

混凝沉澱同時去除自來水中重金屬鎘與濁度之研究

Removal of Cadmium and Turbidity from Water Supply by Conventional Coagulation Process

曾 迪 華 *

張 維 欽 **

摘 要

本研究主要以杯瓶試驗探討混凝沉澱程序對濁度及金屬 Cd 之祛除狀況。由於實驗之變數甚多，本研究嘗試以實驗計劃法，規劃整個實驗過程，首先以 2^n 直交配列方式對加藥量，pH 值，藥液濃度，初始濁度及混凝劑種類等因子作甄別試驗，選出其中經檢定後真正具有顯著影響之因子及其交互作用。而後對被檢定出之因子（或交互作用）及快、慢混時間各別實行要因實驗及變異數分析，求出分別對濁度及金屬 Cd 之最佳祛除狀況及其條件，最後由各別要因實驗之結果求其最適之要因組合方式。另根據上述實驗資料，對濁度及金屬 Cd 之祛除機構作一檢討及推測。

前 言

近年來，由於工業快速地成長，提高了化學物質之使用頻率，而這其中便不乏對人有害者。尤有着者，舉世震驚之水俟病（Minamata disease）及痛痛病（Itai Itai Disease）在 1955 年於日本相繼發生後，更加速了人類對重金屬毒害之正視。此類金屬（Hg, Cd）由於具生物累積性（Biomagnification），吸入後排出不易，故可經由多重之食物鏈管道進入人體。同樣地，台灣之地面公共水源，過去由於工業廢水、都市污水排入之影響，嚴重時造成水廠被迫放棄，取水設施作因應改變之案例亦不少〔1〕。如此之現象，在在顯示了舊式針對濁度及致病菌之處理程序已不敷使用，加強水廠對重金屬等有害物質之處理效能已刻不容緩。為此，吾人需迅速尋求解決之道，以期安全無虞，可口適飲之飲用水。

根據水污染防治所（現省環保局）於民國 71 年之調查指出，台灣地區進口鎘貨品由於工業需用量增加由民國 66 年的 59 公噸增加到 70 年的 190 公噸，五年之年平均進口量為 126 公噸〔2〕。依照質量不滅原理，源源不絕被大量使用之金屬 Cd，最終仍將介入吾人生存之環境系統，而對其如何作一有效之處理、處置，以與人體作一有效隔離、阻絕，並非易事。實際上，在大眾傳播媒介之大聲疾呼下（如桃園觀音之 Cd 污染），此類事件已引起全民之正視，然對於真正切身而最直接飽受工業廢水污染威脅之地表自來水源，其在處理研究

* 國立中央大學土木工程學研究所副教授。

** 國立中央大學土木工程學研究所碩士。

上並未有未雨綢繆之萬全準備。事實上“痛痛病”殷鑑未遠，吾人豈可掉以輕心？

文獻中〔3、4〕已有學者對重金屬之祛除做過一般性之研究，然對於自來水原處理程序之目的並未同時列入考慮，如混凝沉澱之目的原為處理濁度，而文獻多僅單獨研究Cd之祛除，未將濁度併入考慮，因此本研究嘗試對此作一延伸，並擴大變數考慮範圍，探討混凝沉澱處理程序對重金屬Cd與濁度同時祛除之效果。

實驗設備及方法

本實驗之操作及分析主要分二部份，一為於板新水廠化驗室進行杯瓶試驗，濁度分析及重金屬水樣預先保存等。二為將重金屬水樣攜回中央大學環境工程實驗室進行重金屬分析。

1 水樣之配置

本研究之試驗水樣為板新給水廠之進流原水，由於原水中未含Cd金屬，且進流水之濁度時或有變化，因此為有效控制試驗水樣狀況，需使用人工濁度及人工金屬之方法。

當原水之濁度太高或不足時，其配置方法，有學者建議採用：混凝沉澱池污泥或水廠上游附近可能為濁度來源之土壤以提高濁度，或將高濁度之原水調以處理過之清水稀釋至實驗所需之濁度〔5〕。由於使用沉澱池污泥在意義上可視為迴流污泥，故本實驗選用板新水廠沉澱污泥以為提供濁度之物質。

一般用為人工金屬之Cd，大都為解離度高之鹽類，本實驗使用CdCl₂，並以1%之硝酸將其調配為200mg/l之貯備液，使用時再將適當體積之貯備液注入杯瓶成為期望之濃度。

2 杯瓶試驗法

本研究以杯瓶試驗方法模擬自來水廠之混凝沉澱處理單元，其詳細之杯瓶試驗步驟如下：

- (1)清洗杯瓶，攪拌葉片，並在不同轉速下（30rpm，60rpm，100rpm）校核攪拌機轉速。
- (2)於方形杯瓶內放入2200ml之原水（多出之200ml將為後續步驟取出測濁度、重金屬及鹼度之用），置之攪拌器上，加入重金屬Cd（若所需之濃度為0.1mg/l則僅須加入1.2ml），待混合均勻後取樣以測濁度（約25ml）及重金屬（100ml水樣加0.5ml濃硝酸保存帶回中大實驗室）。
- (3)以1N H₂SO₄或1N NaOH溶液調整水樣至所需pH值，而後取樣測其鹼度（50ml）。
- (4)將杯瓶置於試驗儀上，記錄當時水溫，加入所需之混凝劑種類，劑量，快混（轉速100rpm）2min，慢混（30rpm）15min。
- (5)俟其沉降15min後（或5，10，20min）於水面下10cm處取樣（最初殘留於取樣管內約5ml之水樣丟棄不用）以測濁度（25ml）及重金屬Cd濃度（取約30ml水樣經0.45μ濾紙過濾，加入一滴約0.05ml濃硝酸保存於試管帶回中大實驗室分析），最後並量測記錄最終之pH值及水溫。

