

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

台灣地區整合性風險評估方法之建立-鎘與汞案例研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-144-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學環境工程學研究所

計畫主持人：馬鴻文
共同主持人：吳焜裕
計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：施秀靜

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年10月31日

中文摘要

本研究之目標為提供一個完整且可靠的整體性健康風險評估方法，評估人類總體活動過程中所承受來自某一物質的風險。隨著物質的使用越來越多元，人類活動越來越複雜，人體暴露所接觸的污染源也越來越多樣（使用、廢棄、製成），物質使用而產生的總風險也就越難以釐清。本研究第一年著重於廢棄物處理程序的風險。廢棄物處理程序之風險評估包括：焚化處理、掩埋處理、灰渣處理/再利用，涵蓋空氣排放與土壤地下水污染的風險評估。

在掩埋場部分，評估 13 座掩埋場，其中有八座略高於 10^{-6} ，總致癌風險在 $2.45 \times 10^{-6} \sim 3.42 \times 10^{-7}$ 之間，非致癌風險則為 $1.52 \times 10^{-3} \sim 2.13 \times 10^{-4}$ 。而在焚化廠風險評估方面，平均致癌風險約 10^{-7} ，非致癌危害商數則小於 10^{-3} 。另外經由保守的健康風險評估可以得知底渣再利用對施工員工之影響，其致癌與非致癌風險皆在一般可接受的風險範圍內；再者，底渣施工期間對鄰近居民之影響，致癌與非致癌風險分別未超出 10^{-6} 與 1；道路使用期間對鄰近居民之影響，在致癌風險，鉻的風險值分別為鋪設道路使用期 4.73×10^{-6} 與管溝回填使用期 2.33×10^{-6} ，皆略大於 10^{-6} ；而在非致癌風險的部分，各金屬評估結果皆在可以接受的範圍內。

本年度評估結果因部分資料的限制，未能進行精確計算。但已初步完成廢棄物管理系統的風險評估架構；現有風險量化工具已接近成熟，可據以針對確定的污染源進行評估。未來將擴大研究系統，包含物質的各生命階段，逐步建立整合性風險評估方法。

An integrated Methodology for Health Risk Assessment in Taiwan

Abstract

The objective of this study is to develop a complete and reliable integrated risk assessment method to assess the overall human activities involving flow of substances. With growing use of substances in terms of quantity and diversity, we are exposed to more complex web of pollution; the total risk caused by the materials becomes hard to be delineated. In the first year of this study, the focus was placed on waste disposal and management, including incineration, landfill, ash treating / reuse, covering risk assessment of air emissions and soil and groundwater contamination.

For landfill, 13 landfills were assessed in this study, and eight were slightly higher than 10^{-6} , with the carcinogenic risks $2.45 \times 10^{-6} \sim 3.42 \times 10^{-7}$ and non-carcinogenic risks $1.52 \times 10^{-3} \sim 2.13 \times 10^{-4}$. In the incineration plant risk assessment, the carcinogenic risks were about 10^{-7} and the hazard quotients were less than 10^{-3} . In addition, the risks of the treated ash aggregate for construction workers were generally acceptable; the risks of the treated ash aggregate during construction for the residents did not exceed 10^{-6} and 1; during the use of the road, all risks received by the residents were generally acceptable, except for chromium.

Due to the lack of information, some of the risk sources could not be computed precisely. However, an assessment framework for the waste management system has been developed. It employed the state-of-art risk quantification tools to calculate risks for exactly known sources. The studied system will be expanded to cover the life stages of materials and develop the integrated assessment methodology.

一、前言

為了掌握環境中日積月累的釋放量及存量，提供物質在環境中流動的相關訊息，利用有害污染物存量直接被棄置於環境中或隨其他物質被釋放到環境中，所帶來人類長期暴露所導致的風險，例如鉻、鎘等金屬的使用等，提供一個可靠且完整的台灣地區整合性風險之時空分佈，完整且可靠的呈現整體性健康風險評估方法去評估人類總體活動過程中所承受來自某一物質的風險，有助於管理決策之制訂與評估。而以往國內外關於風險評估的問題都將焦點集中在個別的程序（如焚化處理或是掩埋處理）風險評估的問題。物質在人類活動中流佈，及其間風險的相關與物質在環境中對人體的總風險的問題是甚少論及的。隨著物質的使用越來越多元，人類活動越來越複雜，人體暴露所接觸的污染源也越來越多樣（使用、廢氣、製成），物質的總風險也就更顯得重要。因此本計畫第一年首先探討風險評估的現況，著重於廢棄物處理程序中現行的評估風險流程。廢棄物處理程序風險評估包括項目：焚化處理、掩埋處理、灰渣處理/再利用，不論是空氣排放的風險評估或是土壤地下水污染的風險評估，皆仔細評估量化其風險值。

