

科技部補助
大專學生研究計畫研究成果報告

計 畫
名 稱 : 學童暴露於河川揚塵中重金屬之風險評估

執行計畫學生：張琇慈
學生計畫編號：MOST 109-2813-C-040-002-E
研究期間：109年07月01日至110年02月28日止，計8個月
指導教授：陳詩潔

處理方式：本計畫可公開查詢
執行單位：中山醫學大學公共衛生學系（所）
中華民國 110年03月05日

摘要

河川揚塵會吸附重金屬、有機物等，這些物質會對人體造成危害，而濁水溪河川下游地區常出現廣闊面積的裸露河床，在枯水期間辦隨季風易出現河川揚塵(River dust)現象，使周遭居民與學童有潛在的健康危害。本研究目的為探討濁水溪附近國小學童揚塵中重金屬暴露量評估及推估非致癌風險與致癌風險。本研究採樣日期為 103 年 6 月 9 日至 6 月 12 日、103 年 9 月 29 日至 10 月 2 日及 103 年 11 月 24 日至 11 月 27 日，採樣地點為雲林縣二崙鄉、崙背鄉以及古坑鄉的國小，收集教室和住家室內外塵土及微粒中重金屬。塵土中重金屬以吸塵器採集 5 種重金屬濃度(Pb, Ni, Cr, As, Cd)，每一教室和住家分別於三種不同位置採集相同面積塵土，以濾紙前後重量估算室內塵土重量，而微粒中重金屬室內利用靜音採樣器，室外則使用高流量採樣器採集。以攝入率、吸入率、暴露頻率等推估暴露劑量，暴露期間分為暴露六年(國小就學期間)及暴露十八年兩種情境，並利用蒙地卡羅模擬法中靈敏度分析確定在河川揚塵中對於孩童影響最大因子。結果顯示五種金屬每日暴露劑量之攝入途徑大於吸入途徑，危害指數評估不論是暴露六年或十八年皆小於 1，致癌風險加總皆落在 10^{-6} ~ 10^{-4} 間，為可接受致癌風險。靈敏度分析結果顯示，對於暴露六年，暴露頻率(EF)對於 HI 最為相關($r=0.5$)，其次為體重因子；而塵土中鉻金屬(Cr)對於 CR 最為相關($r=0.5$)。對於暴露 18 年，男性對於體重(BW)對於 HI 最為相關($r=0.5$)，女性則為暴露頻率(EF)；而塵土中鉻金屬(Cr)對於 CR 最為相關($r=0.5$)。

因此，二崙、崙背及古坑地區之孩童在國小六年期間，甚至暴露於河川揚塵中 18 年中皆在可接受風險範圍內，不會對健康造成不良效應。

關鍵字: River dust, Heavy metal, Health risk assessment, Monte Carlo Simulation

目錄

一、 前言	5
1.1 研究動機	5
1.2 研究目的	5
二、 文獻回顧	6
2.1 揚塵介紹	6
2.2 危害鑑定	6
2.3 劑量反應評估	7
2.4 暴露評估與風險特性化	9
三、 研究方法及步驟	12
3.1 研究地點、對象及時間	12
3.2 採樣方法	12
3.2.1 塵土中重金屬	12
3.2.2 揚塵中重金屬	13
3.3 風險推估方法	15
3.3.1 暴露情境規劃	15
3.3.2 風險評估	17
3.3.3 非致癌風險	17
3.3.4 致癌風險	17
3.4 蒙地卡羅模擬法及靈敏度分析	18
四、 結果與討論	19
4.1 採樣濃度比較	19
4.1.1 塵土中重金屬	19
4.1.2 微粒中重金屬	19
4.2 暴露六年非致癌效應	21
4.3 暴露六年致癌效應	27

4.4 暴露十八年非致癌效應-----	30
4.5 暴露十八年致癌效應-----	36
4.6 靈敏度分析-----	39
4.6.1 暴露六年靈敏度分析-----	39
4.6.2 暴露十八年靈敏度分析-----	39
五、 結論與建議-----	44
5.1 結論-----	44
5.2 未來研究建議-----	44
六、 參考文獻-----	45

第一章、前言

1.1 研究動機

濁水溪河川下游地區常出現廣闊面積的裸露河床，在枯水期間辦隨季風易出現河川揚塵(River dust)現象，使周遭居民與學童有潛在的健康危害。暴露在懸浮微粒下會影響空氣品質，使能見度降低之外，也會造成許多疾病，粒徑小於 $10\mu\text{m}$ (PM_{10})之懸浮微粒可通過鼻咽喉而進入胸腔，而粒徑小於 $2.5\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$)之懸浮微粒會沉積於肺泡。Kuo et al. (2010)研究指出揚塵中高濃度懸浮微粒(PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$)中會吸附許多重金屬、有機物、酸性微粒，這些物質會對人體造成危害，易感族群為小孩，長期暴露於懸浮微粒下不僅對呼吸系統造成危害，也會增加心血管疾病的風險。且河川揚塵事件頻繁的發生對台灣空氣品質造成影響，引起了環保署(環保署，2009)和許多研究人員的關注(郭等，2010； 林等，2007)。

1.2 研究目的

本研究目的為探討濁水溪附近國小學童揚塵中重金屬暴露量評估及推估非致癌風險與致癌風險。

第二章、文獻回顧

2.1 揚塵介紹

揚塵指河川下游地區常有面積廣闊裸露的河床，在枯水期常會出現乾枯的泥沙，加上東北季風的吹拂下而造成。濁水溪上游地質以頁岩與板岩為主要組成，頁岩是沉積岩中顆粒最細的一種，而地質鬆散，容易被掏刷，是濁水溪平均沖刷深度及泥砂產量大於其他流域的主要原因。當東北季風來臨時，缺少大粒徑礫石覆蓋的裸露河床，其細小顆粒易被強風吹襲，造成大氣中的懸浮微粒(PM₁₀及PM_{2.5})濃度過高。Kuo et al. (2014)指出當日測站測得之PM₁₀濃度>125 µg/m³，則定義該日為河川揚塵事件日。

河川揚塵會吸附重金屬、有機物、酸性微粒，而河床塵土含量高之地殼元素如鐵、鋁、鈣、鎂、錳等，及其他會對人體造成危害之元素如鎳、鉻、砷、鎘等，則稱毒性金屬。

2.2 危害鑑定

身體組織累積過量有毒金屬可導致心血管疾病，並影響神經系統，對人類具有基因突變和致癌作用。揚塵中重金屬對人體危害如表一所示，砷(As)可區分為有機砷及無機砷三價砷、五價砷，以無機砷毒性強，且毒性是三價砷>五價砷，Duker et al. (2005); Lin et al. (2008)指出暴露於砷的人體危害包括心臟疾病、高血壓、肺癌、腎癌、皮膚癌、前列腺癌、免疫機制、造成孩童智力障礙、烏腳病等等。經濟部工業局(2006)指出長時間暴露在含鉻(Cr)的環境中可能會誘發癌症(如肺癌)。鎘(Cd)在人體主要積蓄於腎及肝中，是造成心血管疾病的危險因子，黃(2008)指出過量的鎘能進入骨質與部分鈣交換，使骨骼軟化變型，導致骨折或死亡，或引起痛痛病。Dirk(2012)指出鎳(Ni)會對人體造成接觸性皮膚炎或是肺癌等病變。國家環境毒物中心(2019)研究出鉛(Pb)的毒性主要是影響成人及孩童的神經系統，且孩童比成人更容易鉛中毒，因為他們的神經系統還在發育。

表一、重金屬對人體可能之危害

金屬	對人體之危害	參考文獻
無機砷 (Inorganic As)	心臟疾病、高血壓、肺癌、腎癌、皮膚癌、前列腺癌、免疫機制、造成孩童智力障礙、烏腳病	Duker et al. (2005); Lin et al. (2008)
鉻(Cr)	肺癌、口腔癌、鼻咽癌	經濟部工業局(2006)
鎘(Cd)	痛痛病、高血壓、心肌梗塞	經濟部工業局(2006)
鎳(Ni)	過敏性皮膚炎、肺癌、鼻咽癌	經濟部工業局(2006)、Dirk(2012)
鉛(Pb)	高血壓症, 腎臟及生殖器官損傷	經濟部工業局(2006)、國家環境毒物中心(2019)

2.3 劑量反應評估

IARC(International Agency for Research on Cancer)及 USEPA(United States Environmental Protection Agency)皆定義了各種化合物致癌性分類, 分成五大類, 如表二所示。IARC 將化合物致癌性分為 Group 1、2A、2B、3、4 級, Group 1 為確定為致癌因子, 有充足流行病學證據顯示為人體致癌物, 如砷(As)、鉻(Cr)、鎘(Cd)、鎳(Ni), Group 2A 為極有可能為致癌因子, 流行病學證據有限或不足, 但動物實驗證據充分, 如鉛(Pb)。USEPA 將化合物致癌性分為 Group A、B(B1、B2)、C、D、E, Group A 有足夠證據顯示化合物有致癌性, 其代表金屬為砷(As)、鉻(Cr)和鎳(Ni), Group B1 之人類的流病資料有限, 為人體可能致癌物, 其代表金屬有鎘(Cd), Group B2 缺乏人體流病資料, 但動物毒性資料足夠顯示有致癌性, 代表金屬有鉛(Pb)。

非致癌風險評估常用 RfD(Reference Oral Dose (mg/kg-day))當作參考風險值。而致癌風險評估則用 SF(Slope factor (kg-day/mg))作為評估依據。表三為五種金屬(無機砷、鉻、鎘、鎳、鉛)之攝入及吸入參考劑量(RfD)及斜率因子(SF)。

表二、致癌性分類 (IARC, 2019; USEPA; 2019)

歸類級別(IARC)	歸類說明	金屬種類
1 級: 確定為致癌因子	流行病學證據充分	砷 (As)、五價鉻 (Cr)、鎘 (Cd)、鎳 (Ni)
2A 級: 極有可能為致癌因子	流行病學證據有限或不足, 但動物實驗證據充分	鉛 (Pb)
2B 級: 可能為致癌因子	流行病學證據有限, 且動物實驗證據有限或不足	-
3 級: 無法歸類為致癌因子	流行病學證據不足, 且動物實驗證據亦不足或無法歸入其他類別	-
4 級: 極有可能為非致癌因子	人類及動物均欠缺致癌性或流行病學證據不足, 且動物致癌性欠缺	-

分類(USEPA)	歸類說明	金屬種類
Group A: 人體致癌物	有足夠證據顯示化合物有致癌性	砷 (As)、五價鉻 (Cr)、鎳 (Ni)
Group B1: 人體可能致癌物	人類的流病資料有限	鎘 (Cd)
Group B2: 人體可能致癌物	缺乏人體流病資料, 動物毒性資料足夠顯示有致癌性	鉛 (Pb)
Group C: 人體疑似致癌物	缺乏人體流病資料, 動物毒性資料有限	
Group D: 無法分類是否致癌	無足夠人體及動物毒性資料	
Group E: 非人體致癌物	至少有兩種完整動物毒性試驗或對兩種動物做試驗均是陰性結果, 且在流病上是無顯著疾病盛行率	

表三、人體可接受參考劑量

金屬	RfD _{ing}	RfD _{inh}	SF	參考文獻
砷(As)	3.00×10^{-4}	3.00×10^{-4}	1.50	Li et al. (2014) ; Yang et al. (2018) ; Sharafi et al. (2019) ; Rehman et al. (2020)
鉻(Cr)	3.00×10^{-3}	2.86×10^{-5}	4.20	Li et al. (2014) ; Yang et al. (2018) ; Sharafi et al. (2019) ; Rehman et al. (2020)
鎘(Cd)	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	6.30	Li et al. (2014) ; Yang et al. (2018) ; Sharafi et al. (2019) ; Rehman et al. (2020)
鎳(Ni)	2.00×10^{-2}	2.06×10^{-2}	8.40×10^{-1}	Li et al. (2014) ; Yang et al. (2018) ; Sharafi et al. (2019) ; Rehman et al. (2020)
鉛(Pb)	3.50×10^{-3}	3.52×10^{-3}	8.50×10^{-3}	Li et al. (2014) ; Yang et al. (2018) ; Sharafi et al. (2019) ; Rehman et al. (2020)

2.4 暴露評估與風險特性化

表四為六篇量測不同來源中重金屬之濃度計算其風險的文獻，Li et al. (2014) 收集 2005-2012 年中國礦區塵土中重金屬濃度資料，並計算七種重金屬的致癌及非致癌風險。目的為評估礦區塵土中所含重金屬對人體的健康風險及針對該區狀況給予環境管理建議。Yang et al. (2018) 收集中國 402 個工業地區及 1041 個農業地區塵土中重金屬濃度，計算五種主要污染之重金屬鉛、鎘、汞、鉻、砷對成人及孩童的影響。Sharafi et al. (2019) 研究伊朗米飯中三種重金屬(鉛、鎘、砷)含量，計算致癌及非致癌的風險。Xu et al. (2020) 使用追蹤研究調查中國地區 PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀ 中所吸附之重金屬及其濃度，計算三種不同暴露途徑(攝入、吸入、皮膚接觸)的風險。Rehman et al. (2020) 研究計劃從拉合爾的三種土地類型(住宅、路邊和工業區)塵土樣本中確定 13 種有毒金屬的污染特徵及其相關兒童的健康