3 實驗計劃方式

由於影響混凝試驗結果之因素甚多，本研究乃選擇加藥量，pH值，藥液濃度，初始濁

度及混凝劑種類等因子，並配合實驗計劃及統計分析理論，進行一系列實驗分析，以確定對濁度及金屬 Cd 祛除有顯著影響之因子及交互作用，同時對快、慢混時間亦各別實行要因實驗及變異數分析，以瞭解其在濁度及金屬 Cd 祛除功能上之影響。表 1 綜合了本研究中所採用之各別實驗計劃方法和其目的。

表 1 實驗計劃方式

實驗編號	實驗計劃方式	計 劃 目 的
NO.1	2 ⁿ 直交配列方式	甄 別 試 驗
NO.2	2 ⁿ 直交配列方式	甄 別 試 驗
NO.3	一 因 子 實 驗	加 葯 量 之 影 响
NO.4	二 因 子 要 因 實 驗	pH 值 及 葯 液 濃 度 之 影 响
NO.5	二 因 子 要 因 實 驗	濁 度 (迴 流) 及 加 葯 量 之 影 响
NO.6	一 因 子 實 驗	快 混 時 間 影 响
NO.7	一 因 子 實 驗	慢 混 時 間 影 响
NO.8	二 因 子 要 因 實 驗	濁 度 及 pH 值 之 影 响

4. 實驗設備

(1) 杯瓶裝置：

由於方形杯瓶 (gate Jar) 在實用上具有多重之優點 (如：取樣及量測沉降速度簡易，攪拌狀況較圓形為佳，同時更符合大部份水廠實際混凝沉澱池之形狀等)，因而選用它作為本實驗之試驗杯瓶。其形狀如圖 1 所示，杯瓶本體為一厚度 0.3 cm 透明壓克力製，底面為一寬 11.5cm 之正方形，高 21 cm，當加入 2ℓ 水樣時，水深為 15.1 cm，尚有約 6 cm 之出水高度 (總體積 2.78ℓ)，因此在高轉速時可有足夠餘域水不致濺出。另於水面下 10 cm 處設取樣孔，其主要為 6 號橡皮塞穿以 0.5 cm 內徑玻璃管組成，外套以橡皮管及鉗夾以控制取樣水流。若將杯瓶放置攪拌器上，則攪拌葉片距底端之高度為 4.95 cm，距水面為 7.63 cm。

(2) 分析儀器：

① 濁度計：Hach Model 2100A Turbidimeter

② pH 計：P.W. 9410 Digital pH Meter

③ 純水製造機：Fi-Stream

④ 分析天平：Oertling 30 T.D.

⑤ 原子吸收光譜儀 (A.A.S.)：Perkin Elmer 2380

⑥ 分光光度計：CE 303 Grating-Spectrophotometer

⑦ 杯瓶試驗儀：Phipps & Bird，攪拌葉片長 7.6 cm，寬 2.5 cm，轉速介 0~100 rpm 之間，並附設膠羽顯示燈 (Floc Illuminator)。

(3) 實驗材料：

對於微量之實驗，良好之精密度要求乃為必需，因此有效控制實驗材料當不可忽視。一般均要求試藥級 (Reagent-Grade) 之高品質藥品。而本研要之主要材料如下：

①濾紙：Whatman, WCN Type, 47mm Dia, 0.45 μm 。

② $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ：Ferak Berlin 西德製。

③ H_2SO_4 ：Merck 西德製。

④ NaOH ：Fisher Scientific Company 美國製。

⑤ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ ：Cambrian Chemicals

⑥ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ：石津製藥，日本製。

⑦ HNO_3 ：Ferak Berlin 西德製

5. 分析方法

本實驗之主要水質分析方法均參照 Standard Method 第 15 版 [6]。另由於一般金屬具有吸附現象，因此為避免 Cd 過度吸附於懸浮濁度上，對於原水採用酸萃取金屬分析法，而處理水濁度較低僅用溶解性金屬分析法。

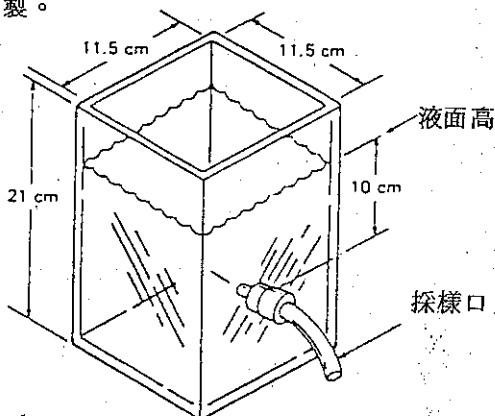


圖 1 方形杯瓶之裝置

實驗結果與討論

1 甄別試驗結果：

通常當實驗之變數太多時，需甚多之實驗及檢定，實無法於兩個以上水準操作每一因子，因而從大量可能性中，挑出重要因子或其交互作用的試驗（稱為甄別試驗，Screening Experiment）實為必須。一般選用“高”及“低”二種水準，並且最為經濟有效之方法為使用 2^n 直交配列表。

本甄別試驗將針對混凝劑加藥量（以 A 表示），pH (B)，混凝劑種類 (C)，初始濁度 (D)，混凝劑溶液濃度 (Coagulant Strength) (E) 等五因子作一選擇，並了解其因子間交互作用之情形，以為後續實驗計劃之基礎。這些因子之實驗條件列如表 2。本實驗依 Cd 之濃度高低分二組實驗，No 1 之 Cd 濃度約為 $0.1\text{mg}/\ell$ ，No 2 為 $0.5\text{mg}/\ell$ 。

使用之實驗配列方式為處理組合數 16 之 2 水準直交表， $L_{16}(2^{15})$ 。並且假設 3 因子以上之交互作用不存在（或很小而可忽略），則使用圖 2 之點線圖可簡易的排列各要因及其交互作用形成如表 3 之配列表。根據處理組合數，進行一連串之實驗，得到不同水準組合下之

