

傳統過濾單元對水源中藻類之去除

曾四恭* 王傳政* 連奕偉***

壹、前言

台灣地區由於家庭，工業等廢水大量排入水庫與湖泊中，湖泊因而加速優養，導致水質惡化，尤其藻類的大量繁殖更使得水中之pH值鹼度、色度、溫度、溶氧等發生改變，造成淨水廠操作人員的困擾與水質衛生上的顧慮。(1)(2)

一般而言，藻類的大量繁殖，促使淨水程序發生困擾並非發生於暴雨濁度突高時，而是在平常時間發生，故而此時濁度由懸浮物質導致的問題並非主要，運用此觀點，在進行本研究，懸浮固體的變化範圍不宜太大，主要的變化應為藻類的濃度，且關於濾料的選定與濾床深度的探討，都針對藻類而論。對於不同的優勢形式，例如在夏季時藍綠藻大量繁殖，可能的優勢種為Oscillatoria、Synedra、Microcystis等，前二者屬長桿狀，後者呈球形或群聚呈不規則形，對於濾床的影響自有不同，唯除實地觀測其影響性外，另外似可將其視為不同的粒徑所導致的影響來探討。結果再根據歷年來，不同水廠其進流水中不同的藻濃度設計最理想的濾料形式及深度，以符合水廠的實際操作需要。

本研究主要在探討不同藻類進行過濾程序的行為，研究內容包括有：

1. 過濾不同濾料，篩選不同粒徑，在不同的濾床位置下，研究各點藻類去除率。
2. 以上述所得之結果作成多層濾料的組合，求出處理藻類的最佳條件。

* 國立台灣大學環境工程學研究所教授

** 國立台灣大學環境工程學研究所碩士

*** 國立台灣大學環境工程學研究所研究助理

貳、實驗設備與方法

一、實驗藻類

(1) Oscillatoria tenuis

屬藍綠藻植物門(Phylum Cyanophyta)，藍綠藻綱(Class Cyanophyceae)顫藻目(Oder Oscillatoriales)顫藻屬(Genus Oscillatoriales)。細胞縱面較長並互相連結成絲狀體，藻絲前方大抵成彎曲，頂端細胞尖，並膨脹成圓形帽狀，細胞為青綠色並有不明之點紋。長寬差距小，細胞長 $2.5\sim 3.2\mu$ ，直徑 $5\sim 8\mu$ 。

(2) Microcystis aeruginosa

屬藍綠藻植物門(Phylum Cyanophyta)，藍綠藻綱(Class Cyanophyceae)漿果藻目(Oder Chlorococcales)漿果藻科(Family Chlorococcales)，氣胞藻屬(Genus Microcystis)。群體呈卵圓球，球形或不規則形，細胞均呈球形聚集在膠體中，細胞內有顯著的偽氣泡，細胞直徑 $2\sim 5\mu$ 。

(3) 原水混合藻：以台大環工所及文學院水池為水源，若藻類濃度不足則加入實驗室開放環境培養的混合藻，其溫度變化範圍在 $20\sim 32^{\circ}\text{C}$ 。

二、實驗裝置

利用四組管柱，直徑3.5公分，高240公分進行實驗，原水經混凝沉澱槽(500公升)，過濾預貯槽(1000公升)，而以控制進流方式進行定速過濾實驗，實驗裝置見圖1。

三、實驗方法

1. 濾料前處理

不同濾料篩選不同粒徑，進行實驗前，利用自來水沖洗24hr至乾淨後，在 103°C 下乾燥及殺菌24hr。

2. 實驗方法

(1) 利用同一濾料不同粒徑的無煙煤、矽砂，石榴石進行過濾實驗，測其水頭，出水濁度、出水葉綠素TOC，並挖出濾料，區分各段，測其濁度及葉綠素。

原水濁度控制在 $15\sim 20\text{NTU}$ ，葉綠素 $a_{10}\sim 30\text{mg}/\text{m}^3$ ，混凝劑 $10\text{mg}/1\text{PAC}$ ，濾速 $250\text{m}/\text{d}$ ，填充床深120公分。

挖出濾料濁度的測法乃將體積20ml的過濾後濾料加自來水，將其充分攪拌後測其懸浮濁度。而COD則是取20ml的過濾後濾料以自來水稀釋至100ml，取20ml測其COD。