二、文獻回顧

目前風險評估方法多考慮特定場址(site-specific)的污染源，也就是實地風險評估方法，表現出非常詳盡的空間差異。考慮現實發生可能影響狀況，將污染物在環境中可能傳輸的介質篩選出，以進行環境傳輸模式或多介質模式的選取，以利後續的暴露評估與風險量化的工作。目前已確定，污染物會存在於水、空氣及土壤中，經由環境傳輸機制，包含大氣擴散、地表水與地下水傳輸傳至受體周界環境濃度，再經各暴露途徑危害受體。

實地性風險評估主要是評估特定污染源及其影響受體之危害。在實地性風險評估中，由於其特徵為特定性污染源，因此其影響範圍有限，此類評估架構常以受體所在位置作為區分，主要分為場址內與場址外。先由情境假設設定其傳輸暴露情境，包含污染源、污染源至各環境介質中濃度、傳輸過程、暴露途徑以及最後所估算的受體承受風險。而場址內外差別在於有無介質傳輸過程。場址內被評估為直接暴露，當情境評估其受體在於廠址內即為受體位置與污染源位置於同一地方，則可以初步得知此受體所接受濃度為直接暴露於污染源環境介質中的濃度。場址內直接接收環境介質濃度的暴露，包含土壤到揚塵、揮發物有機物及誤食之土壤量等；場址外為間接暴露，如上所述當受體位置與污染源位置於不同一地方，污染物經介質傳輸過程後至受體處污染物濃度，除了污染源濃度影響介質濃度外，由於污染源及受體位置並非在同一地方，因此可知各介質濃度會因各介質傳輸後影響受體。而在場址外，污染源至環境介質內後，經環境傳輸人體暴露後，期間經傳輸過程後至受體處的污染濃度對人體造成危害，這其中囊括了污染物特性、環境傳輸、暴露情境等都會影響其濃度變化污染場址透過地下水、空氣傳輸等，甚至到食物鏈中累積，受體經由吸入、飲用、食入等暴露途徑吸收來自污染源的有害物質。因此可以確定實地性風險評估方法通常用以模擬精細之污染源與其影響之受體間的衝擊關係。常用於評估土壤地下水污染及燃燒焚化場所之風險（環保署，2006；工研院，2006；陳彥全，2007）。

國內外受評估土壤地下水污染廠址中，多以掩埋場，如樹林掩埋場混合掩埋飛灰之影響（吳聲耀，2006）；或是受污染廠址復育（Ma, 2002; Chen, 2005），如美國 Superfund 評估之場址；以及底渣再利用等與土壤地下水相關之污染源（台

大嚴慶齡工業研究中心，2007) 為評估目標。此類污染源皆是土壤受到污染，土壤內污染物經由滲透進入地下水或是揮發揚塵進入空氣中，再透過大氣擴散、地下水傳輸等環境傳輸特性污染相關之食物鏈或影響受體吸入之空氣及使用之水體。雖評估污染源性質相同(皆為土壤污染源)，環境傳輸因子相同，但也會因為考慮因子的精密度及估算環境濃度之精準度，而有不同的評估流程。

另外國內外也以多次引用風險評估評估方法針對燃燒焚化場址做風險量化的工作。評估項目有焚化爐，如樹林、新竹、高雄、台中、木柵等焚化廠(Ma et al., 2002)；或是針對鋼鐵工業以及光電業對環境及人體之影響，如小港地區風險評估或中國鋼鐵風險評估(高雄市環保局，2005)。此類污染源皆是煙道排放，污染物經由煙囪排放置空氣中，經由氣象及地面高層之影響，經由大氣傳輸及稀釋等作用沈降至地面土壤及水體，進而在環境介質中交換，進一步影響到食物鏈，經由攝食、吸入等暴露途徑危害人體。由於空氣是不停的流動著，因此風速、流布距離、與污染物經歷時間之間的關係是極需考量的因子。

其中美國環保署 Office of Solid Waste(OSW) 已發展了多暴露途徑且特定污染場址之人體健康風險評估，其主要是針對燃燒焚化場址，此研究為 Human Health Risk Assessment Protocol(HHRAP) (USEPA,2005)。此類風險推估方法，主要由大氣擴散模式結合環境多介質模式，計算周圍居民的人體健康風險。首先，藉由大氣擴散模式推估各污染源之煙囪排放出含有污染物的廢氣後，經由大氣擴散傳輸計算出周圍各地區的污染物空氣濃度與乾溼沉降量，將空氣擴散的結果經由 GIS 地理資訊系統整理後，同時配合現地相關環境與居民習性資料，將所有參數輸入環境多介質模式，計算各污染物在空氣、土壤、水體等不同環境介質之間的交互傳輸，最後經由呼吸與各項飲食等暴露行為接觸到周圍居民，以評估各排放源所釋出之污染物對鄰近民眾之致癌與非致癌健康風險，進一步以風險評估結果，作為建議或研擬相關管制標準的基礎。