表 2 甄別試驗之實驗條件

因 子	水 準
A：混凝劑加藥量	$A_1 = 5\text{ mg}/\ell$, $A_2 = 30\text{ mg}/\ell$
B：pH 值	$B_1 = 5$, $B_2 = 9$
C：混凝劑種類	$C_1 = \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$, $C_2 = \text{Fe}_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$
D：濁度	$D_1 = 21.7 \pm 0.7\text{ NTU}$, $D_2 = 88.1 \pm 2.3\text{ NTU}$
E：混凝劑溶液濃度	$E_1 = 0.1\%$, $E_2 = 1\%$

表 3 甄別試驗之要因配置表

行數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
要因	A	B	× E		A	B	C	D	×	×	×	×	×	×	C
			B		E	E	D		D	D	E	E	C	C	

實驗結果，經整理後得表 4。(註No 1 及 No 2 之實驗順序均予隨機化決定，使用之方法為號碼抽球法)。再將以上所得之觀測值 ($x_1 = \text{No.1 實驗濁度祛除率}$, $y_1 = \text{No.1 實驗 Cd (II) 祛除率}$, $x_2 = \text{No.2 實驗濁度祛除率}$, $y_2 = \text{No.2 實驗 Cd (II) 祛除率}$)，分別以葉特 (Yates) 計算法求其不同組合之相應效果 (effect) 及平方和變異。求得之效果以 Hazen Plot 法，按大小順序排列，再將其繪於常態機率紙上 (normal-probability paper)，觀察圖上具有效果較小之要因 (成一直線)，將其併合 (pooling) 成為誤差項，最後由變異數分析檢定何者之要因影響較大，而在不同顯著水準下之檢定結果綜合示如表 5。

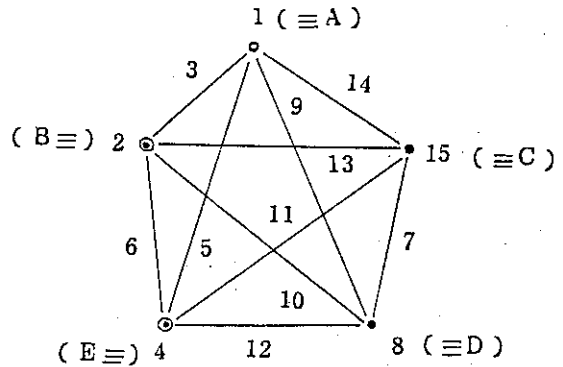


圖 2 甄別試驗之要因點線圖

表 4 2ⁿ 直交配置及分析結果

列號 實驗號碼	(1)(2)(4)(8)(16)					水準之組合					No1 實驗 順序	No 1 之觀測值		No 2 之觀測值		
	A	B	E	D	C	A	B	E	D	C		$x_1, \%$ ^d	$y_1, \%$ ^e	$x_2, \%$	$y_2, \%$	
	1	1	1	1	1	1	5. mg/l	5	0.1%	88NTU		Al ^a	5	18	81.8	-14.3
2	1	1	1	2	2	5. mg/l	5	0.1%	22NTU	Fe ^b	16	4	71.5	-13.8	74.1	-4.2
3	1	1	2	1	2	5. mg/l	5	1%	88NTU	Fe	2	15	10.2	57.6	79.9	8.4
4	1	1	2	2	1	5. mg/l	5	1%	22NTU	Al	12	14	64	7.4	75.9	9.8
5	1	2	1	1	2	5. mg/l	9	0.1%	88NTU	Fe	15	17	9.8	43.3	0	2.3
6	1	2	1	2	1	5. mg/l	9	0.1%	22NTU	Al	6	10	73.8	8.7	97.6	19.3
7	1	2	2	1	1	5. mg/l	9	1%	88NTU	Al	18	6	77.9	48.2	83.1	-27.1
8	1	2	2	2	2	5. mg/l	9	1%	22NTU	Fe	17	5	94.4	5.2	81.8	48.8
9	2	1	1	1	2	30. mg/l	5	0.1%	88NTU	Fe	8	13	71.5	4.3	0	-27.4
10	2	1	1	2	1	30. mg/l	5	0.1%	22NTU	Al	14	12	9.8	-3.5	80	-3.6
11	2	1	2	1	1	30. mg/l	5	1%	88NTU	Al	3	11	18.2	-27.9	44.4	-22.1
12	2	1	2	2	2	30. mg/l	5	1%	22NTU	Fe	13	9	2.4	-26	79.5	-21.5
13	2	2	1	1	1	30. mg/l	9	0.1%	88NTU	Al	10	3	86	36.9	31.8	-17.9
14	2	2	1	2	2	30. mg/l	9	0.1%	22NTU	Fe	4	8	0	-7.4	93.7	9
15	2	2	2	1	2	30. mg/l	9	1%	88NTU	Fe	9	2	0	57.3	66.1	46.1
16	2	2	2	2	1	30. mg/l	9	1%	22NTU	Al	11	16	63.8	28.6	0	-0.6

a. Al 表 $Al_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ b. Fe 表 $Fe_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot xH_2O$ c. 實驗次序 1 及 7 為空白實驗
d. x_n : 濁度祛除率 e. y_n : Cd (II) 祛除率

表5 不同顯著水準下所檢出影響濁度和Cd祛除之要因

顯著水準 編號 法除率		$\alpha=0.05$		$\alpha=0.025$		$\alpha=0.01$		$\alpha=0.005$	
No 1 實 驗	x_1	A C×D A×D B×D C A×E D×E B B×E E B×C	A C×D A×D B×D C A×E D×E B B×E E B×C	A C×D A×D B×D C A×E D×E B B×E E B×C	A C×D A×D B×D C A×E D×E B B×E	A B×C A×D C×D C B×D D×E A×E B×E	A B×E A×D B×C C C×D D×E		
	y_1	B D C×D	B D	B D	B D	B D	B		
No 2 實 驗	x_2	D×E A C×E C×D D E A×C B×C	D×E A C×E C×D D E A×C	D×E A C×E C×D D E A×C	D×E A C×E C×D D A×C	D×E A C×E C×D D A×C	D×E A C×E C×D D A×C		
	y_2	B×C D B A C×E A×D C A×B C×D E	B×C C×D B D C×E A C A×D	B×C C×D B D C×E A C A×D	B×C B C×E C	B×C B C×E C	B×C B C×E		