(2) 在實驗條件下，利用(1)單層濾料所得之數據，選擇合成雙層或多層濾料，以作為選擇最佳過濾條件之參考。

四、水質分析方法：(3)

1. 葉綠素a：以0.45 μ 孔徑濾膜將藻類分離，再用丙酮或甲醇萃取，用分光光度計測室吸光度。
2. 藻類計數：以Sedgwick-Rafter Counter Chamber計數。
3. TOC：利用總有機碳分析儀測定TOC。
4. 其他水質：依據美國"水及廢水檢驗標準方法"16版的建議方法分析。

參、結果與討論

一、濾料粒徑及孔隙分析

取濾料在篩振盪器振盪12min，可得到其粒徑分佈圖，本實驗所採用的矽砂規格，12~16mesh有效粒徑(d₁₀)為1.06mm，均勻係數(d₆₀/d₁₀)1.33，16~20mesh有效粒徑0.93mm，均勻係數1.2，20~25mesh為0.72mm，均勻係數1.27，30~45mesh粒徑為0.35mm，均勻係數1.31。本實驗所用矽砂，無煙煤及柘榴石篩選的粒徑見表1、2、3。

各濾料之孔隙率，先由實驗求得Bulk density(Bd)及Particle density(Pd)，再由計算表(Calculation method)得 $P(\%)=[1-(Bd/Pd)\times 100\%]$ ，由前述方法重複三次實驗可求得各濾料的Bd、Pd、P(%)平均值如表4。

表1 矽砂的規格

篩號別	有效粒徑 (dp) (mm)	均勻係數 Uniform coeff
12~16	1.06	1.33
16~20	0.93	1.20
20~30	0.72	1.27
30~45	0.35	1.31

表2 無煙煤的規格

篩號別	有效粒徑 (dp) (mm)	均勻係數 Uniform coeff
12~16	1.29	1.23
16~20	0.98	1.61
20~25	0.75	1.07
25~30	0.65	1.16

表3 柘榴石的規格

篩號別	有效粒徑 (dp) (mm)	均勻係數 Uniform coeff
8~12	1.9	1.29
12~25	1.1	1.28
25~35	0.59	1.20
35~45	0.43	1.18

表4 濾料特性

濾料	容積密度(Bd)	顆粒密度(Pd)	孔隙率(P)
矽砂	1.51	2.57	0.41
無煙煤	0.83	1.50	0.447
柘榴石	2.04	3.87	0.472

二、不同濾料最佳粒徑的選定

為求得本實驗條件下不同濾料的最佳粒徑，利用前節篩選得各濾料間不同的粒徑，做為本實驗的材料，另外實驗過程模擬一般的原水處理，有混合膠羽池（快混 80rpm，2分鐘；慢混30rpm，30分鐘，而後沉澱30分鐘），再經過濾預儲槽，爾後以pump泵上過濾設備進行過濾，濾率維持250m/day。試驗之藻種及水質見表5。

各種濾料最佳粒徑的選擇，主要根據各管的出流水質與及水頭損失值而定。

表5 求最佳粒徑的試驗藻種及水質

試驗 編號	試驗 條件	藻種	* 濁度		* 葉綠素		* 藻數		* TOC		濾料	粒徑
			NTU		mg/m ³		No/ml		(ppm)			(原水)
No. 1		Microcystis	4.7 5.7		12.7 *11.68		** —		** —		矽砂	—
No. 2		Microcystis	6.0 4.5		9.91 * 6.60		** —		** —		柘榴石	—
No. 3		Microcystis	4.5 4.7		2.032 * 0.762		** —		0.098		無煙煤	—
No. 4		Ocellat- oria	4.8 6.5		6.1 ** —	89 100			0.811		矽砂	15.6 19.2
No. 5		Ocellat- oria	4.8 10 6.5		** — ** —	123 101			0.709		無煙煤	14.2 — 23
No. 6		Ocellat- oria	5.1 6.0		5.5 * 8.64	168 235			0.66 0.24		柘榴石	8.9 21.9
No. 7		混合藻	3.3 3.0		12.7 * 9.74	** —			1.68 1.52		矽砂	6.7 20.7
No. 8		混合藻	5.0 5.1		2.93 * 30.05	** —			** —		無煙煤	6.9 17.6
No. 9		混合藻	7.0 2.7		19.05 * 10.16	** —			0.93 1.96		柘榴石	—

