

都市污水再生利用之職業健康風險評估 -以臺中福田水資源回收中心為例

Occupational Health Risk Assessment by Using Reclaimed Water of Municipal Wastewater—Case Study of Fu-Tian Water Resource Recycling Center in Taichung City

俞菘維¹ 朱韻如^{1,2} 阮香蘭³ 李友平³ 劉尚儒³ 謝慶彬⁴ 王玉純^{*1}
Sung-Wei Yu¹, Yun-Ru Ju^{1,2}, Siang-Lan Ruan³, You-Ping Li³,
Shang-Ru Liu³, Ching-Bin Hsieh⁴, Yu-Chun Wang^{*1}

摘要

目標：臺灣雨量豐沛但水資源短缺，使用再生水是提升水資源使用率之可行解決方案。本研究估算都市污水之再生水使用於工業中，職業人員終身暴露的化學性致癌與非致癌風險及大腸桿菌感染風險，期望提供基礎數據，以確保勞工的職場安全並促進水資源再利用發展。**方法：**分析臺中福田水資源回收中心水質檢測數據，以一般工業部門勞工為評估之暴露族群，暴露途徑以吸入及手口誤食為主，根據環保署「健康風險評估技術規範」和生物劑量反應模式，估算砷、鋇、硼、鎘、總鉻（以六價鉻計算）、鉛、錳、汞、鎳、硒、鋇、鋅、氰、氟、一溴二氯甲烷、三溴甲烷、二溴氯甲烷、三氯甲烷共 18 種化學物之終身職業致癌與非致癌風險及大腸桿菌年感染風險。**結果：**化學物終身致癌風險總和平均值，男性為 4.29E-05-5.21E-05，女性為 3.12E-05-3.89E-05。其中，鉻的化學性致癌風險最高，男性為 3.76E-05-4.57E-05，女性為 2.73E-05-3.41E-05；終身非致癌風險總和平均值均小於 1（非致癌可接受風險建議值）。生物性感染評估結果顯示，再生水在經過逆滲透及加氯消毒處理後，大腸桿菌感染風險為 3.78E-06-5.96E-06，低於世界衛生組織建議值（ 10^{-4} 人/年）。**結論：**由於人體參數不同，男性健康風險大於女性。一般勞工使用都市污水再生水，職業上暴露化學物之終身致癌、非致癌風險及大腸桿菌感染風險均小於目前國際認定的可接受風險建議值。

關鍵詞：再生水，職業健康，致癌，感染，風險

Abstract

Objectives: Proper reuse of municipal wastewater could increase water resource in Taiwan. This study evaluated occupational health risk, chemical lifetime carcinogenic and noncarcinogenic effects, and *E. coli* infection risk, for general workers as they exposed to reclaimed water of municipal wastewater. **Methods:** Measurements for toxicants and microorganisms of reclaimed water were obtained from the data of Fu-Tian Water Resource Recycling Center in Taichung City. Exposure routes of inhalation and hand-to-mouth oral were evaluated for general workers. Lifetime occupational carcinogenic and noncarcinogenic effects in association with 18 chemical compounds (Arsenic, Barium, Boron, Cadmium, Chromium (Cr^{6+}), Lead, Manganese, Mercury, Nickel, Selenium, Strontium, Zinc, Cyanide, Fluorine, Bromodichloromethane, Bromoform, Chlorodibromomethane, and Chloroform) and annual *E. coli* infection risk in reclaimed water were estimated according to authority guideline and biological infectious model. **Results:** Lifetime occupational carcinogenic risks ranged from 4.29E-05 to 5.21E-05 for male workers and 3.12E-05 to 3.89E-05 for female workers. Toxicant Chromium (Cr^{6+}) is related to highest carcinogenic risk that

¹ 中原大學環境工程系

² 國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系

³ 經濟部水利署綜合企劃組第一科

⁴ 象騰顧問有限公司

*Corresponding author. E-mail: ycwang@cycu.edu.tw

¹ Department of Environmental Engineering, Chung Yuan Christian University, Zhongli, Taoyuan, Taiwan, R.O.C.

² Department of Marine Environmental Engineering, National Kaohsiung Marine University, Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.

³ First Section, Planning Division, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs, Taipei, Taiwan, R.O.C.

⁴ Hsiang-Teng consultant co. ltd., Taipei, Taiwan, R.O.C.

Manuscript received 9 March 2015; revised 6 August 2015; accepted 10 September 2015



ranged from 3.76E-05 to 4.57E-05 for male workers and 2.73E-05 to 3.41E-05 for female workers. This study identified the lifetime noncarcinogenic risk were all acceptable (lower than the ceiling of the risk recommendation). After the reverse osmosis and chlorination treatment, *E. coli* infection risk was lower than the WHO recommendation (ranges from 3.78E-06 to 5.96E-06). **Conclusions:** Male workers have higher occupational health risks than female workers due to the variations of physical parameters. Lifetime occupational carcinogenic and noncarcinogenic risks and annual *E. coli* infection risk by using reclaimed water of municipal wastewater were all meet the international recommendations for occupational exposure.

Keywords: reclaimed water, occupational health, cancer, infection, risk

I. 導論

臺灣降雨不均，雖平均降雨量高達 2500 公厘，但有七成降雨都在豐水期 [1]，且臺灣地形陡峭、河川距離短不易保存雨水，加上臺灣人口密度高，缺水風險相對極高，在氣候變遷趨勢下，恐將導致水資源分配不均更加嚴重。因此，近年使用再生水之需求日漸提高。臺灣的年平均降雨量為 950 億噸，但大部分直接流入海洋。而一年用水量約為 210 億噸，其中 56% 引用自河川，24% 由水庫供給，20% 是抽取地下水來使用；在用水方面，有 71% 用於農業用水，9% 為工業用水，20% 提供一般大眾做為生活用水 [1]。欲維持臺灣各項發展及生態需求，在不建設大型水利設施的情況下，將用水循環再利用是重要的解決之道。

國際上已有相當多推動再生水之經驗，美國加州聖地牙哥收集都市污水後經過三級處理程序再輸送至水再純化廠 (water repurification plant)，使用微濾膜 (microfiltration, MF)、逆滲透 (reverse osmosis, RO)、臭氧及離子交換處理後，64% 用於農業灌溉、景觀用水及工業用水，其它用來補注地下水含水層。澳洲則建立三座高級污水再生處理廠及一座海水淡化廠，在 2008 年完工後可提供昆士蘭州東南部 35% 的用水，再生水主要做為發電廠用水、鄰近區域的農、工業用水及注入 Wivenhoe 水庫。新加坡於 2001 年成立的公共事務局將污水回收再利用 (NEWater, 新生水計畫) 列為該國四個主要水源之一，目前已興建四座 NEWater 處理廠，提供 21.3 萬立方米/每日 (cubic meter per day, CMD) 的再生水作為工業用水及商業大樓的冷卻系統用水 [2]。

