

# 原水有機物特性與臭氧化生成有機副產物之相關性研究

\*黃文鑑，\*\*沈桓毅，\*\*王志哲，\*\*陳柏堂  
\*助理教授 \*\*兼任研究助理  
弘光技術學院 環境工程系

## 摘要

本研究針對臭氣消毒過程可能產生之有機副產物，包括溴仿(bromoform)、溴化醋酸 (bromoacetic acids)、溴酚 (bromophenols)、醛類(aldehydes)脂肪酸 (fatty acid) 及生物可利用有機碳 (AOC)，探討原水中各類有機物在臭氧化過程，生成副產物物種及濃度之差異性。同時亦利用酚、乙醛等單一代表有機物 (model compound)，分別配製人工原水進行臭氧化實驗，藉此初步探討苯環類 (aromatic compounds) 與脂肪類有機物 (aliphatic compounds) 與臭氣反應生成副產物之差異性。結果顯示，利用樹脂分離萃取方法將有機物分離成 hydrophobic acid (包括 humic acid 及 fulvic acid)、hydrophilic acid 及 hydrophilic neutral 等，利用配置人工原水方式分別進行臭氧化。結果顯示在固定溴離子濃度、鹼度及 pH 條件，humic acid 及 fulvic acid 等疏水性有機物，臭氣後所生成之 bromoform、2,4-dibromophenol、MBAA、DBAA 濃度明顯較 hydrophilic neutral、hydrophilic acid 等親水性有機物高。且前二者水樣施加 2 mg-O<sub>3</sub> /mg- DOC 劑量下，即有顯著之副產物生成，但提高臭氣濃度，bromoform、2,4-dibromophenol 生成濃度降低，推測是因高臭氣量將此兩種副產物之前質 (precursors) 破壞或因臭氣再度將已生成之副產物氧化成較終產物。另在本實驗控制之臭氣劑量下，發現含

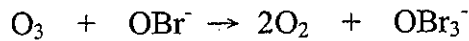
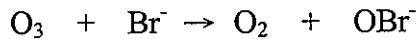
hydrophilic neutral 有機物原水臭氧化後水中醛類及脂肪酸濃度均有明顯升高，其中增加之醛類物種包括甲醛、乙醛及乙二醛等低碳數有機物，環己醛及庚醛等較高碳數者僅少量存在，另臭氧化增加之脂肪酸以甲酸及乙酸佔較大部份。

關鍵字: 臭氣、消毒副產物、溴仿、溴化醋酸、醛類

## 前言

臭氣(O<sub>3</sub>)在淨水程序上之應用，早期主要在消毒、臭味及色度的控制，後來陸續被應用至鐵錳氧化、增進混凝對濁度去除，最近臭氣的功用被發現對消毒副產物前質(precursor)的控制與增進水質之生物穩定性-即降低清水生物生長潛勢，有正面助益<sup>(1,2)</sup>。臭氣雖具強氧化力，但仍無法將原水中所含天然有機物完全氧化成無機態，而容易生成臭氣副產物，這些副產物通常為極性化合物，且有部份是屬生物可利用者，包括醛類(aldehydes)、酮類(ketones)、醇類(alcohols)及羧酸類(carboxylic acids)<sup>(3,4)</sup>。另在水中含有溴離子(Br<sup>-</sup>)條件下，若有足夠之臭氣劑量，會使 Br<sup>-</sup>與 O<sub>3</sub> 分子反應，產生具氧化力之 HOBr-OBr<sup>-</sup>，並與水體有機物反應，生成含溴副產物。文獻指出 OBr<sup>-</sup>是生成溴酸鹽(BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>)之重要中間物質，針對臭氣分子直接反應所產生之 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>，在高 pH 下有利於此反應進行，而低 pH 則有利 HOBr 與有機物反應，且易生成 CHBr<sub>3</sub>。其他在

臭氧化過程被分析證實之有機性溴化副產物，諸如溴化醋酸(bromoacetic acids)、溴化酮(bromoacetones)、溴化乙氰(bromoacetonitriles)等<sup>(5)</sup>。有關臭氧與水中溴離子及有機物反應之途徑如下<sup>(6)</sup>：



(Br-organics including bromoform, bromoacetic acids, bromoacetones, bromoacetonitriles.....)。

上述這些副產物的生成物種及濃度與原水中存在之有機物性質及水質條件有相當程度之關係。

## 研究方法

### 臭氧反應設備及材料

本實驗採用的臭氧反應槽是利用玻璃管柱槽體(H=1.5m, ID=10cm)(圖 1 所示)，將臭氧產生機(OZOTECH, OZ1BTU, USA)之臭氧，控制適合濃度，以散氣盤方式通入反應槽與試樣水樣接觸，同時在槽體進出流口偵測氣相及液相殘留之臭氧濃度。

### 人工原水配製

配置人工原水所需之有機物是萃取、分離自鳳山原水，所採用之有機物分離技術主要是參考 Leenheer<sup>(7)</sup>之方法，利用吸附樹脂(Amberlite XAD-8, Rohm and Haas, 美國)及陽離子(AG-MP-50, Bio-Rad, 美國)、陰離子交換樹脂

