

台灣地區居民對自來水中三鹵甲烷之呼吸暴露量推估

洪旭文** 林財富*

國立成功大學環境工程學系

摘 要

自來水中的三鹵甲烷(Trihalomethanes, THMs)對人類具有致癌性和致突變性等不良影響，近年來受到相當大的注意。傳統上在進行人類對自來水中 THMs 暴露量推估時，多以飲水途徑考慮之。然而文獻顯示，呼吸暴露量亦是一個重要途徑，值得進一步探討。因此本研究首先收集台灣地區六大淨水場清水池出口 THMs 濃度之背景資料作現況分析，以了解 THMs 之濃度分布情形，並假設 THMs 從淨水程序清水池出口到用戶家中濃度維持不變，作為後續沖澡、廚房沖滌模式和燒開水/煮湯模式之輸入參數，推估不同水質條件下室內空氣中 THMs 之增加量，進而求得人體對 THMs 之呼吸暴露量。最後再和飲水途徑暴露量做一個比較，以判定不同暴露途徑之重要性。結果顯示，居民用戶因沖澡、廚房沖滌和燒開水/煮湯所引起之最可能呼吸暴露量分別為每天 10.3 μg 、1.1 μg 及 1.3 μg ，而呼吸暴露總量為 12.4 μg 。廚房沖滌和燒開水/煮湯所引起之最可能呼吸暴露量僅佔沖澡的 11%和 13%，而呼吸暴露總量之最可能暴露量與飲水途徑之最可能暴露量差不多，顯示自來水中三鹵甲烷經由呼吸進入人體之暴露量應該受到重視。

一、前言

台灣地區由於許多河川、湖泊、地下水等自來水水源受到人為的污染與破壞，導致淨水程序中之加氯量也相對提高，產生大量的三鹵甲烷(Trihalomethanes, THMs)。由於這些物質已經直接或間接被證實對動物和人類具有致癌性或是突變性等不良影響，因此近年來受到相當多的研究與注意。傳統上在推估人體對 THMs 之暴露量時，都以每人每日飲水 2 公升作為制定飲用水法規標準的最大許可容量(Maximum Contaminant Level, MCL)。然而國外文獻顯示[1-3]自來水中之揮發性有機物經由呼吸作用進入人體中也是一個重要的人體暴露途徑。國外學者 Andelman[2]更指出每天

*成功大學環境工程學系副教授

**成功大學環境工程學系大學部學生

人體之揮發性有機物呼吸暴露量幾乎是飲水 2 公升暴露量之 6 倍，因此人體對自來水中揮發性有機物之呼吸暴露量值得大家的注意與重視。

目前國內外相關研究在探討揮發性有機物對人體之呼吸暴露量時，多以浴室沖澡、廚房沖滌、燒開水/煮湯、盥洗室沖刷、洗衣機等[4-7]為主要研究暴露機制。而目前國內對於自來水中揮發性有機物對人體之呼吸暴露所做的相關研究很少，因此本研究首先找出台灣地區 THMs 在各大淨水場清水池之背景資料，希望得知 THMs 在各大淨水場清水池之濃度分布，之後再引用相關文獻上之沖澡、廚房沖滌模式[5, 6]和在廚房燒開水/煮湯之假設模式，配合用戶家中自來水可能之 THMs 濃度，模擬不同情況下 THMs 之可能呼吸暴露量，並和飲水途徑比較以判斷不同暴露途徑之重要性。

二、三鹵甲烷現況分析

台灣地區由於許多自來水水源嚴重被污染，多數的自來水廠採用大量的加氯，造成自來水中加氯消毒副產物（Disinfection By Products, DBPs）的大幅增加，相對也提高三鹵甲烷之生成量。三鹵甲烷由於含有致癌性和致突變性，因此已經成為大眾關心的焦點。文獻指出[10]，自來水廠清水池中三鹵甲烷濃度呈現對數常態分布（log-normal distribution）。因此本研究首先收集 1995、1996、1997 年台灣地區六個主要淨水場（代號為 C, U, L, N, S, D）清水池之消毒副產物背景資料[11, 12]，將清水池之三鹵甲烷濃度值依其含量大小順序，分別取其對數值，作常態分佈適合度（goodness of fit）考驗[13]，在對數常態機率座標紙上作圖，如圖 1 所示。得到 χ^2 值(13.25) 小於查表 χ^2 值(15.51，顯著水準為 5%，自由度為 8)，顯示三鹵甲烷在清水池中為一對數常態分布，其幾何平均數為 27.2 mg/L、標準差為 20.5 mg/L。本研究並假設 THMs 從清水池出口經輸水管線到用戶家中濃度維持不變，利用此結果作為用戶家中自來水龍頭水中 THMs 之濃度，作為後續相關模式之輸入依據。