台灣本島推動都市污水再生利用將以台中市豐原廠、福田廠，台南市永康廠、安平廠，高雄市鳳山溪廠及臨海廠等六座為優先示範推動案，臺灣規劃的都市污水再生水處理程序主要為砂濾 (快濾)、超過濾、逆滲透及加氯消毒 [2]。目前已有「新竹工業區廢水回收再利用規劃延續計畫」[3]、「工業廢水再生利用產業試驗研究以南南地區為例」[4]、「福田水資源回收中心放流再生模廠效能與水質驗證總報告」[5] 等計畫完成相對之處理成效評估。

都市污水再生水的使用目的決定了潛在暴露族群及其暴露的可能性健康風險，關注的污染物則包含化學物及生物感染源。根據研究報告，國內都市污水再生水

計畫之使用對象皆以大用水戶為首要對象 [2-5]。在現有都市污水再生水廠規劃案中，以臺中福田水資源回收中心出水之化學物調查最為完整。因此，本研究採用福田水資源回收中心再生水模廠的產水水質檢測報告中化學物及大腸桿菌 (*E. coli*) 之檢測結果 [5]，分析在國人一般職業工時特性下，長期暴露再生水化學物質之健康風險以及大腸桿菌生物感染之風險，以供各界參考。

II. 材料與方法

1. 危害鑑定

經蒐集福田再生水模廠水質檢測資料 [5] 分析後，選擇健康風險分析之化學物質為以下 18 種：砷、鉍、硼、鎘、總鉻 (以六價鉻計算)、鉛、錳、汞、鎳、硒、鋇、鋅、氫、氬、一溴二氯甲烷、三溴甲烷、二溴氯甲烷、三氯甲烷，整理為表 1。具有致癌特性之毒化物有砷、鎘、六價鉻、鉛、鎳、一溴二氯甲烷、三溴甲烷、二溴氯甲烷、三氯甲烷；非致癌特性之毒化物有鉍、硼、錳、汞、硒、鋇、鋅、氫、氬。

現存於污水中會導致急性感染之病原體主要可分為三類。分別為病毒、細菌及寄生性原生動物。由於本土沒有都市污水經再生水程序後之病毒檢測數據，而寄生性原生動物將由逆滲透膜完全去除，本研究僅選擇有實測數據之大腸桿菌作為微生物風險評估主要致病菌物種。

2. 劑量反應

本研究根據福田再生水模廠水質檢測之化學物質，查詢相關毒理資料庫：美國環保署建置之綜合風險資訊系統 (Integrated Risk Information System, IRIS) [6] 以及美國加州環保署成立之專門研究環境健康危害評估辦公室 (Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHHA) [7]，以確認各項化學物質之基本物化特性、致癌性/非致癌性、流行病學及動物實驗之文獻資料及劑量反應關係等，毒理資料彙整詳如表 2。

由於生物劑量—反應效應不易由低濃度危害物求得，實際實驗只能由較高濃度劑量求得相關性，本研究採用模式模擬，以內差計算反推到低濃度的效果。在選用模式中，以 Haas 等人 [8] 及 DuPont 等人 [9] 模擬飲用



表 1 福田再生水模廠相關資料水質檢測表 (1/2) [5]

毒化物方法偵測極限 (福田廠)	砷 mg/L	銀 mg/L	硼 mg/L	鎘 mg/L	總鉻 mg/L	鉛 mg/L	錳 mg/L	總汞 mg/L	鎳 mg/L	硒 mg/L	銻 mg/L
水質來源	0.022	0.013	0.0298	0.002	0.009	0.006	0.013	0.00018	0.009	0.036	0.002
砂濾—超過濾—逆滲透產水 ¹	ND-0.052	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND-0.001	ND	ND	0.004-0.05
大里工業區廢水處理廠使用 再生水作為冷卻水塔補充水 兩周後之水質	ND	ND	-	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.18
最小值	0.011	-	-	-	-	-	-	0.00009	-	-	0.004
最大值	0.052	-	-	-	-	-	-	0.001	-	-	0.18
平均	0.0247	0.0065	0.0149	0.001	0.0045	0.003	0.0065	0.0004	0.0045	0.018	0.078

註：若為全部數據皆為未檢出 (Not detected, ND)，則假設以 1/2 方法偵測極限 (Method detection limit, MDL) 做為平均值計算
¹民國 97-100 年共 23 次採樣

表 1 福田再生水模廠相關資料之水質檢測彙整表 (2/2) [5]

毒化物方法偵測極限 (福田廠)	鋅 mg/L	氰化物 mg/L	氟 mg/L	二溴甲烷 μg/L	三溴甲烷 μg/L	二溴氯甲烷 μg/L	三氯甲烷 μg/L
水質來源	0.009	0.0012	0.018	0.26	0.24	0.19	0.28
砂濾—超過濾—逆滲透產水 ¹	ND-0.019	ND-0.81	ND-0.16	ND-2.42	ND	-	ND-144
大里工業區廢水處理廠使用 再生水作為冷卻水塔補充水 兩周後之水質	ND	-	0.24	ND	ND	ND	2.14
最小值	0.0045	0.0006	0.009	0.13	-	-	0.14
最大值	0.019	0.81	0.24	2.42	-	-	144
平均	0.0093	0.4053	0.1363	1.275	0.12	0.095	48.76

註：若為全部數據皆為未檢出 (Not detected, ND)，則假設以 1/2 方法偵測極限 (Method detection limit, MDL) 做為平均值計算
¹民國 97-100 年共 23 次採樣

水受細菌、病毒感染之風險機率最為常用。本研究參考 DuPont 等人研究結果設定大腸桿菌的劑量—反應模式為 2.11E+06, α 為 0.155 [10]，當模式中代入暴露之大腸桿菌數，即可推求人體感染風險。

β -卜瓦松劑量—反應模式 (Beta-Poisson dose-response model)

$$P_{inf} = 1 - \left(1 + \left(\frac{I}{\beta} \right) \right)^{-\alpha} \quad (1)$$

式中 P_{inf} ：人類由水體暴露病原體的感染機率， I ：病原體數目 (劑量數目)， r ：感染後存活病原體之比例， α 、 β ：描述感染後存活病原體之比例 (r) 為一 β 型的機率分佈之參數， N_{50} ：半數感染劑量， $N_{50} = \beta(2^{1/\alpha} - 1)$ 。

β -卜瓦松劑量—反應模式，是 Haas [8] 修正指數模式中感染後存活病原體之比例 (r) 為常數 (不適用於 *in vitro*)，令 r 為一 β 型的機率分佈，此模式最符合實驗數據。

3. 暴露評估

3-1. 暴露濃度

本研究蒐集臺中福田水資源回收中心再生水模廠之相關報告資料 [5] 作為水體化學物質之暴露濃度，並

根據美國環保署及世界衛生組織健康風險評估指引之慣用方法，毒化物檢測數值如果為未檢出 (not detected, ND)，則以 1/2 方法偵測極限 (method detection limit, MDL) 代替。