風險評估，發現樣本中的鉻，鎘，銅，鎳，鋅和鉛的平均濃度遠高於允許的限值。Cui et al. (2020) 在唐山市市中心收集了 162 個地表塵土樣品，測量了八種重金屬(砷、鎘、汞、鉛、鉻、銅、鋅和鎳)的濃度，了解唐山市地表塵土中重金屬污染及健康風險。兒童和成人的非致癌風險(HI)為砷>鉛>鉻>鎘>鋅>鎳>銅>汞，且兒童的非致癌風險(HI)高於成人。

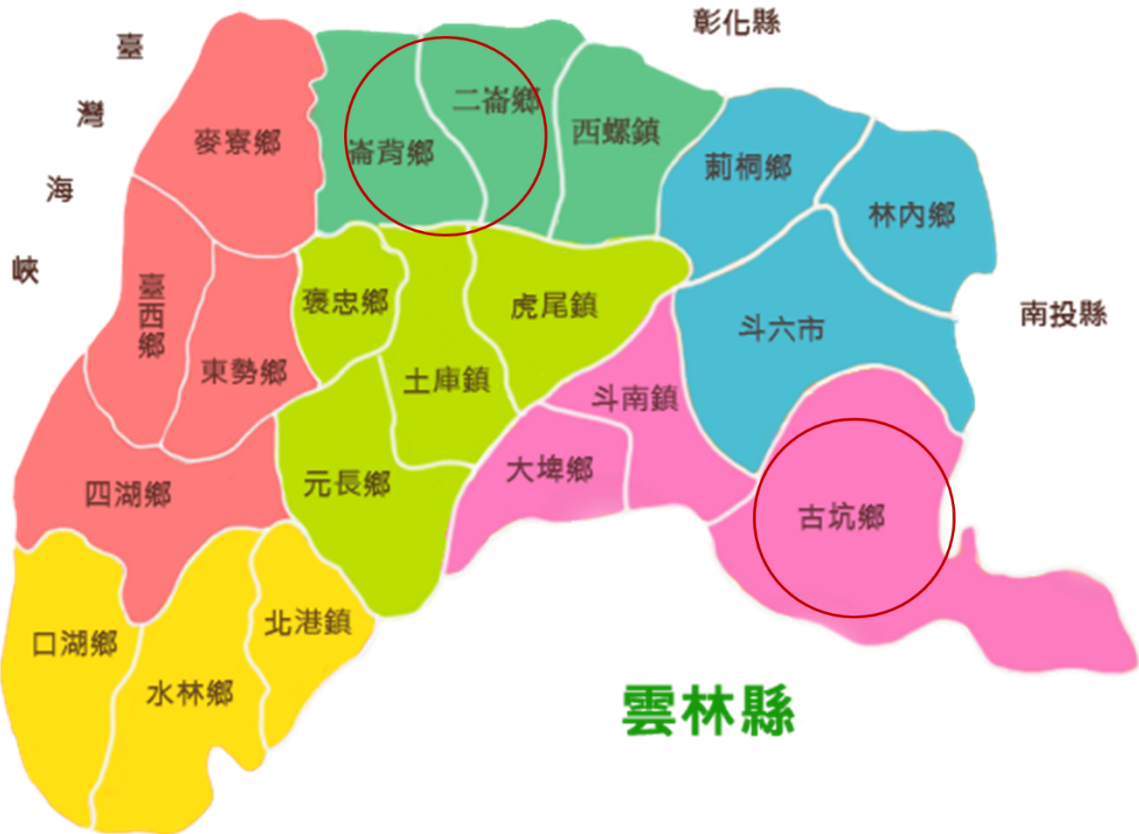
表四、不同文獻之暴露評估與風險量化

文獻	探討重金屬	暴露量評估	致癌及非致癌評估
Li et al. (2014)	鉛、鎘、	$ADI_{I} = \frac{C_s \times SIR \times EF \times ED}{BW \times AT}$	$Risk = ADI \times SF$
	汞、砷、 銅、鋅、鎳	$ADI_{D} = \frac{C_s \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}$	$HQ = \frac{ADI}{RfD}$ $HI = \sum HQ$
Yang et al. (2018)	鉛、鎘、	$ADI_{ing} = \frac{C_s \times IR_s \times EF \times ED}{BW \times AT}$	$LCR = ADI \times SF$
	汞、鉻、砷	$ADI_{dermal} = \frac{C_s \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}$	$HQ = \frac{ADI}{RfD}$ $HI = \sum HQ$
Sharafi et al. (2019)	鉛、鎘、砷	$EDI = \frac{EF \times ED \times IR \times MC}{BW \times AT}$	$ILCR = EDI \times CSF$
			$THQ_{Cd \text{ or } As} = \frac{EDI}{RfD_{Cd \text{ or } As}}$
			$THQ_{Pb} = \frac{EDI}{TDI_{Pb}}$
			$TTHQ = THQ_{Cd} + THQ_{As} + THQ_{Pb}$
Xu et al. (2020)	鉛、鎘、	$CDI = \frac{C \times IR \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$	$CR = CDI \times SFO = IUR \times$
	汞、鉻、	$EC = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{ATn}$	$EC = DAD \times \left(\frac{SFO}{GIABS} \right)$
	砷、錳、鎳	$DAD = \frac{C \times SA \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$	$HQ =$
			$\frac{CDI}{RfDo} = \frac{EC}{RfCi \times 1000} = \frac{DAD}{RfDo \times GIABS}$
Rehman et al. (2020)	鉛、鎘、	$MDI_{ing} = \frac{C \times R_{ing} \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$	$CRI = MDI \times SF$
	鉻、砷、	$MDI_{inh} = \frac{C \times R_{inh} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}$	$HQ = \frac{MDI}{RfD}$
	鎳、銅、	$MDI_{Der} =$	$HI = \sum HQ$
	鋇、釩、鋅	$\frac{C \times SA \times CF \times AF \times ABF \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
Cui et al. (2020)	鉛、鎘、	$ADD_{ing} = \frac{C \times Ingr \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT}$	$R = LADD \times CSF$
	汞、鉻、	$ADD_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF}$	$HQ = \frac{ADD}{RfD}$
	砷、鎳、	$ADD_{derm} =$	$HI = \sum HQ$
	銅、鋅	$\frac{C \times EF \times ED \times SL \times SA \times ABS \times CF}{BW \times AT}$	
		$LADD_{inh} = \frac{C \times EF}{AT \times PEF} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right)$	

第三章、材料與方法

3.1 研究地點、對象及時間

本研究地區為雲林縣受濁水溪河川揚塵影響的鄉鎮，分別是圖一中二崙鄉 (n=12)、崙背鄉(n=18)及古坑鄉(n=6)，研究對象為國小四、五、六年級之孩童，採樣時間分三次，分別為 103 年 6 月 9 日至 6 月 12 日、103 年 9 月 29 日至 10 月 2 日及 103 年 11 月 24 日至 11 月 27 日。



圖一、研究地點

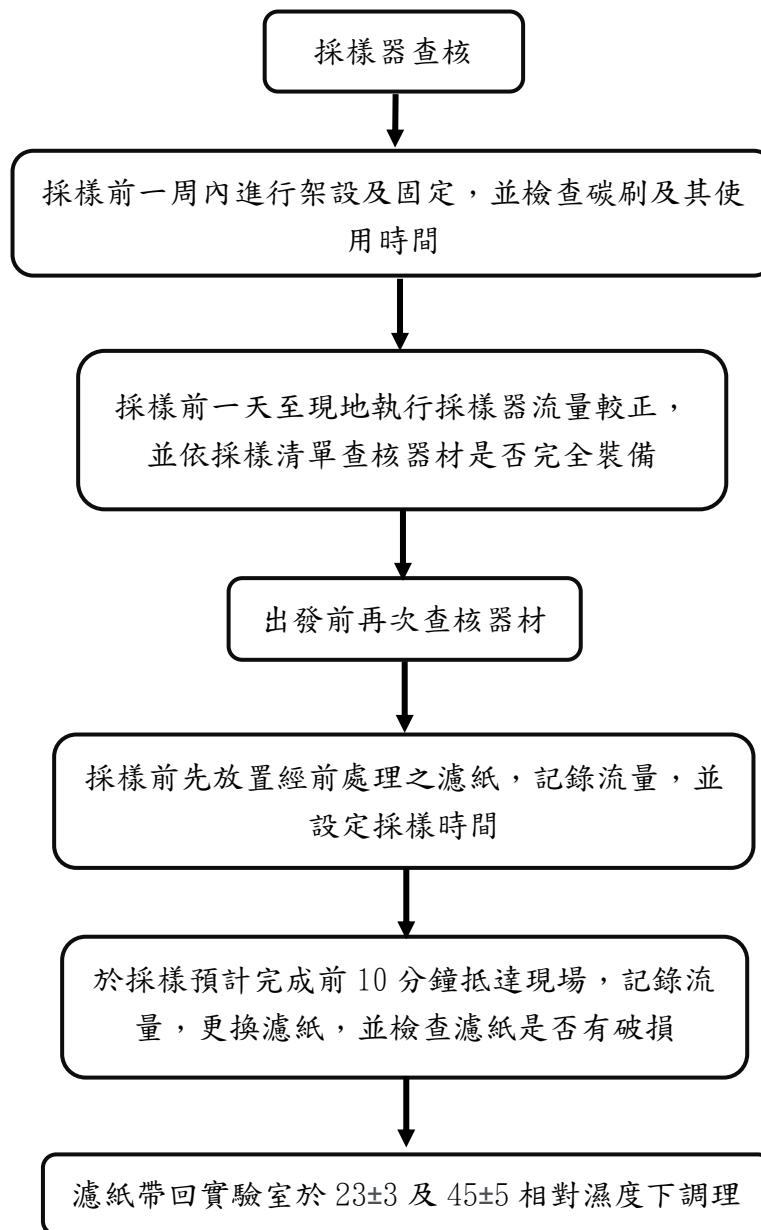
3.2 採樣方法

3.2.1 塵土中重金屬

塵土中重金屬的採樣地點為學校教室室內及孩童住家室內，所測得之金屬共有 15 種，包括 Fe, Al, Ca, Mn, Ti, Pb, Cu, Ni, Cd, As, Co, V, Zn。採樣流程如圖二所示。皆用吸塵器採集塵土，每一教室或住家分別於三個不同位置採集相同面積之塵土，以濾紙前後重量來估算室內塵土負荷量。

3.2.2 PM₁₀ 中重金屬

PM₁₀ 中重金屬採樣地點為學校教室室內外以及孩童住家室內外，採樣流程如圖二所示，採樣前先做校正處理，再進行採樣。室內懸浮微粒是以靜音採樣器 (Airlump SPP 25GA, Techno Takssuki)採樣，將儀器放置於教室內並連接 PM₁₀ 之 PEM 採樣頭採集 PM₁₀。室外則以高流量採樣器(Tish, Model IP10 Mass Flow Controlled System G25A SN 1532, Spring House, PA, USA)採集，採樣高度為 1 公尺，以此反應室外暴露高度。



圖二、採樣流程圖

3.3 風險推估計算方法

3.3.1 暴露情境規劃

本計畫的暴露情境目前規劃如表五所示，分為暴露 6 年及暴露 18 年的種情境，暴露濃度皆為 103 年三次採樣之結果之住家及教室室內平均濃度，將住家及教室暴露濃度依據加權平均(住家 16 小時、教室 8 小時)做為計算資料。

表六為暴露因子參數輸入與分布參數表，攝入率依照暴露因子手冊規定所訂定，暴露六年之攝入率為 60 mg/day，暴露 18 年為 65.8 mg/day，吸入率和體重則參考台灣一般民眾暴露彙編的資料依據年齡分布作加權平均，暴露六年之吸入率男性為 7.04 m³/day，女性為 6.29 m³/day，體重為 32.33 公斤；暴露 18 年之吸入率男性為 7.89 m³/day，女性為 7.13 m³/day，男性體重平均為 34.77 公斤，女性平均為 31.62 公斤。暴露頻率則參考環保署河川揚塵測站統計資料，蒐集從 2015-2019 年義賢測站與旭光測站一年中發生河川揚塵之頻率做計算後，所得出來的數值為 10 天。

表五、暴露情境規劃表

	情境一	情境二 (考慮參數不確定性)
暴露濃度	整合過去三次採樣的平均濃度作為依據 (103 年 6 月 9 日至 103 年 11 月 27 日濁水溪採樣中所測得之河川揚塵中重金屬濃度)	整合過去三次採樣的最大濃度、最小濃度與標準差作為依據 (103 年 6 月 9 日至 103 年 11 月 27 日濁水溪採樣中所測得之河川揚塵中重金屬濃度)
事件日發生頻率	每年的揚塵事件日平均發生天數作為暴露天數依據	預估暴露期間每年的揚塵事件日最大發生天數、最小發生天數作為暴露天數依據
暴露期間	國小學童就學階段:6 年	學童出生~大學前:18 年
暴露地點	教室室內、家戶室內	教室室內、家戶室內

