

# 污染防治技術

## 合成吸附劑與活性碳對不同吸附質 吸附能力比較之探討

陳鴻烈 \*

### 一、前 言

今日在高級處理技術上有一個利用合成吸附劑來去除自來水中有機物的新趨勢，此種應用方法有它非常特殊的好處，尤其是在現廠(*in situ*)的再生(*regeneration*)非常方便<sup>1</sup>。合成吸附劑一般可分為聚合物吸附劑(*polymeric adsorbents*)、合成碳類吸附劑(*synthetic carbonaceous adsorbents*)和離子交換樹脂(*ion exchange resins*)。雖然各種商業吸附劑樹脂有不同的特性，但用過的合成吸附劑依其特性均可很方便而有效的採用不同的溶劑、酸、鹼或鹽類來再生，因此現在有許多人喜歡用合成吸附劑來處理水中有機及無機物<sup>2~9</sup>。

至於活性碳已被廣泛的應用在飲用水軟化、餘氯去除、脫鹽及脫臭上，所以活性碳的吸附已有很成熟的技術，本篇文章將對最新的吸附技術「合成吸附劑吸附法」與活性碳吸附法對不同吸附質之吸附能力及其吸附特性做一番比較。

### 二、活性碳與合成吸附劑之介紹

一般而言，活性碳吸附屬於物理性吸附，而合成吸附劑吸附則依吸附劑種類的不同分別屬於物理性吸附或化學性吸附。通常聚合物吸附劑及合成碳類吸附劑的吸附行為屬於物理性吸附，而離子交換樹脂的吸附則為化學性吸附。合成吸附劑與活性碳的介紹如下：

#### 1. 合成吸附劑

一般是一種合成聚合基質，通常為聚苯乙烯鏈(*polystyrene chains*)藉二乙烯苯(*divinylbenzene*)、苯酚醛(*phenolformaldehyde*)或丙烯酯聚合物(*acrylic ester polymers*)交聯(*cross-linked*)而成。依合成吸附劑的種類可分為聚合物吸附劑(*po-*

\*國立中興大學土木系所環工組副教授

lymeric adsorbents)、合成碳類吸附劑(synthetic carbonaceous adsorbents)及離子交換樹脂(iion exchange resins)。聚合物吸附劑有獨特的物理性巨大網狀孔隙，孔隙大小的分配相當均質，有高表面積和類似非離子基的化學性結構。聚合物吸附劑通常有堅固的物理性質，故在操作循環管柱時，幾乎沒有任何磨損，且此吸附劑不像離子交換樹脂，在使用上不擴張亦不收縮，其吸附的作用力是經由凡得瓦爾力(van der Waal's force)在分子間之親水性和疏水性的平衡而達吸附。合成碳類吸附劑是經由熱處理(partial pyrolysis) 將巨大網狀高分子(macrocyclic copolymers)的顆粒加熱製造而成，孔隙的大小經由加熱的溫度及網狀高分子之顆粒大小來控制，其範圍為 50~100,000 Å，故此種吸附劑具有類似活性碳的外表。離子交換樹脂通常是一種合成聚合基質，由聚苯乙稀鏈(polystyrene chains)藉乙烯苯(divinylbenzen)、苯酚甲醛(phenolformaldehyde)或丙烯酯聚合物(acrylic ester polymers)交聯(cross-linked)構成，並和附著在聚合體鏈上之溶解性離子作用基組合而成。在樹脂上的作用基之總數和型式則決定樹脂的交換容量和離子選擇性，聚合基質(Matrices)則提供為樹脂的不溶解性韌度(toughness)。樹脂本質上為顆粒狀，其外形可能為球形或不規則形，一般常用樹脂多為球形，但不規則形狀者可提供較大表面積，亦有其優點。離子交換樹脂依種類可分為陽離子交換樹脂和陰離子交換樹脂，陽離子交換樹脂其強酸性交換樹脂之官能基(functional group)來自強酸(一般為硫酸)，而弱酸性交換樹脂之官能基則來自羧基或酚基之弱酸；陰離子交換樹脂其強鹼性交換樹脂之官能基為季胺(quaternary ammonium)類之第一型式及第二型；而弱鹼性交換樹脂之官能基則為伯胺(primary amine)、仲胺(secondary amine)與叔胺(tertiary amine)。陰、陽離子交換樹脂中以弱酸和弱鹼性樹脂具有較高的交換容量，且再生效率亦高(接近100%)。

## 2. 活性碳

存在於自然環境中之含碳物質，如植物的果殼、外皮、莖幹，動物的骨骼，礦物之泥煤、褐煤，焦油、瀝青等，及以人工化合原料之鋁鹽、矽鹽、聚丙烯烴、聚氯乙稀、橡膠等均被用來做為活性碳的原料。依活性碳的形狀及用途一般可分為粉末狀活性碳(PAC)、顆粒狀活性碳(GAC) 及纖維狀活性碳(ACF)。粉末狀活性碳乃先經粉碎使其粒子之95~100%可通過 100號篩(開口為 $149\mu m$ )，而有50~95%更可通過325號篩(Fornwalt及Hutchins, 1966)。其顆粒粒徑小於 $43\mu m$ 者佔60~75%，雖設備成本低廉，但有再生技術上之困難，因此增加巨額之操作成本。粒狀活性碳的大小可分為 $20\times 40, 12\times 20, 8\times 30$ 等數種，例如 $20\times 40$ 即表示碳顆粒可通過美國標準20號篩(0.076cm)，而為40號篩(0.040cm)所截留者。顆粒粒徑大於 $420\mu m$ 者，為目前種類最多，而使用最廣泛的一種，常用於固定床吸附塔中，用以去除合成有機物(SOC)，因其顆粒較大，在管徑中不易阻塞，可減低水頭損失。纖維狀活性碳為一種最新的產品，係將活

性碳製成纖狀不織布，其直徑約在5~20 μm，有多且小的孔隙，對揮發性的碳氫氯化物有較大吸附力。

### 三、吸附特性之比較

今就合成吸附劑及活性碳對不同的吸附質包括：腐植質(humic substances)、三鹵甲烷(trihalomethanes)、酚類(phenols)、其他分子(miscellaneous compounds)分別比較其吸附特性如下：

#### 3.1 腐植質(humic substances)

在許多合成吸附劑與活性碳之比較性研究中，Boening<sup>10</sup> 在批次式和小型桌面管柱試驗中，以 5種型式的活性碳和部份合成吸附劑來去除腐植質和磷酸。其中GACs的製造以瀝青，褐煤和煤碳製造而成，表面積介於 650~1100m<sup>2</sup>/g的範圍，而合成吸附劑的性質則示於表 1。恆溫吸附實驗以連續攪拌7~8天、溫度控制在室溫下進行。圖 1 是三種活性碳和兩種合成吸附劑分別對腐植質做恆溫吸附所獲得的曲線，由圖可知R-1a的合成吸附劑比所有的活性碳之吸附效果好。

