10 分鐘，各流程之採樣水量為 100mL。

## 三、結果與討論

### 3-1 單吸附質與雙吸附質之吸附動力實驗

根據等背景化合物模式的假設，當

PAC 吸附單吸附質時，可將其他原水中的天然有機物視作為一個「等背景化合物(EBC)」，同時把整個吸附系統考慮成此吸附質與 EBC 雙溶質的競爭吸附系統，若欲使活性碳進行雙吸附質吸附時，可將其中一個吸附質與原水中其他的天然有機物視為 EBC，則此吸附系統依然可考慮成一個雙溶質的競爭吸附系統。根據推測，在相同的活性碳添加劑量下，活性碳在原水中同時吸附 2-MIB 與 Geosmin 時兩者的動力吸附線，與只吸附 2-MIB 或 Geosmin 時，差異應該不會太大。

為驗證以上 EBC 模式的適用性，實驗中設計 3 組動力吸附實驗，分別在鳳山原水中添加 2-MIB 50ng/L、Geosmin 50ng/L 以及同時添加 2-MIB 與 Geosmin 各 50ng/L，分別以 10mg/L 的 WPH 活性碳進行吸附。實驗結果如圖 1 及圖 2 所示，當在原水中同時存在 2-MIB 與 Geosmin 時的動力吸附線，與單獨吸附 2-MIB 或 Geosmin 時的動力吸附線非常相近，平均差異僅在 7%，最大差異也在 10% 以內，因此證明 EBC 模式假設的適用性，也證明若使用 HSDM 配合 EBC 模式的假設來模擬原水中 2-MIB 與 Geosmin 之動力吸附應具可行性。

### 3-2 原水中 2-MIB 與 Geosmin 之吸附動力預測

為了解在不同活性碳添加劑量以及不同接觸時間下活性碳對 2-MIB 與 Geosmin 吸附的情形，研究中分別以鳳山原水與澄清湖原水為對象，進行動力吸附實驗。

楊氏(2001)利用一組等溫線及一組動力線的資料結合 HSDM 模式能有效預測 PAC 對 2-MIB 的吸附動力。劉氏(2002)利用一組動力實驗結合 HSDM 模式合理的預測瓶杯試驗的結果以及實場處理流程中 PAC 對 2-MIB 的去除效果。因此本研究中嘗試以只做一組吸附動力實驗，並結合 HSDM 模式同時來預測活性碳吸附 2-MIB 與 geosmin 吸附動力。

在 HSDM 模式當中，大部分參數都是已知的實驗條件，只有表面擴散係數 ( $D_s$ ) 以及 Freundlich 方程式常數  $K$ 、 $1/n$  必須由實驗求得。其中表面擴散係數由 HSDM 模式模擬最佳化的吸附動力曲線求得，而  $K$  和  $1/n$  的關係可用 Freundlich Isotherm 方程式表示：

$$q_e = KC_e^{1/n} \quad (1)$$

其中：

$q_e$  為活性碳之平衡吸附量，ng/mg，  
 $C_e$  為吸附質之平衡濃度，ng/L。

若  $K$  與  $1/n$  其中一個參數已知，則另一

個可由方程式(1)求得。因此在進行一特定濃度下之吸附動力實驗，即可以得到一組吸附動力曲線以及其相對應之最終平衡濃度與吸附量，由此平衡濃度與吸附量的關係，由方程式(1)可計算出  $1/n$  與  $K$  的比值。Knappe 等人(1998)曾提出，假設  $1/n$  之值通常是介於 0.1~1 之間，所以若假設  $1/n$  值由 0.1 至 1 之間的定值，因此  $K$  值即會變成定值，所以在固定  $1/n$  值下，HSDM 模式中的可調整參數變成只剩下  $D_s$ ，藉由調整  $D_s$  數值即可模擬出和實驗值最相符的吸附動力曲線，藉由所得到最佳的  $D_s$  值，即可推估不同活性炭添加劑量下之吸附動力線。