本研究分析生物感染風險以大腸桿菌為主，濃度資料同樣取自臺中福田水資源回收中心再生水模廠產水檢測資料 [5]。根據前言提到的再生水處理程序，本研究假設此都市污水經再生水廠 RO 處理與加氯消毒後作為再生水體，所以將 RO 產水之大腸桿菌水體濃度乘上加氯殺菌率 99% [11]，作為本研究再生水之大腸桿菌濃度，原始濃度為 1-35 菌落生成數 (colony forming unit, CFU)/100 mL，計算後之濃度為 0.01-0.35 CFU/100 mL。

3-2. 暴露途徑

根據「新竹工業區廢水回收再利用規劃延續計畫」研究報告，工業上廠商偏向將再生水作為冷卻水使用，而在勞工普遍不會接觸到水體的情況下，本研究假設暴露途徑 (exposure pathway) 為吸入 (inhalation) 及手到口誤食 (hand-to-mouth oral) 兩種。

(1) 吸入途徑 (inhalation)

冷卻水塔的蒸發率會隨著冷卻效率和天氣狀況而異，依據「都市污水再生供工業使用風險評估計畫」，



表 2 化學物質毒理資料整理 (1/2)

化學物質名稱	砷	鋇	硼	鎘	六價鉻	鉛	錳	汞	鎳	硒	銻
	Arsenic (inorganic)	Barium	Boron	Cadmium	Chromium (VI)	Lead	Manganese	Mercury	Nickel	Selenium	Strontium
CAS NO.*	7440-38-2	7440-39-3	7440-42-8	7440-43-9	18540-29-9	7439-92-1	7439-96-5	7439-97-6	7440-02-0	7782-49-2	7440-24-6
IARC Classification	1	4	4	1	1	2B	4	3	2B	3	4
RFI (mg/m ³)	1.50E-05	--	--	2.00E-05#	1.00E-04	--	5E-05	3.00E-05#	1.40E-05#	0.02#	--
RfD (mg/kg-day)	3.50E-06*	0.2	0.2	5.00E-04	3.00E-03	--	0.14	1.60E-04#	1.10E-02#	5E-03	0.6
Oral Slope Factor (mg/kg-day) ⁻¹	1.50E+00	--	--	1.50E+01#	5.00E-01*	8.50E-03#	--	--	0.91#	--	--
Inhalation Slope Factor (mg/kg-day) ⁻¹	12#	--	--	1.50E+01#	510#	4.20E-02#	--	--	0.91#	--	--

資料來源：無註記資料來自美國環保局綜合風險資訊系統 (Integrated Risk Information System)；

標記來自美國環境健康危害評估辦公室 (Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHA)；

* 標記來自加州環保局 Hot Spots Analysis and Reporting Program；

-- 標記表示查無資料

表 2 化學物質毒理資料整理 (2/2)

化學物質名稱	鋅	氰	氟	二氯溴甲烷	溴仿 (三溴甲烷)	二溴氯甲烷	氯仿 (三氯甲烷)
	Zinc	Cyanide	Fluorine	Bromodichloromethane	Bromoform	Chlorodibromomethane (Dibromochloromethane)	Chloroform
CAS NO.*	7440-66-6	57-12-5	16984-48-8	75-27-4	75-25-2	124-48-1	67-66-3
IARC Classification	4	4	4	2B	3	3	2B
RFI (mg/m ³)	--	9E-03*	--	--	--	--	0.3#
RfD (mg/kg-day)	0.3	6E-04	0.06	0.02	0.02	0.02	0.01
Oral Slope Factor (mg/kg-day) ⁻¹	--	--	--	0.13#	0.011#	0.084	0.019#
Inhalation Slope Factor (mg/kg-day) ⁻¹	--	--	--	0.13#	--	--	0.019#

資料來源：無註記資料來自美國環保局綜合風險資訊系統 (Integrated Risk Information System)；

標記來自美國環境健康危害評估辦公室 (Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHA)；

* 標記來自加州環保局 Hot Spots Analysis and Reporting Program；

-- 標記表示查無資料

本研究設定冷卻能力為 100 冷凍噸的冷卻水塔其蒸發損失量是 2.4 gpm [12]，而一冷凍噸為每小時 3,024 大卡。冷卻水冷卻前後溫度差平均約為攝氏 10 度，預計每天使用水量 45,000 公噸，估算出冷卻能力約 6,200 冷凍噸，算出之每日平均冷卻用再生水蒸發量 974 公噸 [2]，再假設環境溫度為攝氏 25 度，可透過理想氣體方程式換算為氣體體積 1,322,479 立方公尺。

再生水用於冷卻水系統會有部分用水蒸散至空氣中且產生微生物氣膠，微生物氣膠主要來自病原體吸附於惰性微粒，而隨氣流散布於空氣中。自水體產生微生物氣膠可經由公式(2)計算。空氣中化學物質濃度之計算式則是將水中化學物質濃度乘上蒸發水量，再除以再生水蒸發後體積。

$$C_{Air} = C_w \times Q \times E \times S \quad (2)$$

C_{Air} = 空氣中病原體濃度 (CFU/m³)， C_w = 再生水中病原體的濃度 (CFU/L)， Q = 水體流速 (L/s)， E = 氣

膠化效率 (s/m³)，使用噴灑器時 $E = 0.3\%$ 水量， S = 氣膠微生物存活因子，保守估計將假設 $S = 1$ 。

微生物氣膠濃度經推算後，再考慮每日呼吸率及暴露頻率，即可推求每日吸入病原體攝取量，計算如下式

$$I_I = C_{Air} \times IR \times ET \quad (3)$$

I_I = 由空氣吸入病原體攝取量 (CFU/day)， IR = 呼吸頻率 (m³/day)， ET = 暴露時間。

(2) 手到口誤食 (hand-to-mouth oral)

本研究引用 O'Toole 等人 [13] 研究洗衣機利用回收水洗滌衣物可能造成的微生物健康安全評估之結果，病原體由水體到手的轉遞效率 (E_{wh}) 數值為 0.00037%。致病菌由手至口部的轉遞效率 (E_{hm}) 則引用自 Rusin 等人 [14] 研究微生物自非生物性之傳染媒介 (fomites) 從手指轉遞至嘴唇之轉遞效率 36.29%。化學性健康風險計算上假設水體到手，以及由手至口部



的轉遞效率與病原體相同，但病原體濃度改為化學物質濃度。

$$I_O = C_w \times V \times E_{wh} \times E_{hm} \quad (4)$$

I_O = 由口食入病原體攝取量 (CFU/day), C_w = 再生水中病原體的濃度 (CFU/L) 或化學物質濃度 ($\mu\text{g/L}$), V = 接觸體積 (mL/day), E_{wh} = 病原體由水體到手的轉遞效率 (%), E_{hm} = 病原體由手至口部的轉遞效率 (%).

