

# 地下水臭氧化生成副產物之研究

黃文鑑\* 林宏達\*\* 謝瑞緣\*\*\* 江培汶\*\*\*

## 摘要

本研究以台灣中部地下水源為試驗對象，選擇遭人為污染或海水鹽化之地下水源，同時利用控制臭氧操作條件，探討各類原水水質參數（例如溴離子濃度、溶解性有機碳、氮、及 pH 值等）對生成  $\text{BrO}_3^-$ 、溴仿(bromoform)、溴化醋酸(MBAA、DBAA)及醛類有機物等副產物之影響。實驗結果顯示，以未受污染地下水控制 pH 值、及鹼度條件下，配置人工原水進行臭氧處理，生成 bromate 速率較有機性副產物 bromoform、DBAA 及 MBAA 快速，原水具高 pH 值、高溴離子濃度及低有機物濃度之水質，臭氧處理後，有高濃度之 bromate 生成，含高濃度  $\text{NH}_3$  及有機物原水在高臭氧劑量仍不易發現有 bromate 產生。Bromoform 及 DBAA、MBAA 等有機副產物在低 pH 值及高有機物濃度下較易生成。遭污染地下水含高濃度  $\text{NH}_3$ ，即使有較高溴離子含量，臭氧化過程仍不易生成 bromate，但有 bromoform、溴化醋酸及多種之醛類有機物產生，包括 valeraldehyde、hexaldehyde、heptaldehyde 及 decanal 等高碳數醛類物種。針對人工配置之腐植質及非腐植質原水臭氧化生成之副產物情形，含腐植質原水生成之 bromate 及各種醛類濃度均高於非腐植質原水，而 bromoform 則以非腐植質較高。

## 一、前言

臭氧在淨水工程之應用，主要在消毒、氧化鐵(錳)、臭味及色度的控制<sup>(1)</sup>，對水質提昇有相當助益，然而臭氧在消毒或氧化過程亦有生成副產物之風險。一般而言，臭氧具強烈氧化特性，是淨水消毒劑中能力最強者，在原水含溴離子及有機物條件下，可經由分子型態的直接反應或以自由基中間物與  $\text{Br}^-$  反應生成溴酸鹽，同時在有機物參與反應下，亦可能產生溴仿 (bromoform)，溴化醋酸 (bromoacetic acids) 及極性之小分子有

---

\*弘光技術學院環境工程學系 助理教授

\*\*弘光技術學院環境工程學系 研究助理

\*\*\*弘光技術學院環境工程學系 大學部兼任助理

機物（例如醛類、羧酸類）<sup>(2)</sup>，這些副產物的生成量與原水水質參數及臭氧化條件有密切關係，前者包括溴離子濃度、有機物特性、pH 值、鹼度及氨氮濃度等<sup>(3)</sup>。

原水中所含污染物與臭氧的反應程度，與臭氧在水相中之型態有關，就臭氧分子而言，與化合物反應主要是以 cycle addition、electrophilic reaction、nucleophilic reaction 等三種方式作用，反應常發生在未飽合之芳香族與脂肪族化合物，以及某些具-OH、-NH<sub>2</sub> 等供電子官能基化合物<sup>(4)</sup>。另一方面，具高氧化力之 OH<sup>·</sup> 自由基則幾乎與水中各類化合物均有反應發生，包含醛、酮及不具活性之脂肪族化合物<sup>(5)</sup>，但在進行連鎖反應過程中仍受水中某些扮演自由基起始劑(initiators)、促進劑(promoters)及抑制劑(inhibitors)等化合物之影響<sup>(6)</sup>。

臭氧化除了產生有機性副產物，在含有 Br<sup>-</sup> 的水體，若有足夠之臭氧劑量，會使 Br<sup>-</sup> 與 O<sub>3</sub> 分子或解離之 OH<sup>·</sup> 自由基反應，而產生副產物溴酸鹽(Bromate, BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>)。在一般淨水條件，Bromate 的生成量受到水質參數及臭氧化條件所影響，前者包含溴離子濃度、pH 值、鹼度、有機物、氨氮及其他還原性物種<sup>(7)</sup>。而臭氧條件則包含臭氧劑量、接觸時間及 CxT 值等。再者，水中有機物的特性及濃度亦是影響 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 生成量之重要因子，臭氧可以直接或藉由自由基與有機物反應，在臭氧反應過程中，若是(1)水中有機物濃度高於 Br<sup>-</sup> 濃度，(2)某些有機物與臭氧反應速率大於 Br<sup>-</sup> 與臭氧反應速率，(3)有機物扮演自由基抑制劑(inhibitor)消耗臭氧，此三種情況均會減少 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的生成。另一方面，對於扮演自由基起始劑(initiators)、促進劑(promoters)之某類有機物(例如腐植質)，則可能增加 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的生成<sup>(8)</sup>。

