

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫一：建立生活污水處理廠放流水再利用之處理技術

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2218-E-002-112-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學環境工程學研究所

計畫主持人：於幼華

計畫參與人員：商能洲、林坤儀、周宗毅、王啟渝

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計劃期末報告
都市水資源循環回收利用前瞻技術之研究
子計畫一：建立生活污水處理廠放流水再利用之處理技術
計畫編號：NSC 93-2218-E-002-112

執行期限：93年8月01日至94年9月30日

主持人：於幼華教授 國立台灣大學環境工程學研究所

研究人員：商能洲、林坤儀、周宗毅、王啟渝

一、 計劃摘要

本研究針對兩處污水處理廠的放流水評估其回收水再利用的處理技術，目的在於符合四項水回收再利用途徑(農業灌溉、澆灌沖洗、都市非飲用、建築物中水道系統、景觀與環境用水)的水質標準建議。結果顯示，針對內湖污水廠或六堵污水廠的放流水，僅需使用砂濾處理程序即可做為「農業灌溉」及「澆灌沖洗」之用(唯水中含氮量可能過高，需加設生物脫氮處理程序)，另外，需使用砂濾+臭氧的串聯處理程序，即可達到「建築物中水道系統及景觀」與「環境用水」兩項回收水再利用途徑之標準；而若水中BOD值過高，只需加設UV或GAC串聯臭氧氧化程序做為催化之用，即可進一步降解水中有機物質。另外，本研究亦初步針對三種存在於放流水之中的環境荷爾蒙物質(Bisphenol A, BPA；Nonylphenol, NP；Octylphenol ethoxylate, OPEO)做臭氧氧化實驗，並求出其半批次試驗之反應速率常數。

關鍵詞：回收水再利用、污水處理廠、放流水、環境荷爾蒙

ABSTRACT

The reclaimed water from domestic wastewater treatment plant is very reliable alternative water resource, because stable quantity and lower pollution of reclaimed water satisfy the requirement for many applications. Based on this, the study estimated the various wastewater reuse technology for the requirement of agricultural and landscape irrigation, street

clean, dual distribution system (toilet flushing), industrial secondary use and environmental uses. The treatment technology of this study included sand filtration, MF, ozone treatment, ozone/UV, ozone/GAC. The results showed that sand filtration or/ozone could fit the requirement of above application of wastewater reuse. In addition, this study also investigated the environmental hormone compounds in the effluent of the domestic wastewater treatment plant. The results indicated that the decomposition rates of the environmental hormone compounds (Bisphenol A, BPA；Nonylphenol, NP；Octylphenol ethoxylate, OPEO) by ozone treatment in the semi-batch reaction followed pseudo-first order kinetics.

Keywords: Wastewater Reuse, Domestic Wastewater Treatment Plant, Effluent, Environmental Hormones.

二、 計劃緣由與目的

台灣地區隨經濟高度成長、都市化與產業結構之改變，用水需求量亦逐漸增加。此刻正草擬「多元化水源開發利用綱領計畫」之前期計畫中，將台灣地區之水資源開發朝向更多元及永續的方向思考，未來水資源將區分成核心水源及輔助水源。核心水源以平地水庫為主，輔助水源則著重在都市污水及工業廢水之回收再利用。其中，公共污水下水道污水處理廠處理後之放流水，其水質穩定、污染負荷低及水量大之特性，可視為未來重要水資源的來源之一。因此，為因應台灣地區未來社會經濟用水需求之變革，宜即早對水再

生利用進行有計畫的政策方案研擬及技術可行評估，俾利政府在檢討台灣地區水資源供應策略時，作為水資源開發、調配及供應之參考依據。

根據國外文獻，Nicklas Paxeus (1996) 分析鑑定在瑞典三大公共污水處理廠放流水中的有機化成物成份，結果指出污水處理廠放流水中含有高達 137 種的有機化學物質，其中有多項皆被列為疑似環境荷爾蒙的化學物質。基於國內都市污水處理廠之放流水亦皆可檢測出此類環境荷爾蒙物質，將對於此水後續的再利用議題，存有風險的爭議，因此，本研究亦將利用臭氧處理方法，針對水中 Bisphenol A (BPA)、Nonylphenol (NP) 及 Octylphenol ethoxylate (OPEO) 進行氧化處理，探討使用臭氧降解 BPA、NP 及 OPEO 的可行性研究(Ike et al., 2002; Kim et al., 2002; Nakagawa et al., 2002)。

