

# 台灣地區飲用水中三鹵甲烷散佈及其健康風險評估

鄧雅謨、王根樹

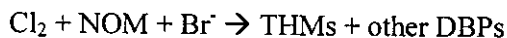
國立台灣大學環境衛生研究所

## 摘 要

本研究蒐集台灣北部、中部、南部及金門地區飲用水中三鹵甲烷之濃度資料，並於 2001-2003 年間進行飲用水中三鹵甲烷採樣分析，以比較各地區三鹵甲烷濃度之分佈及季節變化；並以蒙地卡羅模擬進行風險計算，進行各地區飲用水中三鹵甲烷之健康風險評估。研究結果顯示，台灣各地區飲用水中三鹵甲烷組成均有含溴三鹵甲烷物種出現，且各地區三鹵甲烷之組成及濃度分佈均不同，因而北、中、南及金門地區民眾因暴露於飲用水中三鹵甲烷造成之健康風險均不相同。在三鹵甲烷四個物種中，以氯仿有最高之健康風險貢獻量；不同暴露途徑則以淋浴時之呼吸暴露造成之健康風險較高。因為北部及中部飲用水中三鹵甲烷濃度較低，因此民眾所承受之總健康風險較低，平均為  $2 \times 10^{-5}$ ；南部地區因為較高之氯仿濃度及金門地區較高的總三鹵甲烷濃度，其健康風險較北部及中部為高，平均為  $5 \times 10^{-5}$ 。在不同的暴露參數中，淋浴時間對於風險的影響最大，但可藉由縮短淋浴時間及良好的浴室通風以降低風險。

## 一、前言

在飲用水中添加化學消毒劑以去除水中致病菌之過程會生成對人體健康有害的消毒副產物 (Disinfection Byproducts, DBPs)。以三鹵甲烷 (Trihalomethanes, THMs) 之生成為例：



由於三鹵甲烷與膀胱癌、大腸癌與直腸癌風險增加之相關性，美國自 1979 年即將其列為清水中主要管制對象，我國亦已將三鹵甲烷列入飲用水水質標準加以管制，目前之標準為  $100 \mu\text{g/L}$  (總三鹵甲烷)。消毒副產物(三鹵甲烷、含鹵乙酸等)中各不同物種的分佈是由水中氯對溴離子濃度之比例決定，水中溴離子增加時，消毒副產物物種會有

利於含溴物種之生成(Singer, 2000)。

台灣已有許多學者致力於探討台灣地區飲用水中消毒副產物之生成及揮發性有機物的健康風險評估。Yang et al. (1998) 於台灣地區進行流行病學研究，指出加氯消毒之飲用水與直腸癌、肺癌、膀胱癌和腎癌之發生具有正相關。由於台灣民眾飲水多有煮沸的習慣，而三鹵甲烷可以透過揮發方式逸散，所以呼吸及皮膚吸收亦成為主要的暴露途徑(Lin and Hoang, 2000)。不同暴露途徑所造成的暴露量不同，消化道食入一直被認為有最高的暴露量，但因台灣和國外的情況不同，進行風險評估必須考量此種差異。

1. 食入：台灣民眾飲水多有煮沸的習慣，Kuo et al.(1997) 研究指出，煮沸後約可去除 61%~82% 的三鹵甲烷，所以經由煮沸可以降低暴露量。
2. 吸入：因為三鹵甲烷具揮發性，Lin et al.(2000)之研究顯示，在不同的呼吸暴露途徑中以淋浴所造成之暴露量為最多，約占 90%。
3. 皮膚吸收：皮膚吸收亦占有相當的暴露比例，必須考量此途徑(Kuo et al., 1998)。

本研究以三鹵甲烷為研究對象，主要研究區域為北部、中部、南部、金門，除蒐集以往各地區飲用水三鹵甲烷之濃度外，並進行四個地區飲用水之三鹵甲烷之採樣與分析，以建立台灣地區三鹵甲烷散佈之資料。所得之數據再輸入健康風險評估之模式中，以蒙地卡羅模擬進行風險推估，探討台灣地區民眾承受之健康風險。

## 二、研究方法

### 2.1 台灣地區飲用水中三鹵甲烷濃度數據之蒐集

飲用水中三鹵甲烷濃度數據的來源包括三個部分：

1. 環保署歷年研究計劃：民國 85~89 年研究計劃中的數據，包括北部、中部、南部、外島地區數個水廠之飲用水中三鹵甲烷濃度。
2. 環保署定期檢測水質之結果：包括台北地區民國 79 年至 90 年、台中地區民國 83 年至 90 年、高雄地區民國 83 年至 90 年之三鹵甲烷濃度數據。
3. 實驗室自行採樣分析：於民國 91 年開始進行台北、高雄、台中、金門等地區飲用水之採樣分析。分析方法依照環檢所公告之標準方法進行。

## 2.2 三鹵甲烷暴露評估

暴露評估目的在於估計暴露族群的三鹵甲烷暴露劑量，因為台灣地區自來水普及率高，故暴露族群為台灣地區居民。進行暴露評估時，同時考慮飲水與淋浴兩種暴露路徑，暴露途徑則包括食入、呼吸及皮膚吸收，亦即暴露量 = 食入 + 吸入 + 皮膚吸收的量。各種不同暴露途徑暴露評估所使用參數之定義與設定值請參閱表一。