三、研究方法

關於健康風險評估流程的規範與架構，以1983年美國國家研究委員會及國家科學院(NRC-NAS) (National Research Council, 1983)所提出的評估方法，是目前最為被廣泛採納使用的。依其所發表的內容，將風險評估流程分為以下四步驟(圖1)，包括：危害性鑑定(Hazard identification)、暴露評估(Exposure assessment)、劑量/效應評估(Dose-response assessment)、風險度推估(Risk characterization)，以下進一步詳細說明：



圖1 風險評估流程圖

1. 危害性鑑定

此步驟包含兩個重點，一是辨識某特定化學物質可能產生健康損害的種類或

疾病，二是了解產生傷害或疾病的可能暴露情況，因此，就需要知道化學物質在人體內的傳輸途徑，以及與器官組織或細胞間交互作用的相訊息，所以進行危害性鑑定時，應針對所有可能對環境造成影響的物質，根據其物化特性與毒性做調查規劃，並進一步探討其來源與生成機制。由於各研究方法之結論經常並非決定性，甚至是互為衝突的，需要結合多種研究，評估各證據之強度與比重(weight of evidence)綜合評判，以提出某污染物是否可能危害健康之建議。

2. 暴露評估

實際測量或模擬計算人體在環境中受到某毒性物質之暴露程度。欲推估暴露量需要蒐集的資料包括污染物之實際濃度、重要的暴露途徑、污染物進入人體的方式、實際接收的內在劑量、及受暴露的人口大小及特性與暴露時間。一般而言，本階段主要以污染物質之傳輸與宿命以及相關人群之生活型態為主要之分析項目，相關因子則主要考量為：與排放相關之控制參數、污染物質之排放量與排放點、以及累積或衰變分解之各項因子。

以各介質間之關鍵作用連結其他介質，最後得到各環境介質中的汙染物濃度，其中兼顧了食物鏈轉換累積後的影響，可以獲得一個界接近實地情況的暴露風險。最後，結合居民與接觸介質，例如各類食物之接觸率與污染物在各接觸介質中之濃度，估計評估區域內之民眾經由各途徑的暴露劑量，其主要計算公式如下：

$$ADD_{ij} = [C_i] \times \left[\frac{IU_{ij}}{BW} \right] \times \frac{EF \times ED}{AT}$$

ADD_{ij}：平均每天從接觸介質 i 暴露途徑 j 接觸之劑量(mg-kg/d)

C_i：污染物於接觸介質（如飲用水、食物）之濃度(mg/L)

IU：吸收頻率（如呼吸頻率、飲水量）(L/d)

EF：人與接觸介質之接觸頻率(d/yr)

ED：人與接觸介質之接觸期間(yr)

AT：平均時間(day)

3. 劑量/效應評估

劑量效應評估主要在評估某族群暴露在毒性物質環境中，其劑量與傷害或發生疾病的對應關係。劑量為吸收有毒物質的量，而反應的程度與不同劑量有關，劑量反應的曲線基於兩點主要假設：(1)當劑量增加時，反應隨之增加；(2)劑量低於某值不會產生反應，該劑量稱為閾值(threshold dose)。一般的風險評估不另作劑量反應評估，而是以完整可信的資料庫作為此工作項目背景資訊，風險發生的可能性便是由暴露劑量多寡決定。美國國家科學院將劑量反應關係定義為「物質的劑量與人類暴露產生不良健康效應發生率之間的關係，並以人類暴露量的函數關係表示該效應的發生率」。

目前在健康風險評估中，污染物的毒性被分為致癌性 (carcinogenic) 及非致癌性 (non-carcinogenic) 兩大類。其中致癌毒性因子 (carcinogenic toxicity factor) 的計算，以劑量反應曲線的斜率，來估計平均每增加一個單位劑量所增加的致癌機率有多少，因此又稱為致癌斜率因子 (cancer slope factor, 簡稱CSF)；另外，非致癌毒性因子 (non-carcinogenic toxicity factor) 則以閾值方法 (threshold approach) 計算，又稱為參考劑量 (reference dose, 簡稱RfD) (Integrated Risk Information System, IRIS)。

4. 風險度推估

風險評估的最後步驟為風險特性描述，美國國家科學院的定義為『在暴露評估中所描述之各種人體暴露狀況之下，估計健康效應之發生率之過程。藉著結合暴露評估及劑量反應評估來進行，先前步驟之不確定性的綜合效應，在此步驟中需加以說明』。

風險特徵描述應該提供一個可靠且有用的定量值給環保機關，做為政策的依據之一。應該包含有風險管理在非技術性上有關減少技術項目的討論。它是一個科學的估量以提供風險管理在大眾健康覺得上的資訊。因此風險特徵描述需整合上述之危害性鑑定、劑量反應評估及此風險評估之暴露情境、環境傳輸及暴露途徑，且完整的提供資訊達到民眾交流目的。