三、實驗設備與方法

1. 臭氧高級氧化實驗

生活污水處理廠放流水之臭氧處理實驗

選擇砂濾、薄膜技術、臭氧處理、臭氧/UV 處理及臭氧/GAC 處理等技術做結合串聯，作為都市公共污水處理廠之放流水的回收再利用技術評估。

實驗室砂濾系統的濾料，為使用單一濾料設計，種類為矽砂 (silica gel 60, MACHEREY-NAGEL)；粒徑大小為 0.2 - 0.5 mm / 35 - 70 mech。玻璃管柱槽體為尺寸大小為內徑 5 cm，長度 40 cm；添加濾料高度 10 - 15 cm；濾料上下方均鋪放玻璃棉，上方玻璃棉用以使水流能較平均地流過砂濾系統，下方玻璃棉用以防止濾料掉落。薄膜處理技術種類的選取，主要為 MF 微過濾，本研究選取 0.8 μ m 過濾薄膜，作為處理效果的評估。

實驗室試驗選用的臭氧產生設備包括 PSA 氧氣發生機及臭氧產生機兩大部分，是日本住友 (Sumimoto) 精密工業公司製造。高級氧化程序以臭氧化處理為主再進而選用其他方式的搭配(如 UV、GAC)。臭

氧反應採用半批式(semi-batch)的方式，臭氧產生機設定氣體流量(Q_G)為 2.2 NL/min，進氣臭氧濃度(C_{AGi0})為 46.8 g/m³，反應槽體積(V_L)為 2.0L。相應搭配的 UV 設備，其 UV 波長為 254nm，流過 UV 反應槽的流量為 498ml/min(圖一)。相應搭配的 GAC(粒徑 mesh 16~30)，每次實驗添加 5g。

環境荷爾蒙類物質 Bisphenol A、Nonylphenol 及 Octylphenol ethoxylate 之臭氧處理實驗

臭氧產生設備如上所述，實驗設備架設如圖一所示。臭氧反應採用半批式(semi-batch)的方式，臭氧產生機設定氣體流量(Q_G)為 0.91 NL/min，進氣臭氧濃度(C_{AGi0})為 1.54 mg/L 與 4.40 mg/L，反應槽體積(V_L)為 4.0L。

2. 水質分析項目與方法

水質檢測項目包括：導電度 (Conductivity)、總氮、化學需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)、酸鹼值(pH)、總溶解固體(TDS)及懸浮固體物(SS)濃度、濁度、鹼度(alkalinity)、水中大腸桿菌群檢測(濾膜法)、水中總菌落數檢測法(塗抹法)。一切水質項目之檢測方式，均按照環境檢驗所公告的實驗檢測法進行。另外尚有鈉吸收比(SAR)及藍氏飽和指數(LSI)；鈉吸收比的計算公式為：

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Na^+ 、 Ca^{++} 、 Mg^{++} ：為水中 Na、Ca、Mg 的濃度。

藍氏飽和指數的計算公式為：

$$LSI = pH - pH_s$$

$$pH = \text{水樣酸鹼值}$$

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

$$A = (\log_{10} [TDS] - 1) / 10$$

$$B = -13.12 \times \log_{10} (^{\circ}C + 273) + 34.55$$

$$C = \log_{10} [Ca^{2+} \text{ as } CaCO_3] - 0.4$$

$$D = \log_{10} [\text{alkalinity as } CaCO_3]$$

3. 水質分析項目規劃

主要針對公共污水處理廠放流水再利用的目的不同，其各項水質要求的重點亦有所差異，因此就農業灌溉、澆灌沖洗、景觀與環境用水及都市非飲用、建築物中水道系統 4 項水再利用的途徑，初步決定下列各項水再利用目的其水質分析的重點，以評估各項處理技術能否符合所要求的水質標準。整理如表一。

一般水質分析項目：電導度、pH 值、懸浮固體、濁度、化學需氧量 COD、生化需氧量 BOD。各項水再利用途徑其水質分析的重點如下：

「農業灌溉」：總氮、鈉吸收率(SAR)

「澆灌沖洗」：鈉吸收率(SAR)

「都市非飲用、建築物中水道系統」：大腸桿菌 E. coli、藍氏飽和指數(LSI)

「景觀與環境用水」：大腸桿菌 E. coli、藍氏飽和指數(LSI)