(Amberlite IRA-93, Rohm and Haas, 美國)，將原水中有機物依親/疏水性、酸/鹼性等分離成七類，分別為 Hydrophobic-acid(再細分成 Humic acid 與 Fulvic acid)、-base、-neutral 及 Hydrophilic-acid、-neutral 等。有關有機物濃縮、分離之詳細流程，如文獻<sup>(7,8)</sup>所述。本實驗中共取 300 公升原水，萃取、分離出七類有機物各 2.5 公升，亦即將原水有機物濃縮了 120 倍。混凝試驗所配置之各類人工原水，是將有機物濃縮液稀釋成適當濃度，並調整鹼度、pH 值及添加背景鹽等，其組成成分如表 1 所示。另代表性化合物(model compounds)苯甲酸及乙醛之水樣組成份如表 2 所示

### 水質參數及臭氧加量對生成副產物影響實驗

#### 1. 臭氧加量

首先取 10 升人工原水，添加  $\text{Br}^-$  至 0.3 mg/L，調 pH=7，臭氧加量為 0.15-2.60 mg-ozone/mg-NPDOC (NPDOC=1.78 mg/L)，連續通入臭氧，在固定時間內取樣分析處理水之  $\text{CHBr}_3$ 、MBAA、DBAA、bromophenols、aldehydes、fatty acid 及 AOC 等副產物，同時在反應結束後，分析處理水殘留臭氧濃度。再者，取相同水樣，進行變化臭氧加量實驗，臭氧接觸時間固定在 10 min，通入臭氧量控制在 0.15~2.60 mg-ozone/mg-NPDOC 濃度範圍，處理水樣分別取樣分析  $\text{CHBr}_3$ 、MBAA、DBAA、bromophenols、aldehydes、fatty acid 及 AOC 等副產物，液相中殘留臭氧濃度亦一併分析，以推估水樣之耗臭氧量。

#### 2. pH 值

水樣中 pH 值的調整是利用添加 NaOH 及 HCl，將背景試驗水樣之 pH 值分別調整在 pH=4、6、7、9、10 等， $\text{Br}^-$  濃度控制在 0.3mg/L，NPDOC=1.20 mg/L，臭氧劑量 =2.0 mg-ozone/mg-NPDOC，接觸時間=10min。

### 3. 溴離子濃度

本實驗在比較各類有機物水中溴離子濃度對臭氧化過程生成副產物之影響，藉由添加不同溴離子濃度，觀察臭氣處理水生成之溴化副產物，包括  $\text{CHBr}_3$ 、MBAA、DBAA、bromophenols、aldehydes 等，溴離子控制濃度範圍在 0.1 ~ 1.5 mg/L。另臭氧化水樣之 pH 值控制在 7.0，鹼度=150 mg/l as  $\text{CaCO}_3$ 、NPDOC=1.78 mg/l，臭氣劑量控制 3.5 mg-ozone/mg-NPDOC，接觸時間為 10 min。

### 有機副產物分析方法

本實驗中各項基本水質、有機替代參數、臭氣副產物及氣、液相臭氣濃度之分析方法，是參考環保署環境檢驗所之水質檢驗方與美國水及廢水標準檢驗法 (Standard Method, 19th ed.)<sup>(9)</sup>。其中 NPDOC 是利用總有機碳分析儀 (Total Organic Carbon Analyzer, Shimadzu, TOC-5000, 日本)，溴化醋酸 (MBAA、DBAA) 及溴酚 (2,4-dibromophenol) 是以氣相層析儀 (GC-14B, Shimadzu, 日本)，搭配毛細分析管柱 (25QC2/BPX5) 及電子捕捉偵測器 (Electron Capture Detector) 分析 (Glaze, 1988)。而 bromoform 是採 Purge and Trap Packed-Colume Gas Chromatograph Method，分析之方法及設備為使用 Purge and Trap Concentrator (Model Lsc-3000, Tekmar, 美國) 為前處理裝置，而偵測儀器是氣相層析儀 (GC-17A, Shimadzu, 日本)，並以電子捕捉偵測器 (Electron Capture Detector) 為檢知器。醛類分析是取 20ml 水樣加入 1ml pH6 KHP/NaOH buffer，再加入 1ml 15 mg/ml PFBHA (衍生劑) 混合均勻後，再放置於 45°C 水浴槽或恆溫箱中 1hr，取出並置於室溫。再加入 0.05ml 濃  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (反應剩餘之 PFBHA)，並開始萃取，加入 4ml 正己烷(hexane, )以手動方式劇烈搖晃 3min，再靜置約 5min，使