最後，每日的總攝取量 (I , CFU/day) 再將食入及呼吸途徑攝取的病原體攝取量加總而得

$$I = I_O + I_I \quad (5)$$

3-3. 暴露族群及參數

本研究使用行政院衛生署國民健康局出版的「台灣一般民眾暴露參數彙編」[15]，使用臺灣一般勞工年齡 19-64 歲的男女性呼吸率和體重資料。「台灣一般民眾暴露參數彙編」中呼吸率統計表的年齡分層，分為 20-64 歲、20-24 歲、25-34 歲、35-54 歲及 55-64 歲等五種。體重資料分層則為 19-64 歲、19-24 歲、25-34 歲、35-54 歲及 55-64 歲五種。並依據行政院主計處統計之工業部門一般勞工平均工時做為再生水勞工之暴露工時 [16]。

根據水利署「都市污水再生供工業使用風險評估計畫」研究報告，冷卻水塔使用再生水，勞工僅於每日巡檢水量 1-2 回，本研究假設勞工每天巡邏經過暴露一分鐘，並未配戴個人防護設備如：口罩等，於工作場所工作暴露 40 年，綜合以上使用之人體參數及暴露頻率整理為表 3。

4. 風險特徵化

(1) 化學物終身致癌風險

吸入性風險：

$$C_{air} \times \left[\frac{IR}{BW} \right] \times ET \times \frac{EF \times ED}{AT} \quad (6)$$

手到口誤食風險：

$$C_w \times \frac{V \times E_{wh} \times E_{hm}}{BW} \times ET \times \frac{EF \times ED}{AT} \quad (7)$$

C_i = 介質濃度, $i \in \{\text{air, hand-to-mouth}\}$, $\left[\frac{IR_i}{BW} \right]$ = 介質攝入率 / 體重, $i \in \{\text{air, hand-to-mouth}\}$, $\frac{EF \times ED}{AT}$ = $\frac{\text{暴露頻率 (days/y years)} \times \text{暴露時間 (years)}}{\text{平均時間 (days)}}$,

E_{wh} = 有害化學物質由水體到手的轉遞效率 (%), E_{hm} = 有害化學物質由手到口部的轉遞效率 (%), ET = 假設每日巡檢經過暴露共 1 分鐘, EF = 勞工平均工時, ED = 假設工作時間為 40 年, AT = 平均暴露時間, 在本計畫為終身壽命, 男 73.5 年, 女 79.7 年。

(2) 化學物終身非致癌風險

非致癌健康風險公式如下：

$$HQ = \frac{D}{RfD}, \quad HQ = \frac{C}{RfC}, \quad HI = \sum_i HQ_i \quad (8)$$

表 3 計算健康風險使用人體參數 (1/2)

性別	年齡	活動呼吸率 (m ³ /day) ¹	體重 (kg) ¹	終身壽命 ²
男	20-24 ⁴	18	69	73.5 年
	25-34	20	71	
	35-54	17	72	
	55-64	17	67	
	20-64 ⁴	18	71	
女	20-24 ⁴	12	53	79.7 年
	25-34	12	58	
	35-54	14	59	
	55-64	12	62	
	20-64 ⁴	12	58	

¹ 引用自台灣一般民眾暴露參數彙編 [15]

² 引用自內政部統計處 [24]

表 3 計算健康風險使用人體參數 (2/2)

性別	年齡	工業部門平均工時 ³	暴露時間
男	19-24 ⁴	92.85 天/每年	40 年, 每天一分鐘
	25-34		
	35-54		
	55-64		
	19-64 ⁴		
女	19-24 ⁴	91.34 天/每年	40 年, 每天一分鐘
	25-34		
	35-54		
	55-64		
	19-64 ⁴		

³ 行政院主計處中華民國統計資訊網 [16]

⁴ 年齡分層不同, 呼吸率為 20-24 歲, 體重為 19-24 歲

HQ = 危害商數 (Hazard quotient), 亦稱非致癌風險, D, C = 劑量或濃度, RfD = 參考劑量, RfC = 參考濃度, HI = 危害指數 (Hazard index), 總和暴露者暴露多項污染物所造成之非致癌風險。

目前環保署健康風險評估技術規範 [17] 建議的風險機率值, 致癌風險的可接受範圍是 10^{-6} - 10^{-4} , 但總致癌風險高於 10^{-6} 時 (即族群終身暴露於該環境濃度下, 每 100 萬人中超過一人因化學物而致癌), 應提出最佳可行風險管理策略。非致癌風險 (危害商數) 如小於 1, 預期將不會造成損害。

(3) 大腸桿菌生物感染風險

大腸桿菌的生物性健康風險由公式(5)所加總的每日大腸桿菌攝入量及劑量-反應模式求得。本研究使用再生水中大腸桿菌濃度 0.01-0.35 CFU/100 mL 範圍的平均值, 0.18 CFU/100 mL 計算大腸桿菌感染風險。生物性危害感染風險的目標機率, WHO 及 U.S.EPA 均設定為 10^{-4} 人/年, 即一年裡每一萬人中不超過一人被病原菌感染 [18]。



5. 不確定性分析

本研究使用 Crystal Ball 軟體的蒙地卡羅模擬法 (Monte Carlo simulation) 進行不確定性計算，分布參數設定 lognormal 分布和 5%、50%、95% 的風險值，產生各年齡層、性別及使用福田再生水模廠水質的化學/生物性風險分布。因國內再生水相關報告水質檢測數據尚未足夠，無法計算水質濃度的 95 百分位值與 5 百分位值，本研究改用人體參數，使用 5 百分位值、50 百分位值及 95 百分位值體重依序計算化學性健康風險，所得之三種健康風險值輸入至 Crystal Ball 軟體推估風險分布，從而量化風險評估的不確定性。病原體感染風險計算不含體重，無法計算 5 百分位值及 95 百分位值感染風險，本計畫計算大腸桿菌的最低濃度及最高濃度時的感染風險值區間表示風險的不確定性。

III. 結果

1. 化學性物質職業暴露終身健康風險

使用福田再生水模廠出水水質檢測資料，計算之健康風險結果彙整如表 4。化學物終身致癌風險總和平均值，男性為 4.29E-05-5.21E-05，女性為 3.12E-05-3.89E-05。其中，鉻與砷的終身致癌風險較高（詳見表 5 各化學物致癌風險），鉻的致癌風險，男性為 3.76E-05-4.57E-05，女性為 2.73E-05-3.41E-05；砷的致癌風險，男性為 2.19E-06-1.26E-05，女性為 1.60E-06-9.43E-06。化學物終身非致癌風險總和平均值（詳見表 4），男性為 1.73E-01-1.74E-01，女性為 1.59E-01-1.62E-01。其中，砷與鎳的終身非致癌風險較高（詳見表 6 各化學物非致癌風險），砷的非致癌風險，男性為 1.29E-01-1.30E-01，女性為 1.19E-01-1.21E-01；鎳的非致癌風險，男性約為 2.28E-02，女性約為 2.07E-02。