表 1 吸附劑的性質<sup>10</sup>

樹脂	聚合基質	官能基	交換容量	比表面積	商品名稱	製造商
R-1a	苯酚甲醛	胺基	9.1		A-7	Diamond Shamrock, Redwood City, Calif
R-1b	苯酚甲醛	胺基	3.5		ES-561	Diamond Shamrock, Redwood City, Calif
R-2	苯乙烯二乙烯苯	無		300	XAD-2	Rohm and Haas Philadelphia,Pa
R-3	丙烯	無		200	XAD-8	Rohm and Haas Philadelphia,Pa
R-4	苯乙烯二乙烯苯	第四鉻基	2.6	60	IRA-904	Rohm and Haas Philadelphia,Pa
R-5	丙烯	第四鉻基	4.4	0.1	IRA-458	Rohm and Haas Philadelphia,Pa
CR	碳類樹脂	無		400	EX-340	Rohm and Haas Philadelphia,Pa

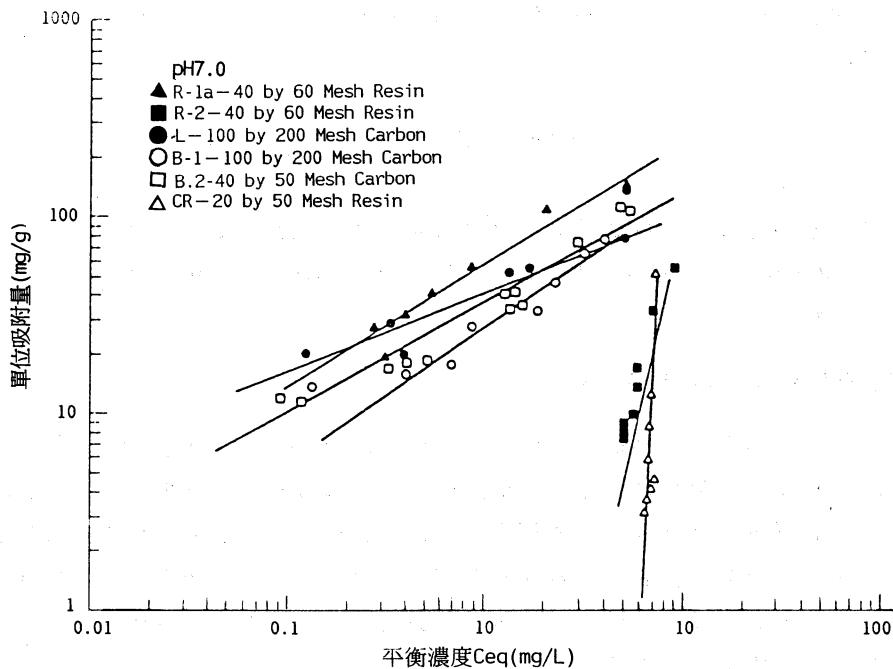
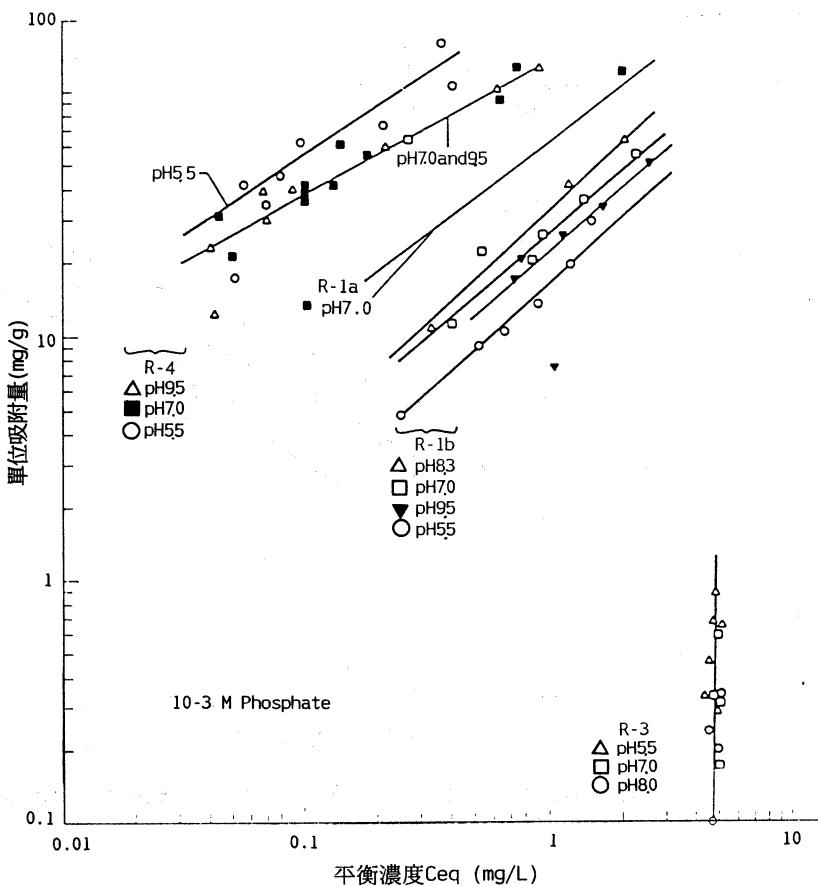


圖 1 合成吸附劑，R-1a，R-2和CR與活性碳，B-1，B-2和L對腐植酸做恆溫線<sup>10</sup>

圖 2 為 4種合成吸附劑在恆溫及不同 pH值條件下對腐植酸之吸附曲線。從圖中發現在不同的pH值條件下，各種吸附劑之吸附能力亦有很大的差異，例如R-4 樹脂在酸性條件下對腐植酸的吸附能力優於鹼性及中性條件；R-1b樹脂的吸附能力大小依序為pH=8.3 >pH=7.0>pH=9.5>pH=5.5；而R-3樹脂吸附能力與pH值大小無關。此外，R-4樹脂是由Styrene-DVB polymer和Quaternary ammonium官能基構成，樹脂中，它的表面積最小，但其吸附能力卻優於其他三者。

### 3.2 揮發性有機物(VOCs)

在許多競爭性的研究中，常以合成吸附劑與活性碳來去除低分子的THMs，例如Kong and DiGiano<sup>11</sup> 在模擬研究中以合成碳類吸附劑XE-340(Rohm & Haas Co.)和粒狀活性碳Filtrasorb-400(Calgon Corp.)吸附四氯化碳(Carbon tetrachloride, CT)，三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)和四氯乙稀(Tetrachloroethylene, PCE)3種揮發性有機物，其吸附情形如圖3，由二者對CT, TCE, PCE的單一恆溫吸附曲線可看出合成碳類吸附劑的吸附能力均比活性碳佳。