由表5之No.1實驗可瞭解濁度之祛除影響因子甚為複雜，相反地，重金屬Cd之祛除則頗為單純。其中值得注意之結果如下：

(1)影響濁度祛除方面：

- (a)加藥量 (A)
- (b)混凝劑種類 (C)
- (c) pH 和藥液濃度之交互作用 (B×E)
- (d)與 pH 值大小無關。

} 具顯著影響

(2)影響重金屬Cd祛除方面：

- (a) pH 值 (B)
- (b) 初始濁度 (D)
- (c) 加藥種類 (C)
- (d) 加藥量 (A)

} 具顯著影響

} 無顯著影響

由No.2實驗可知濁度及重金屬Cd之祛除影響因素均相當複雜，然而尚可看出pH仍為影響Cd去除之主因。無論金屬Cd之初始濃度大或小，經適當之處理組合後均可達大約相同之祛除率。

根據以上之討論，可瞭解濁度與重金屬Cd之祛除條件不盡相同，因此，找尋同時具備

激時間濁
除率差異不大，故只
，而最佳祛除加藥量約位
，但重金屬Cd之祛除並不隨時間增

上之祛除率。

液濃度及pH值之影響

由No.1之甄別實驗得知Cd之祛除嚴格地受制於水樣之pH值，另pH值並和混凝劑溶液濃度對濁度之祛除產生交互影響。因此，可組合此二因素展開2因子2重覆之要因實驗，其中B因子（pH值）之四個水準為6，8，10，12，E因子（混凝劑溶液濃度）之四個水準為0.1%，0.4%，0.7%，1%。而所使用之加藥量則為No.3實驗求得之最佳者：30mg/l。

實驗結果如表8及表9，為觀察方便計，分別再將二個觀測值取平均值，依pH值及混凝劑溶液濃度對祛除率作圖（如圖4），由圖形上可明確地知曉當pH值由8提昇為10時，金屬Cd可由祛除率16%提高至85%，但若需完全處理至不含Cd，則需再提高pH

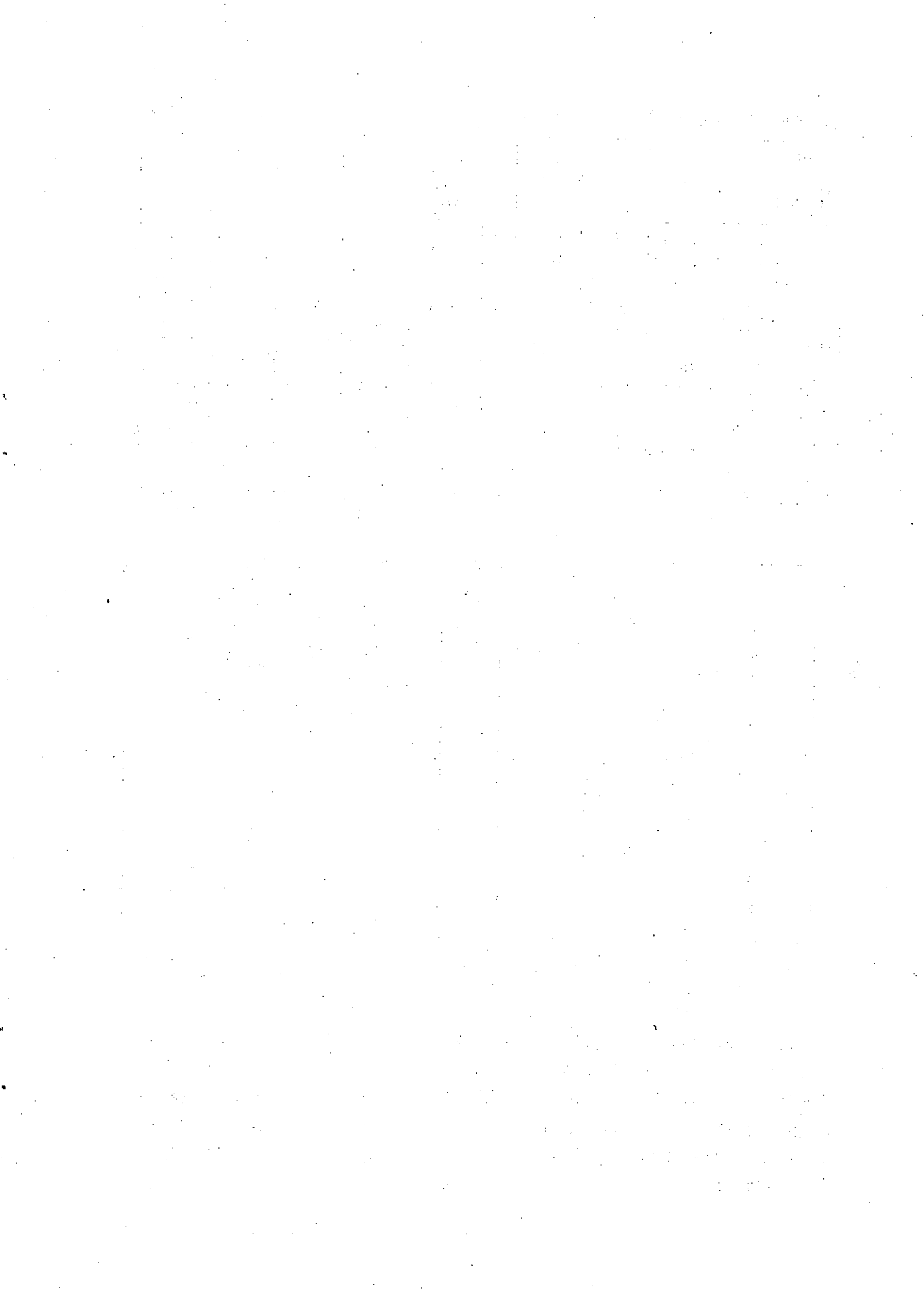


表8 不同pH值及藥液濃度下之濁度祛除率

藥液濃度 \ pH 值	pH 值			
	6	8	10	12
0.1	64	79.9	50	86.9
	75.2	78.3	34.6	81
0.4	70.4	71.4	60	84.7
	70.2	67.5	64.7	84
0.7	67.1	70.4	75.2	86.5
	60.4	59.1	63.9	80.8
1.0	78.3	77	81.6	83.6
	77	73.9	67.5	73