圖2為實地性風險評估之基本流程，此流程會隨著污染源及受體間關係的差異而有所調整。

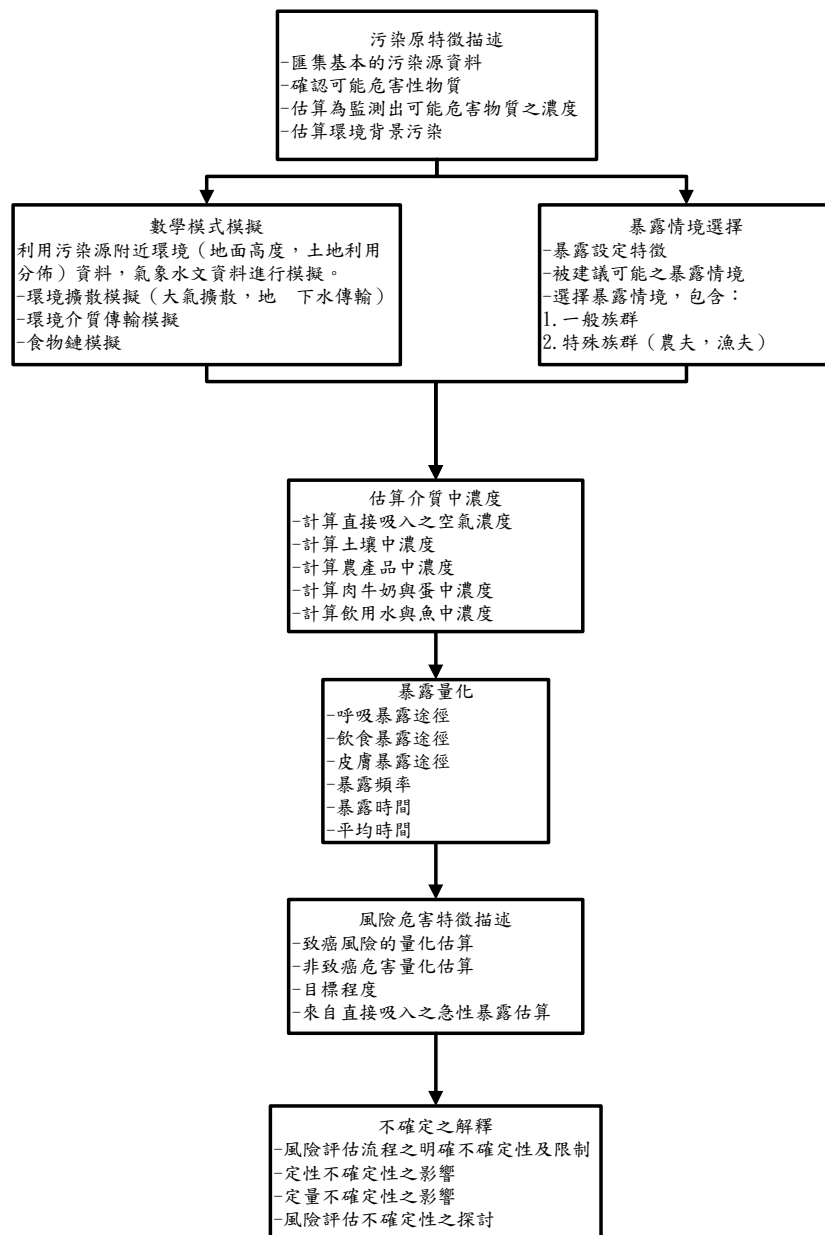


圖2 風險評估流程

四、結果

廢棄物處理程序中，主要包含掩埋場、焚化廠及在利用處理程序，因此於本研究初步評估結果中，將分別估算掩埋場可能的風險評估結果、台灣某縣市的風險評估結果及底渣運用於道路鋪設時可能的風險。

本節以多介質風險評估方法探討 A 縣焚化廠以及各掩埋場所造成的健康危害程度。除了使用適當的模式以外，風險量化工作需要大量資訊，包括排放源特性、環境狀況以及受體暴露條件等。現階段本研究因受限於資料的不足，尚未進行深入的實況評估，乃結合可取得的現況資料與一般較為保守的暴露情境設定，作為篩選式的初步評估，並據以判斷是否有進一步分析的必要。

在焚化廠風險評估方面，需取得的資料包括焚化廠煙道排放濃度、氣象、地形及環境條件、一般民眾暴露參數(如呼吸率、各類食物攝食率等)；而缺乏各掩埋場的滲出水質量、掩埋場內部結構、地下水水文地質條件等資料。對於這些闕如的項目，首先代以台灣其他地區的資料(如以具有較為完整資料的山豬窟作為各掩埋場排放源特性的代替)，其次則以模式中較為保守的參數設定為假設。因此，各掩埋場的特性無法顯出，而使得掩埋場的大小成為左右其風險值的影響因子。