圖 3 至圖 5 中顯示的是 HSDM 模式模擬及預測 WPH-PAC 在鳳山原水與澄清湖原水中不同添加劑量下的吸附動力結果。圖 3 及圖 5 分別為鳳山與澄清湖原水中 2-MIB 的吸附動力模擬與預測結果，2 組實驗皆為模擬一組中間濃度之添加劑量的吸附動力線，求得最佳化  $D_s$  值後，再來預測低濃度與高濃度添加劑量的吸附動力。圖 4 則為鳳山原水中 Geosmin 的吸附動力模擬與預測結果，該實驗為模擬一組較低濃度添加劑量的吸附動力線來預測中間濃度及較高濃度之添加劑量的吸附動力。圖 6 則為 FS-PAC 在鳳山原水中對 2-MIB 的吸附動力模擬與預測結果。此外，限於篇幅，WPH-PAC

在澄清湖/geosmin 系統以及 FS-PAC 鳳山/geosmin 系統中亦得到類似結果，詳細可參考黃氏(2003)。

楊氏(2001)的研究中使用活性炭 WPH 及 TAC 預測鳳山原水及澄清湖原水中的吸附動力曲線以及劉氏(2002)的研究中使用 FS-PAC 預測鳳山原水中 2-MIB 的吸附動力曲線，在  $1/n=0.4\sim 0.6$  之間時預測效果最好，當  $1/n$  值過大或過小時，預測開始產生誤差。本研究則顯示)研究結果，我們可以作個結論，在假設 Freundlich Isotherm 常數  $1/n$  介於 0.4~0.7 之間下，模式能同時有效預測 geosmin 與 MIB 之吸附動力。

因此綜合本研究與楊氏(2001)、劉氏(2002)研究結果，我們可以作個結論，在假設 Freundlich Isotherm 常數  $1/n$  介於 0.4~0.7 之間下(最佳值為 0.5)，對於相同的原水，可以只需做一組吸附動力實驗結合 HSDM 模式，便可以有效的預測活性炭對 2-MIB 與 Geosmin 的吸附動力。

### 3-3 鳳山實廠活性炭添加實驗結果

本實驗於實廠中各流程進行實地採樣，採樣點包括原水取水口、添加 PAC 反應後、前加氯後、沉澱後及過濾池出水，水廠添加 FS-PAC 劑量的時間為 2003 年 5 月 30 日上午 8:30 至下午 5:30 共 9 小時，其中每三個小時更換一個劑量，

三個添加劑量分別為 5mg/L、10mg/L、20mg/L，每個添加劑量進行 3 次採樣，實場採樣分析結果取其平均值，並與實驗室的瓶杯試驗及 HSDM 模式預測的結果作比較。

圖 7 至圖 9 為實驗室動力實驗預測結果、瓶杯試驗結果以及鳳山水廠流程中採樣分析結果之比較。圖中可以看出，在添加活性碳(5 及 10mg/L)後的 15 分鐘內不論是模式預測、瓶杯實驗及實場分析三這結果大致相近，誤差均在 5% 以內，也就是說實驗室的實驗可以合理的測實場的結果，但在添加劑量為 20mg/L 時(未附圖)，2-MIB 的實場採樣的分析結果與實驗室的預測值的誤差上升到 15% 左右。另一方面，Geosmin 的實場採樣分析結果與實驗室的預測之誤差在活性碳劑量 10 mg/L 及 20 mg/L 時高達為 65% 左右。有關高劑量部分模式預測與實場分析誤差較大，推測可能原因包括活性碳添加時間太短(每種劑量僅 3 小時)，無法有效與前面低劑量區隔出。而在 Geosmin 誤差較大部分，因 Geosmin 原來在原水中濃度較低(4ng/L)分析誤差上可能也較大。

另外，在前加氯之後，瓶杯試驗的結果顯示，2-MIB 與 Geosmin 的去除率減少了 5~20% 左右，推測其原因應該是因為前加氯所添加的劑量高達 60mg/L，