三、模式介紹

本研究針對自來水用戶因浴室沖澡、廚房沖滌物品和燒開水/煮湯時，推估自來水中之三鹵甲烷（THMs）因和室內空氣接觸，逸散揮發造成室內空氣中之濃度增加值，並配合潮氣量、呼吸頻率及時間求得呼吸暴露量，以下分別敘述之：

(1) 沖澡模式

沖澡模式是由 Little [5] 在 1992 年利用雙膜理論（two film theory）所發展出，Little

將整個浴室空氣考慮成完全混合反應槽(Completely Flow Stirred Tank Reactor , CFSTR)、蓮蓬頭之水考慮成柱塞流(Plug Flow Reactor , PFR)形式,並且配合質量傳輸和化學平衡推導出模式,同時與數個沖澡實驗結果進行比較,以驗證該模式之可行性。該模式可以推估沖澡時揮發性有機物逸散到浴室空氣中的量,在浴室空氣中污染物濃度可用下式表出:

$$\left(\frac{dCs}{dt}\right)V_s = Q_L(C_{in}-C_{out}) - Q_a(Cs) \quad (1)$$

式中,

C_s = 浴室空氣中污染物之濃度, $\mu\text{g/L}$

V_s = 浴室體積, m^3

Q_L = 沖澡水流量, L/min

C_{in} = 水中 THMs 之入口濃度值, $\mu\text{g/L}$

C_{out} = 水中 THMs 之出口濃度值, $\mu\text{g/L}$

該文章中並列出上式中 C_s 之解析解,可用於求得不同時間之 C_s 濃度。

(2) 廚房沖滌模式

本部分所引用之模式是 Howard and Corsi [6] 在 1996 依質傳與化學平衡所發展出來,該研究將廚房考慮為完全混合反應槽(Completely Flow Stirred Tank Reactor , CFSTR),同時假設沖滌的流速保持一定,針對不同水槽形式求出氣提效率(stripping efficiency),而發展出質量平衡之動力方程式,可以推估自來水中的 THMs 經由沖滌揮發到廚房空氣的量。廚房空氣中之揮發性污染物濃度可以用下式表示:

$$C_a = C_l \left(\frac{Q_l}{Q_v}\right) f (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

式中,

C_a = 廚房空氣中污染物之濃度, mg/m^3

C_l = 自來水中污染物之濃度, mg/m^3

Q_l = 沖滌水流量, m^3/min

Q_v = 室內通風流量, m^3/min

f = THMs 之氣提效率, fractional

t = 沖滌花費時間, hr

λ = 空氣交換率 (air exchange rate), hr^{-1}

(3)燒開水/煮湯模式

本模式是針對燒開水及煮湯習慣所發展出來。文獻顯示[14]，用水壺燒開水時，水中之 THMs 在沸騰後繼續加熱 3 至 10 分鐘內，水中之大部分 THMs 都會逸散出來，使水中 THMs 濃度降到原來濃度的 10% 以下。因此本模式假設自來水中之 THMs 在燒開水/煮湯沸騰的一瞬間完全逸散到廚房空氣中，且將廚房考慮成 CFSTR。廚房空氣中之 THMs 在開水/鍋湯煮沸後與時間的關係則可以下式表示：

$$C_k = \frac{M}{V_N} e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中，

C_k = 廚房空氣中 THMs 之濃度， mg/m^3

M = 水壺/湯鍋中 THMs 之總量， mg

V_N = 廚房之體積， m^3

λ = 空氣交換率(air exchange rate)， hr^{-1}

t = 開水/鍋湯煮沸後之停留時間， hr

利用上述之模式可以求得室內空氣中 THMs 之增加量，再配合潮氣量、呼吸頻率及時間以求得呼吸暴露量。

四、呼吸暴露量推估

呼吸暴露量推估是利用前述各種模式，配合適當輸入參數，在@RISK 軟體(Risk Analysis and Simulation, Palisade Corporation, U.S.A.)上執行的，該軟體只要輸入模式參數的分布行為如平均值、標準差或最大值、最小值即可模擬出各模式預測結果的所有可能值，並且計算出或然率的高低，亦可以得到該模式之或然率圖。本研究各模式輸入參數中：用戶自來水中之 THMs 採用對數常態分布，而沖澡水溫度、沖澡時間、浴室大小、廚房沖滌時間和燒開水/煮湯停留時間皆採用均勻分布，然後代入上述三個模式中，分別模擬 400 次以推估可能之呼吸暴露量。研究中亦曾模擬 800 次，但結果與 400 次極為接近且相差小於 0.1%，因此仍以 400 次為模擬次數。