● 掩埋場風險評估結果

由於 A 縣各掩埋場無公開的滲出水監測資料，無法得知實場滲出水量與水質。因此本研究以台北市山豬窟衛生掩埋場的滲出水監測濃度作為 A 縣境內掩埋場之滲出水水質，山豬窟掩埋場以家戶垃圾為主，並有詳細的監測數據，A 縣境內掩埋場亦以處理家戶垃圾為主，因此假設滲出水水質與山豬窟掩埋場可能相似。山豬窟滲出水濃度乃以 2002~2004 年平均監測資料作為代表。人體暴露相關資訊則以 A 縣實際數據為主，假設 A 縣中民眾的暴露情況相同，所以以 A 縣全縣的平均值代表，不再細分各鄉鎮市的特殊暴露情況。

滲出水為透過地下水傳輸而流布於環境中，其中滲出水挾帶之重金屬可能造成人體健康危害較受注意，相關資料也相對完整，故掩埋場的風險評估以鉛、鎘、鉻、汞、砷五種污染物質為評估對象，利用 MMSOIL 多介質風險評估模式 (USEPA,1996) 進行估算。

以 MMSOIL 多介質風險模式計算結果，總共估算 A 縣內 13 座掩埋場，其中有八座略高於 10^{-6} ，總致癌風險在 $2.45 \times 10^{-6} \sim 3.42 \times 10^{-7}$ 之間，非致癌風險則為 $1.52 \times 10^{-3} \sim 2.13 \times 10^{-4}$ 。致癌風險標準值 10^{-6} 以及非致癌風險標準值 1，因此 A 縣各掩埋場的非致癌風險都在標準值上下。

比較不同危害物質的健康風險，以重金屬鎘所造成的風險最高，也幾乎是總風險值的主要貢獻來源，以 A 市掩埋場為例，如表 1。其中汞並無致癌風險，且鉛無非致癌風險，因此兩者的總風險危害潛力最低。另外探討不同暴露途徑的風險危害，不同於焚化廠的風險主要來自喝水與攝食魚類兩種途徑，在桃園縣案例，掩埋場的風險以鎘金屬為主，暴露途徑則主要為攝食蔬菜，表示若地下水受污染時，重金屬鎘的健康危害應特別注意，如鎘米事件所造成的痛痛病。

表 1 A 市掩埋場各危害物質之風險值

污染物	As	Cd	Cr	Hg	Pb
致癌	1.34E-07	2.26E-06	5.19E-08	0	1.26E-10
非致癌	6.96E-04	7.02E-04	9.61E-05	2.44E-05	0

● 焚化廠風險評估結果

在焚化廠風險評估方面，本研究依照 A 縣中焚化廠的基本資料，利用 ISCST3 大氣擴散模式進行污染物擴散模擬，後利用 GIS 空間分佈求得焚化廠影響範圍之

濃度分佈 (USEPA,2005) (圖 3)。

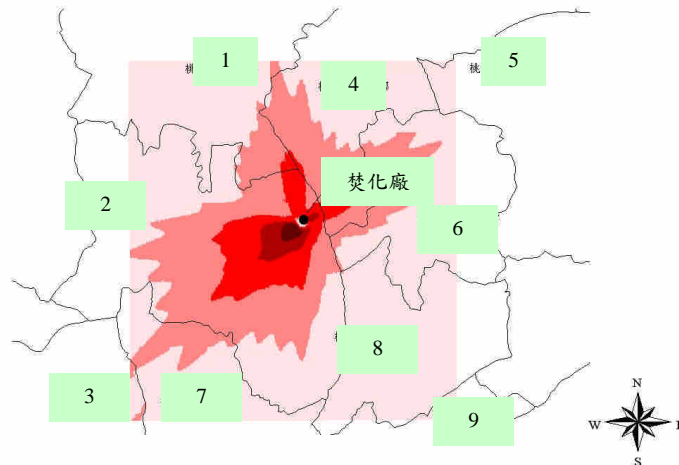


圖 3 焚化廠空氣污染濃度分布模擬結果

整體來說，此焚化廠造成的人體健康風險為平均致癌風險約 10^{-7} ，非致癌危害商數則小於 10^{-3} 。由於中壢市距離焚化廠最近，所受到汙染影響也最大，其次為平鎮市、楊梅鎮。雖然中壢市的健康風險危害最嚴重，但都在致癌風險安全範圍 10^{-6} 以及非致癌危害商數 1 之內，表示該焚化廠煙道排放氣體並不會對當地民眾造成健康方面的明顯危害。在污染物方面，比較戴奧辛、鉛、鎘以及汞四種危害性物質，其中致癌風險貢獻最大者為戴奧辛，其貢獻量幾乎是總致癌風險（大於 99%）；而非致癌風險方面，汞的貢獻量大於鎘金屬。影響範圍九鄉鎮市的風險量化結果如表 2 所示。