## 二、實驗方法

### 2-1 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)，將臭氧產生機 (OZOTECH, OZIBTU, 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、出口偵測氣相及液相殘留之臭氧濃度，整體設備的配置如圖 1 所示。

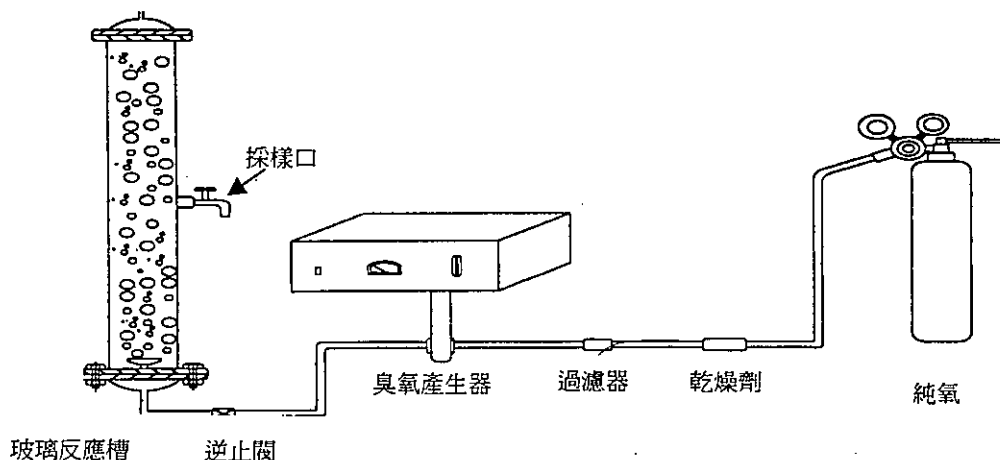


圖 1 臭氧反應設備

## 2-2 水質參數及臭氧加量對生成副產物影響實驗

本實驗是在探討地下水臭氧化過程，可能對生成臭氧副產物造成影響之幾項水質參數及臭氧控制條件，包括溴離子濃度、pH 值、有機物含量、臭氧接觸時間等。試驗水樣主要是採集中部地區之地下水源，首先在實驗室進行各原水基本水質分析，並取其中未遭污染或海水鹽化之地下水作為配置人工原水之背景水樣，以控制各項水質條件，進行臭氧化實驗。各地下水源之基本水質分析如表 1 所示。

表 1 地下水基本水質資料

水樣	NH <sub>3</sub> (mg/l)	TOC(mg/l)	pH	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	Br <sup>-</sup> (mg/l)
SLDW	0.5	0.81	6.3~6.8	15	0.02
WCSW	5	3.2	7.7~7.8	30	0.04
CHDW	2	0.8	6.5~7.2	290	0.73
LGDW	0.2	0.8	6.5~6.8	25	0.03

### 2-2-1 臭氧加量及反應時間

首先取 10 升人工原水，添加 Br<sup>-</sup>至 0.3 mg/L，調 pH=7，固定臭氧加量為 2 mg-ozone/mg-NPDOC，連續通入臭氧，在固定時間內取樣分析處理水之 NPDOC、bromate、bromoform、MBAA 及 DBAA 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 10min，通入臭氧量控制在 1~13 mg-ozone/mg-NPDOC 濃度範圍，處理水樣分別取樣分析 NPDOC、bromate、bromoform、MBAA 及 DBAA 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。

### 2-2-2 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，Br<sup>-</sup>濃度控制在 0.3mg/L，NPDOC=0.81mg/L，臭氧劑量=1~13mg-ozone/mg-NPDOC，接觸時間=10min。

### 2-2-3 溴離子濃度

本實驗在比較地下水中溴離子濃度對臭氧化過程生成副產物之影響，藉由未遭鹽化之背景水樣，添加不同溴離子濃度，觀察臭氧處理水生成之溴化副產物，包括 bromate、bromoform、MBAA 及 DBAA 等，溴離子控制濃度範圍在 0.03 ~ 1.2mg/l。另針對不同區域之地下水樣，包含淺井地下水、深井地下水及遭海水鹽化水樣 (Cl<sup>-</sup> > 250mg/l) 之溴離子濃度一併分析，同時比較臭氧化生成之溴化副產物多寡。臭氧化水樣之 pH 值控制在 7.4，鹼度 = 105mg/l as CaCO<sub>3</sub>、NPDOC=0.81 mg/l，臭氧劑量控制 2 mg-ozone/mg-NPDOC，接觸時間為 10min。

### 2-2-4 有機物濃度

水中之有機物濃度複雜，不同性質有機物與臭氧或臭氧中間產物之反應亦有差異性，本實驗以比較二種不同有機物濃度，但其他基本水質 (pH 值、鹼度、Br<sup>-</sup>、NH<sub>3</sub>) 相似之地下水樣，分析臭氧化生成之副產物，目的在探討有機物在臭氧化過程對生成副產物物種或濃度影響。