* 混凝沉澱後，進流水值

* 因過濾進行為batch式，在8hr或10hr時，因顧及藻類本身的decay會使濃度降低，故重新用以新鮮藻液混凝沉澱後繼續進行實驗。

** 因實驗設備損壞，或技術上有困難未測。

1. 矽砂

矽砂粒徑分別以8~12mesh，12~20mesh，20~30mesh及30~45mesh四組進行過濾試驗，觀察出流水濁度、葉綠素a、TOC及其去除率和水頭損失。

(1) Microcystis

- a. 由圖2出流水濁度可看出4組實驗中除8~12mesh水質有顯著變差外，其餘皆相差不多。
- b. 由圖2與圖3對照可發現，出流水葉綠素含量乃以10~12mesh與其它三組有較大的差別。
- c. 濁度去除率除8~12mesh外，皆維持在80%左右，葉綠素的去除率較低，8~12 mesh曾低至40%，12~20mesh出流水也曾低至45%左右，其餘兩組去除率皆維持在60%以上。
- d. 表面水頭損失：表面水頭損失以30~45mesh圖4上升最快，濾程約12hr，水頭即上升60cm，餘濾程皆超過24hr。

(2) Ocillatoria

- a. 出流水濁度由於8~12mesh的矽砂實驗結果不佳，利用12~20mesh的矽砂重新篩為12~16、16~20mesh繼續以後實驗，其結果顯示兩者出流水大致相同，維持在0.6NTU以下。
- b. 出流水藻數甚低，四組亦大致相同，大部分均在10個/ml以下。
- c. 對於兩者之去除率顯示(圖5、6)，濁度去除率維持在90%，藻數去除率亦維持在90%左右。
- d. 表面水頭損失值：在過濾進行到8hr時，由於再加入混凝後藻液，因濁度的升高，可由圖7看到表面水頭損失突升的情形。
- e. TOC去除率除前2小時變化較大，其餘時間去除率皆維持在30%。

(3) 混合藻

出流水濁度維持0.7NTU以下。出流水葉綠素的濃度，當過濾時間超過8hr時，再加入混凝後藻液，可能因濃度降低，出流水葉綠素濃度亦隨之降低，兩者的去除率(圖8、圖9)，濁度方面相當穩定，維持在80%以上，而葉綠素的去除率則變化相當大。進流水的 TOC值在 1.18~1.52ppm，而出流水的TOC值亦維持在1.0 ppm以上，可見矽砂對TOC的去除效果不佳。

(4) 矽砂對Microcystis，Ocillatoria，混合藻的去除效果比較：

由表5比較三者的進流水質：

濁度：Microcystis>Ocillatoria>混合藻

葉綠素：Microcystis>混合藻>Ocillatoria

而出流水質一般而言：

濁度去除率：Ocillatoria>Microcystis≈混合藻

2. 無煙煤

(1) Microcystis

- (a) 出流水濁度除12~16mesh可看出明顯高於其它二管外，餘皆大致相同。(圖10)
- (b) 葉綠素方面，四管大致相同(圖11)，去除率大部分均在60%以上。
- (c) 對濁度的去除率四管皆維持在85%以上。
- (d) 水頭損失除12~16mesh上升最慢外，其它三者相當一致。

(2) Ocillatoria

- (a) 出流水藻數並無明顯的發現，出流水濁度低，均在0.6NTU以下。
- (b) 出流水TOC的去除率除12~20mesh在10hr、12hr時有負值出現外，其它時候四管皆保持相當一致的趨勢，可見對於去除率而言，濾料大小影響並不明顯。
- (c) 表面水頭損失，在濾程10hr時，即達到80cm。

(3) 混合藻

- (a) 濁度與葉綠素的去除率，在過濾進行10hr，重新混凝高濃度新鮮藻液，可發現藻類的去除率明顯突降(粒徑20~25mesh則仍維持在原振盪處，12hr時未受影響)，濁度變化則明顯約在10%左右(圖12、13)。

(4) 無煙煤對Microcystis、Ocillatoria、混合藻三者的去除比較。

進流濁度：前8hr(or10hr)

混合藻 > Ocillatoria > Microcystis

8hr後

Ocillatoria > 混合藻 > Microcystis

葉綠素濃度：前8hr(or10hr)