(1)呼吸暴露量推估參數

推估呼吸暴露量時，自來水中 THMs 濃度以本土三鹵甲烷現況分析所得結果(即台灣地區各大淨水廠清水池之 THMs 背景資料)，其幾何平均數為 $27.2 \mu\text{g}/\text{L}$ 、標準差為 $20.5 \mu\text{g}/\text{L}$ 。個人呼吸

頻率及潮氣量以文獻中[8]數值為準，分別是 15 次/min 和 0.5 L/次。室內空氣交換率（浴室和廚房）則以文獻中[9]常見之 1hr^{-1} 為代表。由於分析文獻 11 及 12 所得的結果顯示，台灣地區六大淨水場清水池樣品中，氣仿大都超過 THMs 的 70%，為簡化計算因此質量傳送相關參數以氣仿為代表。進行沖澡模式推估時所使用之質量傳送參數(K_{La} 及 K_{Ga} ，分別為液相及氣相質量傳送係數乘以氣/液相交界面積)和沖澡水溫度範圍(33 °C 到 42 °C)為文獻中[5]之數值，沖澡水流量 (19 L/min) 是台北自來水事業處和內政部營建署在 1993 年調查台灣地區自來水 3000 個用戶所得[15]。浴室體積 (3-15 m^3) 則考慮一般台灣地區居民住家可能大小，至於沖澡時間則取 5 到 20 分鐘為代表。

推估廚房之沖滌模式時，假設廚房體積為 30 m^3 、廚房空氣交換率仍以 1hr^{-1} 為代表。沖滌流速(7.9 L/min)和污染物之氣提效率(16%)則引用文獻[6]數值，且假設用戶在廚房沖滌 5 至 20 分鐘。而推估燒開水/煮湯模式時，則依照文獻[2]所記載，典型家庭一天燒開水/煮湯 30 公升，且假設燒完開水/煮湯後立即在廚房停留 5 到 20 分鐘作為推估呼吸暴露量的參數。

(2) 呼吸暴露量推估

呼吸暴露量推估數值列於表 2 中，沖澡模式、廚房沖滌模式和燒開水/煮湯模式之呼吸暴露量或然率如圖 2、圖 3 及圖 4 所示，圖 5 則為呼吸暴露總量或然率圖，最可能之呼吸暴露量分別為 10.3 μg (22%)、1.1 μg (20%)、1.3 μg (29%) 及 12.4 μg (24%)。廚房沖滌和燒開水/煮湯所引起之最可能呼吸暴露量佔沖澡模式的 11% 和 13%，考慮最大暴露量則為 3.2% 和 7.1%。造成沖澡引起暴露量遠較其他兩種室內活動大的原因包括：活動空間小，沖澡水流量大，空氣/水接觸面大及水溫高等因素。如果考慮省水之蓮蓬頭，將增加氣/液接觸面積，則此沖澡模式之呼吸暴露量應該會增加。

一般在考慮人體對 THMs 之暴露途徑，多以飲水途徑推估之。表 1 同時列出每人每日飲用 0.8-1.5 公升未經煮沸的水，即台灣地區之合理生活飲用水量[16]，所引起之 THMs 暴露量推估值，其 THMs 暴露量或然率如圖 6 所示，最可能之暴露量為 13.0 μg (22%)，與 THMs 呼吸暴露總量或然率圖(圖 5)比較，兩者之最可能暴露量相當接近，分別為 13.0 μg 及 12.4 μg ，顯示自來水中之 THMs 經由呼吸進入人體之暴露途徑不容忽視。如果考慮本地區民將飲用水煮沸的習慣，降低自來水中之 THMs，由飲水進入人體的暴露量將會更小，則呼吸暴露量部分更值得重視。

(3) 暴露時間的影響

為比較在相同水質情況下，三種不同活動所引起之呼吸暴露量受時間之影響情形，本研究以典型模式輸入參數，包含水質、水流量、空氣交換率、水溫、浴室及廚房體積等(詳見表 2)輸入