## 2-3 比較腐植質及非腐植質有機物對臭氧副產物生成之影響

為進一步瞭解水中有機物特性對臭氧副產物生成之影響，本實驗利用水中有機物之分離技術，將水中有機物分離成腐植質 (humic substances) 及非腐植質 (nonhumic

substances) 兩類，採用 XAD-8 吸附樹脂 (Amberlite XAD, Sigma, 美國) 進行吸附分離程序。將兩類分離出之有機物分別配置人工原水方式進行臭氧化，其中 pH 控制在 7.0 範圍， $\text{Br}^- = 0.3\text{mg/l}$ ，鹼度  $150\text{ mg/l as CaCO}_3$ ，NPDOC= $1.0\text{ mg/l}$ ，臭氧控制範圍=  $0.5 \sim 8\text{mg-ozone/mg-NPDOC}$ ，接觸時間為 10min。兩類臭氧處理水之分析項目包括 bromate、bromoform 及 aldehydes 等。

## 2-4 水質分析方法

本實驗中各項基本水質、有機替代參數、 $\text{BrO}_3^-$  及氣、液相臭氧濃度之分析方法，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., 1995)。其中  $\text{Br}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、bromate 利用標準檢驗法之離子層析 (Ion Chromatography) 法分析，所使用儀器為 (Dionex, DX-100, 美國) 配置有保護管柱 (Guard Column, Model AG9-SC, Dionex)、分離管柱 (Separator Column, Model AS9-SC, Dionex) 及比導電度偵測器。總有機碳 (TOC) 利用總有機碳分析儀 (Total Organic Carbon Analyzer, Shimadzu, TOC-5000, 日本)，鹵化醋酸 (HAA) 分析方法採美國水及廢水標準檢驗法 19 版 Liquid-Liquid Extraction Gas Chromatography Method，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<sup>(9)</sup>。而 bromoform 是採美國水及廢水標準檢驗法 19 版 (Purge and Trap Packed-Column 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。

## 三、結果與討論

### 3-1 水質參數與臭氧化生成副產物之相關性

圖 2 是利用未遭污染之地下水為背景水樣，調整 pH=7.5，添加  $\text{Br}^-$  濃度至  $0.3\text{mg/L}$ ，施加  $2\text{ mg-ozone/mg-NPDOC}$  臭氧量，觀察 bromate、bromoform 及 MBAA、DBAA 之動力生成結果，圖中顯示 bromate 在臭氧接觸前 10min 內快速增加，之後則趨緩，

bromoform、MBAA 及 DBAA 則約在 15min 後方有明顯生成量，顯示 bromate 之生成速率較高於有機性之副產物，此可歸因於臭氧與  $\text{Br}^-$  反應可藉由直接或自由基產生 bromate，此兩者之進行速率均較臭氧與有機物反應快速，文獻中亦指出臭氧以自由基形態產生之 bromate 速率，要高於臭氧與反應生成 HOBr 或有機溴化產物(brominated organic compound)<sup>(10)</sup>。

圖 3 是背景水樣添加不同  $\text{Br}^-$  濃度，經臭氧化後（臭氧劑量：2 mg- $\text{O}_3$  /mg-NPDOC）所生成之各類產物，其中處理水測出之  $\text{BrO}_3^-$  最高可達 80  $\mu\text{g/L}$  以上，且在低  $\text{Br}^-$  濃度 (0.1mg/L) 亦有約 10  $\mu\text{g/L}$  之  $\text{BrO}_3^-$  生成，顯示臭氧化產生之  $\text{BrO}_3^-$  與原水所含  $\text{Br}^-$  有密切相關性，尤其是原水中其他具耗臭氧之還原性物質偏低條件下。另溴仿(bromoform)、一溴醋酸(MBAA)、二溴醋酸(DBAA)等溴化副產物之生成量不高，在高  $\text{Br}^-$  濃度均低於 10  $\mu\text{g/L}$ ，此可能與原水中之有機物濃度偏低有關。

變化原水 pH 值與  $\text{BrO}_3^-$  生成量之結果(圖 4)，顯示低 pH 值(pH=4)未偵測出  $\text{BrO}_3^-$ 。而隨著 pH 增加， $\text{BrO}_3^-$  生成量亦隨之增加，根據文獻報導  $\text{BrO}_3^-$  生成量與 pH 值大致有正比關係，因為在高 pH 值下，氫氧離子可為起始劑，並促進分子臭氧分解出自由基(OH $\cdot$ )，此自由基可經由二種路徑增加溴酸鹽之生成；其一是與溴離子反應生成 hypobromite radical ( $\text{BrO}\cdot$ )，此自由基將繼續轉為  $\text{BrO}_2\cdot$ ，並與分子臭氧或 OH $\cdot$  自由基反應生成  $\text{BrO}_3^-$ ，其二為分子臭氧與  $\text{Br}^-$  產生之  $\text{OBr}\cdot$ ，會與 OH $\cdot$  自由基作用，增加  $\text{BrO}_2\cdot$  生成量，間接促進  $\text{BrO}_3^-$  的產生<sup>(11)</sup>。本實驗 pH 控制在 7 以上，即發現有高量  $\text{BrO}_3^-$  生成，顯示原水臭氧化產生之  $\text{BrO}_3^-$  可能有大部份是經由自由基反應途徑生成。再者，針對 bromoform 之生成(圖 5)，顯示與  $\text{BrO}_3^-$  恰成相反趨勢，亦即隨著 pH 增加而減少，此主因是低 pH 值下，分子態臭氧與  $\text{Br}^-$  比較利於生成 HOBr 及含溴有機物種。