正己烷與水相分層，用 Pipet 吸取上層液至已有 3ml 0.2N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ，之樣品瓶中，再以手動方式約搖晃 30 秒，再將樣品靜置 5min，最後再用 Pipet 吸取上層液到分析樣品瓶(1.5ml)中，並以 GC/ECD 做定性、定量分析。生物可利用有機碳(Assimilable Organic Carbon, AOC)的分析方法：所使用之菌種 *Pseudomonas fluorescens strain P17* 及 *Sporollum species strain NOX* 二種菌種，主要分析步驟如下<sup>(10)</sup>：水樣滅菌及植菌：將水樣瓶口置一鎳鉻絲後，放入 90°C 之恆溫水槽至瓶內溫度達 60°C 時，再將水樣瓶移至 60°C 之恆溫箱 30 分鐘滅菌，取出，待冷卻後，同時植入 P17 及 NOX 預先培養之純菌菌液，使水樣起始菌數落於 100~500CFU/mL 之間。菌生長曲線觀測：植菌後之水樣立即採樣塗抹於 LLA agar 上，以分析菌數，並將水樣培養於 15°C 下，每隔 1、2 天採樣分析菌數。塗抹後之培養皿於 25°C 培養，3 天後數菌。並繪其生長曲線，直到 P17 及 NOX 之生長達最大菌落數( $N_{\max}$ )為止。AOC 的計算：將重覆分析水樣所得 P17 及 NOX 生長之最大菌落數( $N_{\max}$ )的平均值，乘以 1000 除以各菌種之產率(Yield value)，可分別求得 AOC-P17 和 AOC-NOX 值，再相加得 AOC-Total( $\mu\text{g acetate-C/L}$ )。

### 結果與討論

#### 原水各類有機物臭氧化生成之有機副產物

本實驗利用鳳山淨水廠原水進行有機物分離，各類有機物配製人工原水，以添加 0.3 mg/L  $\text{Br}^-$  濃度，臭氣控制在 0.15-2.60 mg- $\text{O}_3$  /mg-NPDOC，首先圖 2 為各類有機物之耗臭氣量，其中 humic acid 及 fulvic acid 兩類有機物具較高臭氣耗量，主因是此兩類有機物含豐富苯環類及共軛雙鍵結構，臭氣分子容易直接與未飽和鍵行加成反應，同時臭氣分子亦可與腐植質結構中之某些官能基反應產生

自由基，並再與腐植質反應，造成此類有機物能消耗較多臭氧。

再者，臭氧化生成之溴化有機副產物如表 3 所示，各類副產物中， $\text{CHBr}_3$  以 humic acid 有較高生成量，MBAA、DBAA，以 fulvic acid 最高，而 hydrophilic acid 及 hydrophilic neutral 僅在高臭氧劑量發現有少量  $\text{CHBr}_3$ 、DBAA 生成。再者，在本實驗控制之高臭氧劑量下，humic acid、fulvic acid 原水發現有溴酚 (bromophenol) 生成，主要以 2,4-dibromophenol 物種為主，濃度可達之  $10 \mu\text{g/L}$  以上，顯示臭氧化過程所產生之  $\text{HOBr/OBr}^-$  與有機物之反應途徑，可能包括苯環取代反應。

表 4 為各類人工原水臭氧化產生之 aldehydes、fatty acids 及 AOC 濃度，首先臭氧前各類人工原水本身所含之醛類及脂肪酸濃度均低於儀器偵測極限 ( $1.5 \mu\text{g/L}$ 、 $5.6 \mu\text{g/L}$ )。臭氧化後，humic acid 及 fulvic acid 兩類有機物生成醛類濃度有明顯升高，其中臭氧化增加之醛類物種包括甲醛、乙醛、乙二醛等低碳數有機物，環己醛及辛醛等較高碳數者僅少量存在。脂肪酸則以 hydrophilic acid 及 hydrophilic neutral 兩類有機物生成量較高，其中甲酸及乙酸濃度較高。另一方面，臭氧化增加之 AOC 濃度以 hydrophilic neutral 較顯著，且  $\text{AOC}_{\text{NOX}}$  佔較大部份，此由文獻報導<sup>(11,12)</sup>  $\text{NOX}$  菌對臭氧處理之產物(如 oxalic acid)有較高之分解效率，可獲得合理解釋。再者，計算各類有機物臭氧後，aldehydes/AOC、fatty acids/AOC 兩者比值(圖 3)，發現在實驗控制之臭氧施加範圍內，各類有機物之 aldehydes/AOC 比值均隨臭氧施加量之增高而降低，推測是高臭氧量下，有機物氧化較完全，aldehydes 生成量降低，同時所生成之生物可利用產物可能以 carboxylic acids、oxalic acids 等物種佔大部份<sup>(13)</sup>，因而造成 aldehydes/AOC 比值降低。而 fatty

acids/AOC 比值隨臭氧施加量增高而持續增加，推測是甲酸及乙酸等小分子酸可能已是臭氧化的較末端產物，因此在高臭氧量所氧化生成之 fatty acids 增加。