表六、暴露因子參數輸入與分布參數表

參數	數值(6年)	數值(18年)	單位	分布	參考文獻
攝入率 (IngR)	60	65.8	mg/day	對數常態 分布	USEPA EXPOSURE FACTORS HANDBOOK 2017
吸入率 (InhR)	7.04 ^a (M) 女=6.29 ^a (F)	男=7.89 ^a (M) 女=7.13 ^a (F)	m ³ /day	對數常態 分布	台灣一般民 眾暴露彙編
體重 (BW)	32.33±7.61	34.77±14.47 (M) 31.62±6.91 (F)	kg	常態分布	台灣一般民 眾暴露彙編
暴露期間 (ED)	6	18	year		
暴露頻率 (EF)	10±8.08 ^b	10±8.08 ^b MAX=18 min=3	days/year	三角分布	行政院環保 署
非致癌之 平均時間 (ATN)	6×365	18×365	days		Li et al. (2014) Yang et al. (2018)
致癌之平 均時間 (AT)	70×365	70×365	days		Li et al. (2014) Yang et al. (2018)

a:使用台灣一般民眾暴露彙編資料做加權平均

b:依環保署河川揚塵測站統計資料計算每年揚塵事件日平均發生天數，作為暴露天數依據

3.3.2 風險評估

ADD (Average Daily Dose)為每日平均暴露劑量(mg/kg-day)，本研究考慮攝入(公式 1)及吸入途徑(公式 2)，ADD_{ing} 及 ADD_{inh} 分別是塵土及微粒中的重金屬每日暴露量。C(Concentration)為揚塵中重金屬濃度(ng/m³)，IngR(Ingestion Rate)為塵土攝入率(mg/day)，InhR(Inhalation rate) 為吸入率(m³/day)，EF(Exposure Frequency)為暴露頻率(day/year)，ED(Exposure Duration)為暴露期間(year)，BW(Body Weight)為孩童體重(kg)，AT(Average exposure time)為暴露時間(day)，而 LADD(Lifelong Average Daily Exposure Dose)為終身平均暴露劑量(mg/kg-day)，同樣考慮攝入(公式 4)及吸入途徑(公式 5)

$$ADD_{ing} - dust = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$ADD_{inh} - air = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

$$LADD_{ing} = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

$$LADD_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

3.3.3 非致癌效應

HQ(Hazard Quotient)是每日平均暴露量(ADD)與參考劑量(RfD)之比值(公式 5)，為危害商數，用來評估非致癌風險。HI(Hazard Index)為不同途徑之危害商數所加總而得的危害指數，RfD(Reference dose)為重金屬之參考劑量(mg/kg-day)。當 HQ 或 HI<1，代表暴露小於參考劑量，預期將不會對人體造成危害，當 HQ 或 HI>1 時，將會對人體造成危害風險(Chen et al., 2020)。

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (5)$$

$$HI = \sum HQ \quad (6)$$

3.3.4 致癌效應

CR 為致癌風險(公式 7)，SF(Slope Factor)為斜率因子(kg-day/mg)，當 CR>10⁻⁴ 為不可接受之風險；CR 介於 10⁻⁶ 和 10⁻⁴ 之間表示可接受或可容忍的致癌風險；若 CR<10⁻⁶ 則表示沒有明顯的健康危害(Men et al., 2018)。

$$CR = LADD \times SF \quad (7)$$

3.4 蒙地卡羅模擬法與靈敏度分析

本研究使用 Crystal ball 中的蒙地卡羅模擬法及靈敏度分析。蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo Simulation)利用亂數取樣 (Random Sampling)模擬來解決數學問題，量化風險評估中的不確定性。而靈敏度分析則能確定對結果影響最大的因子為何。

第四章、結果與討論

4.1 採樣濃度比較

4.1.1 塵土中重金屬

表七為塵土中採樣所得之重金屬，採樣地點為二崙、崙背及古坑之學校及住家室內，在採樣所得之五金屬中，三地區中崙背的重金屬濃度含量較其他地區高，而其中鎳(Ni)的濃度佔最高，在學校室內及住家內分別為 $41.13\mu\text{g}/\text{m}^2$ 和 $27.93\mu\text{g}/\text{m}^2$ 。

表七、塵土中重金屬濃度表($\mu\text{g}/\text{m}^2$, mean \pm SD)

二崙					
	Pb	Ni	Cr	As	Cd
學校室內	3.63 \pm 2.40	15.63 \pm 9.63	14.37 \pm 7.02	1.30 \pm 0.66	0.10 \pm 0.06
住家室內	3.93 \pm 3.06	17.63 \pm 10.80	13.60 \pm 3.92	1.23 \pm 0.62	0.13 \pm 0.06
崙背					
學校室內	8.57 \pm 3.28	41.13 \pm 9.94	20.47 \pm 9.82	2.47 \pm 1.13	0.17 \pm 0.06
住家室內	4.03 \pm 2.45	27.93 \pm 18.08	17.20 \pm 11.05	1.47 \pm 0.81	0.13 \pm 0.06
古坑					
學校室內	5.07 \pm 3.69	21.00 \pm 7.60	15.20 \pm 7.37	0.70 \pm 0.48	0.13 \pm 0.06
住家室內	4.30 \pm 2.27	18.73 \pm 7.78	12.13 \pm 7.27	0.73 \pm 0.49	ND ^a

^a:ND 為未偵測

4.1.2 微粒中重金屬濃度

表八為微粒中重金屬濃度，採樣點與塵土中重金屬相同在三個地區作採樣，三地區中同樣以崙背濃度為最高，其中鉛(Pb)與鎳(Ni)三地在區所佔濃度最高，在來是鉻(Cr)，最後是砷(As)及鎘(Cd)。

表八、微粒中重金屬濃度(ng/m^3 , mean \pm SD)

二崙					
	Pb	Ni	Cr	As	Cd
日間室外	22.20 \pm 7.57	28.43 \pm 7.04	8.53 \pm 1.77	3.30 \pm 1.12	0.93 \pm 0.35
夜間室外	17.57 \pm 5.92	22.87 \pm 7.65	6.37 \pm 3.54	3.33 \pm 1.02	0.63 \pm 0.22
學校室內	23.03 \pm 13.39	21.0 \pm 10.65	30.73 \pm 15.35	2.93 \pm 1.43	0.53 \pm 0.29
住家室內	21.30 \pm 11.33	19.17 \pm 7.94	26.10 \pm 12.66	3.50 \pm 1.43	0.63 \pm 0.64
崙背					
日間室外	19.17 \pm 7.16	36.73 \pm 4.36	10.50 \pm 8.87	3.20 \pm 0.90	1.00 \pm 0.31
夜間室外	19.70 \pm 6.62	23.80 \pm 10.75	6.37 \pm 1.58	3.37 \pm 1.05	0.73 \pm 0.14
學校室內	25.00 \pm 11.88	26.23 \pm 12.57	26.23 \pm 12.57	2.40 \pm 0.93	0.50 \pm 0.46
住家室內	21.50 \pm 10.73	20.23 \pm 11.88	21.60 \pm 14.38	3.70 \pm 1.33	0.57 \pm 0.69
古坑					
日間室外	19.03 \pm 5.34	27.60 \pm 15.03	8.83 \pm 5.23	2.97 \pm 0.81	0.90 \pm 0.24
夜間室外	16.20 \pm 3.33	20.37 \pm 5.77	6.10 \pm 2.15	3.33 \pm 0.55	0.60 \pm 0.14
學校室內	27.93 \pm 11.64	23.40 \pm 8.47	36.90 \pm 9.26	2.30 \pm 1.26	0.77 \pm 0.40
住家室內	19.73 \pm 9.48	19.00 \pm 7.11	19.00 \pm 4.70	3.53 \pm 1.26	0.40 \pm 0.06

4.2 暴露六年非致癌效應

暴露六年之非致癌效應的結果如表九所示，每日平均暴露劑量之攝入途徑明顯大於吸入途徑，以二崙地區男性鉛為例，攝入途徑之每日暴露劑量為 4.58×10^{-6} mg/kg/day，而吸入途徑為 $1.31 \times 10^{-7} \sim 1.17 \times 10^{-7}$ mg/kg/day，表十為暴露六年之危害指數之範圍，包括最大、最小及平均值，三地區之危害指數皆以鉻最高，介於 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 間。圖三及圖四為利用蒙地卡羅模擬法跑出的攝入和吸入的危害商數，圖 A、B 分別為二崙地區男性及女性之危害商數，圖 C、D 為崙背地區男性及女性危害商數，圖 D、E 為古坑地區男性及女性危害商數。以攝入途徑之危害商數來說，二崙地區砷及鉻之危害商數範圍廣泛，落再 10^{-4} 到 10^{-3} 之間，危害較其他金屬高，崙背與古坑則是鎳與鉻，但發生機率皆不高。而吸入途徑之危害商數，鉻之危害商數的範圍較其他金屬廣泛，危害機率較高，但發生機率低，而砷、鎳、鉛、鎘的範圍皆落在 10^{-5} 到 10^{-4} 間。圖五為危害指數，圖 A、B 分別為二崙地區男性及女性，圖 C、D 為崙背地區男性及女性，圖 D、E 為古坑地區男性及女性。三地區不論男女皆以鉻危害最高，但危害指數皆小於 1，及對健康不造成危害。

表九、暴露六年非致癌效應

二崙								
	ADD _{ing-dust} (mg/kg-day)		ADD _{inh-air} (mg/kg-day)		HQ _{ing}		HQ _{inh}	
	M	F	M	F	M	F	M	F
Pb	4.58×10 ⁻⁶	4.58×10 ⁻⁶	1.31×10 ⁻⁷	1.17×10 ⁻⁷	1.31×10 ⁻³	1.31×10 ⁻³	3.71×10 ⁻⁵	3.31×10 ⁻⁵
Ni	2.29×10 ⁻⁵	2.29×10 ⁻⁵	1.73×10 ⁻⁷	1.55×10 ⁻⁷	1.14×10 ⁻³	1.14×10 ⁻³	8.41×10 ⁻⁶	7.52×10 ⁻⁶
Cr	1.83×10 ⁻⁵	1.83×10 ⁻⁵	2.18×10 ⁻⁷	1.95×10 ⁻⁷	6.10×10 ⁻³	6.10×10 ⁻³	7.63×10 ⁻³	6.81×10 ⁻³
As	1.53×10 ⁻⁶	1.53×10 ⁻⁶	2.34×10 ⁻⁸	2.09×10 ⁻⁸	5.08×10 ⁻³	5.08×10 ⁻³	7.81×10 ⁻⁵	6.98×10 ⁻⁵
Cd	6.63×10 ⁻⁷	6.63×10 ⁻⁷	4.47×10 ⁻⁹	3.99×10 ⁻⁹	6.63×10 ⁻⁴	6.63×10 ⁻⁴	4.47×10 ⁻⁶	3.99×10 ⁻⁶
崙背								
Pb	5.59×10 ⁻⁶	5.59×10 ⁻⁶	1.35×10 ⁻⁷	1.21×10 ⁻⁷	1.60×10 ⁻³	1.60×10 ⁻³	3.84×10 ⁻⁵	3.43×10 ⁻⁵
Ni	2.95×10 ⁻⁵	2.95×10 ⁻⁵	1.79×10 ⁻⁷	1.60×10 ⁻⁷	8.43×10 ⁻³	8.43×10 ⁻³	8.68×10 ⁻⁶	7.76×10 ⁻⁶
Cr	1.12×10 ⁻⁵	1.12×10 ⁻⁵	2.21×10 ⁻⁷	1.97×10 ⁻⁷	3.20×10 ⁻³	3.20×10 ⁻³	7.71×10 ⁻³	6.89×10 ⁻³
As	1.02×10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁵	2.78×10 ⁻⁸	2.48×10 ⁻⁷	2.91×10 ⁻⁴	2.91×10 ⁻⁴	9.26×10 ⁻⁵	8.28×10 ⁻⁵
Cd	ND*	ND*	4.67×10 ⁻⁹	4.17×10 ⁻⁹	ND*	ND*	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶
古坑								
Pb	5.08×10 ⁻⁶	5.08×10 ⁻⁶	1.34×10 ⁻⁷	1.20×10 ⁻⁷	1.45×10 ⁻³	1.45×10 ⁻³	3.81×10 ⁻⁵	3.40×10 ⁻⁵
Ni	1.98×10 ⁻⁵	1.98×10 ⁻⁵	7.56×10 ⁻⁸	6.75×10 ⁻⁸	5.67×10 ⁻³	5.67×10 ⁻³	3.67×10 ⁻⁶	3.28×10 ⁻⁶
Cr	1.63×10 ⁻⁵	1.63×10 ⁻⁵	7.56×10 ⁻⁸	6.75×10 ⁻⁸	4.65×10 ⁻³	4.65×10 ⁻³	2.64×10 ⁻³	2.36×10 ⁻³
As	1.02×10 ⁻⁶	1.02×10 ⁻⁶	1.41×10 ⁻⁸	1.26×10 ⁻⁸	2.91×10 ⁻⁴	2.91×10 ⁻⁴	4.68×10 ⁻⁵	4.19×10 ⁻⁵
Cd	ND*	ND*	3.18×10 ⁻⁹	2.84×10 ⁻⁹	ND*	ND*	3.18×10 ⁻⁶	2.84×10 ⁻⁶