圖 2 樹脂 R-1a, R-1b, R-3, R-4, 在恆溫及不同的 pH 下，吸附腐植質<sup>10</sup>

Chudyk<sup>12</sup> 在小型管柱試驗中，以 5 種型式的活性碳和 3 種合成吸附劑去除三鹵甲烷。在活性碳的製造中，4 種活性碳以瀝青、煤碳，另一種則用褐煤製造；合成吸附劑 R-1a, R-2, 和 CR 的性質，則示於表 1。在恆溫吸附系統中，以連續攪拌 7 天，溫度控制在室溫進行比較實驗。圖 4 為活性碳 (L) 和合成碳類吸附劑 (CR) 對  $\text{CHCl}_3$  做恆溫吸附的情形，並在吸附實驗中加入腐植酸，研究其對上述兩種吸附劑吸附能力之影響。由圖可知，合成碳類吸附劑和活性碳的去除能力非常相近，可知腐植酸的大分子對合成碳類吸附劑吸附  $\text{CHCl}_3$  的能力並沒有很大的影響，但卻使活性碳的吸附能力減少 1.5 倍。CR 樹脂對  $\text{CHCl}_3$  和腐植酸的競爭效力是一定的，由此觀察，碳類樹脂並不吸附腐植酸<sup>10</sup>；而活性碳對腐植酸具有親和力，故其在褐煤活性碳吸附實驗中有很強的競爭效力。

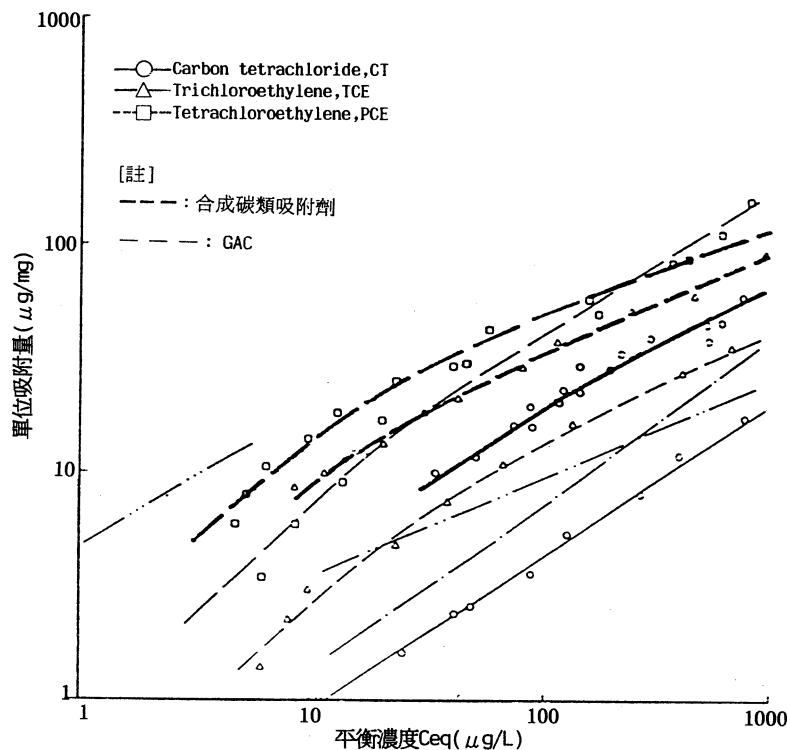


圖 3 以合碳類吸附劑和活性碳吸附TC，TCE和PCE的單一恆溫吸附圖<sup>11</sup>

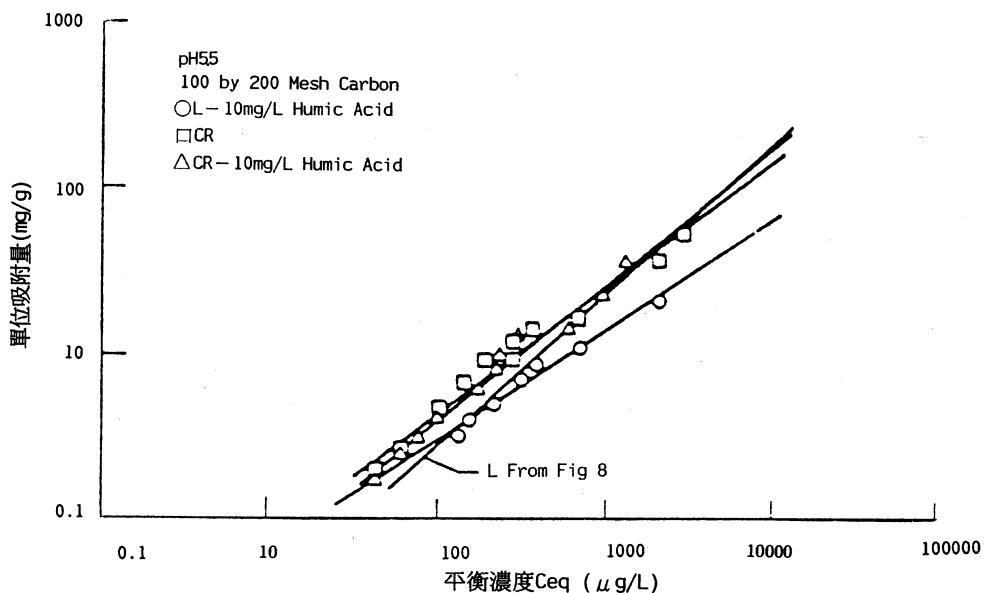


圖 4 碳類吸附劑CR和活性碳L對三氯甲做恒溫吸附<sup>12</sup>

Wood and DeMarco et al<sup>13</sup> 在Hialeah, Florida的Preston水處理場做模擬研究，以活性碳(GAC)和合成吸附劑(XE-340, IRA-904)競爭性的去除THMs和其他揮發性有機物。在小型桌面管柱實驗中控制條件分別為：流速401.0 L/min/m<sup>3</sup>，空床停留時間(EBCT)6.2min，床深0.76m。表2為吸附劑吸附CHCl<sub>3</sub>所得到的貫穿曲線資料，其中樹脂管柱對CHCl<sub>3</sub>的貫穿曲線比活性碳快，但其吸附量與活性碳大約相同。而表3對Bromodichloromethane之吸附資料亦有類似的結果，每100克XE-340吸附劑在最終的吸附量比活性碳多，而在這些吸附溶液中至少有16種低分子量有機物，研究中並發現XE-340對單一有機鹵化物的吸附能力比GAC多2至3倍。

表4為Neely<sup>14</sup>之恆溫吸附實驗(連續攪拌48小時)，其可看出XE-340對CHCl<sub>3</sub>到達平衡濃度2ppm的吸附能力(mg/g)幾乎均為五種活性碳吸附能力的5倍，顯示XE-340吸附劑的表面積比其他吸附劑更有助於其對於CHCl<sub>3</sub>的吸附能力。