高濃度的氯使原本吸附在活性碳表面的 2-MIB 與 Geosmin 被釋放出來而造成水中 2-MIB 與 Geosmin 的濃度增加，但在實場採樣的結果中，氯對於活性碳的影響似乎並不大，這有可能因實場中混合效果不如實驗室瓶杯實驗混合效果，因此無法看出其差異。

#### 四、結論與建議

1. 實驗室結果顯示，以一組動力實驗配合 HSDM 模式可以有效的模擬與預測在不同的原水中，活性碳同時吸附 Geosmin 與 2-MIB 的吸附動力，可以大減少實驗所需時間。
2. 實驗室內以一組動力實驗配合 HSDM 模式可以合理的預測瓶杯試驗以及鳳山實廠中添加粉狀活性碳 5 及 10mg/L 時，對 2-MIB 與 Geosmin 之去除率，但對 20mg/L 添加劑量時，其成效則比較不佳。

#### 致謝

本研究蒙環保署補助部份研究經費，並蒙水公司第七區管理處協助採樣分析，特此致謝。

#### 參考文獻

Butterworth, R. (1998). Review of

- Documents Investigating Taste and Odor Abatement Options: City of Chicago Department of Water, In AWWARF Taste and Odor Workshop, July 23-24, 1998, Chicago, Ill.
- Considine, R., Denoyel R., Pendleton, P., Schumann, R. and Wong, S.H. (2001). The Influence of Surface Chemistry on Activated Carbon Adsorption of 2-Methylisoborneol from Aqueous Solution, *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, **179**, 271-280.
- Gilgoly, T.E.T., Snoeyink, V.L., Elarde, J.R., Wilson, C.M. and Royal, E.P. (1998). <sup>14</sup>C-MIB Adsorption on PAC in Natural Water., *J. Am. Water Works Assoc.* **90**, 89-108.
- Huang, C., Benschoten, J.E.V. and Jensen, J.N. (1996). Adsorption Kinetics of MIB and Geosmin., *J. Am. Water Works Assoc.* **88**, 116-128.
- Knappe, D.R.U., Snoeyink, V.L., Prados, M.J., Bourbigot, M.M. and Dagois, G. (1993). Adsorption of Atarazine by Powdered Activated Carbon. In: *Proceedings of the American Water Works Association Annual Conference*.
- Lalezary, S., Pirbazari, M., McGuire, M.J. (1986a). Oxidation of Five Earthy-Musty Taste and Odor Compound, *J. Am. Water Works Assoc.*, **78**, 62.
- Lalezary, S., Pirbazari, M., McGuire, M.J. (1986b). Evaluating Activated Carbon for Removing Low Concentrations of Taste-and-Odor Producing Organics., *J. Am. Water Works Assoc.*, **78**, 76.
- Najm, I. N., Snoeyink, V.L., and Richard, I. (1991). Effect of Initial Concentration of a SOC in Natural Water on Its Adsorption by Activated Carbon., *J. Am. Water Works Assoc.*, **83**, 57-63.
- 高小萍(1998), 水中異臭味物質的分析, 國立成功大學環境工程研究所碩士論文。
- 汪俊育(2000), 南台灣代表性水源地臭味問題之研究, 國立成功大學環境工程系碩士論文。
- 楊豐誠(2001), 應用粉狀活性碳去除原水中 2-MIB 之研究, 國立成功大學環境工程系碩士論文。
- 劉家玲(2002), 預氯程序對粉狀活性碳吸附 2-MIB 之影響, 國立成功大學環境工程系碩士論文。
- 黃毓茹(2003), 粉狀活性碳吸附原水中 geosmin 與 2-MIB 之研究, 國立成功大學環境工程系碩士論文。

表 1 原水水質資料

	PH 值	濁度 (NTU)	臭度 (TON)	溶氧 (mg/L)	游離氯氮 (mg/L)
鳳山	7.9±0.08	32±7.35	4.53±0.62	6.67±0.42 <sup>(1)</sup>	0.11±0.03
澄清湖	7.7±0.12	16.75±4.35	8.75±0.96	3.3 <sup>(2)</sup>	0.32±0.33