混合藻 > Microcystis

3. 柘榴石

(1) Microcystis

- (a) 由出流水質看出8~12mesh與12~25mesh濁度約在1.0NTU，而25~35，35~45mesh出流水濁度0.4NTU。
- (b) 對於去除率方面，濁度去除率8~12，12~25mesh兩管在80%附近振盪，而25~35，35~45兩管，則維持在90%以上。葉綠素去除率8~12、12~25mesh兩管在85%上下振盪，而兩管則高達90%以上。

(c) 表面水頭損失值，粒徑在8~12，12~25mesh時，過濾進行28hr，水頭並無顯著變化，但25~35mesh則在進行10hr時就達到68cm。

(2) Ocillatoria

(a) 出流水濁度與上述相同8~12，12~25兩管與其餘兩管有明顯的差異。

(b) 去除率方面，濁度去除率維持在80%左右，藻類方面，則為85%上下。葉綠素去除率可明確看出8~12，12~25mesh與其它兩管去除率有明顯差異。

(c) 水頭損失亦可極為明顯的分為兩段，其中8~12，12~25mesh的濾程可超過20hr。

(3) 混合藻

(a) 出流水濁度維持1.0NTU左右，而出流水葉綠素可明顯區分為兩段，此現象與前述(2)相當一致。

(b) TOC的去除率並不因粒徑的變化，而有顯著在去除率上的差別。

(4) 綜合柘榴石對Microcystis、Ocillatoria、混合藻三者的比較：

進流濁度：前8hr

混合藻 > Microcystis > Ocillatoria

8hr後

Ocillatoria > Microcystis > 混合藻

葉綠素濃度：前8hr

混合藻 > Microcystis > Ocillatoria

8hr後

混合藻 > Ocillatoria > Microcystis

4. 選擇最佳粒徑：

對於最佳粒徑的選擇，針對出流水質的要求，在矽砂方面，30~45mesh的濾程明顯太短，為維持出流水品質，故選擇20~30mesh的粒徑做為濾材。同樣的原則適用於無煙煤，選擇20~25mesh的粒徑，以確保在一般過濾廠的規格中，床深只有80cm時，出流水無虞。

對於柘榴石而言8~12，12~25mesh的出流水質低劣，濁度去除率低於快濾池85%去除率的要求，而另外的兩管水頭上升太迅速，且由於價格昂貴，故本實驗不採用其做為進一步研究的對象。

三、雙層濾層最佳過濾條件的選定

1. 實驗條件

利用前試驗所得結果，選擇矽砂20~30mesh做為填充物，而無煙煤因直接影響過

濾的結果，因此列入考慮的變因中，混合膠羽池仍以快混80rpm，2分鐘，慢混30rpm，30分鐘，沉澱30分鐘，依次進行。再經過濾儲存槽，以pump泵上過濾設備進行過濾。水樣則採自台大文學院前水池，稀釋而成，但因所含葉綠素濃度太高，故PAC加量增加為32mg/l。濾床的過濾條件見表6。

2. 實驗結果

(1) 同粒徑，不同裝填厚度：

- (a) 由圖14可知四支濾管出流水濁度差異不顯著，出流水濁度在1~1.8NTU之間。
- (b) 由圖15，各管葉綠素濃度分佈集中在60mg/l至90mg/l之間。
- (c) 濁度去除率可達70%以上，只是葉綠素去除率僅有50%左右，各濾管間之相差不大，可見濾餅尚未達成熟期

表6 雙層濾床的過濾條件

試驗別	管號	砂厚 度 (cm)	砂篩 號 (mesh)	無煙煤 厚 度 (cm)	無煙煤 篩 號 (mesh)	濁度 (NTU)	葉綠素 濃 度 (mg/m ³)
I	A	60	20-30	10	20-25	5.5	122.7
	B	55		15			
	C	50		20			
	D	45		25			
II	A	60	20-30	10	20-25	5.1	157.4
	B				16-20		
	C				12-16		
	D	45		25	20-25		

- * 雙層濾床底層為6cm濾石，往上各為砂砂、無煙煤
- * 濾速225m/d
- * I、II組D管乃模擬板新給水廠之過濾單元

(d) 圖16僅有A管的水頭損失較低為75cm，而B管最高124cm，各管濾程皆超過24hr。

綜合以上結果，可知在相同粒徑下，砂砂裝填愈厚，無煙煤愈薄者，水頭損失愈小，究其因乃無煙煤本身呈薄片狀，會崩解成平板，當這些粒徑較小粒子堆積在濾床頂層時，造成了水頭急劇上升，如此產生了負水頭，形成空氣閉塞問題。