### 一、食入暴露

以「飲用」為造成食入暴露的主要活動，假設每人每天喝水 2 公升(USEPA 1989)，並假設食入暴露的吸收率為 100%，則水中三鹵甲烷濃度、每日飲水量與暴露時間三者的乘積就等於吸收劑量，吸收劑量除以暴露平均時間及體重，可以得到每日每公斤吸收多少毫克之三鹵甲烷。

$$\text{食入之長期吸收劑量(mg/kg-day)} = C_w \times IR \times EF \times ED \times CF / (BW \times AT)$$

### 二、呼吸暴露

以「淋浴」為造成呼吸暴露的主要活動，並依 Little(1992)發展之數學模式推估淋浴時浴室空氣中三鹵甲烷的濃度；淋浴時間採自國內類似調查之數據（王榮德，2000），呼吸速率則取人體輕度活動時之呼吸速率，並假設肺泡吸收率為 50%。故由空氣中三鹵甲烷濃度、呼吸速率、暴露時間及肺泡吸收率四者之乘積就可以得到吸收劑量(Dose)，吸收劑量除以暴露平均時間及體重，可以得到劑量率(Dose rate)。

$$\text{呼吸之長期吸收劑量 (mg/kg-day)} = C_{air} \times VR \times AE \times ET \times EF \times ED \times CF / (BW \times AT)$$

### 三、皮膚暴露

以「淋浴」為造成皮膚暴露的主要活動。由水中三鹵甲烷濃度、皮膚接觸面積、皮膚穿透係數與暴露時間四者的乘積就等於吸收劑量，除以體重和暴露平均時間，即可以得到劑量率。

$$\text{長期吸收劑量(CDI}_d\text{)} = C_w \times SA \times F \times PC \times ET \times EF \times ED \times CF / (BW \times AT)$$

表一 食入、呼吸及皮膚參數設定值

參數	數值	分佈	資料來源
<b>食入暴露</b>			
水中污染物濃度， $C_w$	分佈範圍介於 0~132 $\mu\text{g/L}$	各地區不同物種濃度有其分佈	以及各地區採樣分析所得之結果
飲水量，IR	2 (liters/day)	定值	USEPA 1989
<b>呼吸暴露</b>			
浴室空氣中之化學物濃度， $C_{air}$			數學模式推估得之 (Little, 1992)
呼吸速率，VR	男性：0.84 $\text{m}^3/\text{hr}$ 女性：0.66 $\text{m}^3/\text{hr}$	定值	輕度活動呼吸速率 (洗澡)
肺泡吸收率，AE	50%	定值	王榮德, 2000
水流速， $Q_L$	5 (L/min)	定值	Little, 1992
空氣流速， $Q_{GS}$	50 (L/min)	定值	Little, 1992
浴室內空氣體積， $V_s$	長 1~3 m，寬 1~2 m，高 2~3 m，平均體積為 6.6 $\text{m}^3$	Bata distribution	吳焜裕, 2000
亨利常數，H	依物種而定	定值	RAIS
液相整體質量轉移係數×有效空氣/水介面面積， $K_{OL} A$	依物種而定，(L/min)	定值	
<b>皮膚暴露</b>			
皮膚表面積，SA	$(4W+7)/(W+90)\text{m}^2$ W：體重		Exposure Factors Handbook, 1997
皮膚接觸比率，F	80%	定值	王榮德, 2000
皮膚穿透係數，PC	依物種而定	定值	RAIS
暴露時間，ET	18.9 mins *	Triangular distribution	王榮德, 2000
暴露頻率，EF	365 days/year	定值	USEPA 1989
暴露期間，ED	29 years	Bata distribution	王榮德, 2000
暴露平均時間，AT	70years×365days/yr	定值	70 year lifetime
體重，BW	男性：64.8±10.0 kg 女性：56.3±9.09 kg	Normal distribution	衛生署調查結果
單位換算因子，CF	$10^{-3}\text{L}/\text{m}^3$		

浴室空氣中三鹵甲烷的濃度會受到不同的水中三鹵甲烷濃度、不同三鹵甲烷之亨利常數、液相整體質量轉移係數以及水流速、空氣流速、浴室體積...等參數之影響。浴室空氣中三鹵甲烷濃度推估模式設定請參閱 Little et al. (1992)及 Lin and Hoang(2000)。

### 2.3 風險特性描述

風險推估數學模式使用美國環保署採用之直線多階段模式(Linear multistage model)進行風險計算，因為此模式考慮很多高危險群之特異性，且無論高或低劑量暴露推估之風險度高估情形，可得到較為保守的結果。因為環境暴露多屬低濃度暴露，此模式假設在多階段模式中，劑量-效應關係在低劑量時呈線性關係，而得到一個斜率因子(Slope factor, SF)，因此

$$\text{健康風險} = \text{長期每日攝取量(CDI)} \times \text{斜率因子(SF)}$$

長期每日攝取量：考慮 70 年間所有暴露路徑的每日平均攝取量(mg/kg-day)

斜率因子：一生平均攝取量與癌症增加的風險之間的相關性常數

同介質中不同物質所造成之風險及在同一暴露期間對同一群體因不同途徑所造成之總風險均以將個別風險加總之方式計算而得。

表二所列為三鹵甲烷各物種之斜率因子，由於參考數據不足，一溴二氯甲烷及二溴一氯甲烷經由呼吸暴露途徑的 Slope factor 係引用食入部分的參數(USEPA, 1998)。