資料來源：鳳山及澄清湖淨水廠 2003 年 2~5 月原水平均水質(±標準偏差)資料

註(1)：資料為 2003 年 2~4 月原水水質資料

註(2)：資料為 2003 年 4 月原水水質資料

表 2 WPH-PAC 及 FS-PAC 之特性分析\*

	Calgon WPH	FS-PAC
BET 比表面積, m <sup>2</sup> /g	893	1314
微孔體積, cm <sup>3</sup> /g	0.257	0.382
中、粗孔體積, cm <sup>3</sup> /g	0.200	0.371
平均孔隙孔徑, Å	22.4	23.7

\*劉家玲(2002)

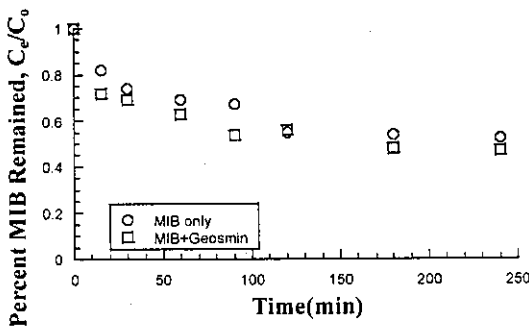


圖 1 WPH 活性碳對 2-MIB 單獨存在與同時存在 Geosmin 時之動力吸附線

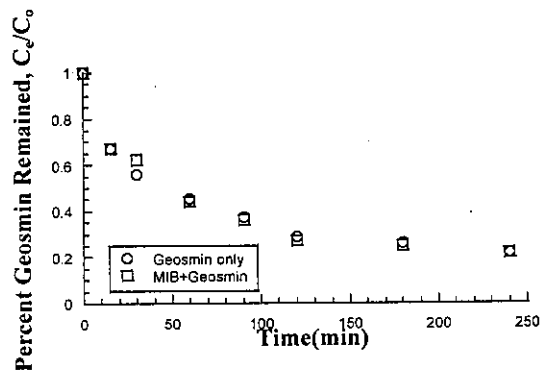


圖 2 WPH 活性碳對 Geosmin 單獨與同時存在 2-MIB 時之動力吸附線

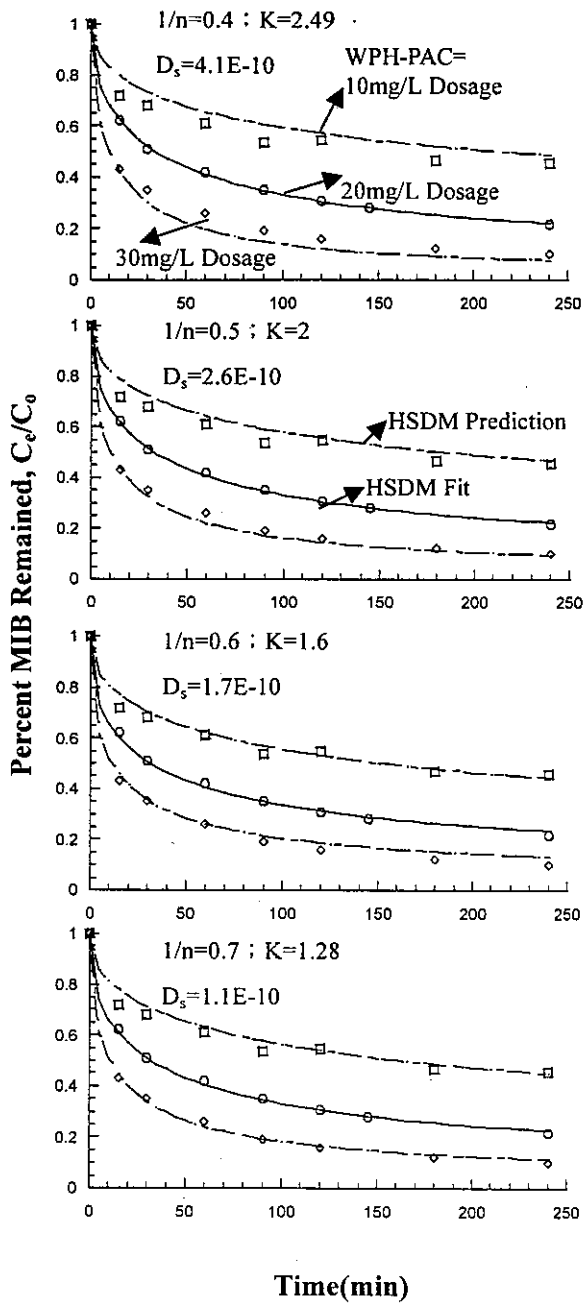


圖 3 鳳山原水中 WPH-PAC 吸附 2-MIB 動力吸附模擬與預測圖