### 3.3 酚類

合成吸附劑和活性碳對酚類(phenols)的吸附去除研究報告比較少。在酚類之去除方面，就合成吸附劑的選擇，曾有學者<sup>15~17</sup>以沒有離子官能基之吸附劑例如Amberlite XAD樹脂和乙烯吡啶-二乙烯苯共聚合物(Vinylpyridine-divinylbenzene copolymer)吸附酚類，其樹脂的再生是可行的，但其吸附能力卻非常低。

Goto, M. et al. 在混合吸附床管柱研究中，以強鹼離子交換樹脂Dowex 1-X4(Dow Chem. Co.)和活性碳(Diahope, Mitsubishi Kasei Co.)為吸附劑，溫度控制在30°C。離子交換樹脂的吸附床高105mm，活性碳則為76.0mm，此2種吸附劑的吸附情形如圖5所示。

Kim et al.<sup>18</sup>在報告中，以合成吸附劑Duolite A-7和GAC(60×80mesh)為吸附劑作恆溫吸附實驗，連續攪動3~4天，溫度控制在19.5~22°C。圖6即為合成吸附劑Duolite A-7在不同的7種pH值條件下吸附對硝基酚(p-Nitrophenol, PNP)之情形，取Log-Log作圖，並從其他的研究報告中取GAC和XAD-7之不同pH值做比較，發現當GAC的pH值比PNP的pKa值(=7.15)大時，GAC比其他吸附劑之吸附能力大；然而亦有例外的情形發生，即少數GAC的pH值雖比PNP的pKa值小，但吸附能力卻也很大，此外，合成吸附劑Duolite A-7的恆溫吸附曲線較接近於Carbon的恆溫吸附曲線(pH=4.1)；而XAD-7屬於丙烯基(acrylic)型樹脂，沒有離子交換的官能基，故受pH值的影響很小。合成吸附劑Duolite A-7在pH值為3.6和9.3時有強的pH值效應，顯然是因為在低pH值時，H<sup>+</sup>和PNP間具有競爭效應，而在高pH值時，酚鹽(phenolate)陰離子和樹脂基質之間具有斥力。

Vliet et al.<sup>20</sup>曾經以2種活性碳和8種合成吸附劑對酚類比較其吸附能力，在恆溫吸附系統中，連續攪動8天，溫度控制在室溫下進行。在處理研究中，平衡濃度非常廣泛，恆溫吸附方程式並不符合Langmuir和Freundlich模式，故以如下表示之：

表 2 對三氯甲烷的吸附資料<sup>13</sup>

試驗項目	消			毒			後			水
	1	IR	1	IR	2	3	3	4	4	
實驗設置編號										4
床深(m)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	1.52	2.29
吸附劑	XE-340	XE-340	XE-340	XE-340	GAC	IRAG94	GAC	GAC	GAC	GAC
平均進流濃度( $\mu\text{g/L}$ )	3.4	1.2	80.2	69.3	64.4	57	57	67.3	67.3	67.3
管性質穿時間(day)	?	7?	3	3	0	7		8	29	49
管性質飽和時間(day)	152?	156	150	150	22		23.5	49	76	98
質量傳輸帶(cm)	72.6	73.7	73.7	76.2	53.3		50.8	62.2	81.3	80.8
測試時間(day)	117	122	117	122	63	53	53	53	122	122
進入總量(g)	0.0355	0.013	0.838	0.736	0.36	0.27	平	0.733	0.733	0.733
吸附總量(g)		0.0081	0.497	0.456	0.247	0.074	平均	0.094	0.235	0.376
飽和吸附量(g)		0.0085	0.596	0.473		0.429	增加	0.074	0.094	0.0235
吸附百分比(%)		62	59	62	69	27	倍	13	32	51
飽和吸附百分比(%)		52	51	52		50	加	66	80	87
每100g吸附劑之吸附量(g)	0.0037	0.231	0.212	0.115	0.042	1.13	倍	0.534	0.067	0.071
每100g吸附劑之 飽和吸附量(cc)	(g)	0.00395	0.265	0.22	0.2	0.042		0.0534	0.067	0.071
	(cc)	0.027	0.177	0.148	0.134	0.028		0.0358	0.0449	0.048
										0.049

表 3 對溴・二氯甲烷的吸附資料<sup>13</sup>

試驗項目	消 毒						後 水		
	1R	1R	1R	2	3	3	4	4	4
實驗設置編號	1	1R	1R	2	3	3	4	4	4
床深(m)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	1.52	2.29
吸附劑	XE-340	XE-340	XE-340	XE-340	GAC	TRA904	GAC	GAC	GAC
平均進流濃度(ug/L)	2.4	?	37.1	42.7	42.4	39	39	47	47
管柱穿穿時間(day)	69		20	20	22	16		14	42
管柱餡和時間(cm)	Name	63	216	210	CE	53		56	98
測試時間(day)	117		117	122	63	53	53	57.2	108.5
進入總量(g)	0.012		0.388	0.465	0.239	0.185		0.512	0.512
吸附總量(g)	0.01		0.301	0.36	0.225	0.121	平均	0.147	0.293
飽和吸附量(g)		0.391	0.439		0.121		0.147	0.293	0.444
吸附百分比(%)	83	83	78	77	94	65	增 加	29	57
飽和吸附百分比(%)		55	54		65		倍	63	71
每100g吸附劑之吸附量(g)	0.005	0.005	0.14	0.167	0.105	0.069	1.13	0.084	0.083
每100g吸附劑之 飽和吸附量(cc)	(g)		0.182	0.204		0.069		0.084	0.083
	(cc)		0.0907	0.1017		0.0344		0.0419	0.0414