(2) 同樣裝填厚度不同粒徑

(a) 圖17在14hr之前，各管濁度約是1.45，之後，D略為上升，其餘參管則有下

降趨勢。

(b) 圖18除了D管在8~14hr間有大變化外，大多維持75mg/l的葉綠素值。

(c) 圖19、圖20各管濁度去除率為71%左右，葉綠素去除率達55%，比試驗 I 稍微好些。

(d) A、B兩管在18hr、16hr時就達到124cm的水頭損失，C於16~18hr間水頭陡降，可能是濾餅出現破裂的情形，使葉綠素貫穿濾床深層，此後濾餅再度形成，水頭又逐漸上升。D則持續在24hr內有104cm高。(圖21)

由試驗 II 看出，上層無煙煤的粒徑愈大，所經過的濾程愈長，而矽砂的過濾效果，使放流水質並不會惡化，還是維持應有的水準。

至於傳統過濾法與改進後的過濾單元之去除率比較，見表7，由表中可知改良後之過濾管，葉綠素及濁度去除率並無顯著改進，僅可以減少水頭損失，增加過濾的時間。

表7 雙層濾床的傳統法與改進後結果比較

	葉綠素去除率 (%)	濁度去除率 (%)	最終水頭損失(cm)	實驗濾程(hr)
傳統管	54.3	71.8	107	24
改進管	55.5	72.5	77	24

*改進管與傳統管之濾料規格見表6的試驗 II 之B,D兩管

肆、結論與建議

1. 利用不同濾料與濾徑，在實驗控制條件下，可發現對於不同藻濁度去除率同樣為：Ocellatoria>Microcystis>混合藻，而對於葉綠素a方面則無一定的規律。而TOC的去除方面，普遍不理想，同樣為Ocellatoria而言，無煙煤>矽砂>石榴石。
2. 對於最佳濾料粒徑的選擇，為確保水質，並盡量縮小水頭損失，經前段實驗結果、研判，選擇矽砂為20~30mesh的濾料，無煙煤為20~25mesh。
3. 對過濾而言，真正影響過濾效果的是，無煙煤和矽砂的粒徑大小與裝填厚度，尤其是矽砂的裝填厚度與無煙煤的粒徑大小。
4. 由實驗結果，選擇濾料規格分別為

單層濾床	矽砂	20~30mesh	80cm
雙層濾床	無煙煤	16~20mesh	10cm
	矽砂	20~30mesh	60cm

5. 通常爲了減輕空氣閉塞問題，並延長濾程，建議括去濾床頂層5~10%的細濾料。
6. 整體而言，當進流水的葉綠素濃度過大時，過濾單元已不堪負荷，應配合加入適量的化學調理劑，預先去除大部分的濁度及葉綠素，再進行過濾。

參考資料

1. Davis, E. and Borchardt, J.A., "Sand filtration of particle matter", A.S. C.E, J. Sanit. Eng. Div., Vol.92, pp. 47-59, 1986.
2. Machenthum, Kenneth M. and Keup, L.E., "Biological problems encountered in water supplies: JAWWA, pp. 520-525, 1970.
3. 曾四恭、蔡利局 "傳統淨水程序對水源中藻類之去除及改善方法之研究" 國立台灣大學環境工程研究報告 No.189, 民國77年。
4. Letterman, R.D., "An overview of filtration" JAWWA, Dec.1987, pp. 26-32.
5. O'mnelia, C.R. and Stumm W., "Theory of water filtration" JAWWA, Nov.1976, pp. 1393-1411.