關於暴露途徑情境，假設當地居民為自給自足狀況，所有食物以及飲水都來自當地出產，而其暴露量如食用牛肉 5.34 g/day，食用蔬菜 26.9 g/day，食用魚肉 19.63g/day 等資料來自國民營養調查報告結果（文獻）。多介質多暴露途徑模式模擬結果，其中最大貢獻量主要來自食用魚肉，大部分皆佔 80% 左右，其次是食用雞蛋與雞肉。在非致癌風險方面，最大暴露途徑亦是食用魚肉，但平均貢獻量比例較少，約為 40~50%，其次是食用蔬菜，另外飲用水及直接吸入皆有部份影響。污染物經由食物鏈進入人體產生健康風險，在模式中，各食物鏈的機制不盡相同，生物累積因子也各異，造成各種食物的污染濃度不同。而食用的魚類假設來自於當地地表水體，即南崁溪，在模式中，魚類直接接觸污染水體與淤泥層，導致魚肉累積的污染物濃度相較為高，不似其他食物經由不同的環境傳輸才累積於生物體內，因此模擬結果以食用魚肉為最大的暴露來源。

表 2 焚化廠之各鄉鎮市風險量化結果

鄉鎮名	致癌風險				非致癌風險		
	戴奧辛	Pb	Cd	總致癌風險	Cd	Hg	總非致癌風險
1	1.04E-07	1.41E-10	5.79E-10	1.04E-07	9.10E-05	1.32E-04	2.23E-04
2	5.80E-07	1.11E-09	1.33E-09	5.82E-07	9.03E-04	2.28E-03	3.18E-03
3	1.99E-07	3.54E-10	6.92E-10	2.00E-07	2.63E-04	3.82E-04	6.45E-04
4	1.86E-07	3.31E-10	9.16E-10	1.87E-07	2.36E-04	3.59E-04	5.95E-04
5	9.58E-08	1.20E-10	3.27E-10	9.62E-08	8.25E-05	7.77E-05	1.57E-04
6	1.44E-07	2.38E-10	6.62E-10	1.45E-07	1.66E-04	1.77E-04	3.43E-04
7	2.19E-07	3.89E-10	6.47E-10	2.20E-07	2.97E-04	5.05E-04	8.02E-04
8	9.88E-08	1.23E-10	2.80E-10	9.92E-08	8.79E-05	9.79E-05	1.86E-04
9	7.70E-08	7.26E-11	1.76E-10	7.72E-08	4.97E-05	4.28E-05	9.25E-05

● 底渣再利用風險評估結果

本研究模擬20年間，底渣經由土壤滲出及地下水傳輸(Aberg et al,2006; Johnson,1996)到受體間的濃度。污染源情境分為道路鋪設與管溝回填(Jackman,1995; Abbott,2003);針對施工員工與鄰近居民為主要受體(黃錦明, 2006)。另外在鄰近居民方面又可分為道路施工期與道路使用期。受體包括施工員工之直接影響;就受影響之居民而言，利用SESOIL與AT123D(Environmental Software Consultants, Inc.,2006; Bonazountas, et al.,1981;1984; Yeh, 1981)模擬距離污染源15公尺處地下水井進行灌溉之地下水飲用及食物鏈傳布(Streng et al.,2002)之影響，及短時間內應用場址來自土壤揚塵至100公尺外之鄰近居民受到空氣傳輸之影響。相關污染物為砷、鎘、鉻、銅與鉛，其濃度分別為117、6.15、395.5、3037.5與1920(mg/kg)(環保署，2004)。

表3與表4中呈現出污染源施用期間對鄰近居民之影響，其暴露設定為每人每年暴露365天，平均暴露工作70年。重金屬風險評估方面，鉻是需要注意的物質，其風險值分別為鋪設道路使用期 $4.73E-06$ 與管溝回填使用期 $2.33E-06$ ，皆略大於 10^{-6} ;而在非致癌風險的部分各金屬評估結果皆小於1。飲用水來自地下水源之的食入之評估途徑其貢獻最大，接著是洗澡水的接觸與誤食。另外在洗澡時呼吸方面，由於本研究評估污染物為重金屬，因此並無此顧慮。其中空氣揚塵的吸入可判定為主要暴露途徑;其中鉻的危害亦是最大的。在地下水暴露途徑中，由於鎘在土壤與地下水中的特性，其影響範圍未達15公尺之地下水井，因此在本研究中於地下水之危害並未評估;而鉛仍吸附於土壤中，因此未經由地下水傳輸至較遠的地下水井。

五、結論

13座掩埋場，總致癌風險在 $2.45 \times 10^{-6} \sim 3.42 \times 10^{-7}$ 之間，略高於焚化廠的風險結果，且部份掩埋場略高於 10^{-6} 。另外，由於兩種污染來源(焚化廠、掩埋場)的污染物性質與環境傳布狀況都不相同，如焚化廠之戴奧辛污染為最大貢獻來源，初步評估以食用魚肉為主要暴露途徑;而掩埋場則以重金屬鎘造成的風險較為顯著，暴露途徑以食用蔬菜為主要來源。這些差異可在對此二種污染源進行風險管理時納入考量，針對不同污染物以及不同暴露環境發展管理策略。