表二 三鹵甲烷之毒性資料

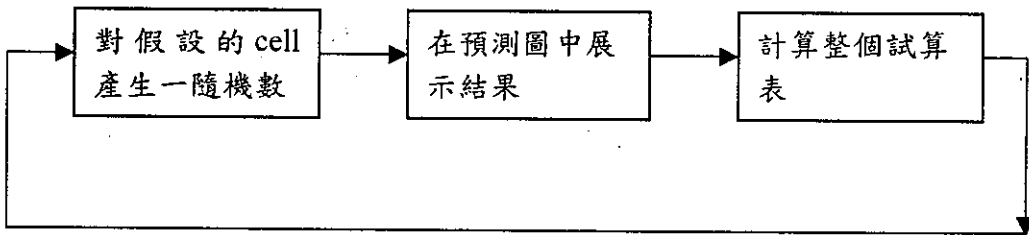
化學物質	Slope Factor (mg/kg-day) <sup>-1</sup>			**健康物分類
	、食入	皮膚吸收	呼吸	
氯仿	6.10x10 <sup>-3</sup>	3.05x10 <sup>-2</sup>	8.05x10 <sup>-2</sup>	Group B2
一溴二氯甲烷	6.20x10 <sup>-2</sup>	6.33x10 <sup>-2</sup>	6.20x10 <sup>-2</sup>	Group B2
二溴一氯甲烷	8.40x10 <sup>-2</sup>	1.40x10 <sup>-1</sup>	8.40x10 <sup>-2</sup>	Group C
溴仿	7.90x10 <sup>-2</sup>	1.32x10 <sup>-2</sup>	3.85x10 <sup>-3</sup>	Group B2

\*\*健康物為分類依據 USEPA 之健康物分類

## 2.4 蒙地卡羅模擬

蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)使用統計取樣技術，得到機率的近似值，解答數學的方程式或模式，用以求出某一模式或某個試驗中，各種可能結果的機率分配方法。只要給定足夠適當的資料和合理的假設，蒙第卡羅模擬便可作為風險評估中適當的統計工具，以分析其變異性和不確定。

風險計算須代入毒性資料與暴露參數，許多參數並非單一數值，如在環境中化學物質之濃度，經過多次採樣，我們所得的是一個濃度的分布，因此我們將利用 Monte Carlo Simulation 進行風險計算，得到健康風險之機率分佈。當各種參數均為一分佈時，蒙地卡羅模擬會隨機在分佈中取一個數值帶入公式計算，而得到一個風險值。經過 5000 次的抽樣及計算，即可得到 5000 個風險值，就可以構成一個風險之機率性分佈圖。

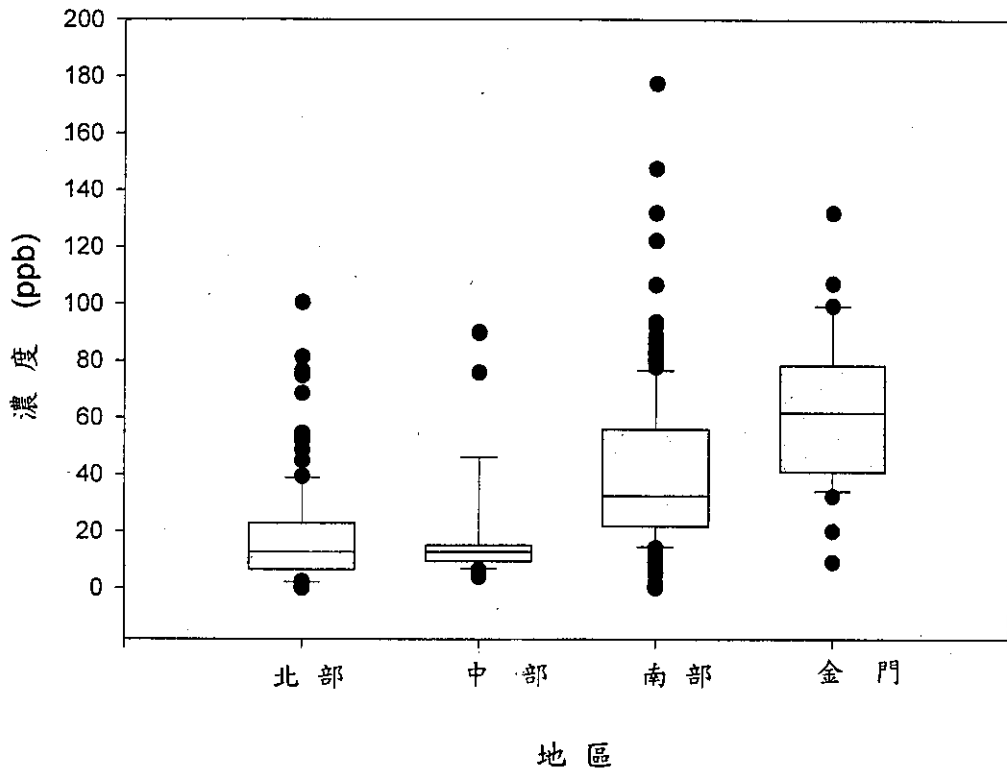


圖一 蒙地卡羅模擬之流程

## 三、結果與討論

### 3.1 台灣地區飲用水中三鹵甲烷濃度分佈情況

為了解台灣地區飲用水中三鹵甲烷濃度分佈情況，我們蒐集環保署歷年研究計劃以及環檢所定期採樣分析之台灣地區飲用水中總三鹵甲烷濃度之數據，同時進行民國 91-92 年各地區之採樣分析，建立台灣地區飲用水中三鹵甲烷濃度分佈資料。圖二所示即為台灣地區飲用水中三鹵甲烷濃度分佈情形。