在男、女性分層之致癌健康風險部分，25-34 歲男性分層的職業風險最高，35-54 歲男性分層的風險最低；35-54 歲女性分層的職業風險最高，55-64 歲女性分層的風險最低。在男、女性分層之非致癌健康風險部分，55-64 歲男性分層的職業風險最高，35-54 歲男性分層的風險最低；19-24 歲女性分層的職業風險最高，55-64 歲女性分層的風險最低。而兩種情境的男女健康風險值的差異主要在呼吸率、體重、壽命等人體參數的不同。

2. 生物性感染風險

大腸桿菌之感染風險（詳見表 7），男性為 5.10E-06-5.96E-06 之間，女性為 3.78E-06-4.32E-06。其中，男性在使用 25-34 歲參數估算之風險最高，女性則在使用 35-54 歲參數估算時風險最高。不同年齡層與性別則未有明顯差異。

3. 不確定性分析

分析發現鉻及鉀暴露可能造成較高之職業暴露健康風險。設定誤食與吸入途徑皆為鉻之平均濃度值時，19-64 歲男性約為 2.50E-05-6.00E-05，19-64 歲女性則約為 1.79E-05-4.36E-05。使用福田再生水模廠檢測水質報

表 4 使用福田再生水模廠數據，一般勞工暴露終身致癌/非致癌健康風險總和平均值總表

性別	年齡層 (歲)	總非致癌風險	總致癌風險
男	19-24	1.74E-01	4.98E-05
	25-34	1.73E-01	5.21E-05
	35-54	1.73E-01	4.29E-05
	55-64	1.74E-01	4.67E-05
	19-64	1.74E-01	4.72E-05
女	19-24	1.62E-01	3.80E-05
	25-34	1.60E-01	3.43E-05
	35-54	1.60E-01	3.89E-05
	55-64	1.59E-01	3.12E-05
	19-64	1.60E-01	3.53E-05

表 7 不同暴露及年齡族群病原體之感染風險

暴露族群	性別	年齡層 (歲)	<i>E. coli</i>
一般勞工	男	19-24	5.56E-06
		25-34	5.96E-06
		35-54	5.10E-06
		55-64	5.16E-06
		19-64	5.44E-06
	女	19-24	3.86E-06
		25-34	3.84E-06
		35-54	4.32E-06
		55-64	3.78E-06
		19-64	3.95E-06

為每年大腸桿菌感染之風險效應，*E. coli* 為罹病腹瀉世界衛生組織建議生物性感染風險限值=1.00E-04/年

告資料，計算化學性健康風險結果。若誤食與吸入皆為砷之平均濃度值時，男性 19-64 歲的終身致癌風險約為 3.22E-06-7.78E-06，19-64 歲女性的致癌風險約為 2.46E-06-5.69E-06。不確定性分析結果顯示人體參數變異不會大幅改變風險計算值。

大腸桿菌感染風險部分，男性為 2.83E-07-1.16E-05，女性為 2.10E-07-8.39E-06。與致癌性健康風險相同，男性使用 25-34 年齡層參數的風險最高，35-54 歲參數的風險最低。

IV. 討論

根據福田水資源回收中心再生水模廠水質數據 [5] 以及本研究設定之職業族群暴露條件，都市污水再生水使用於工業冷卻用水時，作業勞工的職業暴露終身致癌風險皆在 10^{-4} 內，為可接受之職業暴露健康風險值。本研究建議污染源頭管制部分，除應避免事業廢污水流入再生水系統，並因部分化學物危害健康風險高，如：鉻及砷，建議應列為再生水常規檢測項目，並提出風險管控可行方案。生物性感染風險部分，不確定分析結果呈現在大腸桿菌最高濃度時，感染機率雖未超過一年內 10^{-4} 的建議值，本研究亦建議必須在後端消毒系統注意



表 5 使用福田再生水模廠數據，量化一般勞工暴露之終身致癌健康風險 (1/2)

性別	年齡層 (歲)	砷			鎘	六價鉻	鉛	鎳
		平均值	最小值	最大值				
男	19-24	5.70E-06	2.54E-06	1.20E-05	3.13E-07	4.37E-05	2.44E-09	8.54E-08
	25-34	5.96E-06	2.66E-06	1.26E-05	3.25E-07	4.57E-05	2.56E-09	8.88E-08
	35-54	4.91E-06	2.19E-06	1.04E-05	2.72E-07	3.76E-05	2.11E-09	7.43E-08
	55-64	5.35E-06	2.39E-06	1.13E-05	2.96E-07	4.09E-05	2.30E-09	8.07E-08
	19-64	5.41E-06	2.41E-06	1.14E-05	2.98E-07	4.14E-05	2.32E-09	8.12E-08
女	19-24	4.38E-06	1.95E-06	9.23E-06	2.50E-07	3.33E-05	1.88E-09	6.83E-08
	25-34	3.95E-06	1.76E-06	8.32E-06	2.26E-07	3.00E-05	1.70E-09	6.16E-08
	35-54	4.47E-06	1.99E-06	9.43E-06	2.52E-07	3.41E-05	1.92E-09	6.87E-08
	55-64	3.59E-06	1.60E-06	7.57E-06	2.06E-07	2.73E-05	1.55E-09	5.62E-08
	19-64	4.06E-06	1.81E-06	8.57E-06	2.32E-07	3.09E-05	1.75E-09	6.32E-08

表 5 使用福田再生水模廠數據，量化一般勞工暴露之終身致癌健康風險 (2/2)

性別	年齡層 (歲)	二氯溴甲烷			三溴甲烷	二溴氯甲烷	三氯甲烷		
		平均值	最小值	最大值			平均值	最小值	最大值
男	19-24	3.46E-09	3.53E-10	6.56E-09	1.92E-12	2.77E-12	1.93E-08	5.55E-11	5.71E-08
	25-34	3.59E-09	3.67E-10	6.82E-09	1.85E-12	2.67E-12	2.01E-08	5.77E-11	5.93E-08
	35-54	3.01E-09	3.06E-10	5.71E-09	1.83E-12	2.65E-12	1.68E-08	4.82E-11	4.96E-08
	55-64	3.27E-09	3.33E-10	6.20E-09	1.97E-12	2.85E-12	1.83E-08	5.25E-11	5.39E-08
	19-64	3.29E-09	3.35E-10	6.24E-09	1.87E-12	2.70E-12	1.84E-08	5.28E-11	5.43E-08
女	19-24	2.77E-09	2.82E-10	5.25E-09	2.27E-12	3.29E-12	1.55E-08	4.44E-11	4.57E-08
	25-34	2.50E-09	2.54E-10	4.74E-09	2.06E-12	2.98E-12	1.39E-08	4.00E-11	4.12E-08
	35-54	2.78E-09	2.84E-10	5.28E-09	2.01E-12	2.91E-12	1.56E-08	4.47E-11	4.59E-08
	55-64	2.28E-09	2.32E-10	4.32E-09	1.91E-12	2.77E-12	1.27E-08	3.65E-11	3.76E-08
	19-64	2.56E-09	2.61E-10	4.86E-09	2.05E-12	2.96E-12	1.43E-08	4.11E-11	4.22E-08