另外，經由保守的人體健康風險評估可以得知底渣再利用對施工員工之影響，其致癌與非致癌風險皆在可以接受的風險範圍內，但對施工員工而言，空氣揚塵的吸入的危害是最需要注意的，因此建議施工員工工作時要確實配戴口罩等相關保護措施，以減低此途徑之危害。再者，污染源施工期間對鄰近居民之影響，致癌與非致癌風險皆未超出 10^{-6} 與1，空氣揚塵經擴散後被鄰近居民吸入亦是重要暴露途徑，此危害可藉由施工期間灑水減低揚塵量來減低其影響。道路使用期間對鄰近居民之影響，由於暴露期非常的長，因此更需要受到重視。在致癌風險，鉻的風險值分別為鋪設道路使用期 $4.73E-06$ 與管溝回填使用期 $2.33E-06$ ，皆略大於 10^{-6} ;而在非致癌風險的部分各金屬評估結果皆在可以接受的範圍內。由於鉻之致癌風險受到關注，除了鉻本身的物化特性外，其毒理性質亦是重大影響因子之一，因此應從底渣再利用之前製處理著手，減低底渣中重金屬之含量，或經由前處理使重金屬不易滲出，以減低易滲出之重金屬滲入地下水層而造成之危害。

此初步評估結果雖因資料缺乏的限制，不能反映真正的風險危害程度，但因各項廢棄物處理程序風險數值接近於一般可接受風險值(焚化廠與掩埋場)，有必要進一步調查實際狀況以釐清實情，否則無法排除危害可能性。例如，若真

表3 道路鋪設使用期對鄰近居民之風險評估

污染物種類	污染物名稱	暴露途徑									總致癌風險
		地下水暴露								空氣傳輸吸入	
		飲用水	誤食洗澡水	食肉	喝牛奶	吃蔬菜	吃作物	洗澡接觸水	洗澡呼吸		
重金屬	砷	8.52E-09	4.27E-11	1.05E-13	7.49E-13	2.89E-10	9.77E-14	1.30E-11	-	3.27E-19	8.86E-09
	鎘	-	-	-	-	-	-	-	-	4.77E-21	4.77E-21
	鉻	4.53E-06	2.27E-08	8.31E-09	7.07E-09	1.54E-07	2.50E-11	6.94E-09	-	2.00E-18	4.73E-06
	銅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	鉛	-	-	-	-	-	-	-	-	9.94E-21	9.94E-21

污染物種類	污染物名稱	暴露途徑									總非致癌風險
		地下水暴露								空氣傳輸吸入	
		飲用水	誤食洗澡水	食肉	喝牛奶	吃蔬菜	吃作物	洗澡接觸水	洗澡呼吸		
重金屬	砷	1.89E-05	9.48E-08	2.34E-10	1.66E-09	6.42E-07	2.17E-10	2.90E-08	-	7.27E-16	1.97E-05
	鎘	-	-	-	-	-	-	-	-	7.58E-17	7.58E-17
	鉻	3.60E-03	1.80E-05	6.60E-06	5.61E-06	1.22E-04	1.98E-08	5.50E-06	-	4.87E-16	3.75E-03
	銅	-	-	-	-	-	-	-	-	1.87E-14	1.87E-14
	鉛	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表4 管溝回填使用期對鄰近居民之風險評估

污染物種類	污染物名稱	暴露途徑									總致癌風險
		地下水暴露								空氣傳輸吸入	
		飲用水	誤食洗澡水	食肉	喝牛奶	吃蔬菜	吃作物	洗澡接觸水	洗澡呼吸		
重金屬	砷	1.42E-10	7.10E-13	1.75E-15	1.25E-14	4.81E-12	1.62E-15	2.17E-13	-	4.91E-19	1.47E-10
	鎘	-	-	-	-	-	-	-	-	7.16E-21	7.16E-21
	鉻	2.23E-06	1.12E-08	4.10E-09	3.49E-09	7.58E-08	1.23E-11	3.42E-09	-	3.00E-18	2.33E-06
	銅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	鉛	-	-	-	-	-	-	-	-	1.49E-20	2.53E-20

污染物種類	污染物名稱	暴露途徑									總非致癌風險
		地下水暴露								空氣傳輸吸入	
		飲用水	誤食洗澡水	食肉	喝牛奶	吃蔬菜	吃作物	洗澡接觸水	洗澡呼吸		
重金屬	砷	3.15E-07	1.58E-09	3.89E-12	2.77E-11	1.07E-08	3.61E-12	4.82E-10	-	1.09E-15	3.28E-07
	鎘	-	-	-	-	-	-	-	-	1.14E-16	1.14E-16
	鉻	1.77E-03	8.88E-06	3.25E-06	2.77E-06	6.01E-05	9.77E-09	2.71E-06	-	7.31E-16	1.85E-03
	銅	-	-	-	-	-	-	-	-	2.81E-14	2.81E-14
	鉛	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