*ND:表示無資料

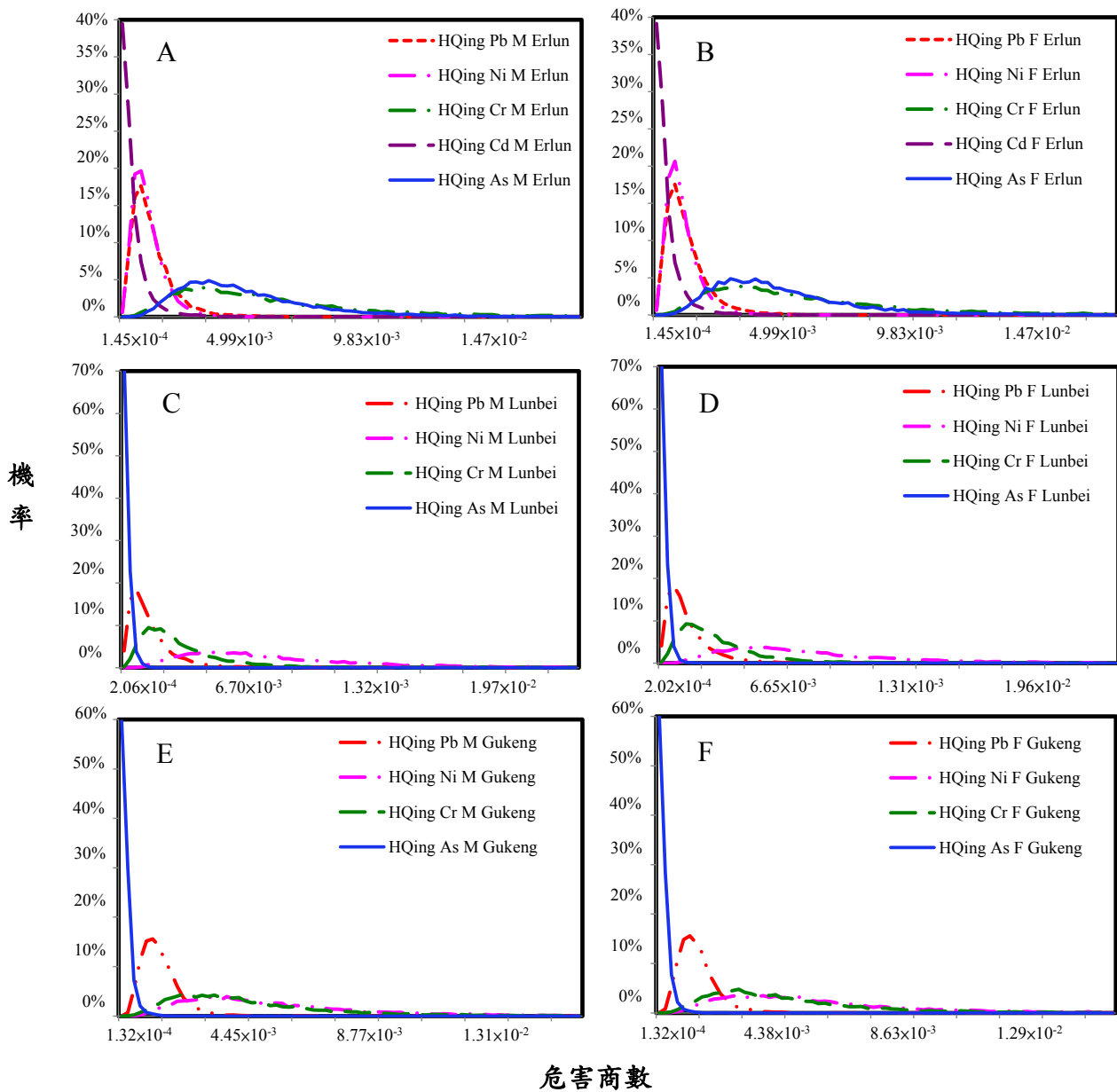
表十、暴露六年危害指數(HI)

二崙						
	Min*		Mean*		MAX*	
	M	F	M	F	M	F
Pb	1.33×10 ⁻⁴	1.36×10 ⁻⁴	1.34×10 ⁻³	1.34×10 ⁻³	1.08×10 ⁻²	1.25×10 ⁻²
Ni	1.53×10 ⁻⁴	1.55×10 ⁻⁴	1.15×10 ⁻³	1.15×10 ⁻³	1.11×10 ⁻²	8.11×10 ⁻³
Cr	2.01×10 ⁻³	1.70×10 ⁻³	1.37×10 ⁻²	1.29×10 ⁻²	1.04×10 ⁻¹	1.12×10 ⁻¹
As	5.92×10 ⁻⁴	6.23×10 ⁻⁴	5.16×10 ⁻³	5.15×10 ⁻³	5.28×10 ⁻²	4.14×10 ⁻²
Cd	1.30×10 ⁻⁵	1.14×10 ⁻⁵	6.67×10 ⁻⁴	6.67×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻²	1.54×10 ⁻²
崙背						
Pb	6.79×10 ⁻⁵	6.81×10 ⁻⁵	1.64×10 ⁻³	1.63×10 ⁻³	2.05×10 ⁻²	2.34×10 ⁻²
Ni	6.24×10 ⁻⁴	6.54×10 ⁻⁴	8.43×10 ⁻³	8.43×10 ⁻³	1.01×10 ⁻¹	7.07×10 ⁻²
Cr	1.17×10 ⁻³	1.27×10 ⁻³	1.09×10 ⁻²	1.01×10 ⁻²	1.12×10 ⁻¹	8.49×10 ⁻²
As	4.26×10 ⁻⁵	4.81×10 ⁻⁵	3.83×10 ⁻⁴	3.73×10 ⁻⁴	4.42×10 ⁻³	3.37×10 ⁻³
Cd	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶
古坑						
Pb	2.92×10 ⁻⁴	3.04×10 ⁻⁴	1.49×10 ⁻³	1.49×10 ⁻³	1.16×10 ⁻²	8.75×10 ⁻³
Ni	4.12×10 ⁻⁴	3.98×10 ⁻⁴	5.67×10 ⁻³	5.67×10 ⁻³	5.15×10 ⁻²	4.06×10 ⁻²
Cr	8.53×10 ⁻⁴	8.64×10 ⁻⁴	7.29×10 ⁻³	7.01×10 ⁻³	5.66×10 ⁻²	5.01×10 ⁻²
As	1.71×10 ⁻⁵	2.57×10 ⁻⁵	3.37×10 ⁻⁴	3.32×10 ⁻⁴	3.32×10 ⁻³	3.44×10 ⁻³
Cd	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶	4.67×10 ⁻⁶	4.17×10 ⁻⁶

*Min:表示最小值

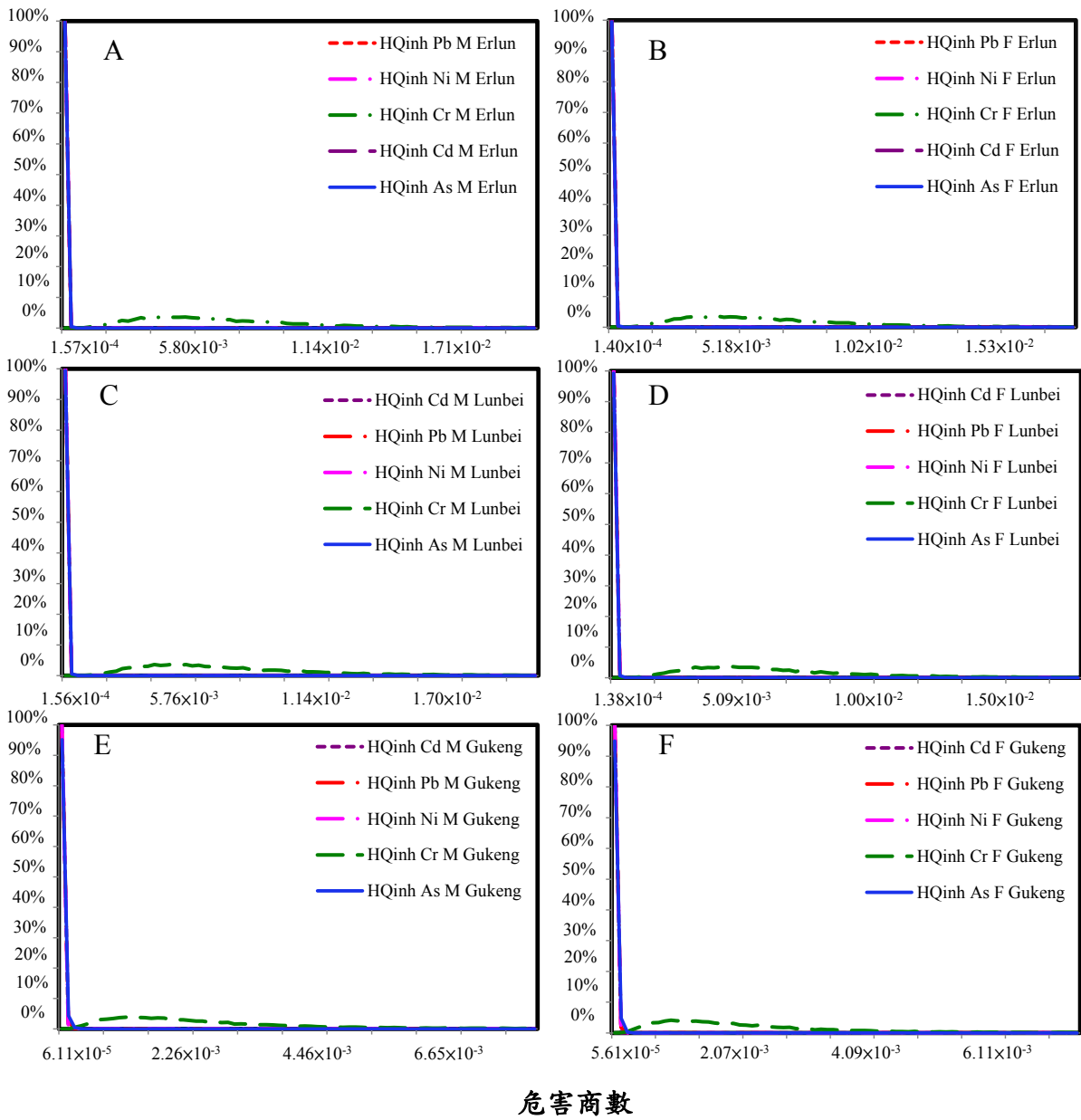
*Mean:平均值

*MAX:最大值

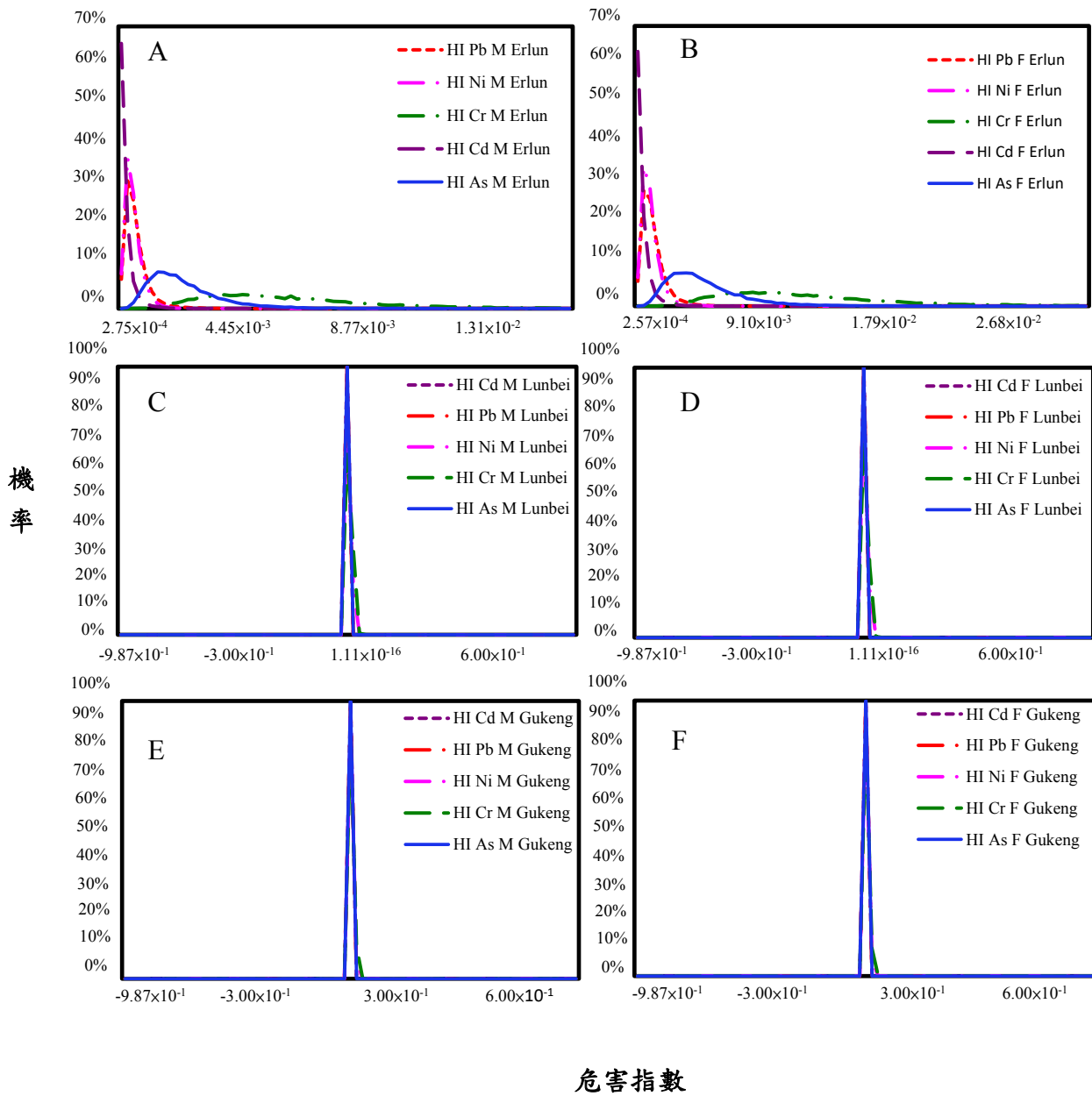


圖三、暴露六年之攝入途徑危害商數(HQ_{ing})