圖二 台灣地區飲用水中三鹵甲烷濃度分佈

#### 北部地區：

北部地區飲用水中三鹵甲烷濃度主要分佈在 10~25  $\mu\text{g/L}$  的範圍內。北部地區飲用水中有較低之三鹵甲烷濃度，除了因為水中較低之 TOC 值(0.5~2.0  $\text{mg/L}$ )之外，北部地區相對於台灣其他地區通常有較低的氣溫，這也可能影響三鹵甲烷生成量。

#### 中部地區

中部地區三鹵甲烷濃度分佈的範圍與北部地區接近，主要分佈在 10~20  $\mu\text{g/L}$  之間，根據以往的飲用水水質監測數據顯示：中部地區亦有較低之 TOC 值(主要亦在 0.4~2.0  $\text{mg/L}$  的範圍內)，較低濃度之有機前質使得該地區有較低之三鹵甲烷濃度。

## 南部地區

南部地區飲用水中三鹵甲烷濃度範圍分佈較廣且變動較大，一般在 20~60  $\mu\text{g/L}$  的範圍內。但自民國 86 年開始三鹵甲烷濃度分佈略為降低，主要分佈在 20~50  $\mu\text{g/L}$  的範圍，但仍有部分數據分佈在 60~100  $\mu\text{g/L}$  的區間。南部地區三鹵甲烷濃度的分佈不同於北部及中部地區，其原因可能包括其原水 TOC 值較高，而水源中人為污染物導致加氯量增加等均造成三鹵甲烷濃度分佈擴大。

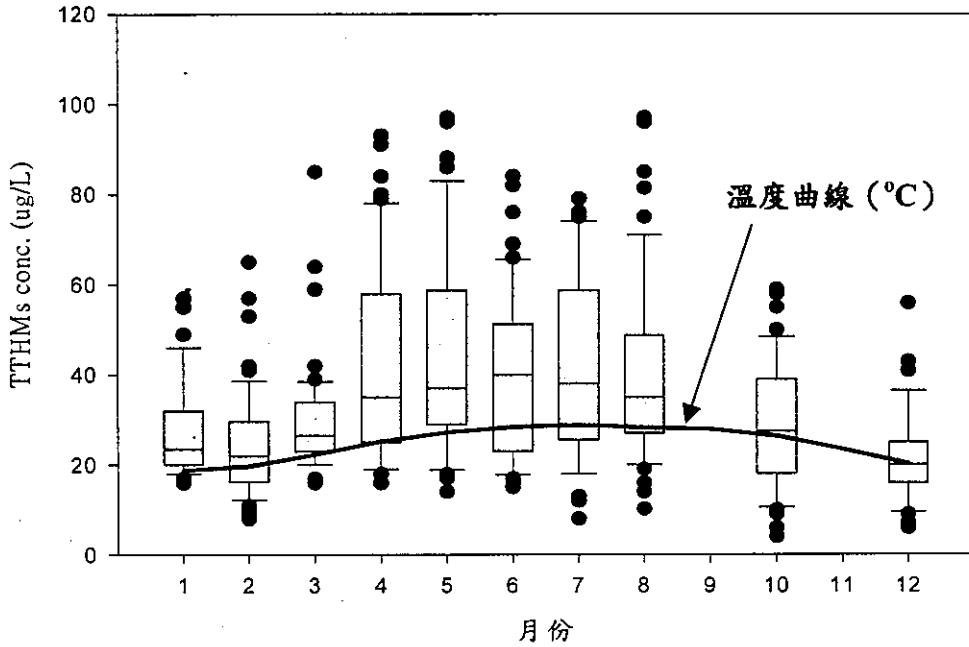
## 金門地區

金門地區飲用水中三鹵甲烷濃度主要分佈在 40~80  $\mu\text{g/L}$  的範圍內。金門地區飲用水原水中有較高之有機物質(4-12 mg/L TOC)，水廠必須添加較高量的消毒劑，提高了三鹵甲烷生成的潛能，因此金門有較高之三鹵甲烷濃度。金門地區之三鹵甲烷濃度變動範圍亦較大，主要原因除原水 TOC 較高外，亦與原水水質變化大，因此加氯量(包括前加氯)不易掌握有關。

### 3.2 飲用水中總三鹵甲烷濃度之季節變化

溫度是影響三鹵甲烷生成的因子(Singer, 1998)，溫度的升高會促進三鹵甲烷的生成反應。依環保署 90 年高雄地區不同月份總三鹵甲烷濃度數據，可觀察不同月份三鹵甲烷濃度的變化。

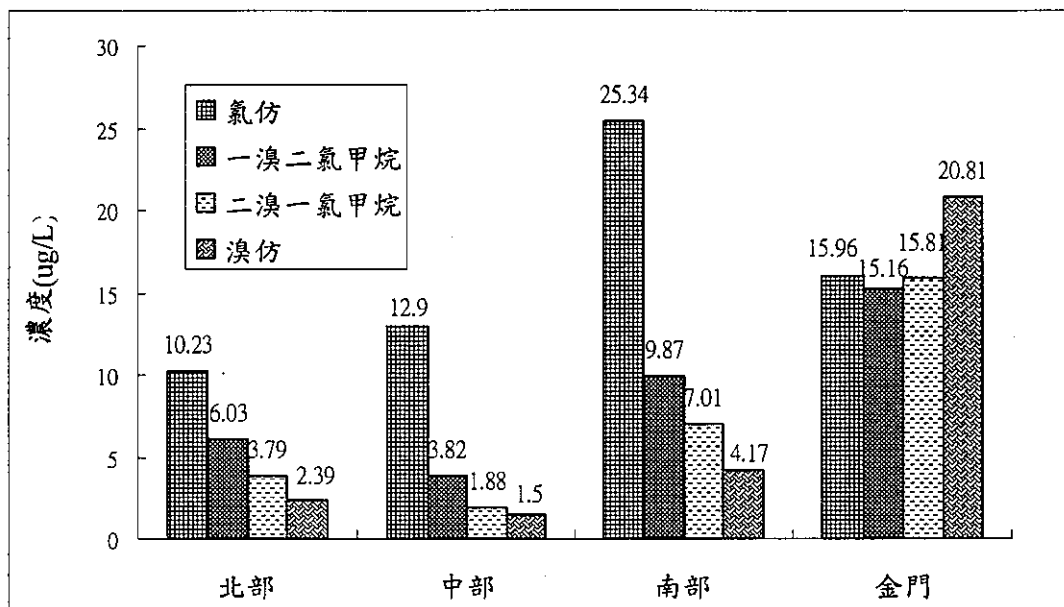
圖三可以看到高雄地區三鹵甲烷濃度自一月至八月亦呈現逐漸升高的趨勢(與台北情況相同)，且四至八月的三鹵甲烷濃度顯然高於其他月份但十與十二月的濃度就可以看到降低的趨勢。台北市配水系統中三鹵甲烷濃度亦有相同之趨勢。