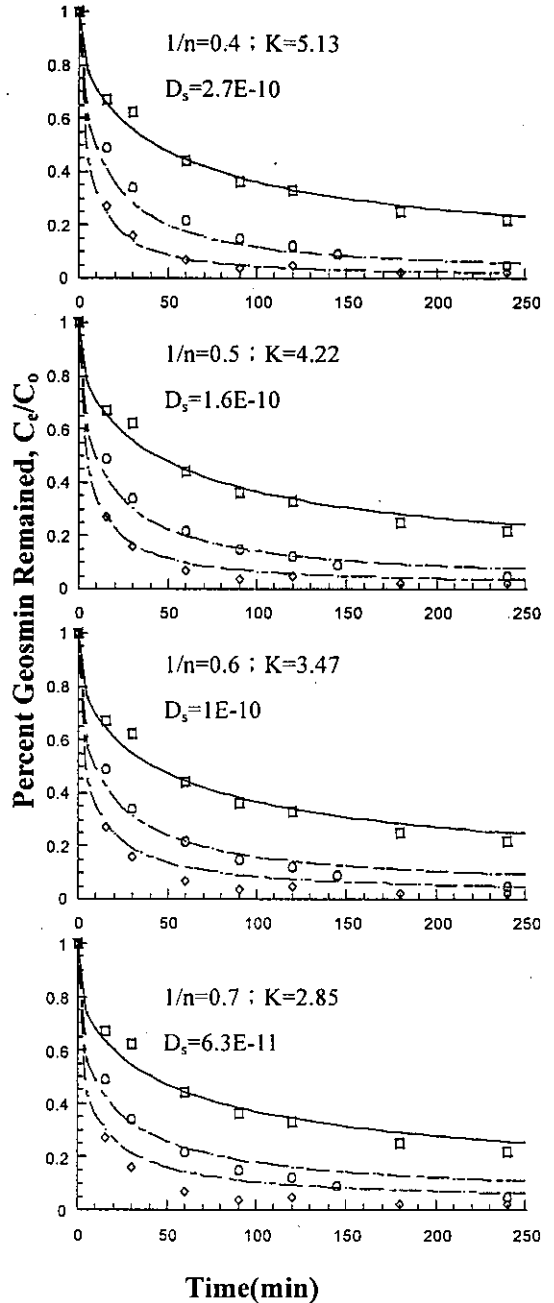


圖 4 鳳山原水中 WPH-PAC 吸附 Geosmin 之吸附動力模擬與預測圖

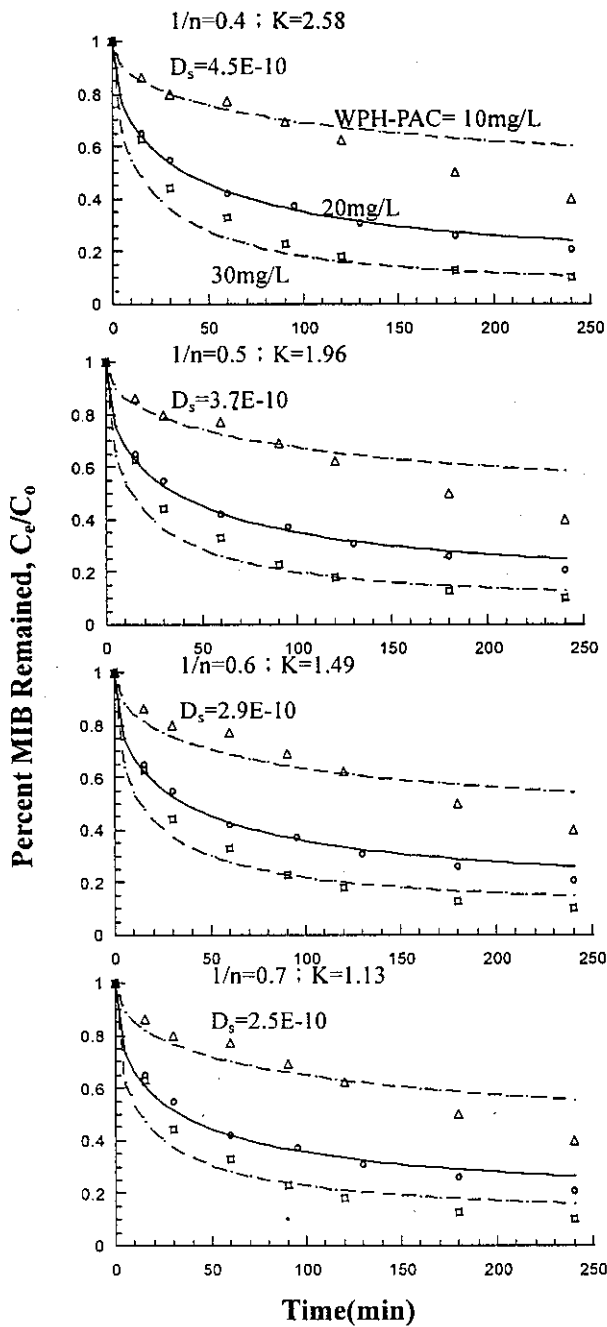


圖 5 澄清湖原水中 WPH-PAC 吸附 2-MIB 之吸附動力模擬與預測圖

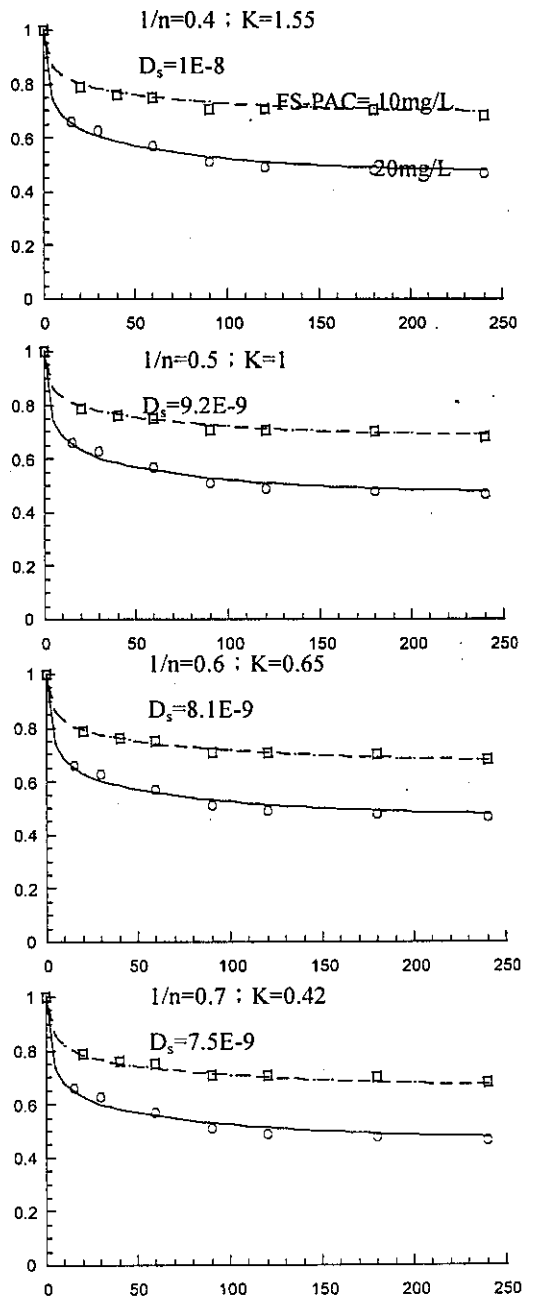


圖 6 鳳山原水中 FS-PAC 吸附 2-MIB 之吸附動力預測

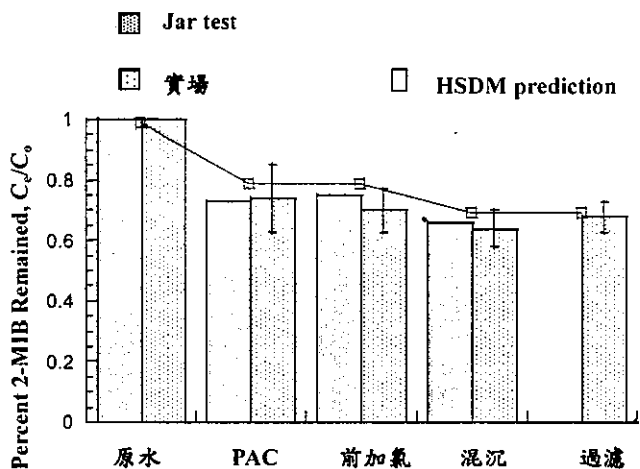