針對有機物對臭氧副產物生成量的影響，本實驗取兩種含不同有機物濃度(以 NPDOC 值定量)之地下水，在固定溴離子濃度及 pH 條件下，進行臭氧反應，圖 6 顯示含高濃度有機物原水在低臭氧劑量下，僅產生少量之  $\text{BrO}_3^-$ 、bromoform、MBAA、DBAA 等副產物，然提高臭氧劑量，即發現有機性溴化副產物有逐漸增高趨勢，同時  $\text{BrO}_3^-$  亦有明顯增加，另醛類在低臭氧下即有顯著生成量，在高臭氧所增加之趨勢則變緩，推測是因有機物與臭氧之反應速率大於  $\text{Br}^-$ <sup>(12)</sup>，導致  $\text{BrO}_3^-$  生成濃度減少，但提高臭氧劑量

至滿足有機物之需求值時，Br<sup>-</sup>與臭氧之反應變為劇烈，故 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>大量增加。針對含低濃度有機物原水，臭氧化 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>增加趨勢較高濃度者明顯，有機性副產物生成量則有減少。

### 3-2 遭受污染地下水臭氧化生成之副產物探討

本實驗為進一步瞭解實際地下水水質在臭氧化過程產生副產物之差異，以採集臺灣中部地區四處地下水為試驗水樣，分別進行臭氧處理，藉由其水質特性，研判生成臭氧副產物之差異性。圖 7 至圖 9 為四種水樣臭氧化生成之 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>、bromoform、MBAA 及 DBAA，首先針對 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>生成量比較，CHDW 及 WCSW 原水在各臭氧劑量條件下，產生之 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>均不顯著，相反的，LGDW 及 SLDW 原水卻有較高濃度生成。再者，bromoform 以 WCSW 及 CHDW 原水有較高生成量，而 SLDW 原水則較不明顯，在 MBAA 及 DBAA 方面，以 CHDW 原水最高，SLDW 原水次之，WCSW 最低。此結果配合各原水之水質來看，CWDW 及原水由於氨氮及有機碳濃度較高，由其是 WCSW 淺井水可能已遭人為污染，氨氮濃度高達 5mg/L，導致施加臭氧大部份與此類還原性物質反應，增加臭氧需量(圖 10 所示)，間接減少 BrO<sub>3</sub><sup>-</sup>之生成。另由於 CHDW 及 WCSW 原水含有較高有機碳，臭氧生成之 Bromoform 相對較其他低有機碳原水明顯。在 HAAs 方面，CHDW 原水產生之 MBAA 及 DBAA 較高，而含高濃度有機物之 WCSW 原水反倒較低，原因可能是原水中有機物特性不同，以本實驗利用有機物分離方法將其分類成腐植質及非腐植質，兩類有機物所佔之比例，WCSW 原水中腐植質所佔比值最高，約 50%，此現象是否為造成 WCSW 原水臭氧化過程產生高量 THM，但 HAA 卻少量之原因，仍待進一步證實。

再者，針對地下水臭氧化生成之醛類有機物，本實驗以 WCSW 及 SLDW 兩原水進行分析結果(表 2、表 3)，發現兩原水中存在之醛類物種主要以低碳數之 formaldehyde 及 acetaldehyde 為主，其中受污染之 WCSW 原水 formaldehyde 含量頗高，約有 100 μg/L。SLDW 原水臭氧化後生成低碳數之 formaldehyde 及 acetaldehyde 之醛類濃度相當高，其中 acetaldehyde 在高臭氧量下有逐漸減少趨勢。WCSW 原水生成之物種除發現低碳數者，valeraldehyde、hexaldehyde、heptaldehyde 及 decanal 等高碳數醛類，亦有相當高濃度產生，研判是因 WCSW 原水含較高濃度有機物，且其中屬結構複雜之大分子腐植質所佔比值偏高，因此在臭氧化過程有較多樣之醛類物種生成，同時由各物種隨臭氧劑量增加而變動之趨勢，顯示部份高碳數醛類(如 valeraldehyde、heptaldehyde)將隨臭氧劑量