機
率



圖四、暴露六年之吸入途徑危害商數(HQ_{inh})



圖五、暴露六年之危害指數(HI)

4.3 暴露六年致癌效應

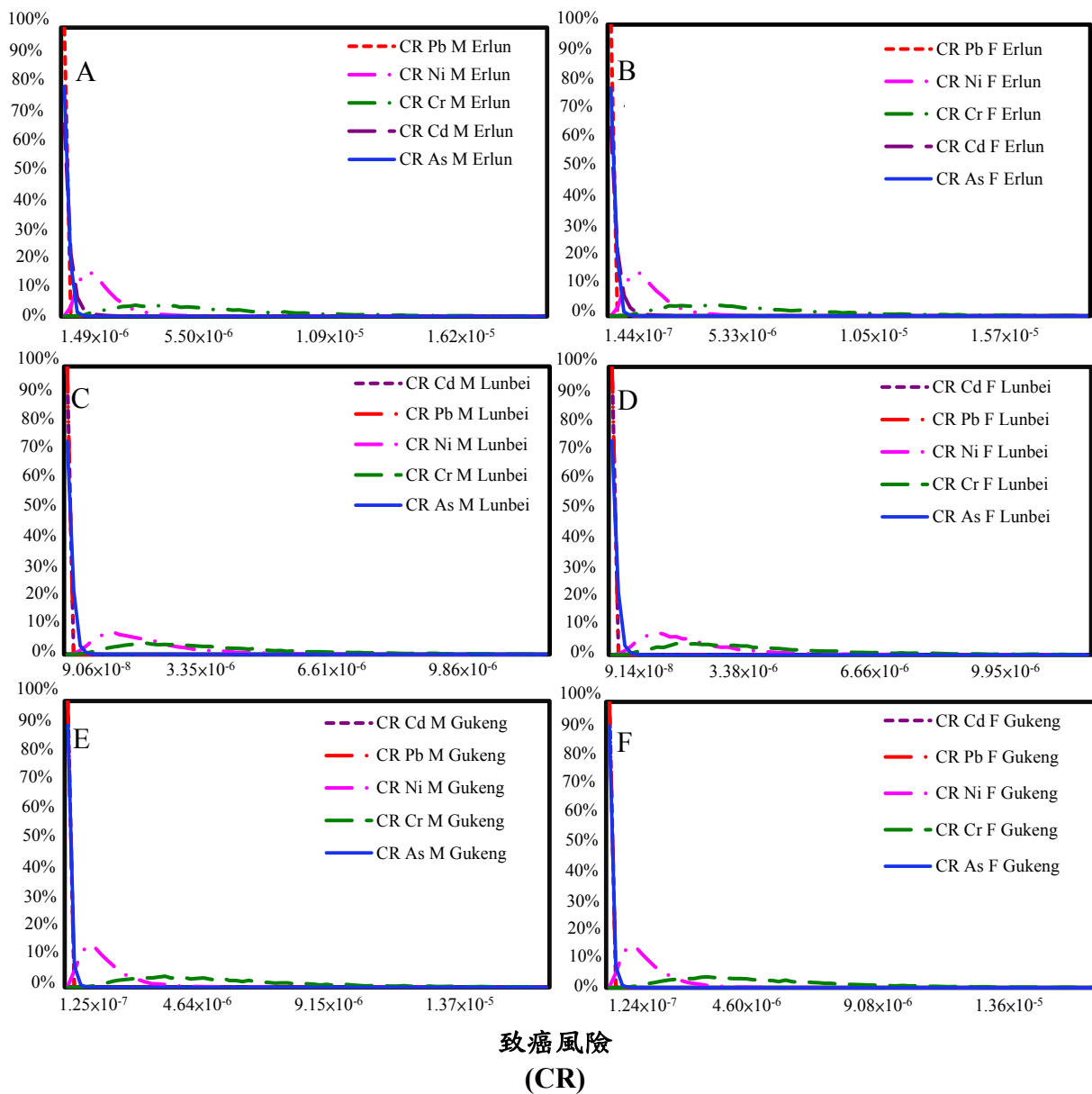
表十一為暴露六年之致癌效應，以終生平均暴露劑量來看，攝入途徑大於吸入途徑，以二崙地區男性鉛為例，攝入途徑的終生平均暴露劑量為 3.92×10^{-7} mg/kg-day，而吸入途徑為 1.12×10^{-8} mg/kg-day，三個地區的鎳及鉻之致癌風險皆介於 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之間，為可接受之風險。圖六為蒙地卡羅模擬法模擬後的圖，圖 A、B 分別為二崙男性及女性致癌風險圖，圖 C、D 為崙背男性及女性，圖 E、F 為古坑之男性和女性。從圖中也可明顯看出三地區的鉻範圍廣泛大於 10^{-6} ，鎳範圍雖不比鎳來的廣，卻也都超過 10^{-6} ，但兩金屬發生機率不高，都在 0~10% 之間，其餘金屬雖發生機率高卻無致癌風險。整體來說，對國小學童而言，暴露於河川揚塵中重金屬的風險在可接受範圍內。

表十一、暴露六年致癌效應

二崙										
	LADD _{ing-dust} (mg/kg-day)		LADD _{inh-air} (mg/kg-day)		CR-min		CR-Mean		CR-MAX	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
Pb	3.92×10 ⁻⁷	3.92×10 ⁻⁷	1.12×10 ⁻⁸	1.00×10 ⁻⁸	3.39×10 ⁻¹⁰	3.48×10 ⁻¹⁰	3.43×10 ⁻⁹	3.42×10 ⁻⁹	2.75×10 ⁻⁸	3.19×10 ⁻⁸
Ni	1.96×10 ⁻⁶	1.96×10 ⁻⁶	1.49×10 ⁻⁸	1.33×10 ⁻⁸	2.21×10 ⁻⁷	2.24×10 ⁻⁷	1.66×10 ⁻⁶	1.66×10 ⁻⁹	1.60×10 ⁻⁵	1.17×10 ⁻⁵
Cr	1.57×10 ⁻⁶	1.57×10 ⁻⁶	1.87×10 ⁻⁸	1.67×10 ⁻⁸	4.03×10 ⁻⁷	5.27×10 ⁻⁷	6.67×10 ⁻⁶	6.66×10 ⁻⁶	7.33×10 ⁻⁵	5.48×10 ⁻⁵
As	1.31×10 ⁻⁷	1.31×10 ⁻⁷	2.01×10 ⁻⁹	1.79×10 ⁻⁹	2.28×10 ⁻⁸	2.40×10 ⁻⁸	1.99×10 ⁻⁷	1.99×10 ⁻⁷	2.04×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻⁶
Cd	5.68×10 ⁻⁸	5.68×10 ⁻⁸	3.83×10 ⁻¹⁰	3.42×10 ⁻¹⁰	7.02×10 ⁻⁹	6.15×10 ⁻⁹	3.60×10 ⁻⁷	3.60×10 ⁻⁷	6.66×10 ⁻⁶	8.34×10 ⁻⁶
崙背										
Pb	4.79×10 ⁻⁷	4.79×10 ⁻⁷	1.16×10 ⁻⁸	1.04×10 ⁻⁸	1.73×10 ⁻¹⁰	1.74×10 ⁻¹⁰	4.17×10 ⁻⁹	4.16×10 ⁻⁹	5.22×10 ⁻⁸	5.97×10 ⁻⁸
Ni	2.53×10 ⁻⁷	2.53×10 ⁻⁶	1.53×10 ⁻⁸	1.37×10 ⁻⁸	1.68×10 ⁻⁷	1.66×10 ⁻⁷	2.14×10 ⁻⁶	2.13×10 ⁻⁶	2.55×10 ⁻⁵	1.79×10 ⁻⁵
Cr	9.59×10 ⁻⁷	9.59×10 ⁻⁷	1.89×10 ⁻⁸	1.69×10 ⁻⁸	3.33×10 ⁻⁷	2.73×10 ⁻⁷	4.11×10 ⁻⁶	4.10×10 ⁻⁶	5.39×10 ⁻⁵	4.52×10 ⁻⁵
As	8.72×10 ⁻⁸	8.72×10 ⁻⁸	2.38×10 ⁻⁹	2.13×10 ⁻⁹	1.22×10 ⁻⁸	1.14×10 ⁻⁸	1.34×10 ⁻⁷	1.34×10 ⁻⁷	1.87×10 ⁻⁶	1.43×10 ⁻⁶
Cd	ND*	ND*	4.00×10 ⁻¹⁰	3.57×10 ⁻¹⁰	8.24×10 ⁻¹¹	6.95×10 ⁻¹¹	2.52×10 ⁻⁹	2.25×10 ⁻⁹	4.79×10 ⁻⁸	3.33×10 ⁻⁸
古坑										
Pb	4.36×10 ⁻⁷	4.36×10 ⁻⁷	1.15×10 ⁻⁸	1.03×10 ⁻⁸	7.46×10 ⁻¹⁰	7.77×10 ⁻¹⁰	3.80×10 ⁻⁹	3.79×10 ⁻⁹	2.95×10 ⁻⁸	2.23×10 ⁻⁸
Ni	1.70×10 ⁻⁶	1.70×10 ⁻⁶	6.48×10 ⁻⁹	5.79×10 ⁻⁹	1.05×10 ⁻⁷	1.01×10 ⁻⁷	1.43×10 ⁻⁶	1.43×10 ⁻⁶	1.30×10 ⁻⁵	1.02×10 ⁻⁵
Cr	1.39×10 ⁻⁶	1.39×10 ⁻⁶	6.48×10 ⁻⁹	5.79×10 ⁻⁹	5.25×10 ⁻⁷	3.80×10 ⁻⁷	5.88×10 ⁻⁶	5.88×10 ⁻⁶	5.14×10 ⁻⁵	5.97×10 ⁻⁵
As	8.72×10 ⁻⁸	8.72×10 ⁻⁸	1.20×10 ⁻⁹	1.08×10 ⁻⁹	5.49×10 ⁻⁹	6.62×10 ⁻⁹	1.33×10 ⁻⁷	1.32×10 ⁻⁷	1.39×10 ⁻⁶	1.45×10 ⁻⁶
Cd	ND*	ND*	2.73×10 ⁻¹⁰	2.44×10 ⁻¹⁰	3.02×10 ⁻¹¹	2.38×10 ⁻¹¹	1.72×10 ⁻⁹	1.54×10 ⁻⁹	5.77×10 ⁻⁸	6.09×10 ⁻⁸

*ND:表示無資料; Min:表示最小值; Mean:平均值; MAX:最大值

機
率



圖六、暴露六年之致癌險(CR)

4.4 暴露 18 年之非致癌效應

暴露 18 年之非致癌效應如表十二所示，與暴露六年情境相同，攝入途徑的每日平均暴露劑量及危害商數皆大於吸入途徑。同樣以二崙男性鉛為例，攝入途徑每日平均暴露劑量為 4.67×10^{-6} mg/kg-day，而吸入途徑則為 1.36×10^{-7} mg/kg-day；攝入途徑危害商數為 1.33×10^{-3} ，吸入途徑為 3.86×10^{-5} ，表十三為暴露十八年之危害指數，包含最小值、最大值及平均值，二崙中鉻之危害指數最高，範圍落在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 間。經過蒙地卡羅模擬法演算後的圖如圖七~圖九所示，圖 A、B 為二崙地區男性及女性，圖 C、D 為崙背地區男性及女性，圖 E、F 為古坑地區之男性及女性。圖七及圖八分別為攝入及吸入途徑之危害商數，由圖七可知女性的危害商數範圍較男性廣泛，二崙地區女性(圖七之 B)之鉻及砷範圍較其他金屬廣泛，在 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 間，崙背(圖七之 D)則以鎳涵蓋最大，介於 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 間，古坑女性(圖七之 F)以鉻及鎳為主。而圖八之 B、D、F 則皆為鉻危害範圍最廣，但皆不超過 1。圖九為兩途徑危害商數加總之危害指數，不論性別及男女之差異均不大，且危害指數皆小於 1，暴露於河川揚塵 18 年同樣不會對健康造成危害。