圖三 民國 90 年高雄地區飲用水中總三鹵甲烷濃度分布趨勢  
(高雄地區溫度變化與三鹵甲烷濃度之比較)

### 3.3 台灣地區飲用水中三鹵甲烷各物種組成

圖四顯示台灣北、中、南、東及外島地區個別三鹵甲烷的平均濃度。可觀察到北部及中部總三鹵甲烷濃度相近且低(平均~20  $\mu\text{g/L}$ )，且個別物種的濃度差異甚小，所以北部及中部個別三鹵甲烷組成的情況相近。值得注意的是南部飲用水中氯仿濃度不僅高於北部、中部，甚至高於金門地區，可能因為金門海水鹽化的情況更加重，而提高飲用水原水溴離子濃度，使得清水中含溴 DBP 物種增加。金門地區含溴物種平均濃度以溴仿濃度為最高，二溴一氯甲烷、一溴二氯甲烷與氯仿的濃度接近。



圖四 民國 79-92 年各地區個別三鹵甲烷平均濃度

### 3.4 三鹵甲烷個別物種之風險貢獻量

不同地區其物種組成分佈不同及因不同物種濃度所造成的健康風險各異，因此在比較各地區的健康風險分佈之前，先了解個別物種經不同途徑的風險貢獻量，將有助於後續不同攝取途徑、各地區暴露情況的分析。為了求得四個物種在物種濃度及暴露參數均相同的基礎下所貢獻的風險，假設各鹵甲烷物種濃度均為  $1 \mu\text{g/L}$ ，其他參數則以表一所列平均值代入風險推估模式，所得結果如下（表三）：

#### 食入暴露

由於暴露條件相同，因此不同物種的風險主要受到食入的 Cancer Slope factor 的影響而不同。於表中一溴二氯甲烷與二溴一氯甲烷的風險接近，分別為  $1.64 \times 10^{-7}$  及  $2.22 \times 10^{-7}$ ，約為氯仿及溴仿的 10 倍。

#### 呼吸暴露

各物種因為亨利常數、整體質量轉移係數及斜率因子的不同，因而有不同的風險貢獻量。表 4-2 明顯看出氯仿有最高的風險貢獻量，約為一溴二氯甲烷與二溴一氯甲烷的

2 倍，溴仿的 100 倍。

### 皮膚吸收

其各物種風險推估模式中，主要的差異在於皮膚穿透係數及 Cancer Slope factor，皮膚穿透係數影響三鹵甲烷自皮膚進入人體的劑量。於表 4-3，二溴一氯甲烷有較高之風險，為  $1.56 \times 10^{-8}$ ，其次為一溴二氯甲烷、氯仿，溴仿則為最低，風險貢獻量僅  $9.84 \times 10^{-10}$ 。

綜觀三個暴露途徑，在食入及皮膚吸收兩途徑中，二溴一氯甲烷之健康風險高於其他物種，在呼吸暴露則以氯仿具有最高的風險貢獻量。三個暴露途徑的總風險可以觀察到氯仿有最高之健康風險貢獻量( $1.82 \times 10^{-6}$ )，約為一溴二氯甲烷與二溴一氯甲烷的 2 倍；溴仿則最低，為( $4.79 \times 10^{-8}$ )。因此在三鹵甲烷各個物種中，以氯仿為對風險的影響最大，尤其是透過呼吸暴露所造成的，故淋浴之暴露時間及浴室內之氣體交換率值得重視。