註：原水濁度 ≈ 25 NTU Cd(II) ≈ 0.1 mg/l
加藥量 = 30 mg/l $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$

表9 不同pH值及藥液濃度下之金屬Cd祛除率

藥液濃度 \ pH 值	pH 值			
	6	8	10	12
0.1	0	19	78.3	100
	0	19	85.6	100
0.4	0	21	78.3	100
	0	19	85.6	95.8
0.7	-10.6	9.6	95.4	95.4
	-8.7	17.4	85.8	100
1.0	8.7	17.4	85.8	100
	-9.6	9.6	87.1	95.8

註：原水濁度 ≈ 25 NTU Cd(II) ≈ 0.1 mg/l
加藥量 = 30 mg/l $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$

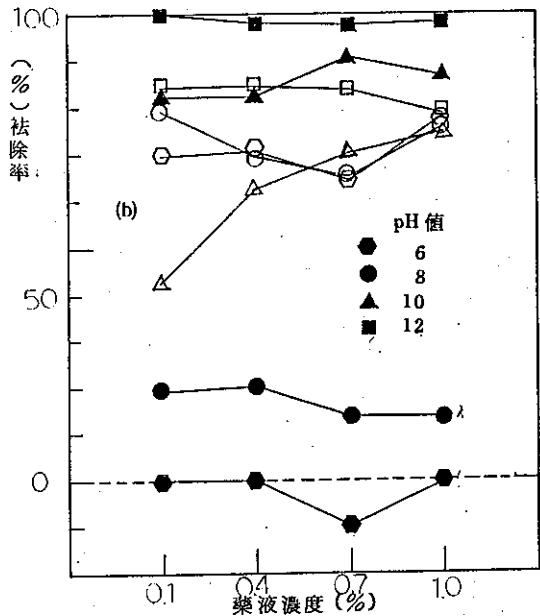
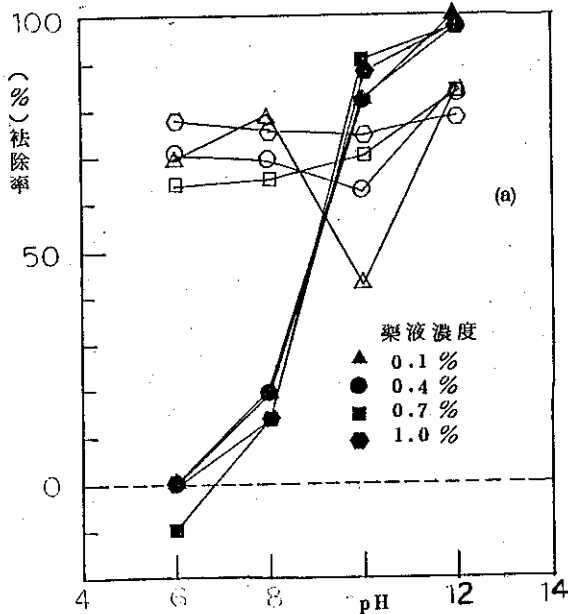


圖4 不同pH藥液濃度下濁度及金屬Cd之祛除率(a)以pH為橫軸(b)以藥液濃度為軸
(空心點為濁度祛除率,實心點為金屬Cd祛除率)

值至12,由此可了解金屬Cd之氫氧化物沉澱現象必為Cd祛除之主因無虞。反觀濁度,因其受兩因子之交互影響,故所顯現之圖形較為複雜,然基本上當pH值為12時其祛除率為最高(約85%,參見圖4),在此pH值時,杯瓶內之膠羽異常肥大,膠凝沉澱之現象可明顯地直接由杯瓶察得,因而推測如此之高pH值下(已超過明礬混凝之最適pH值:6.0~7.8)仍有高濁度祛除率相信應為濁度、鋁鹽氫氧化物、及 $Cd(OH)_2(s)$ 共沉(Co-precipitation)所致。

4. 迴流污泥提高濁度之影響

甄別試驗之結果顯示提高初始濁度有利Cd 祛除之可能，並一般迴流污泥具有節省加藥量之趨勢，因而藉著迴流污泥在不同的加藥量下實行祛除率研究。所迴流而達到之濁度選為 28、44、63、88 NTU，加入之藥量則定為 15、30、45mg/l。依此配置成為 2 因子 2 重覆要因實驗，實驗之順序仍隨機化決定。而其他之實驗條件則為上列實驗求得之最佳者（如：0.1%藥液濃度，pH 值 8 附近）。

實驗所得之結果列於表 10、11、12。本實驗 (No.5) 需特別注意者，為其使用之濁度評估因子應為殘餘濁度而非濁度祛除率（因為在相同祛除率下，高迴流量者其殘留量亦大，

表 10 不同迴流濁度及加藥量下之殘餘濁度

加藥量 mg/l \ 初始濁度 NTU	27.8	43.5	63.3	88
15	4.75 3.6	6.25 7.4	7.65 14.5	12 7.3
30	5.6 4.25	5.55 5.2	5.6 3.6	5.3 5.7
45	6.7 7.4	6.6 5.3	6.4 3.9	8.0 11

註：原水濁度 ≈
28 NTU, Cd
≈ 0.1 mg/l

表 11 不同迴流濁度及加藥量下之濁度祛除率

加藥量 mg/l \ 初始濁度 NTU	27.8	43.5	63.3	8.8
15	82.4 86.9	85.8 82.4	87.7 76.6	86.2 91.6
30	78.5 86.7	86.8 87.6	91.6 94.4	93.9 93.9
45	75.2 73.1	85 88.7	89.7 93.7	90.4 88