增加而衰減。

### 3-3 有機物特性對生成臭氧副產物之影響

應用有機物分離方法將原水萃取出之腐植質(humic substances)及非腐植質(nonhumic substances)兩類有機物，以配製人工原水方式，控制  $\text{Br}^-$  濃度、pH 值及鹼度等水質參數，分別進行臭氧化實驗。圖 11 顯示含腐植質原水生成之  $\text{BrO}_3^-$  明顯高於含非腐植質者，但 bromoform 生成量則以含非腐植質原水較高，根據文獻報導<sup>(13)</sup>，原水存在之天然有機物會對水相臭氧之鏈反應產生影響，特別是含複雜官能基之腐植質可當成鏈反應之起始劑(initiator)或促進劑(promotor)，因此當此類有機物參與反應時，水中由臭氧生成之自由基將增加，進而與  $\text{Br}^-$  反應，產生更高濃度之  $\text{BrO}_3^-$ 。此外，在醛類生成方面，腐植質生成之醛類濃度較高於非腐植質者，前者主要以甲醛、乙醛、丙醛及丁醛等低碳數有機物為主，戊醛、環己醛及辛醛等較高碳數者僅少量存在。而非腐植質生成之醛類僅在高臭氧量發現少量甲醛及乙醛等高碳數醛類則未發現，此結果可能與被氧化有機物之物化特性有關，腐植質因屬大分子有機物，臭氧化過程生成之物種相對較複雜，因此在臭氧化水中可同時發現高、低碳數之醛類。本實驗以 GC/MS 圖譜鑑定比對結果，亦發現含腐植質原水臭氧化後，尚有草酸、酮及烷類有機物生成。

## 四、結論

本文針對臭氧化生成之副產物，以控制水質參數及臭氧施加條件，同時採地下水進行比較，所獲實驗結果，可歸納出下列結論：

1. 臭氧化產生各類副產物，在動力生成結果比較，無機性 bromate 生成速率高於 THM 及 HAA 等有機副產物。
2. 臭氧化生成之 bromate 隨  $\text{Br}^-$  濃度增加而增加，尤其在低有機物原水中更加明顯。提高 pH 值對 bromate 生成有正面效應，而 bromoform 則恰有相反趨勢。
3. 針對遭受污染地下水源，含高濃度  $\text{NH}_3$  及有機碳原水，臭氧化生成之 bromate 相當有限，然有機性副產物 THM、HAA 及醛類則有明顯生成量。
4. 含腐植質原水生成之 bromate 及醛類濃度高於非腐植質者，而 bromoform 則以非腐植質原水較高。

## 誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會提供經費補助（計劃編號：89-2211-E-241-005）特此誌謝。

## 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、Froese, K. L., Wolanski, A. and Hrudey, S. E., "Factors Governing Odorous Aldehydes Formation As Disinfection By-Products in Drinking Water," Water Research, 33:6:1355-1364, 1999.
- 7、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.
- 8、Oxenford, J. L., "Disinfection By-Products in Water treatment: The Chemistry of Their Formation and Control," R. A. Minear, and G. L. Amy, eds., Lewis Publishers, 1996.
- 9、Glaze, W. H., "Summary: Workshop on By-Products of Ozonation, AWWA Research Foundation, Denver, CO., 1988.
- 10、Weinberg, H. S., Glaze, W. H., Krasner, S. W. and Scilimenti, M. J., "Formation and Removal of aldehydes in Plants that Use Ozonation," Jour. AWWA., 72:5:72-85, 1993.
11. Siddiqui, M., Amy, G. L., and Rice, R. Q., "Bromate Ion Formation: A Critical Review," Jour. AWWA, 87:10:58-70, 1995.
12. Yamada, H., "By-Products of Ozonation of Low Bromide Waters and Reduction of the by Products by Activated Carbon," 11<sup>th</sup> Ozone World Congress, San Francisco, Calif., 1992.

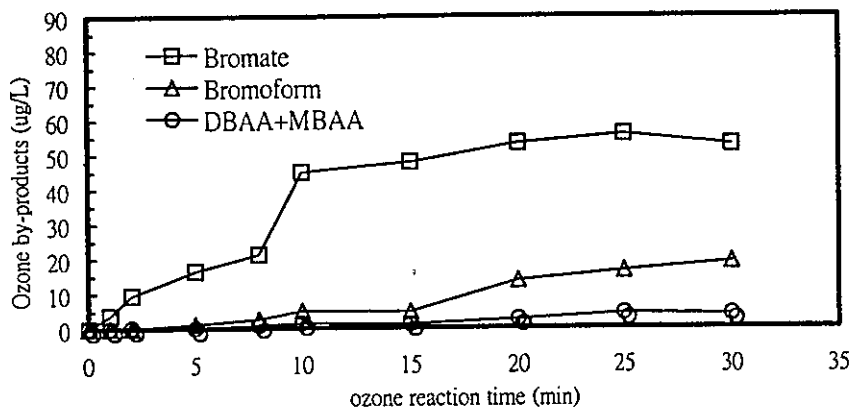


圖 2 各類臭氧副產物之生成動力趨勢(Reaction conditions : pH=7.5, Br=0.3 mg/L, ozone dosage=2mg-ozone/mg-NPDOC)