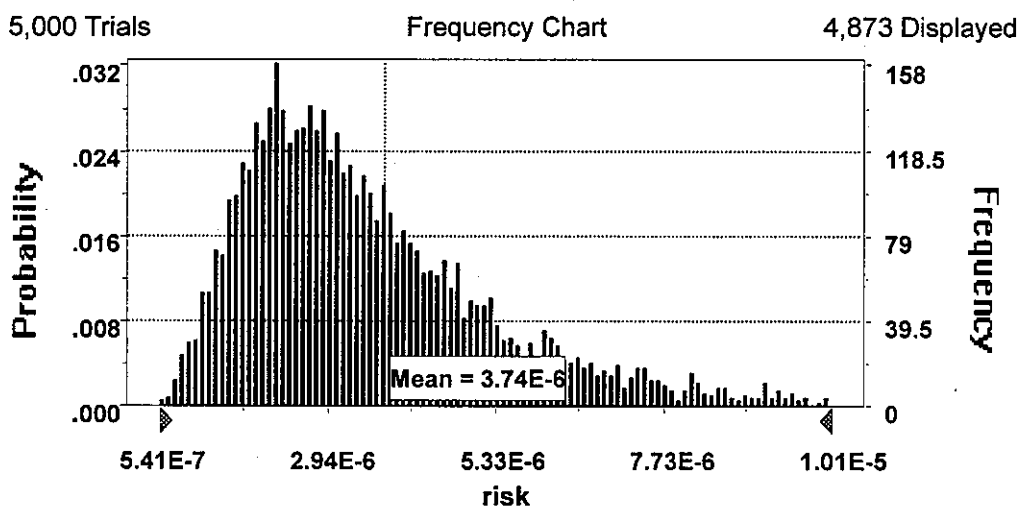
表三 不同物種之風險貢獻量

	食入	呼吸	皮膚吸收	總風險
氯仿	1.61E-08	1.80E-06	7.78E-09	1.82E-06
一溴二氯 甲烷	1.64E-07	8.87E-07	1.05E-08	1.06E-06
二溴一氯 甲烷	2.22E-07	7.69E-07	1.56E-08	1.01E-06
溴仿	2.09E-08	2.60E-08	9.84E-10	4.79E-08

### 3.5 機率性風險分佈

某地區之三鹵甲烷濃度會隨時間、季節而變化，也會因為多次採樣分析而得到一個濃度分佈；國人體重也呈現某種分布，將各種不同的分佈代入風險推估模式，利用蒙地

卡羅模擬進行多次的隨機抽樣，可以得到如同圖五所呈現的健康風險機率分佈圖，可以觀察因三鹵甲烷暴露而導致健康風險分佈主要的區間，可用以描述大部分民眾的健康風險情況，而不同途徑、不同地區由於三鹵甲烷濃度分佈不同也會有不同的健康風險機率分佈圖。



圖五 蒙地卡羅模擬所得之健康風險機率分佈圖

美國環保署利用「直線多階段模式」推估健康風險時，健康風險推估值通常以第 95 百分位表示，可避免過度高估模式所得之風險。由於本研究以蒙地卡羅模擬得到機率性風險分佈且其分佈呈現 lognormal distribution，因此以幾何平均值及標準差呈現各地區的風險分佈，進行各地區民眾健康風險之討論。

### 食入暴露

台灣民眾飲水有煮沸的習慣，因此推估食入暴露風險時，我們將煮沸後三鹵甲烷的去除率假設為 80%，於表四可以看到煮沸飲用及未煮沸飲用的風險。

北部和中部飲用水中總三鹵甲烷濃度低(主要分佈在 0~20  $\mu\text{g/L}$ )且各物種濃度接

近，因此北部、中部有相近的風險分佈：飲水未煮沸所造成的風險分佈在  $3.7 \times 10^{-6} \sim 1.5 \times 10^{-5}$  的範圍內，幾何平均值均在  $1.0 \times 10^{-5}$  以下。南部有較高的三鹵甲烷濃度 ( $20 \sim 50 \mu\text{g/L}$ )，因此健康風險較高，飲水未煮沸造成的風險主要分佈在  $7.8 \times 10^{-6} \sim 4.0 \times 10^{-5}$  的範圍，幾何平均值為北部及中部的 2~3 倍；金門地區有最高濃度的三鹵甲烷 ( $40 \sim 80 \mu\text{g/L}$ ) 及較高濃度的含溴物種(在前一節個別物種風險貢獻量的討論中，我們看到一溴二氯甲烷及二溴一氯甲烷在食入暴露上有較高的風險貢獻量)，故與其他地區比較時，金門民眾食入暴露會有較高的健康風險，風險之幾何平均值約為南部的 2 倍，風險分佈在為  $1.9 \times 10^{-5} \sim 6.2 \times 10^{-5}$  (表四)。

飲水經煮沸後風險平均值明顯降低為原來的 1/5，北部及中部風險分佈在  $7.5 \times 10^{-7} \sim 3.0 \times 10^{-6}$ ，南部則分佈在  $1.6 \times 10^{-6} \sim 8.1 \times 10^{-6}$  的範圍內，金門地區則分佈在  $4.5 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-5}$ ，因此煮沸後，民眾經由食入暴露所承受的風險普遍小於十萬分之一，而且金門民眾主要飲用的是瓶裝水，故食入暴露的風險影響也就更小。

### 皮膚吸收

各地區透過皮膚吸收造成的平均風險值都小於百萬分之一，北部及中部主要分佈在  $4.0 \times 10^{-8} \sim 4.3 \times 10^{-7}$  的範圍；南部分佈在  $9.3 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-6}$  的範圍；金門分佈在  $1.6 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-6}$  的範圍，因此普遍來說皮膚暴露造成的風險相當低。

### 呼吸暴露

北部及中部民眾淋浴時經由呼吸暴露所造成的平均健康風險約為  $2 \times 10^{-5}$ ，風險主要分佈在  $4.9 \times 10^{-6} \sim 6.5 \times 10^{-5}$  的範圍。南部地區平均風險為北部、中部的 2 倍(與食入的情況相近)，範圍為  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.47 \times 10^{-4}$ 。值得注意的是金門地區總三鹵甲烷濃度通常大於南部地區，其透過呼吸暴露造成的風險分佈卻與南部相近(表四)，平均風險約為  $4 \times 10^{-5}$ ，分佈在  $1.1 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4}$  的範圍，此結果可以個別三鹵甲烷物種分佈解釋之：雖然金門地區總三鹵甲烷平均濃度為  $67.6 \mu\text{g/L}$ ，高於南部的  $44.5 \mu\text{g/L}$ ，但金門三鹵甲烷中以含溴物種居多，而南部氯仿平均濃度高於金門，又因氯仿有較高的風險貢獻量(由呼吸暴露而來)，因此造成兩者的風險分佈接近。