表十二、暴露 18 年致癌效應

二崙								
	ADD _{ing-dust} (mg/kg-day)		ADD _{inh-air} (mg/kg-day)		HQ _{ing}		HQ _{inh}	
	M	F	M	F	M	F	M	F
Pb	4.67×10 ⁻⁶	5.13×10 ⁻⁶	1.36×10 ⁻⁷	1.35×10 ⁻⁷	1.33×10 ⁻³	1.47×10 ⁻³	3.86×10 ⁻⁵	3.84×10 ⁻⁵
Ni	2.33×10 ⁻⁵	2.57×10 ⁻⁵	1.81×10 ⁻⁷	1.79×10 ⁻⁷	1.17×10 ⁻³	1.28×10 ⁻³	8.77×10 ⁻⁶	8.71×10 ⁻⁶
Cr	1.87×10 ⁻⁵	2.05×10 ⁻⁵	2.27×10 ⁻⁷	2.26×10 ⁻⁷	6.22×10 ⁻³	6.84×10 ⁻³	7.95×10 ⁻³	7.90×10 ⁻³
As	1.56×10 ⁻⁶	1.71×10 ⁻⁶	2.44×10 ⁻⁸	2.43×10 ⁻⁸	5.18×10 ⁻³	5.70×10 ⁻³	8.14×10 ⁻⁵	8.09×10 ⁻⁵
Cd	6.76×10 ⁻⁷	7.43×10 ⁻⁷	4.65×10 ⁻⁹	4.62×10 ⁻⁹	6.76×10 ⁻⁴	7.43×10 ⁻³	4.65×10 ⁻⁶	4.62×10 ⁻⁶
崙背								
Pb	5.70×10 ⁻⁶	6.27×10 ⁻⁶	1.41×10 ⁻⁷	1.40×10 ⁻⁷	1.63×10 ⁻³	1.79×10 ⁻³	4.00×10 ⁻⁵	3.98×10 ⁻⁵
Ni	3.01×10 ⁻⁵	3.31×10 ⁻⁵	1.86×10 ⁻⁷	1.85×10 ⁻⁷	8.59×10 ⁻³	9.45×10 ⁻³	9.05×10 ⁻⁶	8.99×10 ⁻⁶
Cr	1.14×10 ⁻⁵	1.25×10 ⁻⁵	2.30×10 ⁻⁷	2.28×10 ⁻⁷	3.26×10 ⁻³	3.58×10 ⁻³	8.04×10 ⁻³	7.99×10 ⁻³
As	1.04×10 ⁻⁶	1.14×10 ⁻⁶	2.90×10 ⁻⁸	2.88×10 ⁻⁸	2.96×10 ⁻⁴	3.26×10 ⁻⁴	9.65×10 ⁻⁵	9.59×10 ⁻⁵
Cd	ND*	ND*	4.86×10 ⁻⁹	4.83×10 ⁻⁹	ND*	ND*	4.86×10 ⁻⁶	4.83×10 ⁻⁶
古坑								
Pb	5.18×10 ⁻⁶	5.70×10 ⁻⁶	1.40×10 ⁻⁷	1.39×10 ⁻⁷	1.48×10 ⁻³	1.63×10 ⁻³	3.97×10 ⁻⁵	3.94×10 ⁻⁵
Ni	2.02×10 ⁻⁵	2.22×10 ⁻⁵	7.87×10 ⁻⁸	7.83×10 ⁻⁸	5.78×10 ⁻³	6.35×10 ⁻³	3.82×10 ⁻⁶	3.80×10 ⁻⁶
Cr	1.66×10 ⁻⁵	1.82×10 ⁻⁵	7.87×10 ⁻⁸	7.83×10 ⁻⁸	4.74×10 ⁻³	5.21×10 ⁻³	2.75×10 ⁻³	2.74×10 ⁻³
As	1.04×10 ⁻⁶	1.14×10 ⁻⁶	1.46×10 ⁻⁸	1.46×10 ⁻⁸	2.96×10 ⁻⁴	3.26×10 ⁻⁴	4.88×10 ⁻⁵	4.85×10 ⁻⁵
Cd	ND*	ND*	3.32×10 ⁻⁹	3.29×10 ⁻⁹	ND*	ND*	3.32×10 ⁻⁶	3.29×10 ⁻⁶

*ND:表示無資料

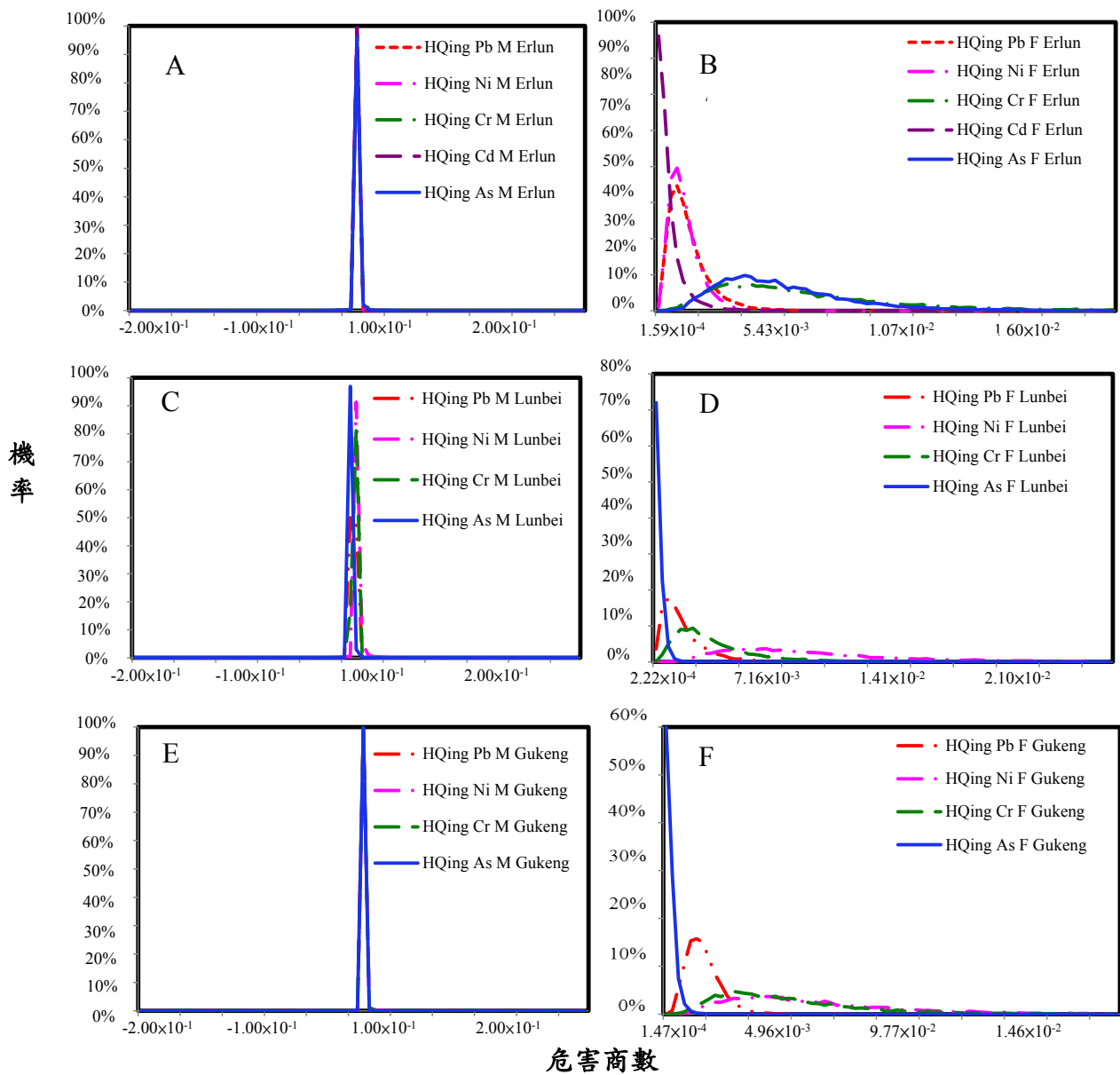
表十三、暴露 18 年之非致癌效應

二崙						
	Min		Mean		MAX	
	M	F	M	F	M	F
Pb	8.35×10^{-5}	9.17×10^{-5}	1.37×10^{-3}	1.50×10^{-3}	4.40×10^{-2}	1.30×10^{-2}
Ni	5.59×10^{-4}	1.74×10^{-4}	1.18×10^{-3}	1.29×10^{-3}	5.27×10^{-2}	1.44×10^{-2}
Cr	6.14×10^{-3}	1.59×10^{-3}	1.42×10^{-2}	1.47×10^{-2}	7.07×10^{-1}	1.32×10^{-1}
As	3.38×10^{-4}	7.91×10^{-4}	5.27×10^{-3}	5.78×10^{-3}	3.73×10^{-2}	4.40×10^{-2}
Cd	1.40×10^{-5}	1.31×10^{-5}	6.80×10^{-4}	7.48×10^{-4}	4.32×10^{-2}	1.14×10^{-2}
崙背						
Pb	2.49×10^{-5}	9.43×10^{-5}	1.67×10^{-3}	1.83×10^{-3}	1.43×10^{-2}	1.94×10^{-2}
Ni	1.35×10^{-4}	9.23×10^{-4}	8.60×10^{-3}	9.46×10^{-3}	2.87×10^{-2}	6.69×10^{-2}
Cr	8.54×10^{-3}	1.74×10^{-3}	1.13×10^{-2}	1.16×10^{-2}	7.22×10^{-2}	9.46×10^{-2}
As	1.57×10^{-5}	5.67×10^{-5}	3.93×10^{-4}	4.22×10^{-4}	1.41×10^{-3}	3.77×10^{-3}
Cd	4.67×10^{-6}	4.17×10^{-6}	4.67×10^{-6}	4.17×10^{-6}	4.67×10^{-6}	4.17×10^{-6}
古坑						
Pb	1.01×10^{-4}	3.14×10^{-4}	1.52×10^{-3}	1.67×10^{-3}	1.13×10^{-2}	1.03×10^{-2}
Ni	5.96×10^{-4}	6.27×10^{-4}	5.78×10^{-3}	6.36×10^{-3}	5.50×10^{-2}	8.43×10^{-2}
Cr	5.49×10^{-3}	1.09×10^{-3}	7.49×10^{-3}	7.95×10^{-3}	2.91×10^{-2}	7.21×10^{-2}
As	2.26×10^{-5}	2.51×10^{-5}	3.45×10^{-4}	3.74×10^{-4}	1.33×10^{-3}	2.77×10^{-3}
Cd	4.67×10^{-6}	4.17×10^{-6}	4.67×10^{-6}	4.17×10^{-4}	4.67×10^{-6}	4.17×10^{-6}