四、 結果與討論

1.處理內湖污水廠放流水

針對內湖污水處理廠之放流水，本研究總共之取樣次數有四次，時間點分別為 2004/7/22、2004/8/17、2005/7/26 及 2005/8/17，取回來的內湖污水處理廠放流水，已完成了砂濾、臭氧處理、臭氧/UV 及臭氧/GAC 處理等的串聯處理實驗。

從實驗結果的數據分析顯示各種的串聯處理，對於電導度及酸鹼值都沒有明顯的變化。藍氏飽和指數(LSI)，從實驗結果顯示，其變化都不大。對於懸浮固體的部份，砂濾處理至少有 75% 以上的去除率，處理後的懸浮固體濃度，均可符合上述 4 項回收水再利用途徑所要求的濃度標準；在化學需氧量 COD 濃度的分析方面，從 2004 年的結果發現臭氧單獨處理(反應時間 5 分鐘)的 COD 分析，其數據反而略為升高，推測原水中存在的有機物質，使得化學需氧量實驗之重鉻酸鉀無法氧化該有機物質，因此在經過臭氧處理後，部份有機物被分解成可以被重鉻酸鉀氧化，而出現 COD 濃度。以 2005/7/26 取樣的數據來看，砂濾+臭氧處理，可約有 45% 的 COD 去除率，砂濾+臭氧/UV 與臭氧/GAC 處

理，可約有 60% 的 COD 去除率，顯示此放流水的懸浮固體貢獻大部分的 COD。經過臭氧/UV 處理後，由之前的研究顯示其對有機物的礦化能力有很明顯的效果，所以導致實驗結果顯示，臭氧/UV 處理後 COD 濃度下降至低於偵測極限；同樣的，在一般研究中顯示臭氧系統中加入活性碳觸媒，會加速臭氧分解的速率，可以增進去除污染物及礦化的效果，實驗結果顯示，臭氧/GAC 處理後 COD 濃度也降至低於偵測極限。對於總氮及 TOC 的實驗結果而言，各項處理的效果皆不顯著。對於大腸桿菌的檢測結果，可以知道在經過臭氧處理後，可有效去除水中之大腸桿菌。

2.處理六堵污水廠放流水

針對六堵污水處理廠之放流水，本研究取樣次數為一次，時間點為 2004/9/26 取回來的放流水，已完成了砂濾、臭氧處理及臭氧/UV 處理等的串聯處理實驗。

從實驗結果的數據分析看來，針對各分析項目而言，其效果趨勢和六湖污水廠放流水處理之結果大致相似，惟獨在化學需氧量 COD 濃度的分析方面，從數據看來，COD 的去除效率不如之前對內湖污水處理廠來得好，所有的實驗串聯方式最多只能去除約 30% 的 COD，推測原因為六堵污水處理廠的污水混合了生活污水及工業廢水，成份與內湖污水處理廠的放流水有異，臭氧結合 UV 對其氧化的能力受到其所含化學物質的影響而顯得不高；此外，觀察這次實驗數據，亦發現經過臭氧殺菌處理 5min 後，其 COD 值下降少許，但在經過臭氧+UV 氧化殺菌的處理之後，其 COD 值反而上升，推測其理由應與上述相同。

3.各種水再利用途徑之處理技術建議

本研究就 4 項水再利用的途徑，提出作為選擇處理技術的建議。針對「農業灌溉」此項目而言，污水廠放流水水質檢測項目：電導度、酸鹼值、懸浮固體、鈉吸收率等均已符合「農業灌溉」標準，僅總氮的數值過高，不符合標準；而經過實驗結果可知，目前的處理程序設計，對總氮

而言皆無明顯處理效果，所以就農業灌溉此一水再利用途徑而言，必須再行設計其它處理單元(如生物脫氮程序等)或管制含高濃度氮物質進入污水下水道，方才可符合標準。

針對「澆灌沖洗」此項目而言，污水廠放流水水質所有檢測項目：電導度、酸鹼值、懸浮固體、化學需氧量等均符合標準。因此建議僅需使用「砂濾+臭氧」處理即可達到使用於「澆灌沖洗」的效果。

針對「都市非飲用、建築物中水道系統」和「景觀與環境用水」此兩項目而言，內湖污水廠放流水水質檢測項目：電導度、酸鹼值、生化需氧量等符合標準；另外，可能六堵污水廠納管工業廢水的原由，其電導度偏高，此部分宜進行管制；此外由於放流水之大腸桿菌數過高，需控制好臭氧殺菌程序；而針對與大腸桿菌的處理，「砂濾+臭氧」處理程序，已可有效達到使用於「都市非飲用、建築物中水道系統」和「景觀與環境用水」的效果。而若放流水水質生化需氧量偏高，則建議增加 UV 處理或是 GAC 處理程序。