加氣餘氣量或合併安裝紫外光 (UV) 燈殺菌，避免微生物孳生的狀況。

本研究採用環保署公告之健康風險評估規範並使用模廠水質實測數據，進行健康風險評估作業，暴露參數考量全國勞工年齡層之人體參數及平均工時，並進行不確定性分析提供風險分布範圍，為近年探討再生水健康風險評估中少見之完整分析報告。但是，本研究受限於現有再生水出水水質檢測數據之不足，僅能使用福田再生水模廠之測值來代表分析。福田水資源回收中心模廠污水來源主要為都市污水，但其中有部分截流事業廢水，雖已是臺灣現有再生水廠模廠中，水源最接近都市污水之模廠，仍因臺灣住、商、工廠混雜導致都市污水重金屬檢測濃度偏高。因此，本研究評估結果無法全然代表本國其他都會區都市污水的污染物組成、再生水特性與健康風險。此外，原福田再生水模廠之水質檢測，是為確認各產水程序之水質定性分析，並研究不同產水程序對特定水質項目的去除效能，因此，採用能夠一次檢測多種重金屬水質項目的感應耦合電漿原子發射光譜分析 (inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES) 檢測方法，而非現有偵測極限較低之原子吸收光譜法等。因此，原水高重金屬濃度與高方法偵測極限下，便衍生出本研究可能高估的職業暴

露健康風險計算值。鉻的致癌風險結果為最高，應是本研究將總鉻濃度採用六價鉻毒理資料計算，是為鉻的最大健康風險值，相對是最為保守的計算結果。

「福田水資源回收中心放流水再生模廠效能與水質驗證總報告」報告內容以再生模廠效能與水質驗證為主，因此，風險結果部分並未與國內其他研究進行比較。但報告完整列出風險評估設定來源，化學物質健康風險參數來源為風險評估資訊系統資料庫 (The Risk Assessment Information System, RAIS) [19]、非接觸用途風險評估計算公式與參數設定則參考環保署 96 年度土壤及地下水污染場址健康風險評估評析技術諮詢計畫 [20] 及許 [21]，而大腸桿菌感染推估使用之 Beta-Poisson 模式使用參數參考 Hass 等人 [22]。至於本研究與「福田水資源回收中心放流水再生模廠效能與水質驗證總報告」風險評估方法上的主要差異為，本研究依據美國環保署及世界衛生組織健康風險評估指引之方法，將未檢出之毒化物檢測數值，以 1/2 方法偵測極限替代，而福田再生模廠報告則是忽略不予計算。因此，本研究分析風險結果會較福田再生模廠報告為高。另外，暴露情境設定的差異也會影響估算結果，如：再生水之用途、暴露途徑選擇、暴露估算公式及暴露參數等，上述均會顯著影響分析結果，在兩份研究方法設定



表 6 使用福田再生水模廠數據，量化一般勞工暴露之終身非致癌健康風險（1/3）

性別	年齡層（歲）	砷			鎳	硼	鎘	六價鉻	錳	汞		
		平均值	最小值	最大值						平均值	最小值	最大值
男	19-24	1.30E-01	5.78E-02	2.73E-01	5.96E-08	1.37E-07	3.55E-03	3.20E-03	9.23E-03	9.35E-04	2.14E-04	2.38E-03
	25-34	1.29E-01	5.76E-02	2.72E-01	5.74E-08	1.32E-07	3.55E-03	3.20E-03	9.23E-03	9.35E-04	2.14E-04	2.38E-03
	35-54	1.29E-01	5.76E-02	2.72E-01	5.70E-08	1.31E-07	3.55E-03	3.20E-03	9.23E-03	9.35E-04	2.14E-04	2.38E-03
	55-64	1.30E-01	5.80E-02	2.74E-01	6.12E-08	1.40E-07	3.55E-03	3.20E-03	9.23E-03	9.35E-04	2.14E-04	2.38E-03
	19-64	1.29E-01	5.77E-02	2.73E-01	5.80E-08	1.33E-07	3.55E-03	3.20E-03	9.23E-03	9.35E-04	2.14E-04	2.38E-03
女	19-24	1.21E-01	5.41E-02	2.56E-01	7.06E-08	1.62E-07	3.22E-03	2.90E-03	8.37E-03	8.50E-04	1.94E-04	2.16E-03
	25-34	1.20E-01	5.34E-02	2.53E-01	6.40E-08	1.47E-07	3.22E-03	2.90E-03	8.37E-03	8.49E-04	1.94E-04	2.16E-03
	35-54	1.19E-01	5.33E-02	2.52E-01	6.25E-08	1.43E-07	3.22E-03	2.90E-03	8.37E-03	8.49E-04	1.94E-04	2.16E-03
	55-64	1.19E-01	5.30E-02	2.50E-01	5.95E-08	1.36E-07	3.22E-03	2.90E-03	8.37E-03	8.49E-04	1.94E-04	2.16E-03
	19-64	1.20E-01	5.34E-02	2.52E-01	6.36E-08	1.46E-07	3.22E-03	2.90E-03	8.37E-03	8.49E-04	1.94E-04	2.16E-03