模式，求得不同活動不同暴露時間長短下之 THMs 暴露情形。各活動暴露推估值如圖 7-a、圖 7-b、圖 7-c。三種活動下，沖澡顯然仍是暴露量最高者，且隨沖澡時間延長，暴露量增加率也隨時間增加，因為此時室內空氣中污染物的濃度也隨時間增加。同樣情形也發生在廚房洗滌的情況下，基本上廚房空氣中污染物濃度也隨洗滌時間延長而增加。但在燒開水/煮湯的活動下則有不同的結果，暴露量隨著停留時間的延長，增加率反而略為遞減，因為此污染源假設為瞬間型，造成廚房空氣中污染物濃度隨著時間而降低。若將三種活動的呼吸暴露量與飲水（如圖 8）相比較，則可發現仍只有沖澡活動與飲水所引起之暴露量相當。大體而言，在平均水質情況下，喝 1 公升的水（未煮沸）所引起的暴露量大約等於沖澡 16.5 分鐘左右。

五、結論與建議

本研究是初步的探討居民用戶對自來水中 THMs 之呼吸暴露量評估。居民用戶因沖澡、廚房沖滌和燒開水/煮湯所引起之最可能呼吸暴露量分別為 10.3 μg 、1.1 μg 、1.3 μg ，而呼吸暴露總量為 12.4 μg 。廚房沖滌和燒開水/煮湯所引起之最可能呼吸暴露量僅佔沖澡模式的 11% 和 13%，而呼吸暴露總量之最可能暴露量與飲水途徑之最可能暴露量差不多，因此自來水中三鹵甲烷經由呼吸進入人體之暴露量應該受到重視。

本研究中許多參數因本土數據缺乏，因此採用國外典型數值代替，此部份本土數據的收集、調查值得繼續進行，以使模式推估值更臻完善。此外，因考慮模式簡化的結果，部分假設，例如 THMs 出清水池後濃度不變，以氯仿代替三鹵甲烷等假設，在未來進行較完善的模式推估時，應予以一併考慮。

六、參考文獻

1. McKone, T.E., "Human Exposure to volatile organic Compounds in Household Tap Water". *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 21, pp.1194-1201 (1987).
2. Andelman, J.B., "Inhalation exposure in the home to the volatile organic contaminants in drinking water", *Sci. Total Environ.* Vol. 47, pp. 443-461 (1985).
3. Wallace, L.A., Pellizzari, E.D., Hartwell, T.D., Sparacino, C, Zelon, H., "The Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) Study :Direct measurement of personal exposures through air and water for 600 residents of several U.S. cities", *Pollutants in a Multimedia Environment*, Yoram Cohen. ed., Plenum Press, New York (1986).
4. Little, J.C., *Personal Communication* (1996).

5. Little, J.C., "Applying the Two-Resistance Theory to Contaminant Volatilization in Showers", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 26, pp. 1341-1349 (1992).
6. Howard C., Corsi R.L., "Volatilization of Chemical from Drinking Water to Indoor Air: Role of the Kitchen Sink", *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 46, pp. 830-837 (1996).
7. Shepherd, J.L., Kemp, J., "Chloroform in the Indoor Air and Wastewater: The Role of Residential Washing Machines", *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 46, pp. 631-642 (1996).
8. Campell, N.A., *Biology*, Third ed., The Benjamin/Cummings Publishing Co., Redwood City, CA, USA (1993).
9. Little, J.C., Hodgson, A.T., Gadgil, A.J., "Modeling Emission of Volatile Organic Compounds from a New Carpet", *Atm. Env.*, 28, pp. 227-234 (1994).
10. 蔡秋華、郭錦洛，「台灣省自來水中三鹵甲烷與原水中總有機碳之分析研究」，第二屆環境分析化學研討會論文集，第 222-238 頁 (1986)。
11. 蔣本基等，「飲用水中消毒副產物調查及處理技術之評估」，EPA-85-E3J1-09-01，國立台灣大學環境工程研究所 (1996)。
12. 蔣本基等，「飲用水中消毒副產物調查及處理技術之評估」，EPA-86-E3J1-09-01，國立台灣大學環境工程研究所 (1997)。
13. 林清江，「次數人數或百分比的分析- χ^2 考驗」，心理與教育統計學修正版，東華書局 (1985)。
14. 江木泳、李欽慧、張玉玲，「煮沸法去除自來水中三鹵甲烷之研究」，環境檢驗所環境調查研究年報 2，第 431-468 頁 (1994)。
15. 李泰雄、郭光志、王文安、李田樹、陳培根，「台灣地區推動節約用水與用戶用水行為之關係」，自來水會刊雜誌第 48 期，第 55-63 頁 (1993)。
16. 林秋裕、李漢鏗、邊逢沂、周仁，「合理生活用水量之探討」，第 13 屆自來水研究發表會報告集，第 449-464 頁 (1996)。
17. 黃汝賢、陳國宏、胡玉峰、黃俊仁，「改善混凝處理以提高水廠經濟效益並減少三鹵甲烷形成」，國立成功大學環境工程研究報告 No. 122 (1991)。