### 水質參數及臭氧化條件對生成副產物之影響

本項實驗控制之各反應參數包括 pH、Br<sup>-</sup>濃度及臭氧劑量，圖 4 為變化各人工原水 pH 值與各有機副產物生成量之結果，顯示 humic acid 及 fulvic acid 所生成之  $\text{CHBr}_3$  及 DBAA 隨 pH 值增加而減少，醛類則隨 pH 值增加而增加。根據文獻報導臭氧與 Br<sup>-</sup>生成  $\text{HOBr/OBr}^-$  量與 pH 值有關係，在低 pH 值下，分子態臭氧與 Br<sup>-</sup> 比較利於生成  $\text{HOBr}$ ，因此易生成溴化有機物，相反的於高 pH 下，氫氧離子可為起始劑，並促進分子臭氧分解出自由基 ( $\text{OH}\cdot$ )，此自由基具較強氧化力，因此對有機物之氧化較完全，相對醛類或酸類有機物有較高生成濃度<sup>(14)</sup>。

針對溴離子對臭氧副產物生成量的影響，本實驗以 0.1-1.5 mg/L Br<sup>-</sup>濃度範圍，取 humic acid 人工原水，在固定 pH、臭氧劑量條件下，進行臭氧化反應，圖 5 顯示含低濃度 Br<sup>-</sup>原水，僅產生少量之  $\text{CHBr}_3$ 、MBAA、DBAA 等副產物，然 Br<sup>-</sup>提高至 0.3 mg/L，即發現有機性溴化副產物有逐漸增高趨勢，另醛類生成量與 Br<sup>-</sup>濃度無明顯相關性存在。

對於臭氧劑量與副產物生成量的關係(圖 6)，humic acid 及 fulvic acid 兩種人工原水生成之  $\text{CHBr}_3$  及 2,4-DBP 在低臭氧下即有顯著生成量，但在高臭氧下反有減少趨勢，推測是因有機物與臭氧之反應在高臭氧劑量下，有機物被臭氧氧化較完全，所生成之  $\text{CHBr}_3$  再度被氧化，或臭氧將有機物裂解為小分子有機物已非  $\text{CHBr}_3$  前驅物。

## 酚類及醛類有機物臭氧生成之副產物

本實驗取苯甲酸及乙醛為代表性化合物，在控制 pH、Br<sup>-</sup> 濃度條件下，進行臭氧反應，並觀察溴化有機物之生成情形。圖 7 顯示苯甲酸在低臭氧加量，生成 CHBr<sub>3</sub> 及 2,4-DBP 明顯高於乙醛，然提高臭氧量則明顯看出兩種溴化物有下降趨勢，且 CHBr<sub>3</sub> 濃度反較乙醛產生者為低。再者，DBAA 生成量在控制之臭氧劑量範圍，均以乙醛生成量較高，根據文獻報導<sup>(15)</sup>，醛類亦是屬 CHBr<sub>3</sub> 之前驅物質，且在高臭氧量及 Br<sup>-</sup> 濃度條件，生成量更為明顯。另一方面，稍早已有文獻<sup>(16)</sup> 指出，存在於液相中之 Br<sup>-</sup> 能與 HOCl 反應 (Br<sup>-</sup> + HOCl → HOBr + Cl<sup>-</sup>) 產生具氧化力之 HOBr，其氧化力雖不及 HOCl，然而與有機物作用亦能生成含溴物種之鹵化有機物。再者，HOCl 與 HOBr 兩種氧化劑將有機物轉生成 THM 或 HAA 之反應能力，視被氧化有機物之性質不同而有所差異，通常含芳香族 (aromatic) 苯環結構之化合物較容易與 HOCl 反應生成含 Cl 之 THMs (Cl-THMs) 或 HAA (Cl-HAAs)，而屬脂肪族 (aliphatic) 直鏈狀化合物則易與 HOBr 生成含 Br 之 THMs (Br-THMs) 或 HAA (Br-HAAs)<sup>(15)</sup>。由圖 7 之結果顯示，以苯環為主體結構之苯甲酸有機物在低劑量臭氧生成之 CHBr<sub>3</sub> 及 2,4-DBP 較高，因溶液中有部分有機前質與 HOBr 反應，然高劑量時因臭氧已破壞大部份有機前質，導致 CHBr<sub>3</sub> 生成量降低。而以 aliphatic 結構為主之 acetaldehyde 有機物則恰有相反趨勢，原因是此類有機物與 HOBr 有較強之 THMs 或 HAAs 生成能力。

## 結論

1. 原水各類有機物臭氧化生成之溴化有機副產物中，CHBr<sub>3</sub> 以 humic acid 有較高生成量，MBAA、DBAA，以 fulvic acid

最高，而 hydrophilic acid 及 hydrophilic neutral 僅在高臭氧劑量發現有少量 CHBr<sub>3</sub>、DBAA 生成。另在本實驗控制之高臭氧劑量下，humic acid、fulvic acid 原水發現有 2,4-dibromophenol 生成。

2. 各類人工原水臭氧化產生之 aldehydes、fatty acids 及 AOC 等生物可利用有機物濃度，以親水性 hydrophilic acid 及 hydrophilic neutral 兩類有機物生成量較高，且臭氧化增加之 AOC 濃度以 AOC<sub>NOX</sub> 佔較大部份。
3. humic acid 及 fulvic acid 所生成之 CHBr<sub>3</sub> 及 DBAA 隨 pH 值增加而減少，醛類則隨 pH 值增加而增加。另在低臭氧下兩種副產物即有顯著生成量，但在高臭氧下反有減少趨勢。
4. 代表性化合物之臭氧實驗，苯甲酸在低臭氧加量，生成 CHBr<sub>3</sub> 及 2,4-DBP 明顯高於乙醛，高臭氧量則有下降趨勢，且 CHBr<sub>3</sub> 濃度反較乙醛產生者為低。DBAA 生成量在控制之臭氧劑量範圍，均以乙醛生成量較高。