圖 7 添加 FS-PAC 5mg/L 時 Jar-test、鳳山實廠流程及 HSDM 模式預測 2-MIB 殘留率之比較圖

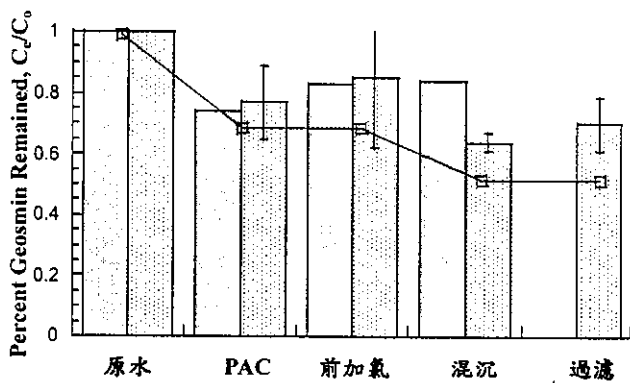


圖 9 添加 FS-PAC 5mg/L 時 Jar-test、鳳山實廠流程及 HSDM 模式預測 Geosmin 殘留率之比較圖

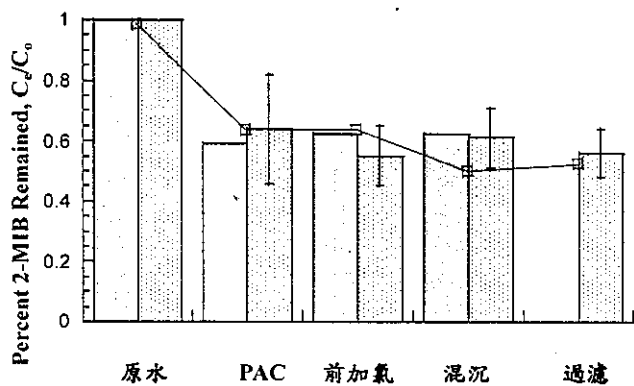


圖 8 添加 FS-PAC 10mg/L 時 Jar-test、鳳山實廠流程及 HSDM 模式預測 2-MIB 殘留率之比較圖