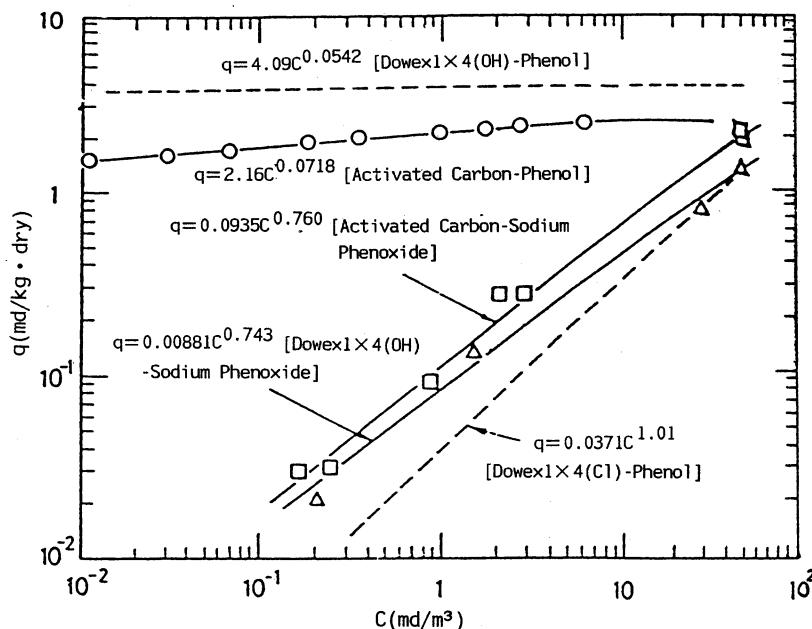
[註] CE：不能以外插法計算

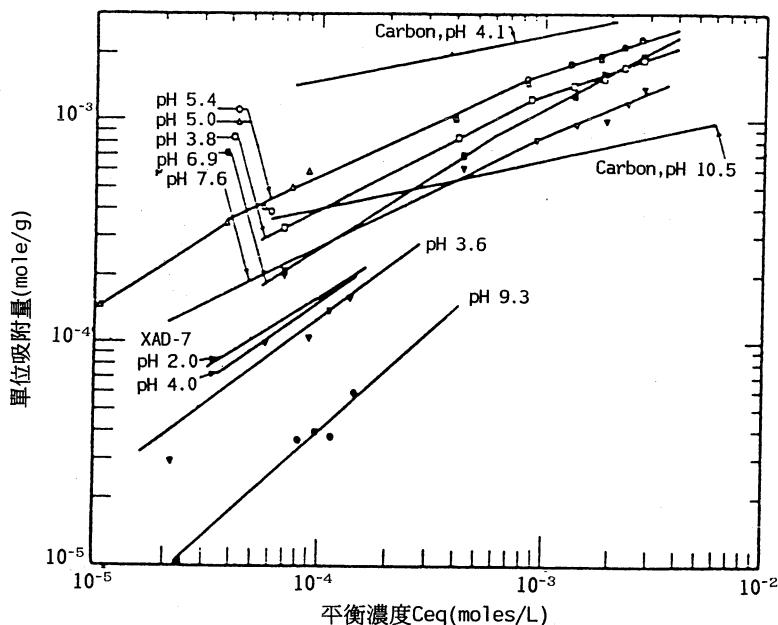
表 4 多種吸附劑的物理和吸附性質<sup>14</sup>

吸 附 劑	型 式	氯仿單位吸附量	表面積 <sup>(1)</sup>	在氯仿中的體積膨脹率(%)
Ambersorb XE-340	碳類	50	400	13
Ambersorb XE-347	碳類	21	400	3
Ambersorb XE-348	碳類	28	550	2
XE-225A	非常低交聯聚合均	6	50	520
Amberlite XAD-1	低交聯聚合物	10	100	42
Amberlite XAD-2	中交聯聚合物	4	300	13
Amberlite XAD-4	高交聯聚合物	6	750	23
Filtrasorb 300	顆粒狀活性碳	10	1,000 <sup>(2)</sup>	—
Filtrasorb 400	顆粒狀活性碳	12	1,000 <sup>(2)</sup>	0
Nuchar WV-G	顆粒狀活性碳	12	1,000 <sup>(2)</sup>	2
BPL (12×30)	顆粒狀活性碳	17	1,000 <sup>(2)</sup>	1
Kubrea	球狀碳	13	780	1

[註] (1)：為在微小(Micromeretics)模式之高速分析

(2)：為製造商的估計值

圖 5 在活性碳和Dowex 1-X4吸附劑對酚及苯氧基化鈉之恒溫吸附<sup>9</sup>

圖 6 吸附劑A-7對硝基酚之恒溫吸附線<sup>19</sup>

$$C = a_1 q \exp(a_2 q_a a_3 + a_4) \quad (1)$$

其中  $C$  : 平衡後濃度 (mg/L)

$q_a$  : 對應的吸附能力 (mg/g)

$a_i$  : 以曲線回歸求出之係數 ( $i = 1, 4$ )

此方程式是Freundlich方程式的基本擴張；圖7為多種吸附劑對酚類的恒溫吸附曲線，可發現3種碳類吸附劑XE-347，XE-348和XE-340與2種活性碳 Filtrasorb400和BACM有相近的效應。批次式吸附動力學是為了發展管柱實驗的研究，表5為各種吸附劑對酚類的膜交換係數和表面膜擴散係數，其中兩個係數與吸附劑的形式、粗糙因子(Roughness factor)有關，而高擴散和高膜交換則與吸附劑生產的粗糙度和不規則表面有關連。

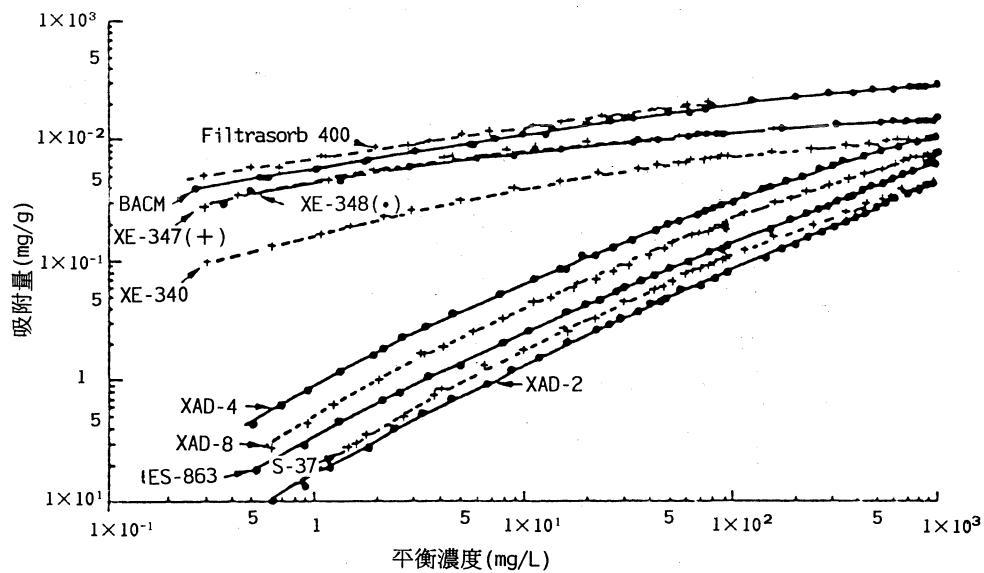
Weber<sup>21</sup>以8種合成吸附劑和2種活性碳(GACs)對酚類、磷酸鹽、和CCl<sub>4</sub>做批次和管柱研究，在恒溫吸附實驗中，以2個係數表示Dubinin<sup>22</sup>方程式，如下：

$$W = W_0 \exp(-Bt^2/B) \quad (2)$$

其中，  $W = Q/10p$

$Q$ ：被吸附物質的液相負荷 (mg adsorbate/g adsorbent)