## 致謝

本研究承蒙行政院國科會補助經費 (NSC 89-2211-E-241-005)，特此誌謝，對鳳山水廠協助採樣，亦在此一併銘謝。

## 參考文獻

1. Hoigne, J., and Bader, H., "Ozone Initiated Oxidations of Solutes in Wastewater: A Reaction Kinetic Approach," Prog. Water Technol., Vol. 10, 657, 1978.
2. Rice, R. G., "Ozone Oxidation Products-Implications for Drinking Water Treatment," In Biohazard of Drinking Water Treatment, Larson, R. A., ed., Lewis Publishers, Inc. Chelsea, MI.,

- 1989.
3. Hoigne, J. and Bader, H., "Rate Constants for Reaction of Ozone with Organic Pollutants and Ammonia in Water," IOA Symp., Toronto, Canada, 1977.
  4. Reckhow, D. A., Leqube, B., and Singer, P. C., "The Ozonation of Organic Halide Precursors: Effect of Bicarbonate," *Water Research*, 20:8:987-998, 1986.
  5. Langlais, B., Reckhow, D. A., and Brink, D. A., "Ozone in Water Treatment: Application and Engineering," *AWWARF, Compagnie Generale Des Eaux, Lewis Publishers, Chelsea*, 1991.
  6. Van Hoof, F., Jnsens, J. G., and Van Dijck, H., "Formation of Oxidation By-Products in Surface Water Preozonation and Their Behavior in Water Treatment," *Water Supply*, 4:93-102, 1986.
  7. Leenheer, J. A. *Environ. Sci. Technol.*, 15 578-587. 1981.
  8. W. J. Huang, H. H. Yeh, *J. Environ. Sci. Health*, A32 2311-2336. 1997.
  9. APHA, AWWA, and WEF Standard methods for the examination of water and wastewater, 18<sup>th</sup> ed. Washington. 1992.
  10. Van der Kooij, D. "Assimilable Organic Carbon (AOC) in Drinking Water." in *Drinking Water Microbiology*, G.A.McFeter ed., Springer-Varlay, New York. 1990.
  11. Huck, P.M. Fedorak, P.M. and Anderson, W.B. "Formation and Removal of Assimilable Organic Carbon During Biological Treatment", *Jour.AWWA* ;83, 12, pp.69-80, 1991.
  12. Van der Kooij, D., Hijnen, W. A. M., and Kruithof, J.C. "The Effect of Ozonation, Biological Filtration and Distribution on the concentration of Easily Assimilable Organic Carbon(AOC) in Drinking Water." *Ozone Sci.& Engi.*, Vol.11,pp.297-311, 1993.
  13. Vahala, R., Ala-Peijari, T., Rintala, J. and Laukkanen, R. "Evaluating Ozone Dose for AOC Removal in Two-step GACFilters" *Wat. Sci. Tech.*, 37(9), pp.113-120, 1996.
  14. Siddiqui, M., Amy, G. L., and Rice, R. Q., "Bromate Ion Formation: A Critical Review," *Jour. AWWA*, 87, 10, 58-70, 1995.
  15. S. Mohamed, M. Siddiqui, G. Amy, J. *AWWA*, 87, 61, 1995.
  16. W. R. Haag, et al., *Water Res.*, 18, 1125, 1984.

表 1 臭氧試驗之人工原水組成份

Synthetic water	I	II	III	IV
Organic fraction	humic acid	fulvic acid	hydrophilic acid	hydrophilic neutral
NPDOC (mg/L)	1.78	1.78	1.78	1.78
Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	150	150	150	150
Ionic strength (M)	0.05	0.05	0.05	0.05

表 2 臭氧試驗之代表性化合物配製原水組成份

Synthetic water	I	II
Organic fraction	hydroxybenzoic acid	acetaldehyde
Concentration (mg/L)	10.3	12.6
NPDOC (mg/L)	5.8	5.2
Alkalinity (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	150	150
pH	7.0	7.0
Br- (mg/L)	1.0	1.0
Ionic strength (M)	0.05	0.05

表 3. 各類有機物臭氧化生成之溴化有機副產物

Water sources	O <sub>3</sub> to DOC ratio (mg-O <sub>3</sub> /mg-C)	CHBr <sub>3</sub> (μg/L)	MBAA (μg/L)	DBAA (μg/L)	2,4-DBP (μg/L)
humic acid	0.15	2.5	ND	ND	ND
	0.30	5.7	ND	ND	5.3
	0.50	17.6	ND	ND	10.6
	1.75	12.4	1.1	ND	6.4
fulvic acid	0.30	1.1	ND	ND	ND
	0.52	4.1	ND	0.6	1.8
	1.55	12.5	1.5	2.7	2.4
	2.50	10.3	2.4	5.9	1.7
hydrophilic acid	0.22	ND	ND	ND	ND
	0.45	ND	ND	ND	ND
	1.60	ND	ND	ND	ND
	2.60	0.7	ND	0.5	ND
hydrophilic neutral	0.25	ND	ND	ND	ND
	0.55	ND	ND	ND	1.2
	1.65	1.2	ND	1.2	ND
	2.55	1.4	ND	0.7	ND