表四 各地區飲用水中三鹵甲烷各暴露途徑之健康風險平均值

	北部		中部		南部		金門	
	男	女	男	女	男	女	男	女
未煮沸 飲用	0.88 (±1.80)	1.00 (±1.81)	0.54 (±1.81)	0.62 (±1.81)	1.61 (±1.73)	1.88 (±1.74)	3.7 (±1.43)	4.26 (±1.68)
煮沸 飲用	0.18 (±1.80)	0.20 (±1.81)	0.11 (±1.81)	0.12 (±1.81)	0.32 (±1.73)	0.37 (±1.74)	0.74 (±0.29)	0.85 (±0.34)
皮膚	0.02 (±2.19)	0.02 (±2.19)	0.01 (±2.11)	0.01 (±2.11)	0.03 (±2.12)	0.03 (±2.12)	0.06 (±0.04)	0.06 (±0.04)
呼吸	1.68 (±2.42)	1.50 (±2.43)	2.03 (±2.24)	1.83 (±2.25)	4.13 (±2.28)	3.73 (±2.29)	4.36 (±2.11)	3.94 (±2.12)
總風險 不考慮煮沸	2.81 (±2.01)	2.79 (±1.98)	2.72 (±1.99)	2.61 (±1.96)	6.13 (±1.94)	5.99 (±1.91)	8.27 (±1.66)	8.36 (±1.61)
總風險 考慮煮沸	1.98 (±2.26)	1.85 (±2.24)	2.19 (±2.16)	2.01 (±2.15)	4.59 (±2.16)	4.25 (±2.14)	5.24 (±1.92)	4.94 (±1.89)

(單位：十萬分之一，10<sup>-5</sup>)

\*\* 表中為北部、中部、南部的所有暴露途徑及金門的呼吸暴露途徑健康風險之幾何平均值及標準差，金門的食入及皮膚暴露途徑則為算術平均數及標準差。

不論任何一個地區，我們均可由其風險分佈觀察到：各暴露途徑中，呼吸暴露可能造成最高的健康風險，主要是因為淋浴時空氣與水之間的界面較大、水溫也較高，有利於三鹵甲烷的揮發，又水的使用量多，浴室的空間小而密閉。其次為食入暴露，考慮煮沸對食入的影響，更縮小了食入暴露帶來的風險。皮膚吸收造成之健康風險( $<10^{-6}$ )則遠低於前二者。因此相較於其他暴露途徑，呼吸暴露顯得相當重要。如欲降低三鹵甲烷暴露所導致之健康風險，應增加浴之通風情氣，以減低因呼吸所導致之暴露。

加總食入、呼吸、皮膚三個途徑造成的健康風險，得到不同地區民眾暴露於飲用水中三鹵甲烷的總風險。

#### 一般考慮煮沸情況下的總風險

南部地區因為氯仿的濃度較金門高，明顯提高呼吸的風險，而相對於其他途徑，呼吸具最高的風險貢獻，因此造成南部及金門地區的總健康風險分佈接近，平均風險約為

$5.0 \times 10^{-5}$ ，風險主要分佈在  $1.3 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-4}$ 。

### 不考慮煮沸情況下的總風險

若飲水時不加以煮沸，對於北部及中部民眾因三鹵甲烷暴露所導致之健康風險的影響不大(平均風險差異 < 十萬分之一)，對南部及金門地區的總健康風險之影響較大，其平均風險差異約為  $1.5 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-5}$ ，因此煮沸對三鹵甲烷濃度較高的地區有其必要性。

## 3.6 風險之敏感度分析

為了解風險推估時各個參數對於風險估計結果之影響程度，我們利用蒙地卡羅進行敏感度分析，以變異組成(contribution to variance)呈現各參數在預測結果的變異性或不確定性中所佔的百分比。

若依不同物種濃度討論，不論是北部、中部、南部或是金門地區，氯仿濃度對於健康風險之變異貢獻量遠高於其它物種，不同地區氯仿濃度約占變異組成之 50%，即氯仿濃度為影響風險估計結果之重要參數。一溴二氯甲烷濃度占變異組成之 3~9%，二溴一氯甲烷濃度則占 0.5~8%，溴仿濃度對風險推估結果的變異貢獻則均小於 0.1%。暴露時間亦為影響健康風險變異最重要的參數，占變異貢獻之 34~45%，其它如浴室體積、國人體重、暴露期間對於風險結果變異的影響很小。

## 四、結論與建議

### 4.1 結論

台灣地區飲用水中總三鹵甲烷濃度普遍低於現行法規標準 100  $\mu\text{g/L}$ ；北部及中部地區三鹵甲烷濃度約 20  $\mu\text{g/L}$ ，南部約 20-50  $\mu\text{g/L}$ ，金門約 40-80  $\mu\text{g/L}$ ，但其個別物種占總三鹵甲烷的比例不同，其中以南部地區有較高濃度之氯仿，以金門地區含溴物種的濃度最高。

飲用水法規標準 100  $\mu\text{g/L}$  可以將民眾「單獨透過食入暴露」所造成之風險降至十萬

分之一以下，但飲用水使用廣泛，應考慮之暴露途徑不僅僅是食入，淋浴更是相當重要之造成暴露的活動，故皮膚與呼吸暴露因此值得重視，其中呼吸暴露造成之風險最高。不同的暴露參數中，淋浴時間對於風險的影響最大，此情況在南部及金門地區更是明顯。