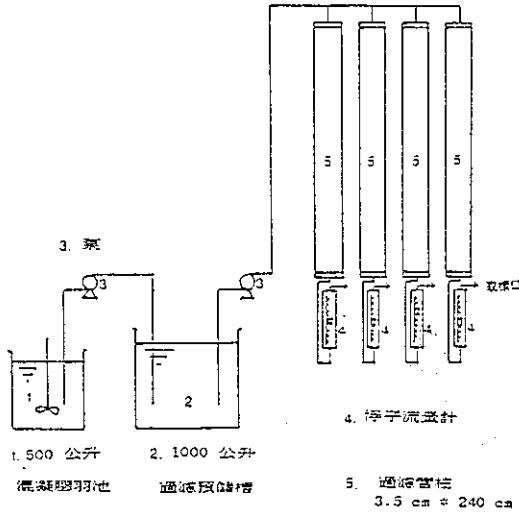


圖 1 過濾實驗設備圖

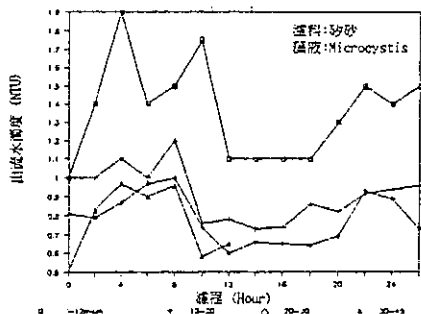


圖 2 不同粒徑出流水濁度隨時間之變化

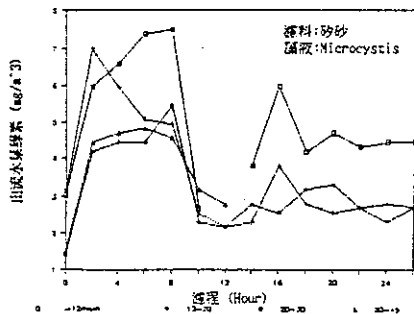


圖 3 不同粒徑下出流水葉綠素隨時間之變化

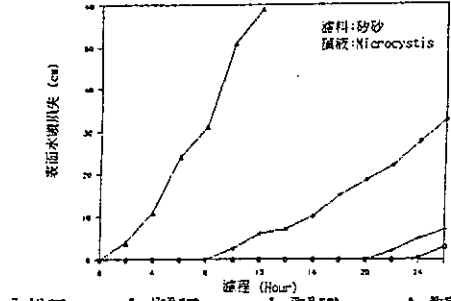


圖 4 不同粒徑之表面水頭損失值

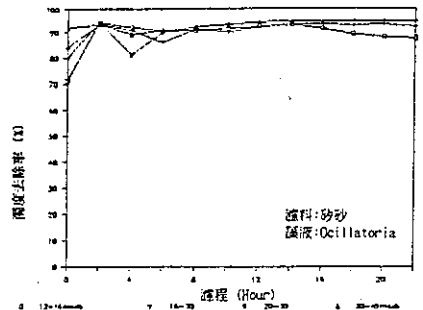


圖 5 不同粒徑之濁度去除率

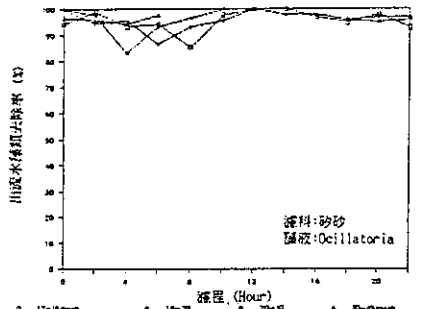


圖 6 不同粒徑之出流水濁度去除率

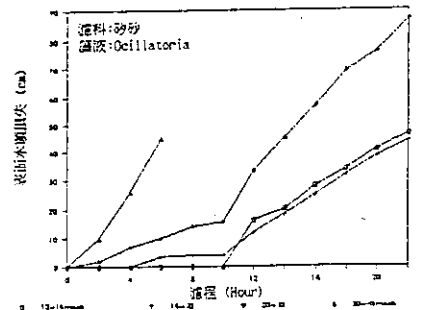


圖 7 不同粒徑之表面水頭損失值