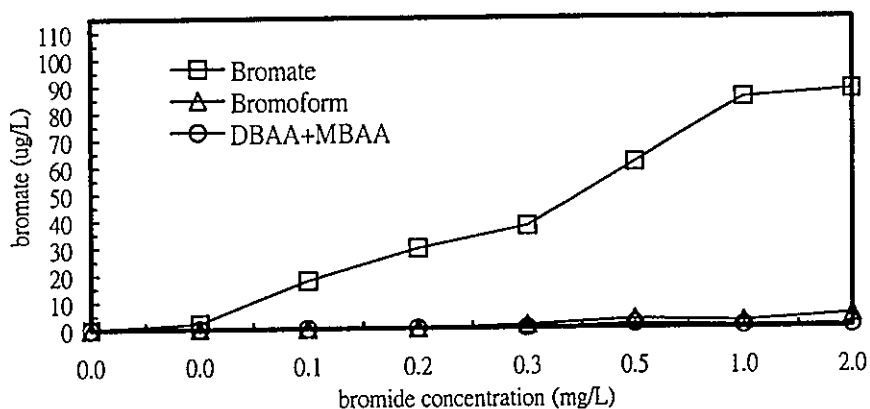


圖 3 原水溴離子濃度對臭氧副產物生成之影響(Reaction conditions : pH=7.5, ozone dosage=2mg-ozone/mg-NPDOC, contact time =10min)

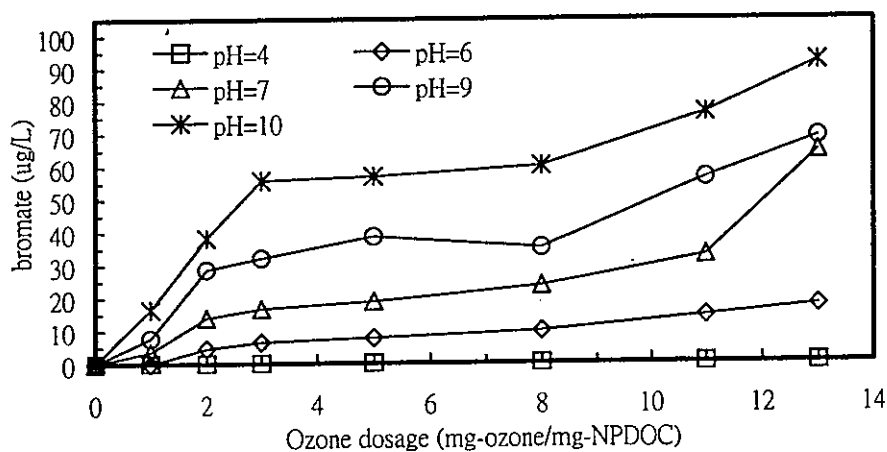


圖 4 原水 pH 值對臭氧副產物 bromate 生成之影響(Reaction conditions : Br=0.3 mg/L, contact time =10min)

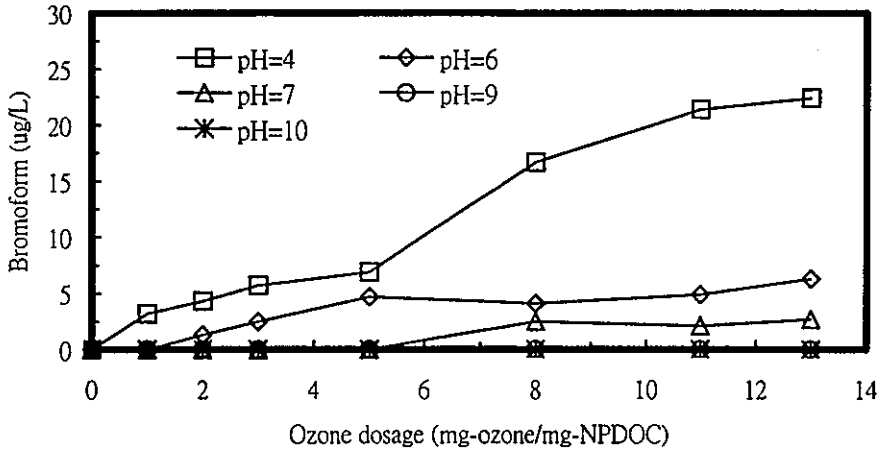


圖 5 原水 pH 值對臭氧副產物 bromoform 生成之影響(Reaction conditions : Br=0.3 mg/L, contact time =10min)