實滲出水濃度過高，且滲出水量大，以目前未收集處理的情況，任由其滲漏污染附近水體，一旦與民眾產生接觸，可能造成危害。

為進一步研究廢棄物處理潛在危害，未來宜針對各項廢棄物處理由成以及週遭環境特性進行現地調查，才能得到準確性較高，符合實地的風險量化結果。建議未來可規劃以下兩項工作：(1) 污染源質量的掌握，實際採樣各污染源相關資訊，作為風險評估的基礎資訊；(2) 暴露途徑界定，在風險評估相關文獻中，暴露途徑的決定與設計為不確定性最高且影響較大的部份，應就各廢棄物處理流程影響範圍內環境利用狀況、民眾生活習慣等實地考察，了解真實可能的暴露狀況。

參考文獻

- Abbott,J., Coleman,P., Howlett,L., Wheeler,P.,”Environmental and Health Risk Associated with Use of Processed Incinerator Bottom Ash in Road Construction”,BREWEB,2003.
- Aberg, A., Kumpiene, J. and Eck, H., “Evaluation and prediction of emissions from a road a road built with bottom ash from municipal solid waste incineration(MSWI),” Science of the Total Environment, Vol.355,pp.1-12(2006).
- Bonazountas, M., and J. Wagner (Draft), “SESOIL: A Seasonal Soil Compartment Model,”Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Massachusetts, prepared for the US. Environmental Protection Agency, Office of Toxic Substances(1981;1984).
- Chen,Y.C., Ma, H.W., “Model comparison for risk assessment: A case study of contaminated groundwater,” Chemosphere,pp.751-761(2005).
- Environmental Software Consultants, Inc., “SEVIEW :Integrated Contaminate Transport and Fate Modeling System—User’s Guide,” Madison, Wisconsin, January (2006)
- Jackman, T.M., Roffman, H.K.,”Assessment of Potential Human Health and Environmental Effects From The Beneficial Use of American Ash Recycling Corporation’s Treated Ash Aggregate”, Dow Environmental INC., dei project number 2581.000, 1995.
- Johnson, C.A., Kersten, M., Ziegler, F. and Moor, H.C., “Leaching Behaviour and Solubility Controlling Solid Phases of Heavy Metals in Municipal Solid Waste Incinerator Ash,” Waste Management, Vol.16, pp.129-134(1996).
- Ma H.W. “ Stochastic multimedia risk assessment for a site with contaminated groundwater,” Stochastic Environ. Res. Risk Assess., Vol. 16, pp. 464-478 (2002).
- National Research Council, “Risk assessment in the Federal Government : Managing the Process. NAS-NRC Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health,” National Academy Press, Washington,DC (1983).
- Streng, D.L., Chamberlain, P.J., “Multimedia Environmental Pollutant Assessment System (MEPAS): Exposure Pathway and Human Health Impact Assessment Model,” Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington(2002).
- USEPA, 1996. MMSOILS Model: Multimedia Contaminated Fate, Transport, and Exposure Model: Documentation and User’s Manual Version 4.0. Office of Research and Development, Washington, DC.
- USEPA,”Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities”,2005.

Yeh, G. T., "AT123D: Analytical Transient One-, Two-, and Three-Dimensional Simulation of Waste Transport in the Aquifer System," Oak Ridge National Laboratory, Environmental Sciences Division, Publication No. 1439, March(1981).

黃錦明，"建立一般廢棄物焚化底渣再利用決策方法論之研究"，博士論文，台灣大學環境工程研究所（2006）。

吳聲耀，"飛灰固化物掩埋場中氡與各滲漏之健康風險評估"，碩士論文，台灣大學環境工程研究所（2006）。

陳彥全，"健康風險評估中不確定性之量化與降低"，博士論文，台灣大學環境工程研究所（2007）。

行政院環保署，土壤地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引（2006）。

行政院環保署，土壤及地下水污染場址健康風險評估評析原則參數使用指引（2005）。

行政院環保署，廢棄物焚化灰渣材料化技術研究，台灣大學與中華大學（2004）。

工業技術研究院，土壤及地下水污染場址風險評估系統填寫指引（2006）。

台大嚴慶齡工業研究中心，底渣再利用健康及環境風險評估-第一年（期末報告），國賓大地環保事業股份有限公司（2007）。

高雄市環保局，九十四年度「高雄市戴奧辛監測及管理計畫」（2005）。

計畫成果自評

本研究完成預期之廢棄物管理系統風險評估的建置，尤其在於灰渣資源化再利用的部分。灰渣資源化再利用過程可能的風險，向來存有疑慮，而國內外仍缺乏完整的評估。該部分的研究已在一國際會議中發表，正在期刊投稿準備中。本年度整體廢棄物管理系統評估方法的確立，一方面在實務上，可釐清現行相關處理及處置作法所造成的環境衝擊，一方面在學術上，作為整合性評估方法的雛形，進一步擴大系統範圍，建立整合評估架構。本研究的繼續發展，將可為國內物質的使用，提出重要的管理方向。