表 6 使用福田再生水模廠數據，量化一般勞工暴露之終身非致癌健康風險（2/3）

性別	年齡層（歲）	鎳	硒	鋅			氟化物			氟		
				平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值
男	19-24	2.28E-02	7.05E-05	5.71E-08	2.75E-08	1.16E-07	4.44E-03	6.57E-06	8.86E-03	4.17E-06	2.75E-07	7.34E-06
	25-34	2.28E-02	7.03E-05	5.50E-08	2.65E-08	1.12E-07	4.39E-03	6.50E-06	8.78E-03	4.02E-06	2.65E-07	7.07E-06
	35-54	2.28E-02	7.02E-05	5.46E-08	2.63E-08	1.11E-07	4.38E-03	6.49E-06	8.76E-03	3.99E-06	2.63E-07	7.02E-06
	55-64	2.28E-02	7.07E-05	5.86E-08	2.83E-08	1.19E-07	4.47E-03	6.62E-06	8.93E-03	4.28E-06	2.83E-07	7.54E-06
	19-64	2.28E-02	7.03E-05	5.55E-08	2.68E-08	1.13E-07	4.40E-03	6.52E-06	8.80E-03	4.06E-06	2.68E-07	7.14E-06
女	19-24	2.07E-02	6.58E-05	6.76E-08	3.26E-08	1.38E-07	4.37E-03	6.47E-06	8.73E-03	4.94E-06	3.26E-07	8.69E-06
	25-34	2.07E-02	6.51E-05	6.13E-08	2.96E-08	1.25E-07	4.23E-03	6.26E-06	8.46E-03	4.48E-06	2.96E-07	7.88E-06
	35-54	2.07E-02	6.49E-05	5.98E-08	2.89E-08	1.22E-07	4.20E-03	6.22E-06	8.39E-03	4.37E-06	2.89E-07	7.69E-06
	55-64	2.07E-02	6.46E-05	5.70E-08	2.75E-08	1.16E-07	4.14E-03	6.12E-06	8.27E-03	4.16E-06	2.75E-07	7.32E-06
	19-64	2.07E-02	6.50E-05	6.09E-08	2.94E-08	1.24E-07	4.22E-03	6.25E-06	8.44E-03	4.45E-06	2.94E-07	7.83E-06

表 6 使用福田再生水模廠數據，量化一般勞工暴露之終身非致癌健康風險（3/3）

性別	年齡層（歲）	二氯溴甲烷			三溴甲烷	二溴氯甲烷	三氯甲烷		
		平均值	最小值	最大值			平均值	最小值	最大值
男	19-24	1.17E-07	1.19E-08	2.22E-07	8.71E-09	1.65E-09	2.05E-05	5.88E-08	6.05E-05
	25-34	1.13E-07	1.15E-08	2.14E-07	8.40E-09	1.59E-09	2.02E-05	5.79E-08	5.95E-05
	35-54	1.12E-07	1.14E-08	2.12E-07	8.34E-09	1.58E-09	2.01E-05	5.77E-08	5.94E-05
	55-64	1.20E-07	1.22E-08	2.28E-07	8.95E-09	1.70E-09	2.07E-05	5.95E-08	6.12E-05
	19-64	1.14E-07	1.16E-08	2.16E-07	8.48E-09	1.61E-09	2.02E-05	5.81E-08	5.98E-05
女	19-24	1.39E-07	1.41E-08	2.63E-07	1.03E-08	1.96E-09	2.11E-05	6.05E-08	6.22E-05
	25-34	1.26E-07	1.28E-08	2.38E-07	9.36E-09	1.77E-09	2.01E-05	5.76E-08	5.93E-05
	35-54	1.23E-07	1.25E-08	2.33E-07	9.14E-09	1.73E-09	1.98E-05	5.70E-08	5.86E-05
	55-64	1.17E-07	1.19E-08	2.22E-07	8.70E-09	1.65E-09	1.94E-05	5.57E-08	5.73E-05
	19-64	1.25E-07	1.27E-08	2.37E-07	9.30E-09	1.76E-09	2.00E-05	5.75E-08	5.91E-05

不同下，難以同等比較風險估算結果。本研究所採取之參數數據及分析方法均為現今公告之適用方法，所得分析結果較以往分析報告更具公信力與可信度。

北京一研究 [23] 評估使用再生水灌洗街道的化學性健康風險，對再生水中的 19 項化學污染物進行定量風險評估，結果顯示職業性致癌風險為 8.47E-06，一般民眾的風險值為 3.78E-06。以化學性健康風險來說，截至目前沒有研究曾經討論過再生水使用於工業用途之職業健康風險。

美國國家環保局針對一般群眾訂出在各項空水土法規之可接受致癌風險，以 10^{-4} 為不可超過的風險機率，若有達到此風險之情事就應立即採取行動，避免造成危害。在職業上，美國勞工部職業安全與健康管理局（Occupational Safety and Health Administration, OSHA）則採用 Supreme Court Action 計算全美職業病發生情形，建議職業上以 10^{-3} 為判定顯著致癌風險之依據。WHO 則認為可接受之飲水致癌風險為 10^{-5} 。臺灣目前因環境影響評估需要，環保署僅針對一般群眾訂出終



身致癌風險建議值為 10^{-6} ，本國在職業上則沒有職業健康風險之建議值。依據本研究評估結果，若妥適控制污水中砷、鉻等高危害重金屬濃度，與後續微生物滋生情形，則再生水將符合嚴格之健康風險評估建議值。

本研究計算之健康風險評估乃最大風險結果，未將影響風險評估之其他因素納入考量，如：再生水廠最終處理程序的影響（併用 UV 殺菌或調整加氯量）及工廠內冷卻水塔之空間配置。本研究亦未考慮其他勞工安全衛生作業環境及風險管理規範程序的影響，如：現場作業整體換氣及局部通風、勞工配戴個人防護具之保護、勞工輪班管理等。本研究可做為未來再生水運用於工業之職業健康風險參考，但實際勞工暴露健康風險仍需由實測值來確認。

全台都市污水原水特性具有時空差異特性，加上再生水廠處理設備也會隨原水情況與使用需求加以調整，導致各廠再生水實際供水不同，建議各地區的再生水廠應自行進行健康風險評估計畫，計畫內容包括再生水使用端定性風險調查與定量風險結果（使用自來水現況及變更為再生水後）。

水廠實際運作前，設備處理成效之理論推估值與實測值也有必要先相互驗證，如差異過大則需使用替代方案。另建議再生水廠應比照自來水淨水廠建立定期監測水中毒化物程序，利用長期檢測結果，週期性進行潛在健康風險評估，建立循環評估程序，亦可由健康風險評估結果反推設備應具備之最低處理效能及最佳可操作設備條件。再生水廠的設備、程序變更前應進行風險評估，設備需定期更新確保符合初期規劃之處理效率。

依本研究計算大腸桿菌感染風險結果，儘管 UV 光或加氯殺菌擇一即能符合生物性健康風險標準，但為降低生物性感染風險，本研究基於風險管控最保守之原則，建議再生水廠末端可考慮合併安裝 UV 及加氯雙重殺菌設備，或在單一加氯殺菌程序時，以不超過可接受化學性風險的情況下，保持具殺菌能力之餘氯量，可以減少微生物滋生，降低勞工生物感染之風險。

依照作業危害告知程序，雇主應告知第一線工作人員使用再生水之潛在危害，加強其職業安全衛生基本觀念，必要時需加強現場作業之安全衛生設備或強制要求作業勞工配戴個人防護具。除了配戴防護具外，也可利用工作時間管理，如：輪班制度，來減低暴露族群可能健康風險。本研究建議加強部分健康檢查項目，以強化勞工健康追蹤管理。如：肺等高暴露風險的器官。