$p$ ：被吸附物質的容積密度 (Bulkdensity, g/cm<sup>3</sup>)

圖 7 吸附劑對酚類的恆溫吸附線<sup>20</sup>表 5 對酚的批次式之速率係數<sup>20</sup>

吸 附 劑	$D_s \times 10^9$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) <sup>(1)</sup>	$k_{fb} \times 10^3$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) <sup>(2)</sup>	形狀和粗糙因子 <sup>(3)</sup> (n, 無因次常數)
BACM carbon	2.18	7.04	1.00
Filtrsob 400 carbon <sup>(4)</sup>	1.24	6.88	0.98
Ambersorb XE-348	0.696	4.88	0.69
Ambersorb XAD-4	20.6	4.35	0.62
Ambersorb XE-347	0.572	1.32	0.19
Ambersorb XE-340	0.484	1.01	0.14

[註]攪拌速度=1,200rpm，吸附劑粒子大小(particle size)=0.30~0.42mm

(1): 有效粒內表面擴散係數

(2): 膜交換係數 (從CMB速率實驗推得)

(3): 各種吸附劑的 $K_{fb}$ 值與BACM carbon之 $K_{fb}$ 值的比率

(4): 根據初濃度為100mg/L之等溫吸附

$W_0$ ：被吸附質最大的液相負荷 ( $\text{cm}^3 \text{ adsorbate}/100\text{g adsorbent as C} \rightarrow \text{Cs}$ )

$t$  :  $RT \ln(\text{Cs}/C)$  (kJ/mol)

R : 以 kJ/mol 為單位的氣體常數

T : 溶液的溫度 (K)；

C : 被吸附物質的液相濃度 (mg/L)

$C_s$  : 被吸附物質的溶解度 (mg/L)

B : 被吸附物質與吸附劑之間的親和力係數 (kJ/mol)<sup>2</sup>

表 6 , 表 7 分別為 10 種吸附劑和 5 種有機分子間之 B 值和  $W_0$  值。

表 6 親和力係數(B)<sup>21</sup>

吸附劑 種類	商品名稱	酚	對氯酚	四氯化碳	對甲苯 磺酸鹽	十二苯磺 酸鹽
A	F-400(a)	462.07	546.25	184.210	719.66	1261.30
B	BACM(b)	414.22	538.66	324.960	680.93	874.06
C	XE-340(c)	355.16	477.60	178.830	248.19	568.14
D	XE-347(c)	549.94	787.84	241.640	599.57	739.04
E	XE-348(c)	523.47	832.51	301.270	426.50	855.95
F	XAD-2(c)	118.86	135.76	43.473	217.85	370.73
G	XAD-4(c)	139.04	178.99	36.178	185.57	454.06
H	XAD-8(c)	128.81	151.79	28.942	182.27	305.86
I	ES-863(d)	125.49	138.47	31.560	172.55	306.38
J	S-37(d)	118.02	118.09	37.503	217.22	514.74

[註] a: Calgon Corp., pittsburgh, PA.

b: Mitsubishi International Corp., New York, NY.

c: Rohm and Haas Co., Philadelphia, PA.

d: Diamond Shamrock Chemical Co., Dallas, TX.

### 3.4 其他分子(Miscellaneous Compounds)

Lawrence<sup>23</sup>在研究中，以 2 種 GACs、2 種聚合物吸附劑、2 種聚氨基甲酸酯 Polyurethane foams 和 PVC 來吸附 Aroloors 1242 和 1254，連續攪拌溶液之時間為 30 分鐘，圖 8 為取 Log-Log 作圖之非線性吸附資料，其中活性碳和 XAD-2 有較大的吸附能力，這些不規則的恆溫吸附曲線可能是因水中 PCBs 為低溶解度，或是由於分析上的問題。

表 7 最大能力 ( $W_0$ ) 值<sup>21</sup>

吸附劑 種類	商品名稱	酚	對氯酚	四氯化碳	對甲苯 磺酸鹽	十二苯磺 酸鹽
A	F-400 <sup>(1)</sup>	33.780	36.25	41.940	7.3700	44.210
B	BACM <sup>(2)</sup>	34.130	36.03	42.930	7.5920	42.830
C	XE-340 <sup>(3)</sup>	13.550	12.98	11.380	0.6163	3.875
D	XE-347 <sup>(3)</sup>	16.850	16.71	1.740	0.9342	3.707
E	XE-348 <sup>(3)</sup>	17.570	16.59	10.500	3.6520	12.880
F	XAD-2 <sup>(3)</sup>	8.219	11.31	13.160	0.8246	26.110
G	XAD-4 <sup>(3)</sup>	20.570	20.97	40.820	2.6820	76.330
H	XAD-8 <sup>(3)</sup>	16.420	21.34	13.450	0.6809	30.440
I	ES-863 <sup>(4)</sup>	12.030	13.89	26.730	1.6670	67.630
J	S-37 <sup>(4)</sup>	10.460	14.59	1.791	9.5970	41.610

[註] (C→Cs) 乾燥時吸附劑(cm/100g).

(1)Calgon Corp., pittsburgh, PA.

(2)Mitsubishi International Corp., New York, NY.

(3)Rohm and Haas Co., Philadelphia, PA.

(4)Diamond Shamrock Chemical Co., Dallas, TX.

Chudyk<sup>12</sup> 在恆溫吸附和批次式管柱研究中以GACs和合成吸附劑從水中去除2-甲基異龍腦(2-Methylisoborneol, MIB)。在原水供給中，MIB是引起腐臭的分子之一，在很多研究中發現腐植質會影響MIB的吸附過程。3種合成吸附劑和1種活性碳(100×200mesh)去除MIB的恆溫吸附圖請參見圖9，從圖中可知Carbon 對MIB的吸附優於合成吸附劑，而R-1a樹脂對MIB吸附能力很小。

Love and Eilers<sup>24</sup> 在實驗室研究以碳類合成吸附劑Ambersorb XE-340吸附低分子量有機物，表8為合成吸附劑於管柱中，在多種吸附床深度和多種空床停留時間(EBCTs)對三氯乙烯Trichloroethylene，和相關性溶液之吸附值。