註：原水濁度 ≈
28 NTU, Cd
≈ 0.1 mg/l

表 12 不同迴流濁度及加藥量下之金屬 Cd 祛除率

加藥量 mg/l \ 初始濁度 NTU	27.8	43.5	63.3	88
15	14.1 14.1	14.1 15.2	21.3 21.3	21.3 21.3
30	14.1 7.1	21.3 14.1	7.1 14.1	15.2 14.1
45	14.1 6.6	7.6 21.3	7.6 15.2	15.2 15.2

註：原水濁度 ≈
28 NTU, Cd
≈ 0.1 mg/l

7. 綜合討論

基本上對於含有重金屬 Cd 之地面水，較佳之處理方式應能於混凝沉澱池中將 Cd 與濁度問題一併解決。然經上述 No. 4 實驗後，發覺對於處理水另產生一重要之水質標準 (pH 值) 需列入評估效果之考慮，即吾人期望藉著所考慮之操作因子將濁度 20NTU, Cd 濃度 0.1 mg/l 之原水，經混凝沉澱處理程序後能有①低 Cd 濃度②低濁度③適當 pH 範圍之處理水。茲將 No. 1 ~ No. 7 之各別實驗結論綜合為表 17，依照此表可知欲滿足上述要求可有下列 2 個適當處理組合。

(1) 原水中加入混凝劑溶液濃度 0.1 % 之 Al 鹽使成為 30mg/l 之加藥量，並使 pH 值於 8 附近，則經快混 (100 rpm) 2min，慢混 (30 rpm) 25min，沉澱 15min 後可有 85 % 之濁度祛除率，但金屬 Cd 僅有 15 % 左右之祛除現象，需再以他種程序單元處理之。

(2) 將原水 pH 值調至 12 (至少須大於 10)，注入 30mg/l 之加藥量 (同為 Al 鹽，溶液濃度不拘)，經快混 (100 rpm) 2min，慢混 (30 rpm) 25min，沉澱 15min 後，可有效祛除濁度 (90 %) 及金屬 Cd (100 %)，然處理水 pH 值仍高達 12，需再以他種程序中和之。

表 17 混凝沉澱各項操作因子對濁度和金屬 Cd 去除之影響

評估項目 影響變數	濁度	重金屬 Cd	最適條件
A 加藥量	○	×	30 mg/l
B pH 值	◎ (×)	◎	對 Cd: pH = 12 或至少大於 10 對濁度: pH = 12
C 混凝劑種類	◎	×	Al ₂ ·(SO ₄) ₃ ·16H ₂ O
D 濁度	×	× (○)	
E 藥液濃度	×	×	
F 快混時間	○	×	2 min
G 慢混時間	○	×	25 min
B × E pH 及藥液濃度 之交互作用	◎	×	(1) pH = 8 E = 0.1 % (2) pH = 12

註：1 ◎ 表具“非常顯著”之影響 (顯著水準 = 0.01)

○ 表具“顯著”影響 (顯著水準 = 0.05)

× 表不具顯著影響

2 其他交互作用因子經檢定不具顯著影響者未列入。

3 () 為甄別試驗所檢出而和後續實驗不同者。

由以上兩種組合效果可明顯地了解於混凝沉澱程序裡並無法作實質上之完全處理，因之需輔以他種之處理單元。

關於金屬之祛除機構，一般主要為(a)沉澱作用 (precipitation)：因形成不溶性之氫氧化物和碳酸鹽 (insoluble hydroxide and carbonates) (b)共沉現象 (coprecipitation) (c)吸附作用 (adsorption) 三種或其組合。若其祛除機構主要為吸附，則於實驗中應有下列三種之情形：

- (1) 初始濁度高則吸附量多，祛除率會較高。
- (2) 膠羽體積濃度 (Floc volume conc.) 高，則吸附能力大，祛除效果會較佳。
- (3) 隨著沉澱時間之增加，被吸附之金屬應會伴隨著膠羽被去除，因此，Cd 之祛除率隨著沉澱時間會和濁度祛除率有正比關係。

以上三種情形之判斷，應於低 pH 之情形下，方不致與沉澱作用混淆。然而根據所有實驗，可作如下之檢討：

(1) 上述 Na 5 實驗 (迴流污泥提高初始濁度)，經檢定之結果，Cd 之祛除和初始濁度大小無關。(更具意義之結果應為比較 " Cd 祛除率 " 及 " 濁度祛除量 " 之大小，然而因 Cd 祛除率大小幾為一定，故結果仍為相同)。

(2) 自 Na 1 至 Na 7 之實驗，(Na 4 之實驗除外，因其具高 pH 值) 其中甚多高膠羽體積濃度者，但並不具較高之 Cd 祛除率。

(3) 根據 Na 3 , Na 6 , Na 7 之實驗 (分四段不同時間取樣分析者)，隨著時間增加，濁度祛除率提高，然均未見 Cd 之祛除率有昇高者。

經上述之三點理由當可判定吸附現象應不致為 Cd 祛除之主要機構。並在表 17 中可了解對 Cd 來說 pH 值為所有因素中唯一具 " 非常顯著 " 影響者，因此無疑地其氫氧化物之沉澱現象必為 Cd 祛除主要機構之一。另 Na 4 之實驗中，在與於 Al 鹽適當範圍之高 pH 情形下 (pH = 12)，膠羽異常地肥大，並且具有最低之殘留濁度，其所以如此推測應為濁度，Al 鹽氫氧化物及 Cd (OH)_{2(s)} 共沉 (coprecipitation) 所致。

關於本實驗另一評估因子——濁度，其祛除機構依文獻所述主要有四：(1) 壓縮電雙層 (2) 吸附及電價中和 (3) 沉澱絆除 (4) 吸附及架橋作用。而經 Stumm & O'Melia (1968) [8] 研究後提出 Al、Fe 鹽之作用主要為第 (2) 及第 (3) 機構。因此綜合上述本實驗主要由四個祛除機構組成：(a) 沉澱作用 (precipitation) (b) 共沉現象 (coprecipitation) (以上針對 Cd) (c) 吸附及電價中和 (adsorption and charge neutralization) (d) 沉澱絆除 (Enmeshment in a precipitate) (以上針對濁度)。