表 1、三鹵甲烷呼吸暴露量推估結果

| | 沖澡 模式 | 廚房沖滌模式 | 燒開水/煮湯 模式 | 呼吸暴露總量 | 飲用水暴露量 |
|----------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 平均值(μg) | 17.9 | 0.7 | 2.3 | 21.7 | 30.9 |
| 標準偏差(μg) | 20.8 | 0.7 | 1.9 | 25.0 | 22.6 |
| 最大暴露量(μg) | 192.0 | 6.2 | 13.7 | 211.5 | 150.5 |
| 最可能暴露量(μg) (或然率) | 10.3 (22%) | 1.1 (20%) | 1.3 (29%) | 12.4 (24%) | 13.0 (22%) |

表 2、典型模式輸入參數

| 參數 | 模 式 | | | |
|--------------------------|-------|--------|--------|------|
| | 沖澡 | 廚房沖滌 | 燒開水/煮湯 | 飲水 |
| THMs 濃度, $\mu\text{g/L}$ | 27.2 | 27.2 | 27.2 | 27.2 |
| 水溫, $^{\circ}\text{C}$ | 38 | - | - | - |
| 流量, L/min | 19 | 7.9 | - | - |
| 空間體積, L | 8,000 | 30,000 | 30,000 | - |
| 空氣交換率, hr^{-1} | 1 | 1 | 1 | - |
| 開水/湯體積, L | - | - | 30 | - |