Love and Eilers<sup>24</sup> 分別以曝氣和吸附的方式來去除水中的6種有機物。由表9中顯示合成吸附劑比GAC和曝氣式的效率好。

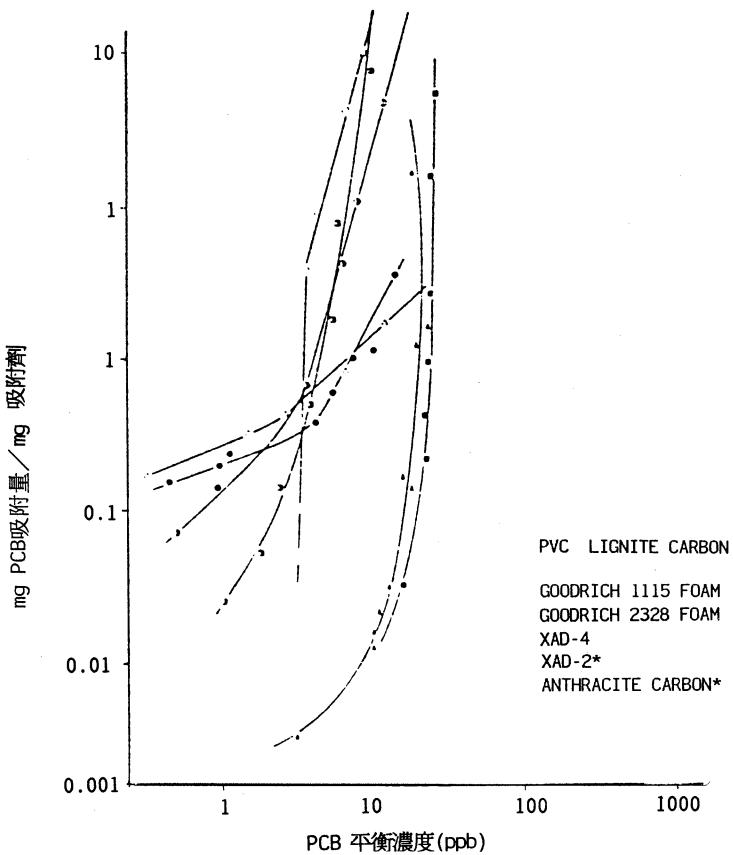


圖 8 PVC, 褐煤活性碳、無煙煤活性碳、聚氨基甲酸酯和 Amberlite XAD-2, Amberlite XAD-4去吸附Aroloors 1242和1254

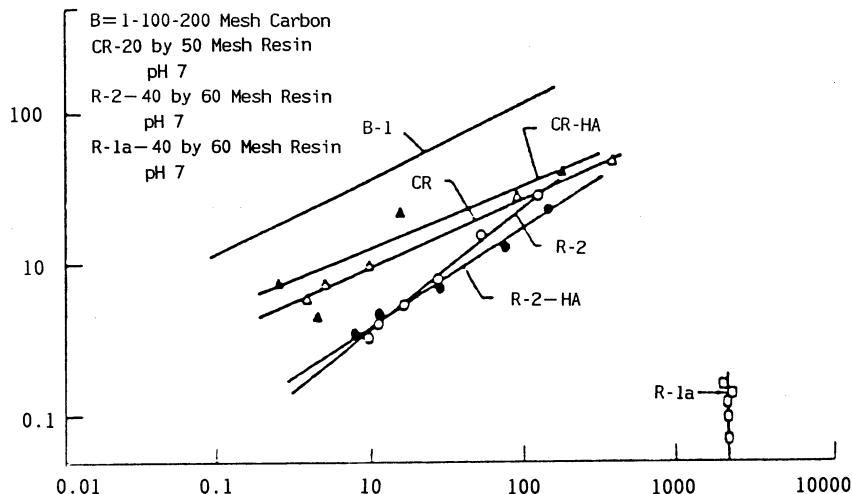


圖 9 R-1a, R-2 and CR 樹脂對MID之恒溫吸附<sup>12</sup>

表 8 合成吸附劑Ambersorb XE-340對三氯乙烯等有機化合物種之吸附值<sup>24</sup>

化 合 物	平均濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )	床 深		空床停留時間 (min)	出水 $0.1\mu\text{g/L}$ 時之負荷 $\text{m}^3/\text{m}^3$
		(m)	(m)		
三氯乙烯	215	0.3	0.3	2	83700 <sup>(1)</sup>
	210	0.6	0.6	4	78600 <sup>(1)</sup>
	210	1.2	1.2	7.5	>53300 <sup>(1)</sup>
	177	0.8	0.8	9	>20160
	4	0.8	0.8	8.5	>123340
	3	0.2	0.2	5	>117000
四氯乙烯	41	0.3	0.3	2	>99000 <sup>(2)</sup>
	51	0.6	0.6	4	78600 <sup>(2)</sup>
	65	1.2	1.2	7.5	>53300 <sup>(2)</sup>
	70	0.3	0.3	2	106000 <sup>(2)</sup>
	94	0.8	0.8	5	112900
	400	0.8	0.8	9	17290
	3	0.8	0.8	8.5	>12340
	2	0.8	0.8	9	>20160
1,1,1-三氯乙烷	5	1.2	1.2	7.5	39300 <sup>(2)</sup>
	33	0.8	0.8	9	56000
	237	0.2	0.2	5	82600
	23	0.2	0.2	5	>100800
	1	0.8	0.8	9	>20160
	19	0.8	0.8	5	7560
	19	0.8	0.8	10	15120
四氯化碳	40	0.3	0.3	2	37200 <sup>(2)</sup>
	38	0.6	0.6	4	39500 <sup>(2)</sup>
	40	1.2	1.2		19700 <sup>(2)</sup>
順-1,2-二氯乙烯	40	0.3	0.3	7.5	36400 <sup>(2)</sup>
	25	0.8	0.8	2	14400
	22	0.8	0.8	6	7200
	16	0.8	0.8	6	11500
	6	0.8	0.8	6	<20160
	2	0.8	0.8	8.5	<59000
					but <12340
1,2-二氯乙烷	1	0.2	0.2	5	10864

[註] (1) : 進流濃度 $20\mu\text{g/L}$ (2) : 進流濃度 $5\mu\text{g/L}$

表9 處理的相關效率<sup>24</sup>

化 合 物	曝 氣 亨利定律	吸 附			合成樹脂 模 型 場	煮 沸		
		顆 粒 狀 活 性 碳						
		模 型 場	等 溫 吸 附	模 型 場				
三氯乙烯	3	2	2	1	1	5		
四氯乙烯	2	1	1	2	2	1		
1,1,1-三氯乙烷	5	5	6	5	5	4		
四氯化碳	1	3	3	3	6	3		
順-1,2-二氯乙烯	4	4	5	6	4	2		
1,2-二氯乙烷	6	6	4	4	3			

[註] 1.=處理效率最佳；6=處理效率最差

Suffet et al<sup>25</sup>在模擬管柱試驗中以GAC (Filtrasorb 400, Calgon Corp)和XAD-2<sub>d</sub>聚合物吸附劑(Rohm & Haas Co.)吸附4種有機分子 1,4-戴奧辛(1,4-dioxane), 硝基甲烷(nitromethan), 1-丁醇(1-butanol) 和甲·乙酮(Methyl ethyl ketone)。2種吸附劑的性質及實驗操作條件示於表10，而其吸附的結果請參閱圖10，由圖中可發現活性碳的吸附較合成吸附劑佳。

表10 在模擬管柱研究之吸附劑性質及操作情形<sup>25</sup>

水 力 資 料	XAD-2 <sup>(1)</sup>	Filtrasorb 400 <sup>(2)</sup>
試驗期間	18 Weeks	
管徑(cm)	15.2	15.2
床高(m)	0.53	1.74
流速(L/min)	3.26	3.26
體積負荷(L/min · m <sup>3</sup> )	334.2	106.9
床體積(kg/m)	29.8	9.2
表面負荷(L/min · m <sup>2</sup> )	179.2	179.2
線性流速(m/min)	0.18	0.18
停留時間(min)	3.0	9.7
吸附劑資料	XAD-2 <sup>(1)</sup>	Filtrasorb 400 <sup>(2)</sup>
篩目大小	20×80	12×40
比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	300	1100
平均孔徑大小(Å)	90	34

[註] (1): Rohm & Haas Co., Philadelphia,Pa.