此四機構或同時發生，或先後發生，或相輔相成並不易作明確之劃分，其在每一杯瓶實驗中實扮演著錯綜複雜之角色。然基本上，仍可將其簡化為圖 9，而對它作一初步之理解：Cd 之 " 沉澱作用 " 及濁度之 " 吸附及電價中和 " 為二者各別擁有進行之機構，而 " 共沉現象 " " 沉澱絆除 " 則為二者相輔相成而不易明辨區分之機構。

經由以上對祛除機構之討論，吾人產生如下之推測：即在可形成 Cd 氫氧化物之情形下，是否能藉由迴流大量污泥提高初始濁度 (或膠羽量)，而降低所需之 pH 值 (不用提高至 12) 使在可接受之限制內，並同時具高 Cd 祛除率 (換言之，在同一可形成 Cd (OH)_{2(s)} 之高 pH 值下，提高初始濁度是否能借由共沉掃曳作用而提高 Cd 祛除率，亦即，在 Cd 之

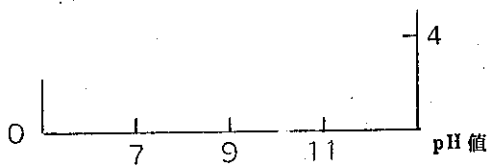


圖 10 不同 pH 值下之殘留濁度、濁度祛除率及 Cd 祛除率

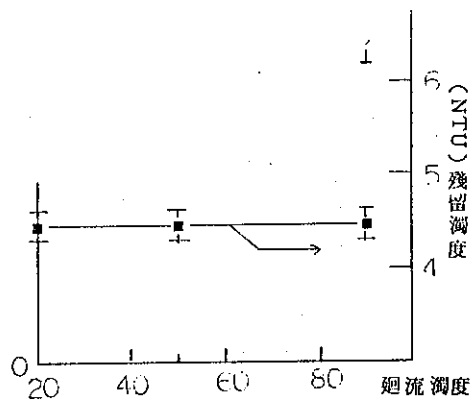


圖 11 不同迴流濁度下之殘留濁度、濁度祛除率及 Cd 祛除率

若將No.8 實驗和No.4 實驗併合，則吾人可對Cd之祛除作一完整之認識：即在所有之研究變數中僅pH值及初始濁度確對Cd之祛除造成影響，而其對pH值之依賴尤大於初始濁度。將此二實驗之資料綜合則可得一非常重要之圖形（圖12），此圖顯示在濁度為20NTU時，欲將Cd祛除至限制以下需將pH提高至10以上方為可能（限值 $0.01\text{ mg}/\ell$ 約位於85~90%之間），但若迴流濁度至50NTU，則只調pH=9即可達相同之祛除現。然此殘餘Cd濃度仍位於限值邊緣，無法作一絕對之保證。當完全祛除需要時，則無可避免地將pH調至11是必要的，但其處理水pH值勢必無法滿足要求。

至此，將 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ 及 $\text{Cd}(\text{OH})_2(\text{s})$ 之溶解度作一比較，則進一步發現兩者之最佳pH值範圍本即不同， $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ 位於5.5附近，而 $\text{Cd}(\text{OH})_2(\text{s})$ 却在10.4左右（在此分別為獨立系統），若兩者於同一溶液中考慮時，由於 Al^{+++} 及 Cd^{++} 將對 OH^- 產生

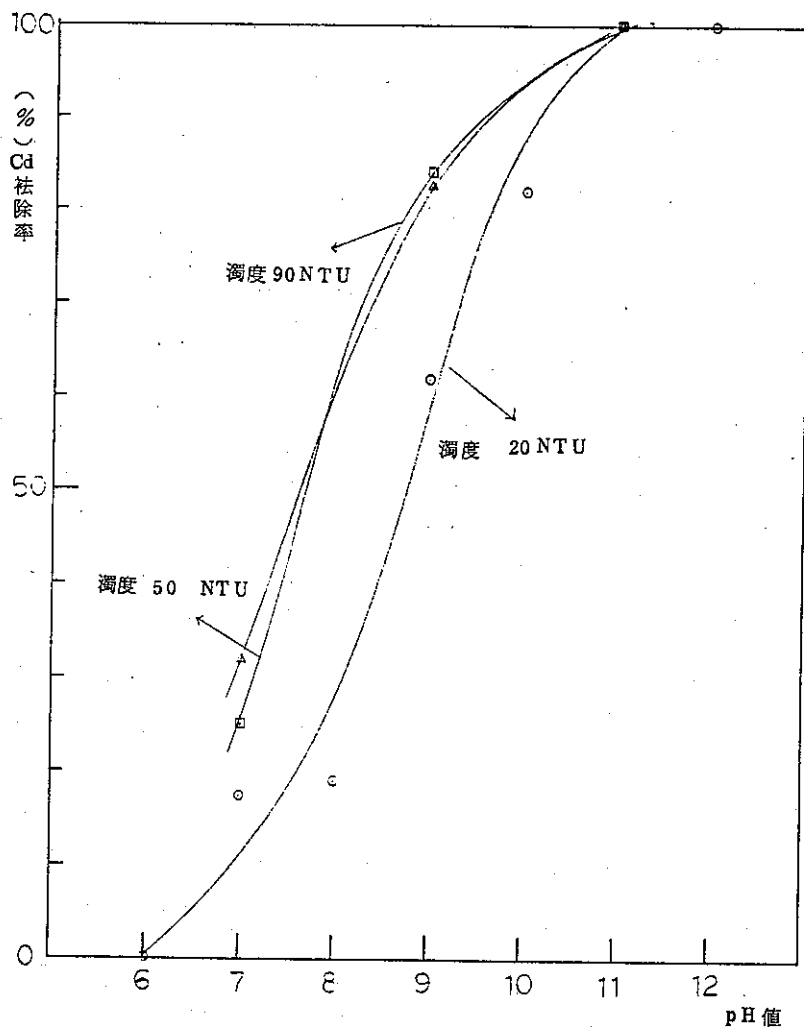


圖 12 不同 pH 值及迴流濁度下之 Cd 祛除率

爭奪，故是一非常複雜之問題。但經本實驗研究之結果，Cd 之祛除對 OH^- 之依賴比濁度之祛除敏感甚多，所求出之最適 Cd 祛除 pH 值應大於 10，此點和 $\text{Cd}(\text{OH})_2(\text{s})$ 之理論溶解度曲線之結果尚稱相符，而濁度祛除方面，除加藥量影響之變動較大外，其他均有一定限度，即使改變 pH 值亦同。事實上，此點理由甚明，即 Cd 之祛除機構幾乎全靠沉澱作用（形成 $\text{Cd}(\text{OH})_2(\text{s})$ ），故其結果和理論較相符，而濁度之祛除機構複雜，並非單單 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ 之問題而已。