4. 臭氧化環境荷爾蒙物質 Bisphenol A、Nonylphenol 及 Octylphenol ethoxylate

Semi-batch reactor 臭氧化有機化合物之反應動力學，在本研究中，使用簡化的模式來描述；包括起始化合物分解成中間產物的反應速率式，以簡化的 pseudo-first order kinetics 來敘述，包括假設本實驗的臭氧化時期，液相臭氧濃度維持一固定值，以下為相關的說明 (Shen et al., 1995；Kuo, 1999)：

起始化合物分解(A)成中間產物(B)的反應速率式：

$$-d[A]/dt = k_{\text{compound}}[A]$$

$$[A]_t = [A]_0 e^{-k t}$$

$k_{\text{compound}} = f([O_3], [OH], \dots)$ ；反應速率常數。

本研究假設液相臭氧濃度維持固定，而 pH 值在臭氧化期間均維持在欲控制值；因此 k_{compound} 為一常數。

根據上述反應動力學的討論，在臭氧

化三種環境荷爾蒙物質(Bisphenol A, BPA；Nonylphenol, NP；Octylphenol ethoxylate, OPEO)的反應試驗中，將反應物濃度以 $\ln(C_t/C_0)$ 的型式對臭氧化時間作圖，從圖三中的結果顯示，三種化合物的臭氧化之濃度變化曲線，符合線性關係， R^2 值皆有 0.92 以上(圖三中列有各曲線 R^2 值範圍)，曲線斜率即為反應速率常數；有關臭氧化三種環境荷爾蒙物質的反應速率常數資料，整理於表二中所示。另外，從圖三中的結果顯示，在本研究的實驗條件下，三種化合物可在臭氧化 5 分鐘以內，被氧化反應成其他的中間產物，而這其中以 OPEO 的反應最快，BPA 次之，NP 反應最慢。

五、計劃成果與自評

1. 建立下水道污水處理廠放流水之回收水再利用的處理程序建議：

本研究就 4 項水再利用的途徑，提出的水質標準建議，以及作為選擇處理技術的建議。表三為綜合四種回收水再利用途徑的建議處理程序。

2. 針對環境荷爾蒙類物質部份

本研究針對此部份，只做了初部的研究，不過依然可以見到，利用臭氧化處理環境荷爾蒙類物質的效果是有很有效的，而且能夠在短時間內達到降解 99% 的處理效率。

六、參考文獻

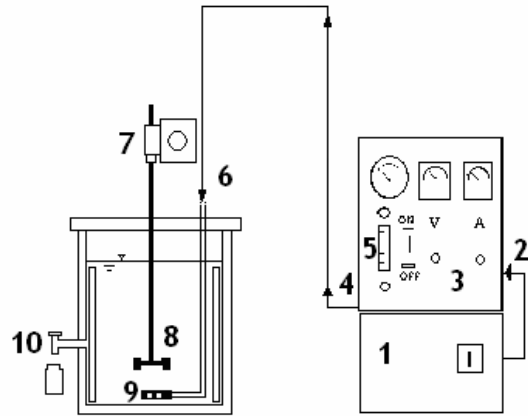
- Ike, M. Asano, M.; Belkada, F.D.; Tsunoi, S. Tanaka, M.; Fujita, M., 2002. Degradation of biotransformation products of nonylphenol ethoxylates by ozonation and UV/TiO₂ treatment, *Water Science and Technology*, 46 (11-12), 127-132.
- Kim, S.-G., Choi, K.-J., Ryoo, J.I., Oh, K.-J. and Park, J.K., 2002. Fate of endocrine disruptors in water treatment processes. Poster presentation. IWA World Water Congress, Melbourne.
- Kuo, W.S., 1999. Synergistic Effects of

Combination of Photolysis and Ozonation on Destruction of Chlorophenols in Water. *Chemosphere*. 39(11), 1853-1860.

Nicklas Paxeus, 1996. Organic Pollutants in the effluents of large wastewater treatment plants in Sweden, *Wat.Res.*, 30(5),115-1122.

Shen, Y.S., Ku, Y., Lee, K.C., 1995. The Effect of Light Absorbance on the Decomposition of Chlorophenols by Ultraviolet Radiation and U.V./H₂O₂ Processes. *Wat. Res.* 29(3), 907-914.