(2): Calgon Corp., Pittsburgh,Pa.

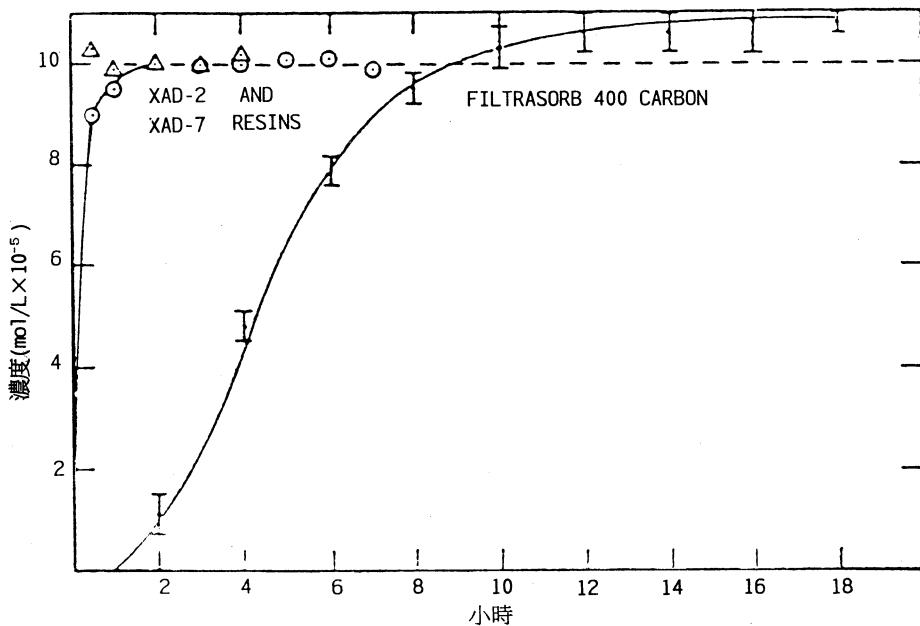


圖10 以Filtrasorb 400和XAD-7吸附劑吸附4種混合分子之  
戴奧辛之貫穿曲線<sup>25</sup>

#### 四、結語

由以上文章觀之，合成吸附劑與活性碳比較，對於吸附不同的吸附質，有它特殊的效能，且合成吸附劑的再生效率幾乎可達 100%，而活性碳的再生會耗損一些劑量，故合成吸附劑在劑量成本上可減少一筆費用，並且在現廠的再生非常便利，故合成吸附劑在歐、美、日等國已普遍受到相當程度的歡迎，頗值得提供給自來水處理機構及人員參考採用。

#### 五、參考文獻

1. Gustafson, R. L. and J. Paleos., Interaction Responsible for the Selective Adsorption of Organics on Organic Surfaces Chapter 10 in Organic Compounds in Aquatic Environments. S. D. Faust and J. V. Hunter, eds. Marcel Dekker, New York, p.213, 1971.
2. Zhu, Y. and Sengupta A., Sorption Enhancement of Some Hydrophilic Organic Solutes through Polymeric Ligand Exchange, Environ. Sci. Vol. 26, No. 10, 1992.

3. Fu, P. and Symons J. Removing Aquatic Organic Substances by Anion Exchange Resins, Jor. AWWA., 1990.
4. Kim, P. H. and Symons J. M., Using Anion Exchanges Resins to Remove THM Precursors, Jur. AWWA., 1991.
5. Hongve, D. Anion Exchange for Removal of Humus from Drinking Water: Calcium Improves The Efficiency of Process", Wat. Res. Vol.23, No.11,p.1451 -1254 1989.
6. Jelinek, R. T. and Sorg, T. Operation a Small Full-Scale Ion Exchange System for Uranium Removal, Jou. AWWA., 1988.
7. Hathaway, S. and Jr, F., Removing Arsenic From Drinking Water, Jou. AWWA ., 1987.
8. Ion Exchange for the Removal of Nitrate from Well Water, Jou. AWWA., 1986.
9. Goto,W. et al., Adsorption and Desorption of Phenol on Anion-Exchange Resin and Activating Carbon, Environ. Sci. Technol., Vol.20, No.5 1986.
- 10 Boening, P. H. et al., Jure. AWWA. 72:54 1980.
- 11 Kong, E. J. and DiGiano F. A., Competitive Adsorption Among VOCs on Activated CArbon and Carbonaceous Resin, Jou. AWWA. 1986.
- 12 Chudyk, N. A. et al., Jour. AWWA., 71:529,1979.
- 13 Wood, P. R., and J. DeMarco., Activated Carbon Adsorption of Organics from the Aqueous Phase, Vol.2, Ann Arbor Science Publishers 1980.
- 14 Neely, J. W., Activated Carbon Adsorption of Organic from the Aqueous Phase, Vol.2, M. J. McGuire and I. H. Suffet, Eds.,1980.
- 15 Paleos, J. J. Colloid Interface Sci.,1969.
- 16 Crook, E. H., McDonnell, R. P. et al., Ind. Eng.Chem. Prod. Res. Dev.,1975.
- 17 Farrier, D. S. et al., Colloid Interface Sci.,1979.
- 18 Dawabata, N. et al., Chem. Soc. Jpn.,1981.
- 19 Kim, B. R. et al., J. Water Poll. Control Fed. 48:120,1976.
- 20 Van Vliet, B. M. et al., Water Res. 14, 1719,980
- 21 Weber,W. J. Jr. and B. M. Van Vliet. J. Am. Water Works Assoc.73:426,1981.
- 22 Dubinin, M. M., Chem. Rev. 60, 235 (1960).
- 23 Lawrence, J. and H. M. Tosine., Environ. Sic. Technol., 10, 381,1976.
- 24 Love, O. T. Jr. and R. G. Eilers. J.AWWA, 74.413,1982.
- 25 Suffect H. and Brenner L. et al., Evaluation of the Capability of Granular Activated Carbon and XAD-2 Resin to Remove Trace Orgains from Treated Drink Water, Vol.12, No.12, Novermber,1978.