結論與建議

本研究主要嘗試以化學混凝沉澱法對 0.1 mg/l 金屬 Cd（No.2 實驗為 0.5 mg/l ）及 20 NTU 濁度之原水作一處理研究，所考慮之變數計有：加藥量，混凝劑種類，pH 值，迴

流污泥，快混時間，慢混時間，藥液濃度，沉澱時間等。試驗後獲致主要結論如下：

1 對於初始 Cd 濃度不同之水樣 (0.1 , 0.5mg/l) ，只要變數經適當之組合，則兩者可達大約相同之祛除率。

2 Al^{+++} , Fe^{+++} 鹽對金屬 Cd 之祛除現象顯現不出差異，但就濁度來說 Al 鹽比鐵鹽為佳。

3 濁度祛除最適加藥量為 30mg/l ，重金屬 Cd 之祛除在不同加藥量下則無甚差別。

4 Cd 金屬之祛除受 pH 值之影響甚大，明顯之祛除需將 pH 值調至 10 以上，完全祛除則需至 11 方可。

5 濁度受到 pH 及藥液濃度之交互影響，較佳之情形為調 pH 值至 12 或僅調至 8 但使用 0.1 % 之藥液濃度。

6 在 pH 值中性範圍下，迴流污泥提高濁度並無實質減低加藥量之意義，且 Cd 濃度也未因吸附而降低。

7 以快混 (100 rpm) 2min ，慢混 (30 rpm) 25min 為攪拌條件，將會得到比其他攪拌情形更佳之濁度祛除率，然金屬 Cd 則無差別。

8 在高 pH 值情形下，適量之迴流污泥 (50 NTU) 有助 Cd 之祛除，並不會對殘餘濁度有任何之犧牲。

9 Cd 之吸附現象在本實驗中無足輕重，沉澱作用及共沉現象方為 Cd 之祛除之主要機構。

10. 同時考慮對 Cd 及濁度祛除之所有因子，可得較佳之三種處理組合：

(a) 原水中加入藥液濃度 0.1 % 之 Al 鹽使加藥量成為 30 mg/l ，並使 pH 於 8 附近，則經快混 (100 rpm) 2min ，慢混 (30 rpm) 25min ，沉澱 15min 後可有 85 % 之濁度祛除率，但金屬 Cd 僅有 15 % 左右之祛除現象，需輔以他種處理單元。

(b) 將原水調至 pH 11 ，注入 30mg/l 之加藥量 (亦為 Al 鹽，藥液濃度不拘) ，經快混 (100 rpm) 2min ，慢混 (30 rpm) 25min ，沉澱 15min 後，可有效祛除濁度 (90 %) 及金屬 Cd (100 %) ，然處理水 pH 仍高達 11 ，需以他種程序中和之。

(c) 將原水 pH 調至 9 ，注入 30 mg/l 之加藥量 (Al 鹽，藥液濃度 0.1 %) ，並迴流污泥提高初始濁度為 50 NTU ，經快混 (100 rpm) 2min ，慢混 (30 rpm) 25min ，沉澱 15min 後，可有效祛除濁度 (殘餘濁度 4.5 NTU) ，並處理水 pH 可滿足要求，但殘留 Cd 濃度仍位於限值邊緣，無法有絕對之保證。最好再輔助他種程序單元。

除上述結論外，另本研究建議如下：

1 由本研究得知以傳統之混凝沉澱處理程序祛除 Cd ，在不改變現有設備下，欲作完全之處理乃為不易之事。因此有效地保護，管制水源狀況，杜絕一切可能產生鎘污染之工業行為 (如硬脂酸鎘製造業，金屬鍍鎘廠) 於水源上游發生，應為當務之急。

2 由於時間、人力等限制，本研究未對他種處理程序作一探討，然根據文獻，對 Cd 之祛除如石灰軟化 (lime softening) ，離子交換 (Ion exchange) 均為相當具有潛力之處理法，建議對此作進一步之研究。

3 本研究使用之實驗設備僅為實驗室規模 (laboratory scale) 之大小，真正對於實際廠之預測，仍須再經連續式之模型廠操作後方可確定，尤其混凝沉澱後之過濾，消毒等

、林益銘先生等提供實驗

獻

省水污所，民國 72 年 8 月。

金屬調查及管制”台灣省水污所研究報告，民國 71 年 12 月。

Sorg, "Treatment Technology to Meet the Interim Primary Drinking Water Regulations for Inorganics : Part 3", J.A.W.W.A., Dec. 1978.

4. 朱信, "自來水中對健康有害之微量金屬及有機物去除研究", 台灣大學環工所碩士論文, 民國 71 年。
5. 駱尙廉、楊萬發, "硫酸鋁及 P.A.C. 對高濁度原水之混凝比較", 土木水利, 第九卷, 第四期, 民國 72 年 2 月。
6. A.P.H.A., "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater", 15 th ed., 1981.
7. Ruey J. Lai, et. al., "Velocity Gradient Calibration of Jar-Test Equipment", J.A.W.W.A., Oct. 1975.
8. Werner Stumm and Charles R. O'Melia, "Stoichiometry of Coagulation", J.A.W.W.A., May 1968.