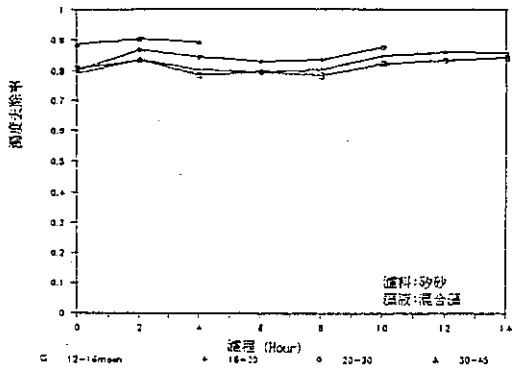


圖 8 不同粒徑之濁度去除率

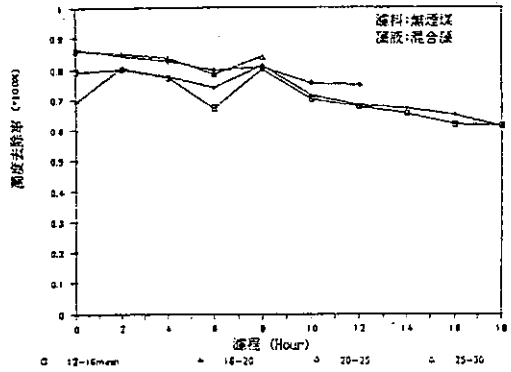


圖 12 不同粒徑之濁度去除率

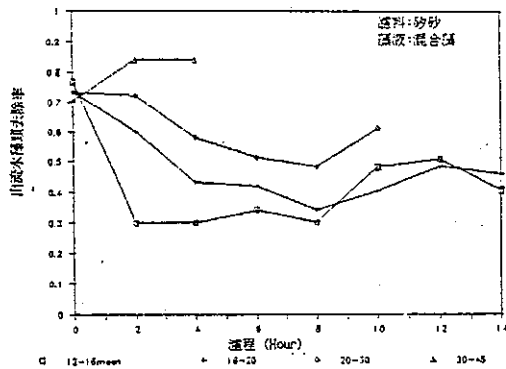


圖 9 不同粒徑之葉綠素去除率

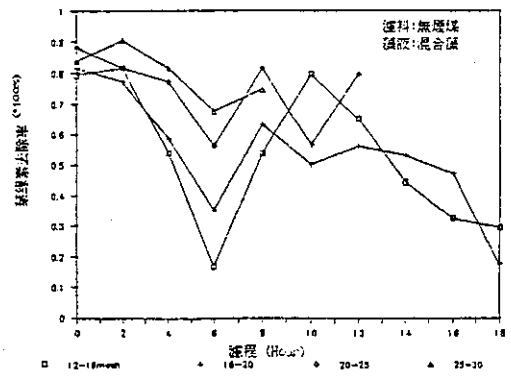


圖 13 不同粒徑之葉綠素去除率

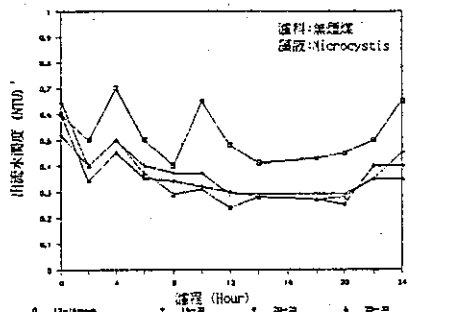


圖 10 不同粒徑出流水濁度隨時間之變化

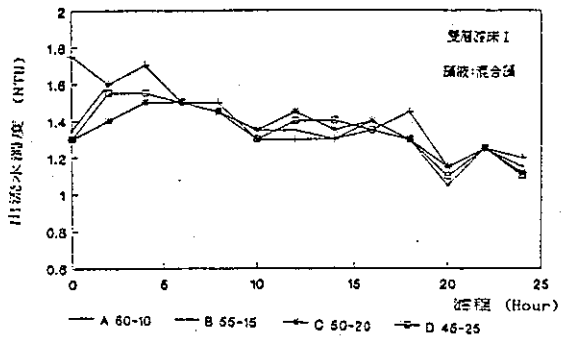


圖 14 試驗一 出流水濁度隨時間之變化

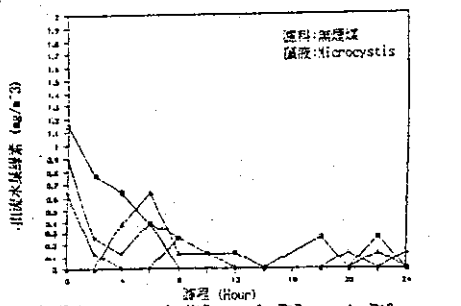


圖 11 不同粒徑下出流水葉綠素隨時間之變化