台灣民眾所承受的總健康風險以北部、中部較低，平均為  $2 \times 10^{-5}$ ，以南部及金門較高，平均為  $5 \times 10^{-5}$ 。一般認為外島地區民眾可能因含溴物種的存在而承受較高之健康風險，但經由不同物種風險貢獻量的比較觀察到氯仿具有較高之風險貢獻量。因此可知外島地區民眾其健康風險較高之主要原因是較高之總三鹵甲烷濃度，並非受含溴物種之影響，亦即相同的總三鹵甲烷濃度中，氯仿所占比例愈高則愈易提高健康風險，故南部地區雖然總三鹵甲烷濃度低於金門，但因為較高之氯仿濃度使得兩個地區民眾所承受之健康風險接近。儘管如此，文獻中指出一溴二氯甲烷與自發性流產增加之風險在統計上有最高的關聯性，因此含溴物種之其他健康危害是不容忽視的。

## 4.2 建議

本研究進行飲用水三鹵甲烷健康風險評估，由於淋浴之呼吸暴露為主要風險貢獻的途徑，可藉由縮短淋浴時間及良好的浴室通風以降低風險。

本研究結果指出  $100 \mu\text{g/L}$  的法規標準值不足以保護民眾之健康，目前美國已將  $100 \mu\text{g/L}$  改為  $80 \mu\text{g/L}$ ，更以  $40 \mu\text{g/L}$  為其下一個管制目標，因此建議台灣之法規有其修改之必要。研究中提出氯仿有較高之風險貢獻量，一溴二氯甲烷及二溴一氯甲烷值得注意的是其延遲效應，因此針對不同 THM 物種進行管制似乎是需要加以考量的，但目前只有日本及 WHO 將三鹵甲烷個別分開管制，大部分的國家，包括美國，並未將其分開管制，主要是因為資料的缺乏及了解的不足。雖然就現實層面，台灣目前尚無能力將其分開管制，但分開管制應是一個較佳的方向。

含溴物種對於人體健康之延遲效應的研究應加以重視，應針對台灣飲用水中三鹵甲烷濃度之詳細分佈及暴露著手相關研究，以作為未來修訂管制標準之基礎。

## 參考文獻

- Kuo et al., 1997, "VOC concentration in Taiwan's household drinking water", *The Science of the Total Environment* : 208, pp.41-47
- Little, John C., 1992, "Applying the Two-Resistance Theory to Contaminant Volatilization in Showers" *Environ. Sci. Technol.* : 26, pp.1341-1349
- Lin et al., 2000, "Inhalation exposure to THMs from drinking water in south Taiwan", *The Science of the Total Environment* : 246, 1, pp.41-49
- RAIS, Risk Assessment Information System, [http://risk.lsd.ornl.gov/tox/tox\\_values.shtml](http://risk.lsd.ornl.gov/tox/tox_values.shtml)
- Singer, P. C., 1998, "Occurrence of Disinfection By-Products (DBP) Precursors in Source Waters And DBPs in Finished Waters"
- Singer, P. C., 2000 "Formation and Control of Disinfection By-Products in Drinking Water: An Update"
- USEPA, 1989, "Risk Assessment Guidance for Superfund"
- USEPA, 1997, "Exposure Factors Handbook"
- USEPA, 1998, "National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts"
- Yang, C. Y., Chiu, H. F., Cheng, M. F., Tsai, S. S., 1998, "Chlorination of drinking water and cancer mortality in Taiwan," *Environmental Research* : 78 ,1, pp.1-6
- 樓基中, 1987, 淨水系統單元操作對三鹵甲烷之去除機質與生成模式之研究
- NIEA, 1994, 水中總三鹵甲烷檢測方法—吹氣捕捉氣相層析法, NIEA W781.50A
- 樓基中, 1996, 飲用水中有機物(含揮發性有機物)管制項目及標準合理性分析(II), EPA-85-J1-02-09-04
- 林財富, 1997, 飲用水中有機物(含揮發性有機物)管制項目及標準合理性分析(III), EPA-86-J1-02-09-06
- 張怡怡, 1997, 飲用水中無機物、微生物及濁度管制項目及管制標準之合理性分析, EPA-86-J102-09-07

- 蔣本基, 1997, 飲用水中消毒副產物調查及處理技術之評估 (III), EPA-86-E3J1-09-01
- 蔣本基, 1998, 臭氧搭配活性碳單元對飲用水中消毒副產物之去除效能評估,  
EPA-87-E3J1-09-01
- 藍文賢, 1998, 淨水系統對不同分子量消毒副產物前質去除之研究
- 蔣本基、張怡怡, 1999, 飲用水中微量有機物背景調查及管制標準之研究,  
EPA-88-E3J1-09-01
- 張怡怡, 2000, 飲用水水源中 TOC、COD 及大腸桿菌群調查及水源標準之檢討,  
EPA-89-J102-03-1093
- 蔣本基、張怡怡, 2000, 水源鹽化對加氯消毒副產物生成之影響與改善對策之研究,  
EPA-89-U1J1-03-003
- 王榮德等, 2000, 含氯揮發性有機物污染事件居民流行病學調查與風險評第二年專案計畫
- 吳焜裕, 2000, 毒理機制在風險評估的運用及其本土化之研究 (II), 89-2621-Z-039-002
- 王正雄, 2002, 三鹵甲烷環境暴露之探討, 環境檢驗通訊雜誌第 42 期