臺灣目前並沒有職業健康風險標準，如：美國 Supreme Court Action 建立職業致癌顯著風險值為 10^{-3} ，因此，本研究以一般民眾暴露可接受致癌風險 10^{-6} - 10^{-4} 為基準，在日益增加使用再生水的需求下，建議臺灣官方應儘速建立再生水使用管理制度及相對應法規標準。

此外，本研究也建議建立再生水健康風險危機處理程序，評估下列各風險因子發生情境及可能衍生之風險，包含：水源水量遽變之影響、水源水質超過規劃容許設定值之影響（如：氣象災害，都市污水量突發性增量或降低對於污水處理及再生水處理程序效能影響），建立對應的暫停供水程序。關於突發性人畜傳染病及其

衍生之廢水生物性污染風險問題，應建立生物性風險評估及停止供水程序，加強與其他單位（如：疾病管制署、農委會）之橫向資訊連結。另外，也應建立再生水廠處理程序失誤或意外時緊急停工的程序，並應週期性評估處理設備效能降低等衍生之增量風險分析。

V. 結論

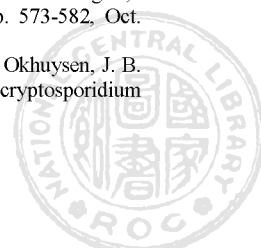
本研究依照環保署健康風險評估技術規範，在臺灣一般民眾參數中挑出符合全國勞工的人體參數，使用行政院主計處統計的工業部門平均工時，計算在福田水資源回收中心模廠水質檢測濃度下，再生水中 18 種化學物的職業暴露終身健康風險與大腸桿菌的生物感染風險。結果顯示再生水用於工業冷卻水的終身致癌風險雖超過 10^{-6} ，但仍在可接受的範圍內。男性與女性健康風險值的差異主要在呼吸率、體重、壽命等人體參數與化學物的致癌與非致癌毒理特性不同。而在致癌風險中鉻與砷的風險較高，成因可能是污水來源摻有部分事業排放水，以及本研究將總鉻濃度採用六價鉻的毒理資料估算風險值，本研究建議再生水系統中應定期檢測重金屬，防止潛在從業勞工長期暴露重金屬之健康危害，另因都市污水時空特性差異，各再生水廠也需要針對其本身再生水實測值進行循環健康風險評估程序，以確保再生水使用端之健康。

致謝

本研究由水利署（計畫名稱：都市污水再生供工業使用風險評估計畫）及科技部（MOST 103-2621-M-033-001、MOST-103-2633-M-033-002）經費補助完成，特此致謝。

參考文獻

- [1] 經濟部水利署，氣候變遷水環境知識庫 [Online]。Available: <http://climatechange.wra.gov.tw/dispPageBox/CCKM/CCKMWEHP.aspx?ddsPageID=CCKMCH> (2014)
- [2] 象騰顧問有限公司，「都市污水再生供工業使用風險評估計畫」，經濟部水利署計畫 MOEAWRA1030303，2014。
- [3] 經濟部水利署水利規劃試驗所，「新竹工業區廢水回收再利用規劃延續計畫」，2004。
- [4] 財團法人成大研究發展基金會，「工業廢水再生利用產業試驗研究以南地區為例」，經濟部水利署水利規劃試驗所 MOEAWRA0960053，2007。
- [5] 財團法人中興工程顧問社，「福田水資源回收中心放流水再生模廠效能與水質驗證總報告」，經濟部水利署水利規劃試驗所 MOEAWRA1000092，2011。
- [6] U.S.EPA. Integrated Risk Information System. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/iris/> (2014)
- [7] California EPA. Office of Environmental Health Hazard Assessment. [Online]. Available: <http://oehha.ca.gov/tcdb/index.asp> (2014)
- [8] C. N. Haas, "Estimation of risk due to low doses of microorganisms: a comparison of alternative methodologies," *American Journal of Epidemiology*, vol. 118, pp. 573-582, Oct. 1983.
- [9] H. L. DuPont, C. L. Chappell, C. R. Sterling, P. C. Okhuysen, J. B. Rose, and W. Jakubowski, "The infectivity of cryptosporidium



- parvum in healthy volunteers,” *New England Journal of Medicine*, vol. 332, pp. 855-859, 1995.
- [10] H. L. DuPont, S. B. Formal, R. B. Hornick, M. J. Snyder, J. P. Libonati, D. G. Sheahan, E. H. LaBrec, and J. P. Kalas, “Pathogenesis of *Escherichia coli* diarrhea,” *New England Journal of Medicine*, vol. 285, pp. 1-9, 1971.
- [11] 陳佳郁, 「臭氧與氯對水中微生物殺菌效率之評估」, 碩士論文, 國立台灣大學公共衛生學院環境衛生研究所, 2005。
- [12] 教育部, 節能減碳資訊查詢系統 [Online]。 Available: <http://co2.ftis.org.tw/pageJ4.asp?class=50> (2014)
- [13] J. O’Toole, M. Sinclair, and K. Leder, “Transfer rates of enteric microorganisms in recycled water during machine clothes washing,” *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 75, pp. 1256-1263, 2009.
- [14] P. Rusin, S. Maxwell, and C. Gerba, “Comparative surface-to-hand and fingertip-to-mouth transfer efficiency of gram-positive bacteria, gram-negative bacteria, and phage,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 93, pp. 585-592, 2002.
- [15] 國立台灣大學公共衛生學院健康風險及政策評估中心, 「台灣一般民眾暴露參數彙編」, 行政院衛生署委託計畫 DOH96-HP-181, 2008。
- [16] 行政院主計總處, 中華民國統計資訊網 [Online]。 Available: <http://www.stat.gov.tw/> (2014)
- [17] 行政院環境保護署環署綜字第 1000060206 號, 「健康風險評估技術規範」, 2011。
- [18] Interagency Microbiological Risk Assessment Guideline Workgroup, “Microbial risk assessment guideline,” EPA and USDA/FSIS, 2012.
- [19] U.S. Department of Energy. The Risk Assessment Information System. [Online]. Available: <http://rais.ornl.gov/> (2013)
- [20] 中興工程顧問股份有限公司, 「96 年度土壤及地下水污染場址健康風險評估評析技術諮詢計畫」, 環保署計畫, 2008。
- [21] 許惠宗, *風險評估與風險管理 (第 2 版)*, 新文京開發出版股份有限公司, 2006。
- [22] C. N. Haas, J. B. Rose, and C. P. Gerba, *Quantitative Microbial Risk Assessment*, 1st ed., Wiley, April. 1999.
- [23] X. H. He, S. H. Ma, X. C. Pan, Q. Chen, A. D. Li, and J. F. Wang, “Research on the health risk assessment of chemical pollutants in reclaimed water used for streets watering,” *Huan Jing Ke Xue*, vol. 28, pp. 1290-1294, June 2007.
- [24] 內政部統計處, 內政部統計查詢網 [Online]。 Available: <http://statis.moi.gov.tw/micst/stmain.jsp?sys=100> (2012)