表 4. 各類有機物臭氧化生成之生物可利用有機物

Water sources	O <sub>3</sub> to DOC ratio (mg-O <sub>3</sub> /mg-C)	aldehydes (µg/L)	fatty acid (µg/L)	AOC <sub>P17</sub> (µg/L)	AOC <sub>NOX</sub> (µg/L)	AOC <sub>Total</sub> (µg/L)
humic	0	ND <sup>a</sup>	ND	16.5	2.3	18.8 <sup>b</sup>
-acid	0.15	16.5	ND	15.6	17.8	33.4
	0.30	13.6	ND	6.7	25.5	32.2
	0.50	12.4	8.4	9.4	22.6	32.0
	1.75	11.3	16.4	4.5	36.9	41.4
fulvic	0	ND	ND	19.4	1.9	21.3
-acid	0.30	14.3	ND	3.2	22.5	25.7
	0.52	8.6	6.9	5.8	21.6	27.4
	1.55	12.3	13.2	6.7	29.2	35.9
	2.50	13.5	22.4	1.7	42.3	44.0
hydrophilic	0	ND	ND	ND	ND	ND
-acid	0.22	ND	10.3	ND	13.5	13.5
	0.45	2.5	15.4	1.5	17.8	19.3
	1.60	4.7	17.6	2.1	15.4	21.5
	2.60	6.9	26.5	1.6	27.3	28.9
hydrophilic	0	2.5	6.6	26.4	7.2	33.6
-neutral	0.25	18.8	14.3	13.2	28.5	41.7
	0.55	17.6	28.7	11.5	41.4	52.9
	1.65	23.6	35.2	17.5	32.8	50.3
	2.55	24.2	31.8	3.4	65.4	68.8

a. Sum of formaldehyde, acetaldehyde, propaldehyde, butaldehyde, hexaldehyde, decanal, benzaldehyde, and glyoxal.

b. Sum of AOC<sub>P17</sub> and AOC<sub>NOX</sub>.