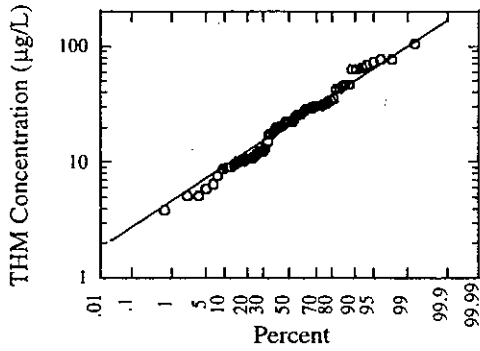


圖 1、清水池 THMs 之對數常態機率圖

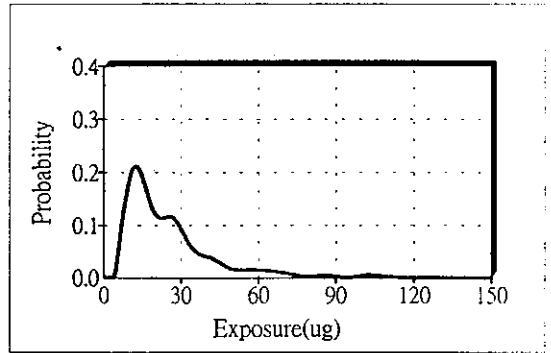


圖 2、沖澡模式呼吸暴露量或然率

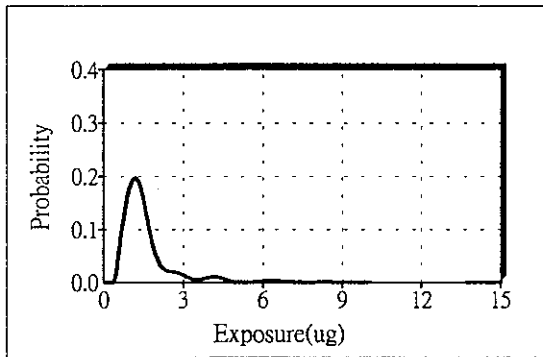


圖 3、廚房沖滌模式呼吸暴露量或然率

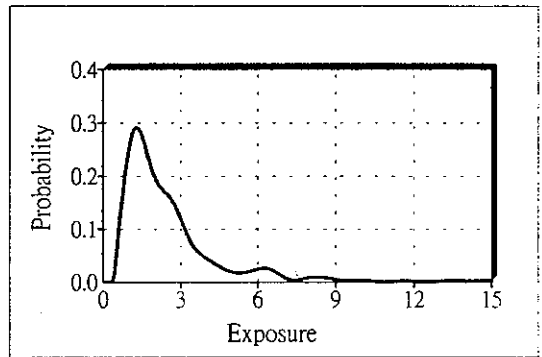


圖 4、燒開水/煮湯模式呼吸暴露量或然率

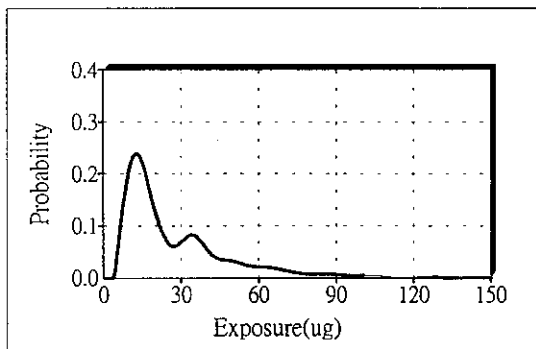


圖 5、三鹵甲烷呼吸暴露總量或然率

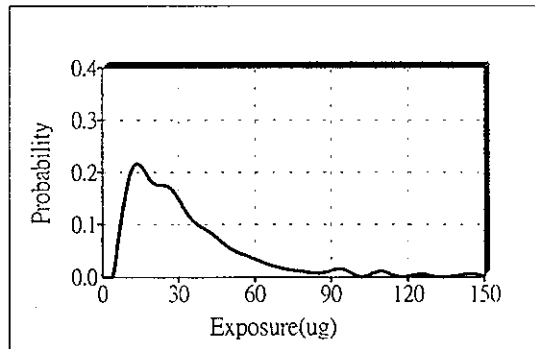


圖 6、三鹵甲烷暴露量或然率(飲水途徑)

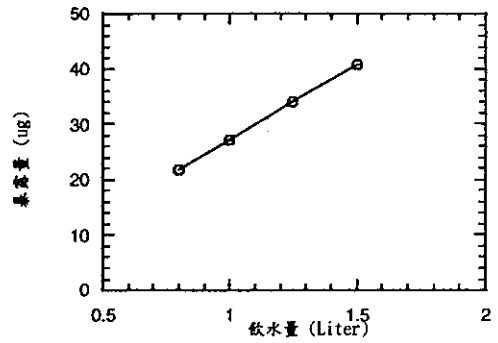
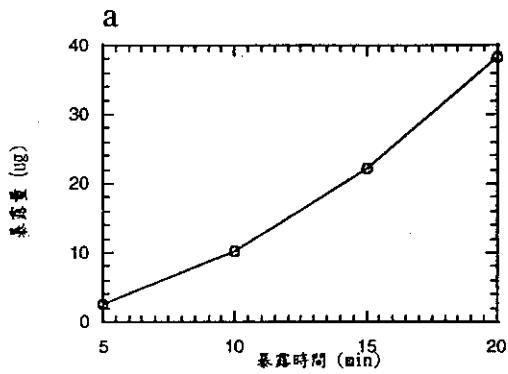


圖 8、典型水質狀況下飲水之暴露量

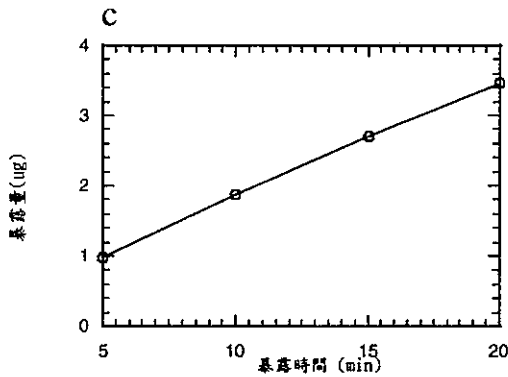
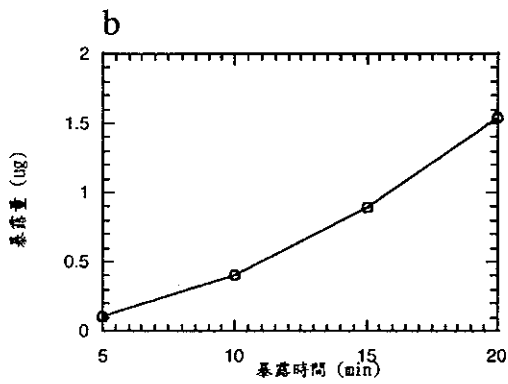


圖 7、典型水質狀況下三種活動之呼吸暴露量

(a：沖澡，b：廚房沖滌及c：燒開水/煮湯)