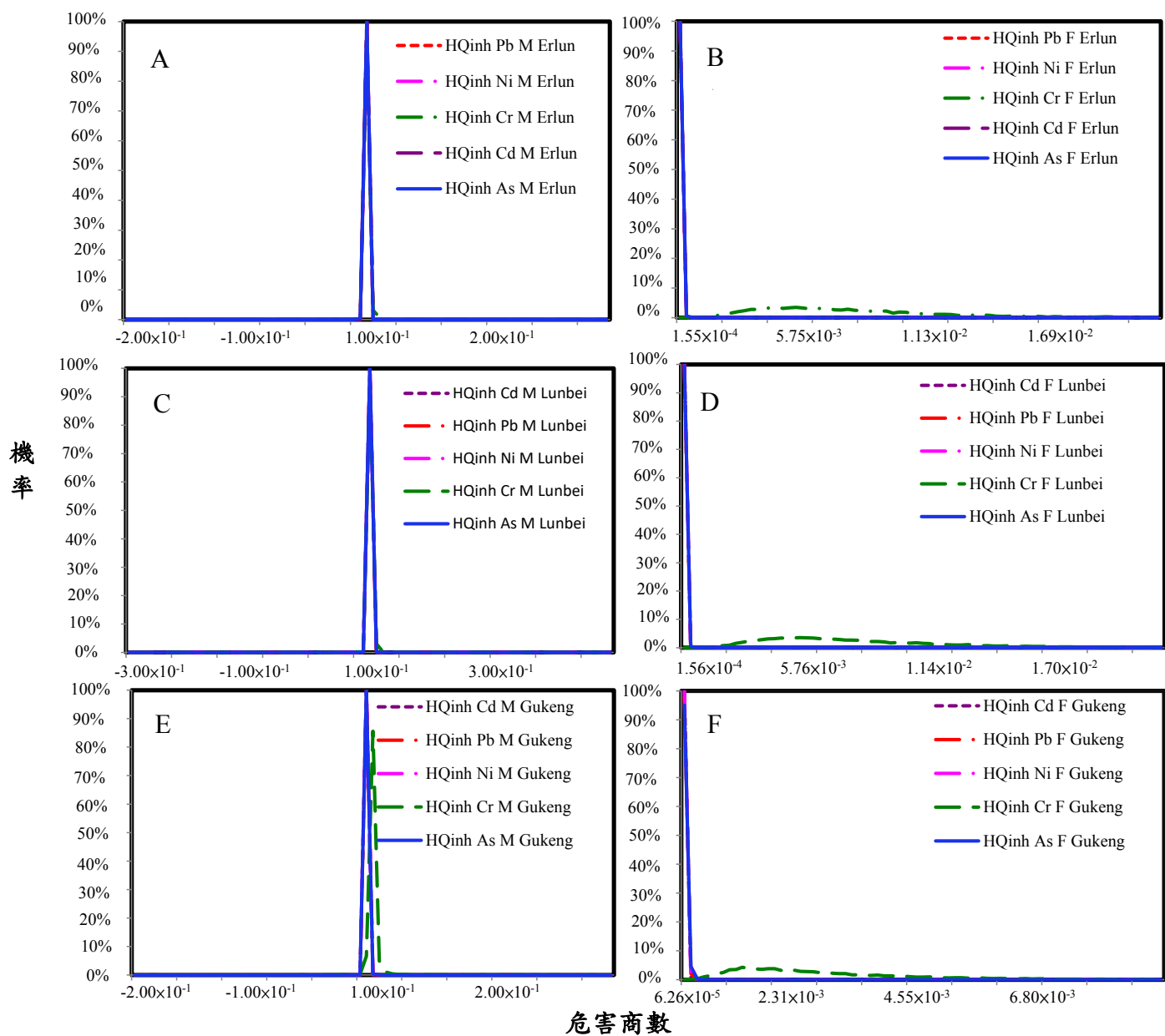
Min: 為最小值

Mean: 平均值

MAX: 最大值

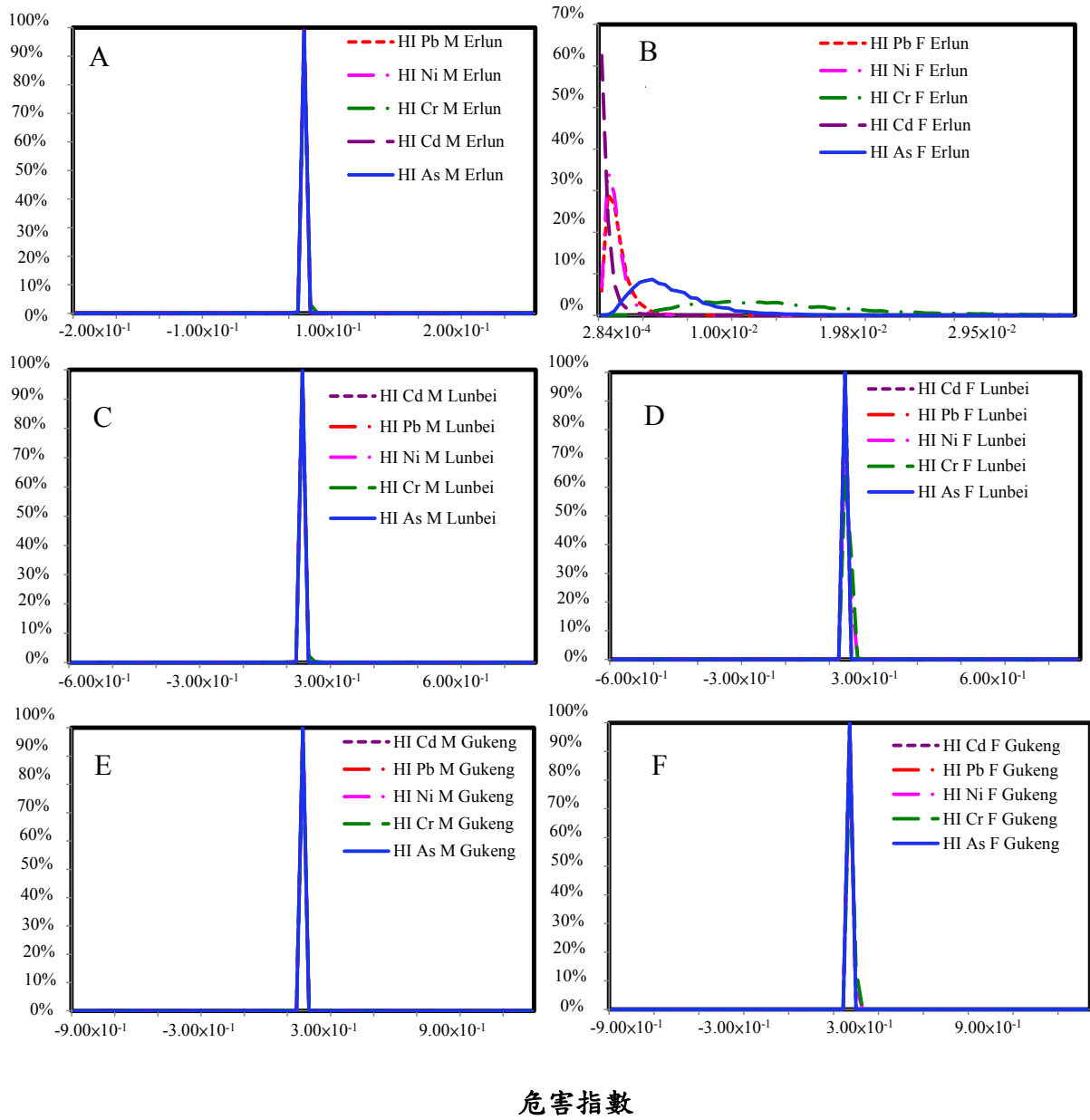


圖七、暴露 18 年之攝入途徑危害商數(HQing)



圖八、暴露 18 年之吸入途徑危害商數(HQ_{inh})

機
率



圖九、暴露 18 年之危害指數(HI)

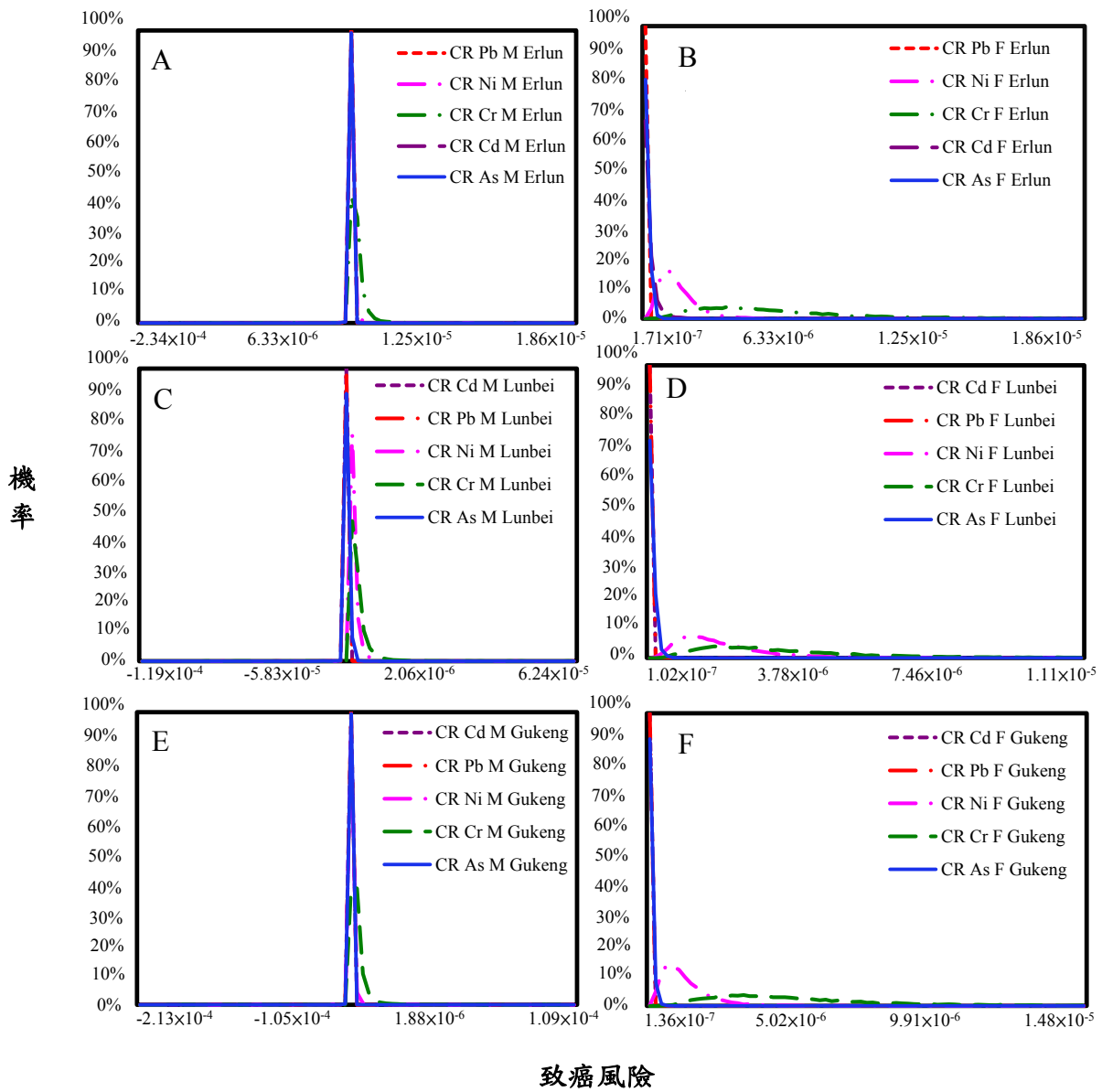
4.5 暴露 18 年之致癌效應

表十四為暴露 18 年之致癌效應，結果也與暴露六年之致癌效應相似，危害以攝入途徑為主，且鎳及鉻之致癌風險介於 10^{-6} ~ 10^{-4} 之間。圖十為經過蒙地卡羅模擬法計算後所得的圖，圖 A、B 為二崙地區男性及女性，圖 C、D 為崙背地區男性及女性，圖 E、F 為古坑地區之男性及女性。圖 B、D、F 皆已鉻的範圍最廣，再來是鎳，且範圍皆超過 10^{-6} 但小於 10^{-4} ，表示為可接受致癌風險，但發生機率皆不高，其餘金屬則皆無超過 10^{-6} ，無致癌的可能性，但整體來說，孩童在雲林二崙、崙背、古坑三地區暴露 18 年有致癌風險，但在可接受風險內。

表十四、暴露 18 年之致癌效應

二崙										
	LADD _{ing-dust} (mg/kg-day)		LADD _{inh-air} (mg/kg-day)		CR-min		CR-Mean		CR-MAX	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
Pb	4.00×10 ⁻⁷	4.40×10 ⁻⁷	1.17×10 ⁻⁸	1.16×10 ⁻⁸	2.13×10 ⁻¹⁰	2.34×10 ⁻⁹	3.50×10 ⁻⁹	3.84×10 ⁻⁹	1.12×10 ⁻⁸	3.33×10 ⁻⁸
Ni	2.00×10 ⁻⁶	2.20×10 ⁻⁶	1.55×10 ⁻⁸	1.54×10 ⁻⁸	8.06×10 ⁻⁷	2.51×10 ⁻⁷	1.69×10 ⁻⁶	1.86×10 ⁻⁶	7.59×10 ⁻⁵	2.08×10 ⁻⁵
Cr	1.60×10 ⁻⁶	1.76×10 ⁻⁶	1.95×10 ⁻⁸	1.94×10 ⁻⁸	3.49×10 ⁻⁷	6.05×10 ⁻⁷	6.80×10 ⁻⁶	7.47×10 ⁻⁶	3.23×10 ⁻⁵	7.82×10 ⁻⁵
As	1.33×10 ⁻⁷	1.47×10 ⁻⁷	2.09×10 ⁻⁹	2.08×10 ⁻⁹	1.30×10 ⁻⁸	3.05×10 ⁻⁸	2.03×10 ⁻⁷	2.23×10 ⁻⁷	1.44×10 ⁻⁶	1.70×10 ⁻⁶
Cd	5.79×10 ⁻⁸	6.37×10 ⁻⁸	3.99×10 ⁻¹⁰	3.96×10 ⁻¹⁰	7.58×10 ⁻⁹	7.07×10 ⁻⁹	3.67×10 ⁻⁷	4.04×10 ⁻⁷	2.33×10 ⁻⁶	6.14×10 ⁻⁶
崙背										
Pb	4.89×10 ⁻⁷	5.38×10 ⁻⁷	1.21×10 ⁻⁸	1.20×10 ⁻⁸	6.35×10 ⁻¹⁰	2.41×10 ⁻¹⁰	4.26×10 ⁻⁹	4.67×10 ⁻⁹	3.66×10 ⁻⁸	4.96×10 ⁻⁸
Ni	2.58×10 ⁻⁶	2.83×10 ⁻⁶	1.60×10 ⁻⁸	1.59×10 ⁻⁸	3.41×10 ⁻⁷	2.41×10 ⁻⁷	2.18×10 ⁻⁶	2.39×10 ⁻⁶	7.28×10 ⁻⁵	1.69×10 ⁻⁵
Cr	9.78×10 ⁻⁷	1.08×10 ⁻⁶	1.97×10 ⁻⁸	1.96×10 ⁻⁸	1.49×10 ⁻⁷	2.46×10 ⁻⁷	4.19×10 ⁻⁶	4.60×10 ⁻⁶	3.42×10 ⁻⁵	6.07×10 ⁻⁵
As	8.89×10 ⁻⁸	9.77×10 ⁻⁸	2.48×10 ⁻⁹	2.47×10 ⁻⁹	5.67×10 ⁻⁹	6.63×10 ⁻⁹	1.37×10 ⁻⁷	1.50×10 ⁻⁷	4.21×10 ⁻⁶	1.23×10 ⁻⁶
Cd	ND*	ND*	4.17×10 ⁻¹⁰	4.14×10 ⁻¹⁰	7.03×10 ⁻¹¹	5.09×10 ⁻¹¹	2.63×10 ⁻⁹	2.61×10 ⁻⁹	1.51×10 ⁻⁸	4.59×10 ⁻⁸
古坑										
Pb	4.44×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁷	1.20×10 ⁻⁸	1.19×10 ⁻⁸	2.57×10 ⁻¹⁰	8.01×10 ⁻¹⁰	3.88×10 ⁻⁹	4.25×10 ⁻⁹	2.88×10 ⁻⁸	2.62×10 ⁻⁸
Ni	1.73×10 ⁻⁶	1.91×10 ⁻⁶	6.75×10 ⁻⁹	6.71×10 ⁻⁹	1.51×10 ⁻⁷	1.64×10 ⁻⁷	1.46×10 ⁻⁶	1.61×10 ⁻⁶	1.39×10 ⁻⁵	2.12×10 ⁻⁵
Cr	1.42×10 ⁻⁶	1.56×10 ⁻⁶	6.75×10 ⁻⁹	6.71×10 ⁻⁹	6.36×10 ⁻⁷	5.41×10 ⁻⁷	6.00×10 ⁻⁶	6.60×10 ⁻⁶	2.35×10 ⁻⁵	7.77×10 ⁻⁵
As	8.89×10 ⁻⁸	9.77×10 ⁻⁸	1.26×10 ⁻⁹	1.25×10 ⁻⁹	9.10×10 ⁻¹⁰	7.46×10 ⁻¹⁰	1.35×10 ⁻⁷	1.48E×10 ⁻⁷	5.18×10 ⁻⁸	2.95×10 ⁻⁸
Cd	ND*	ND*	2.84×10 ⁻¹⁰	2.82×10 ⁻¹⁰	1.50×10 ⁻¹¹	9.45×10 ⁻¹¹	1.79×10 ⁻⁹	1.78E×10 ⁻⁹	7.29×10 ⁻⁸	2.27×10 ⁻⁸