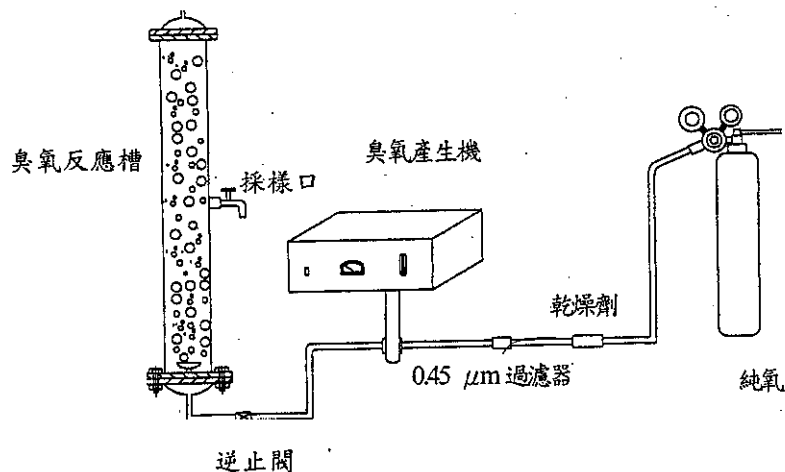


圖 1 臭氧反應系統

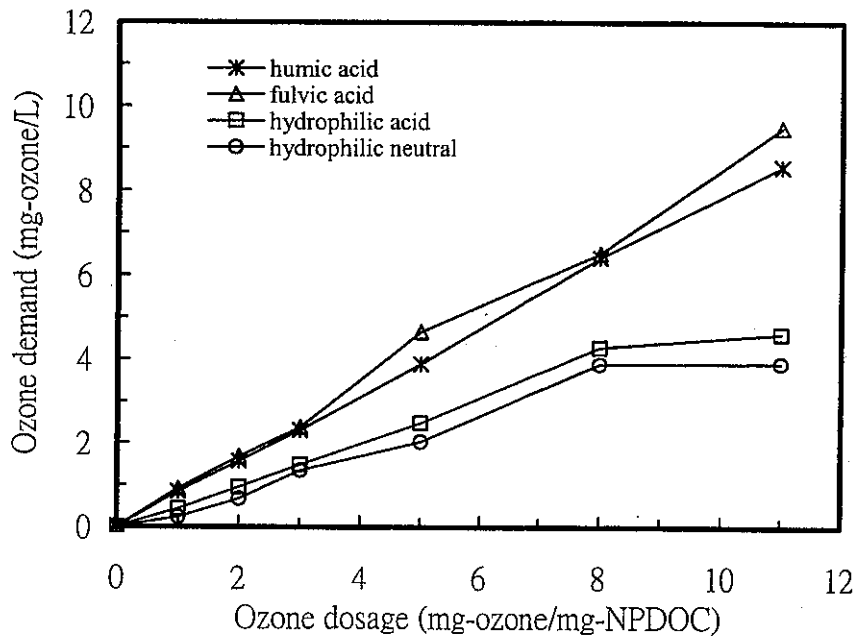


圖 2 各類有機物配製原水臭氧化過程之耗臭氧量

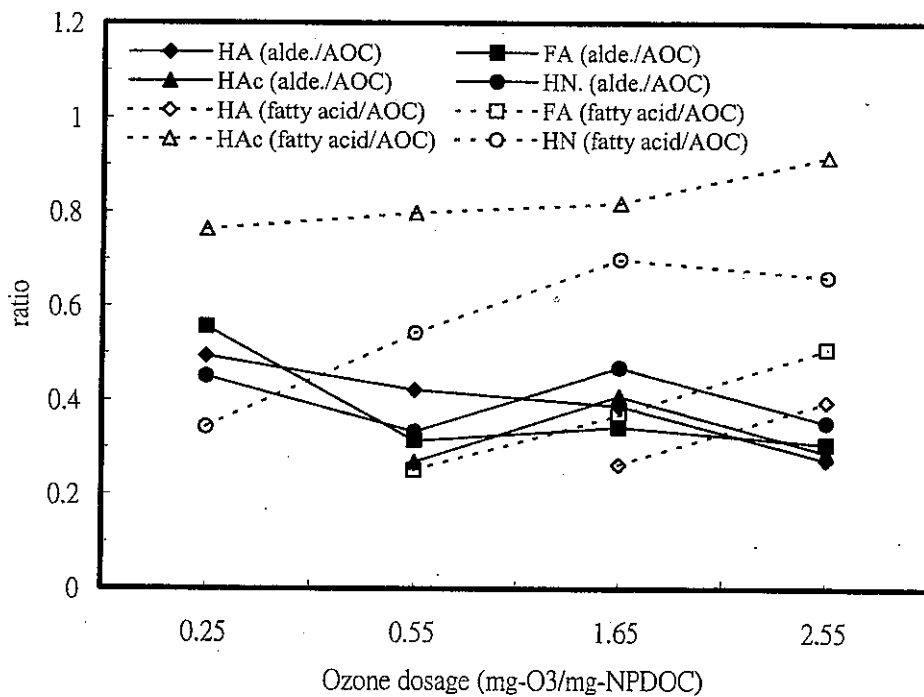


圖 3 各類有機物臭氧化生成產物 aldehydes/AOC、fatty acids/AOC 與臭氧量之相關性

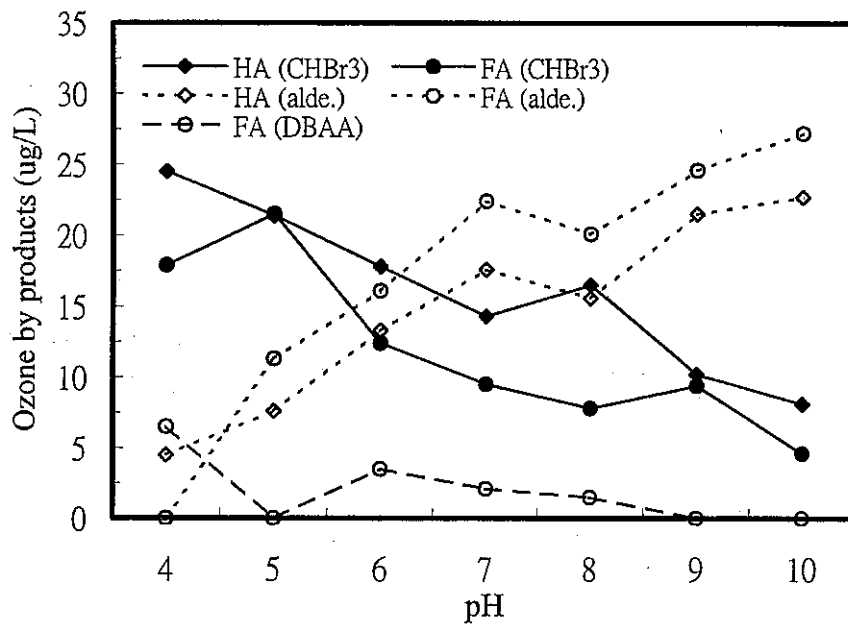


圖 4 各類有機物臭氧化生成副產物與反應 pH 之相關性 (ozone dose/NPDOC = 2.0 mg/mg, Br<sup>-</sup> = 1.0 mg/L)