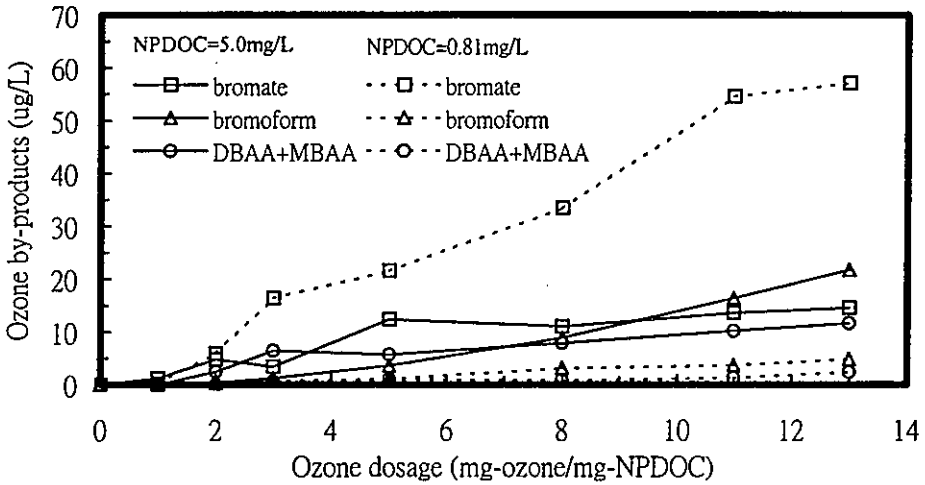


圖 6 原水有機物濃度對臭氧副產物 bromoform 生成之影響 (Reaction conditions : pH=7.5, Br=0.3 mg/L, contact time =10min)