Nakagawa, S., Kenmochi, Y., Tutumi, K., Tanaka, T. and Hirasawa, I., 2002. A study of the degradation of EDs and DXNs by ozonation and AOPs. Poster presentation, IWA World Water Congress, Melbourne.



Components: 1. 氧氣產生機, 2. 氧氣入口, 3. 臭氧產生機, 4. 臭氧出口, 5. 氣體流量計, 6. 氣體進口, 7. 攪拌機, 8. 攪拌葉片, 9. 散氣頭, 10. 取樣口

圖一、攪拌式完全混合臭氧反應槽實驗裝置

表一、整理本研究就 4 項水再利用的途徑，所提出的水質標準建議

| 項目 | 農業灌溉 | 澆灌沖洗 | 都市非飲用、建築物中水道系統 | 景觀與環境用水 |
|-----------------|------|------|----------------|---------|
| 電導度 | 750 | 750 | 750 | 750 |
| pH | 6-9 | 6-9 | 6-9 | 6-9 |
| 懸浮固體 | 100 | 30 | - | - |
| 濁度 | - | - | 5 | 2 |
| 化學需氧量 COD | - | 100 | - | - |
| 生化需氧量 BOD | - | - | 10 | 10 |
| 總氮 | 3 | - | - | - |
| 鈉吸收率(SAR) | 6.0 | 6.0 | - | - |
| 大腸桿菌 E. coli | - | 200 | 不能檢出 | 不能檢出 |
| 藍氏飽和指數(LSI) | - | - | 0 | 0 |

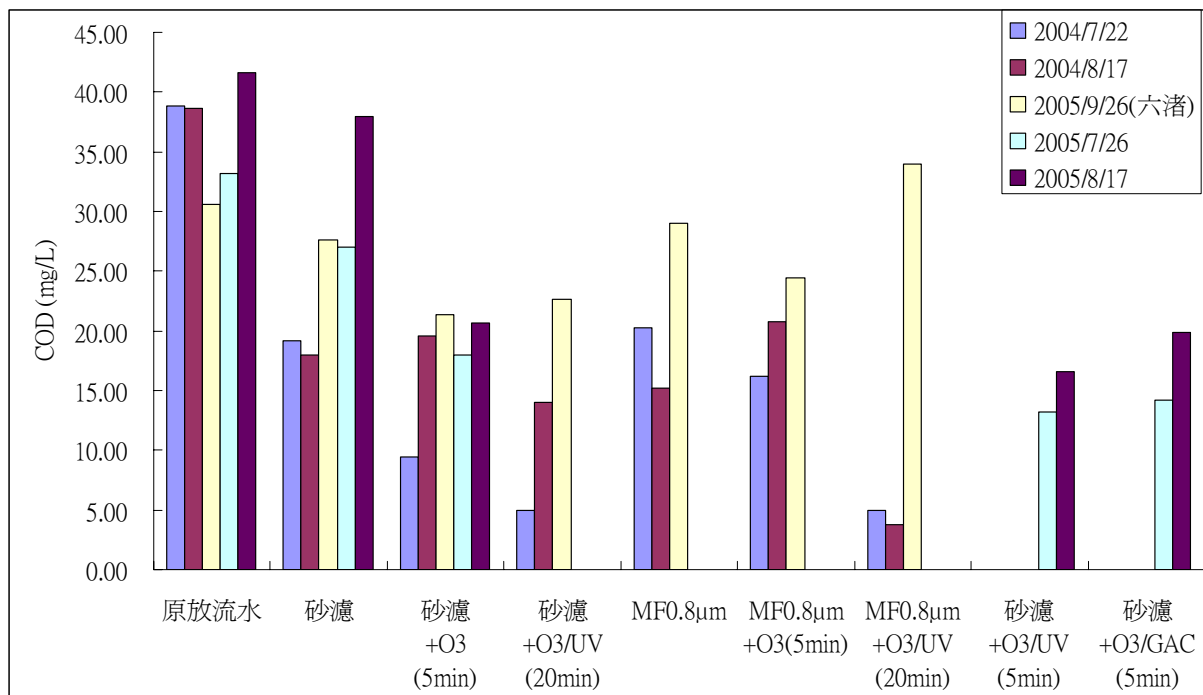
表二、以 Semi-batch 臭氧化三種環境荷爾蒙物質之反應速率常數；[BPA]₀=2.5 mg/L、[NP]₀=2.5 mg/L、[OPEO]₀=10 mg/L。

| | Bisphenol A | | Nonylphenol | | OPEO | |
|-------------------------------------|-------------|------|-------------|------|------|------|
| Ozone dosage (mg/min) | 4 | 1.4 | 4 | 1.4 | 4 | 1.4 |
| k _{compounds} ^a | 1.84 | 1.10 | 1.64 | 0.87 | 3.61 | 1.42 |