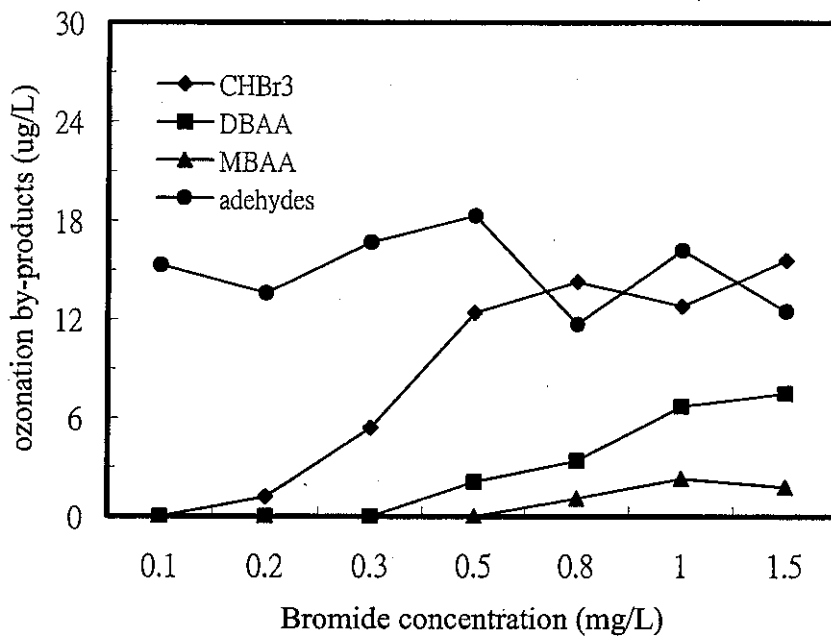


圖 5 Humic acid 臭氧化生成副產物與 Br<sup>-</sup>濃度之相關性 (ozone dose/NPDOC = 2.0 mg/mg, pH = 7.0)

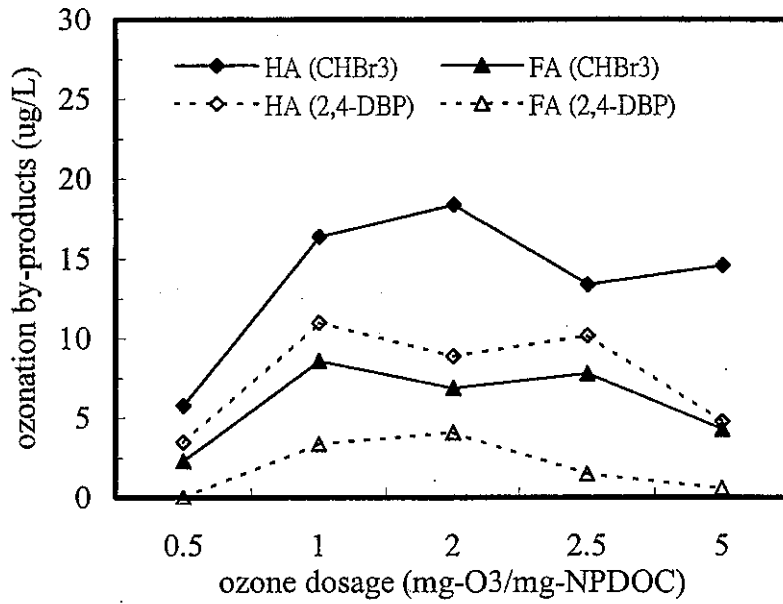


圖 6 各類有機物臭氧化生成副產物與臭氧劑量之相關性 (pH = 7.0, Br<sup>-</sup> = 1.0 mg/L)

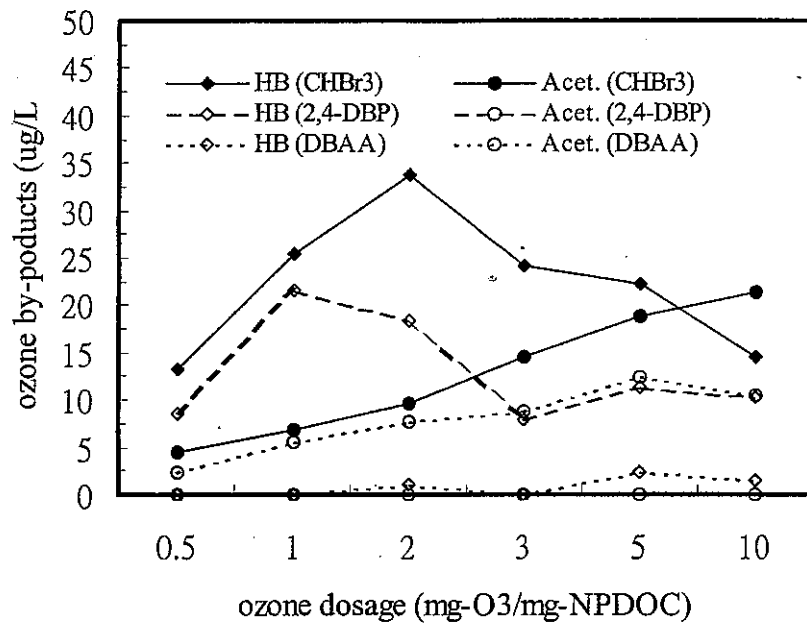


圖 7. 苯甲酸及乙醛人工原水臭氧化生成副產物與臭氧劑量之相關性 (pH = 7.0, Br<sup>-</sup> = 1.0 mg/L)