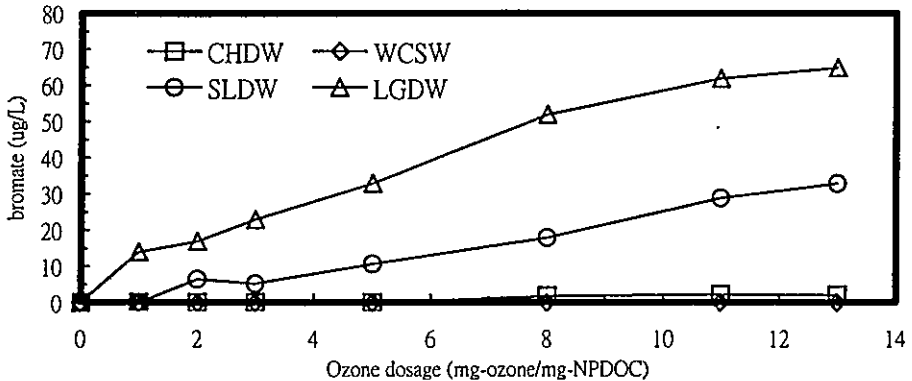


圖 7 比較各地下水源臭氧化處理生成之臭氧副產物 bromate

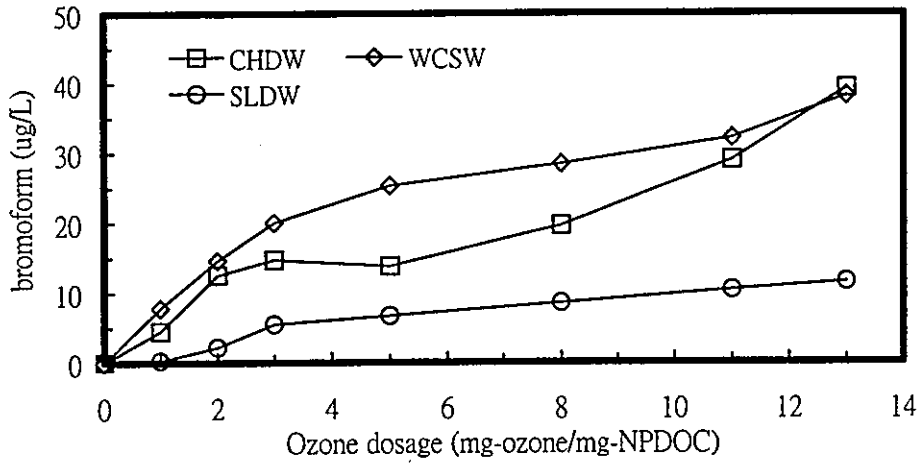


圖 8 比較各地下水源臭氧化處理生成之臭氧副產物 bromoform

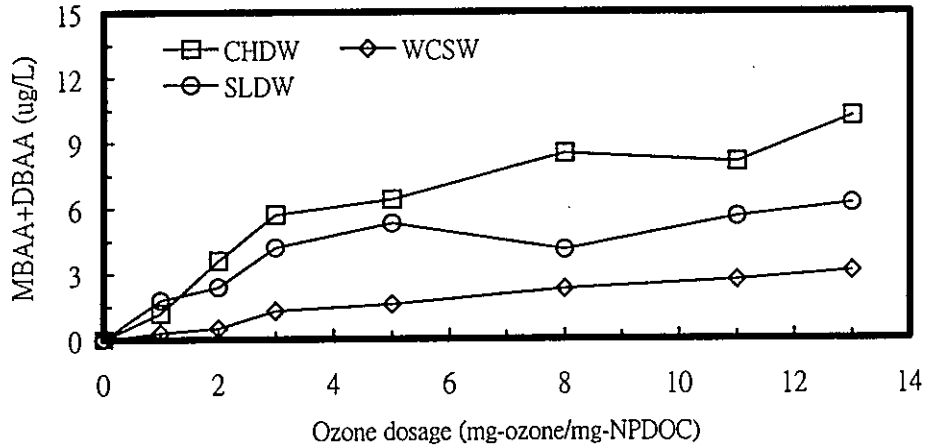


圖 9 比較各地下水源臭氧化處理生成之臭氧副產物 HAAs(DBAA+MBAA)

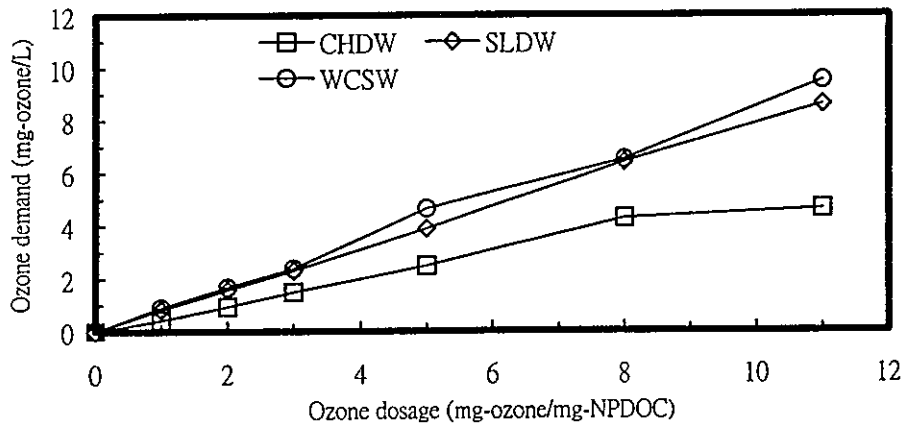


圖 10 各地下水源臭氧化處理過程之耗臭氧量

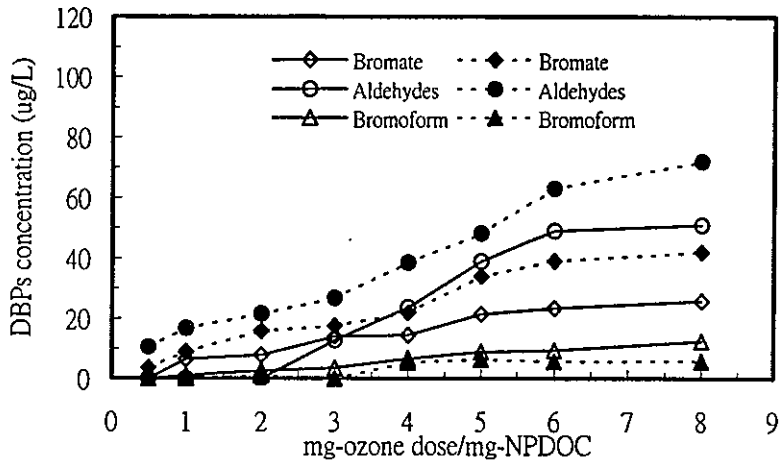


圖11 腐植質及非腐植質有機物 臭氧化生成之各類副產物

表 2 含低濃度有機物原水(SLDW)臭氧化生成之醛類物種

Aldehydes	Ozone dosage (mg/l)				
	0	1.2	2.4	6	11
Formaldehyde	12	107.5	185.6	160.1	284.2
Acealdehyde	3	45.5	9.9	11.9	8.9
Propaldehyde	1.2	6.6	2.6	2.1	1.6
Butaldehyde	ND	ND	0.9	0.6	2
Valeraldehyde	ND	ND	17.1	8.6	7
Hexaldehyde	ND	ND	6.6	9	7.2
Heptaldehyde	ND	ND	ND	2.8	2.7
Nonanal	ND	ND	ND	0.5	0.4
Decanal	ND	ND	ND	3.2	3.3

表 3 含高濃度有機物原水(WCSW)臭氧化生成之醛類物種

Aldehydes	Ozone dosage (mg/l)				
	0	1.2	2.4	6	11
Formaldehyde	103.3	138.9	135.1	144	112
Acealdehyde	23.3	27.1	44.1	45	42.3
Butaldehyde	ND	0.1	2	2.5	4.6
Valeraldehyde	4.8	21	18.2	11.9	7
Hexaldehyde	3.5	57.2	56	52.6	48.2
Heptaldehyde	2.4	41.6	41.2	39.9	37.6
Nonanal	5.6	3.7	3.4	2.3	2
Decanal	ND	6.7	11.3	20.7	23.2