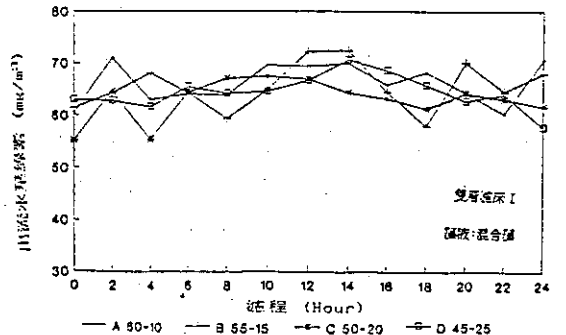


圖 15 試驗一 出流水葉綠素隨時間之變化

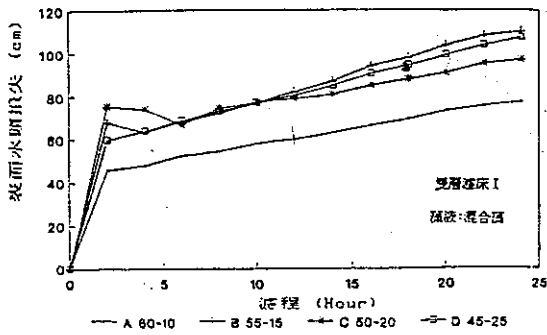


圖 16 試驗一 表面水頭損失值

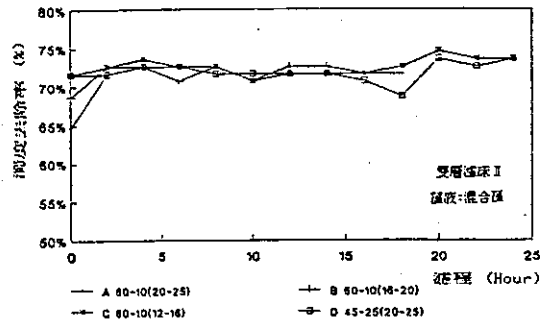


圖 19 試驗二 濕度去除率

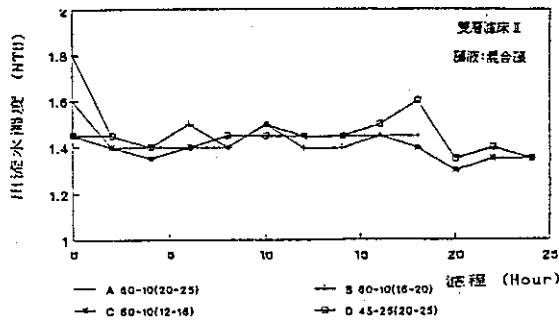


圖 17 試驗二 出流水濕度隨時間之變化

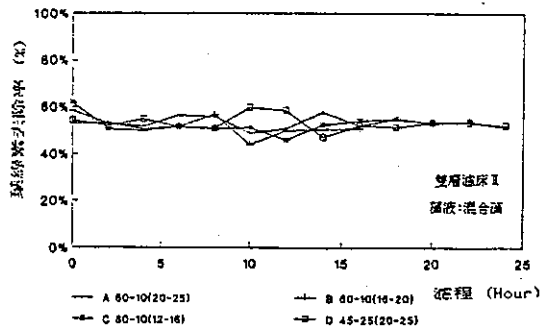


圖 20 試驗二 葉綠素去除率

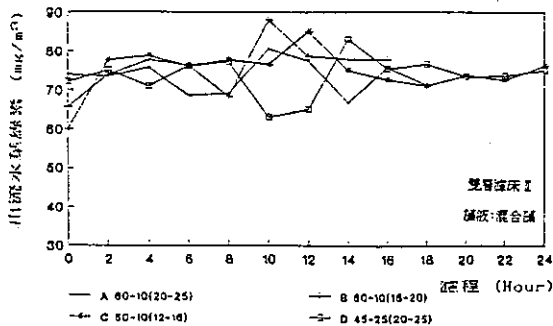


圖 18 試驗二 出流水葉綠素隨時間之變化

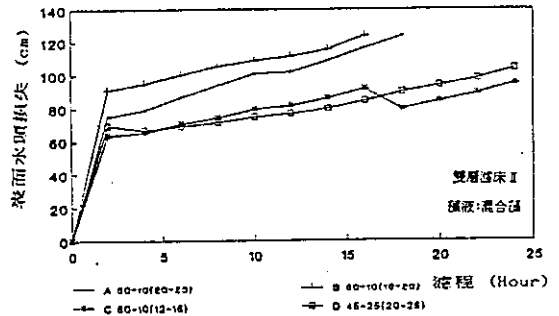


圖 21 試驗二 表面水頭損失值