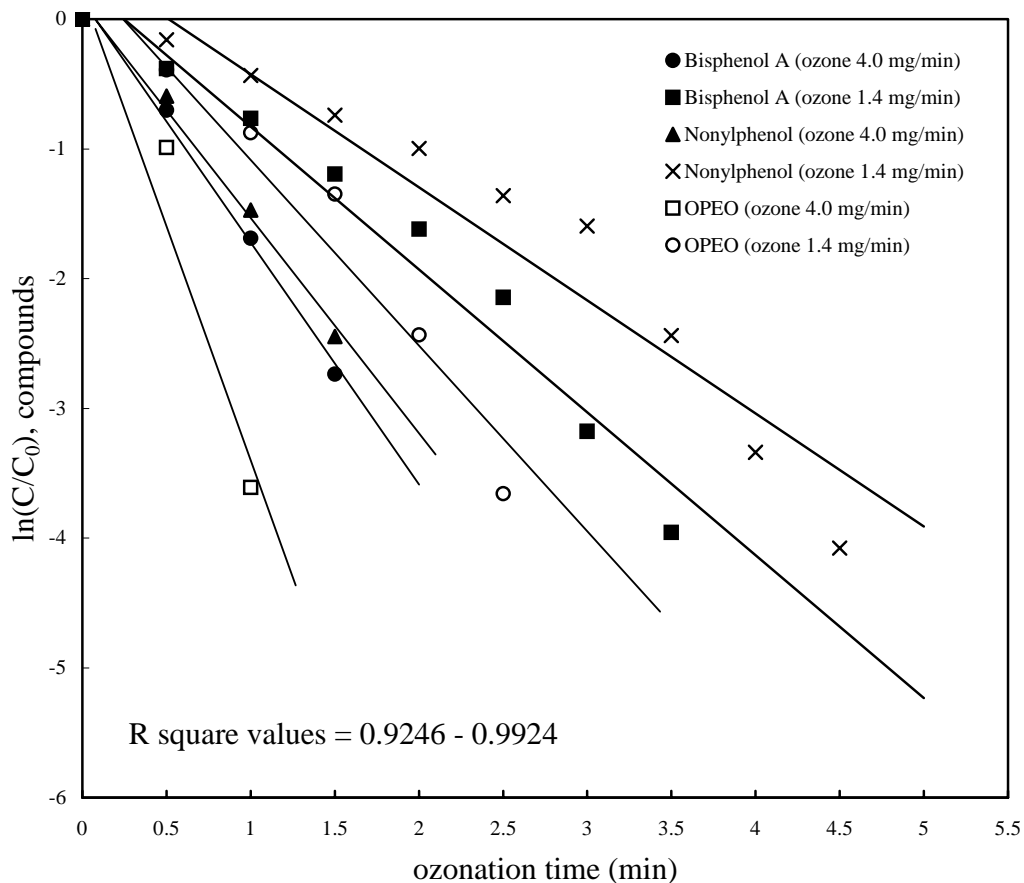
a : pseudo-first order rate constant (min⁻¹)

表三、回收水再利用途徑的建議處理程序

| 回收水再利用途徑 | 農業灌溉 | 澆灌沖洗 | 都市非飲用、建築物中水道系統 | 景觀與環境用水 |
|-------------------|------------------------|-------|---|---------|
| 建議處理程序 (內湖污水廠) | 原放流水 (但需加設 脫氮程序) | 砂濾+臭氧 | 砂濾+臭氧 (若 BOD 值過高則加設串聯 UV 或加 GAC 之處理程序) | |
| 建議處理程序 (六渚污水廠) | 原放流水 (但需加設 脫氮程序) | 砂濾+臭氧 | 砂濾+臭氧 (管制電導度) (若 BOD 值過高則加設串聯 UV 或加 GAC 之處理程序) | |



圖二、綜合整理各種技術組合處理內湖污水廠及六渚污水廠放流水之 COD 變化。



圖三、臭氧化 Bisphenol A (BPA)、Nonylphenol (NP)及 Octylphenol ethoxylate (OPEO)之反應物濃度 $\ln(C_t/C_0)$ 隨臭氧化時間變化圖。