*ND:表示無資料; Min:最小值; Mean:平均值; MAX:最大值



圖十、暴露 18 年之致癌風險(CR)

4.6 靈敏度分析

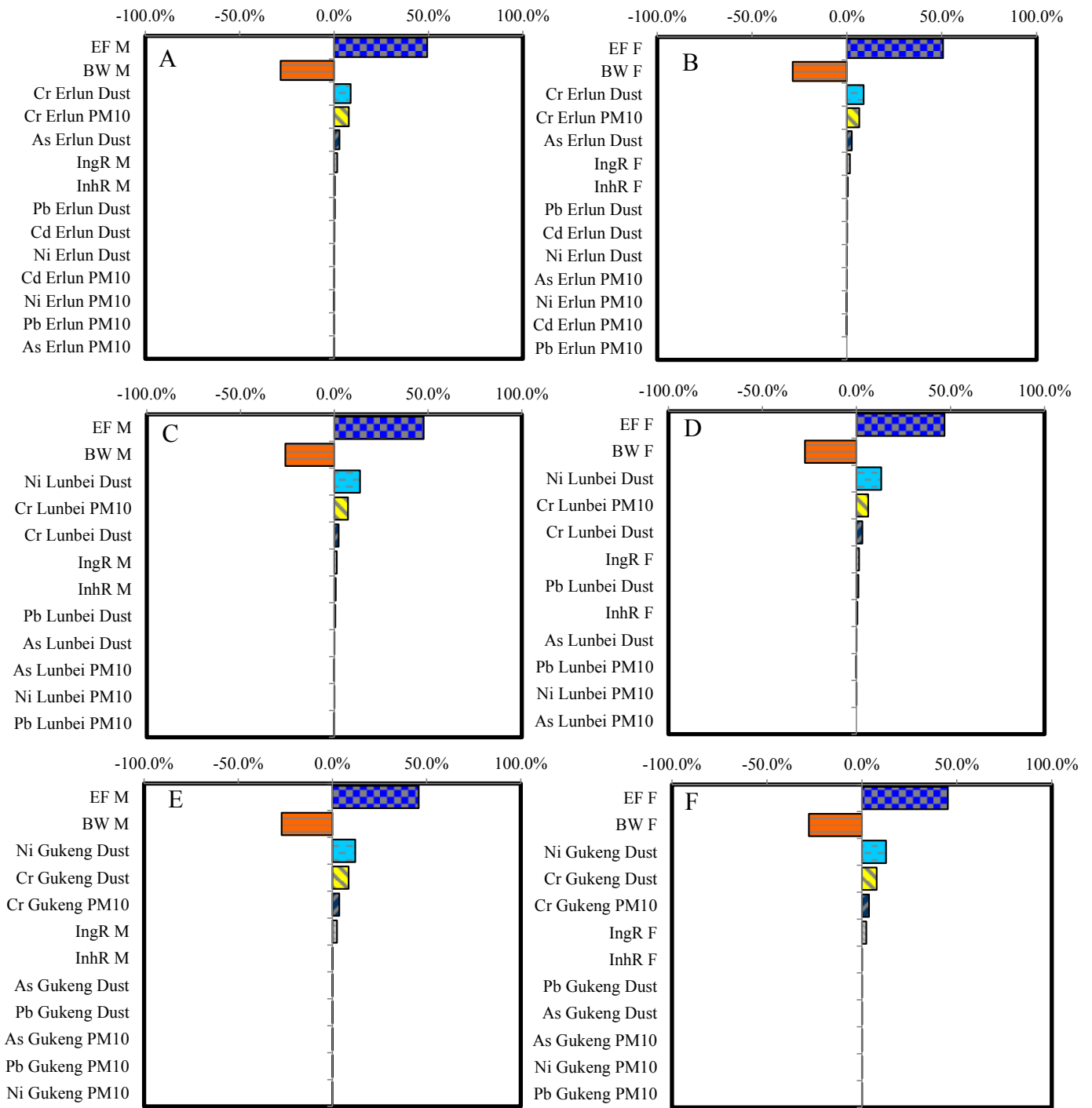
透過靈敏度分析能確定對於結果影響最大的因子，本研究使用貢獻變異性百分比探討河川揚塵中何種因子對致癌及非致癌影響最大。

4.6.1 暴露六年之靈敏度分析

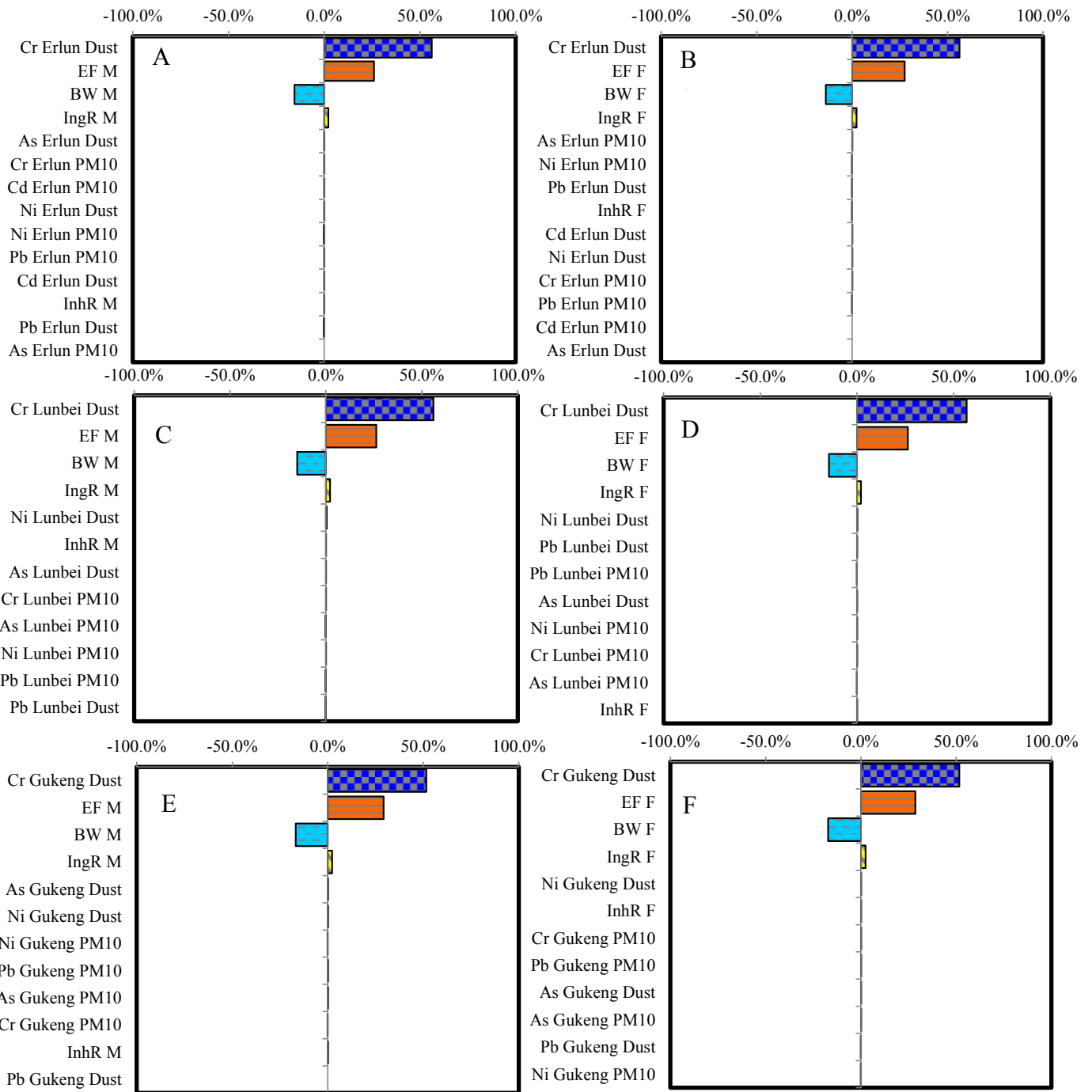
圖十一為非致癌效應之靈敏度分析，圖 A、B 為二崙地區男性及女性，圖 C、D 為崙背地區男性及女性，圖 E、F 為古坑地區之男性及女性，對於暴露六年非致癌效應，不論地區及性別，皆以暴露頻率為最主要影響因子，佔大約 40-50%，再來是體重，二崙地區(圖十一之 A、B)第三為塵土中的鉻金屬，崙背及古坑地區(圖 C、D、E、F)第三則是塵土中的鎳金屬。圖十二為致癌效應之靈敏度分析，不論地區及性別皆以塵土中鉻金屬影響最大，佔 50-60%，第二為體重，第三結果與非致癌效應靈敏度分析相同。

4.6.2 暴露十八年之靈敏度分析

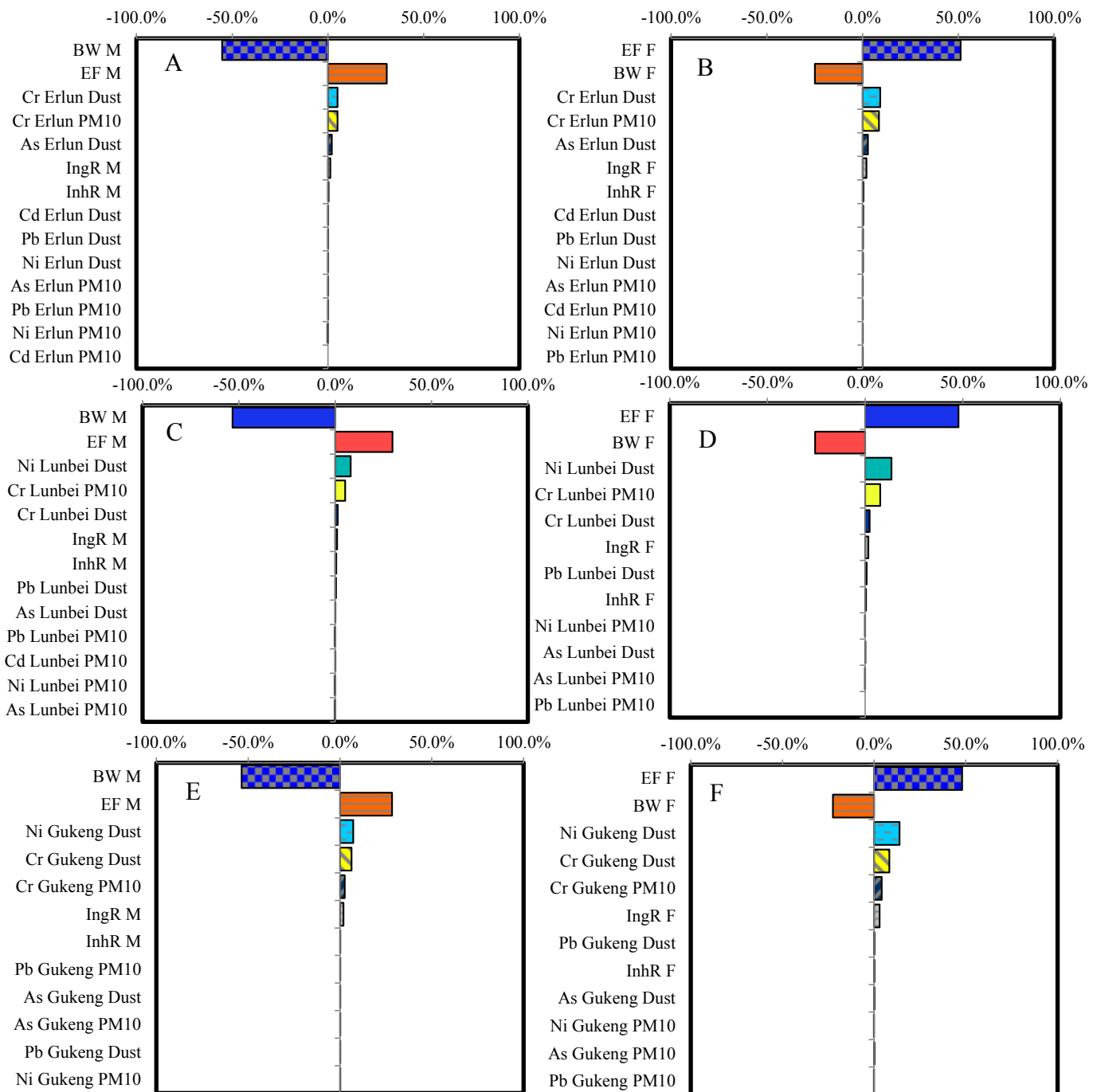
圖十三為非致癌效應之靈敏度分析，圖 A、B 為二崙地區男性及女性，圖 C、D 為崙背地區男性及女性，圖 E、F 為古坑地區之男性及女性，暴露十八年之男性皆以體重為影響非致癌風險最主要變量，第二為暴露頻率；而對於女性最主要影響變量為暴露頻率，接著為體重，男性及女性在非致癌風險及靈敏度分析差異主要在於平均體重的不同(Li et al, 2014)。致癌效應靈敏度分析結果顯示如圖十四表示，除了古坑男性之外，影響最大因子為塵土中鉻金屬，而古坑男性(圖十四之 E)最主要影響致癌效應的變量則為體重。



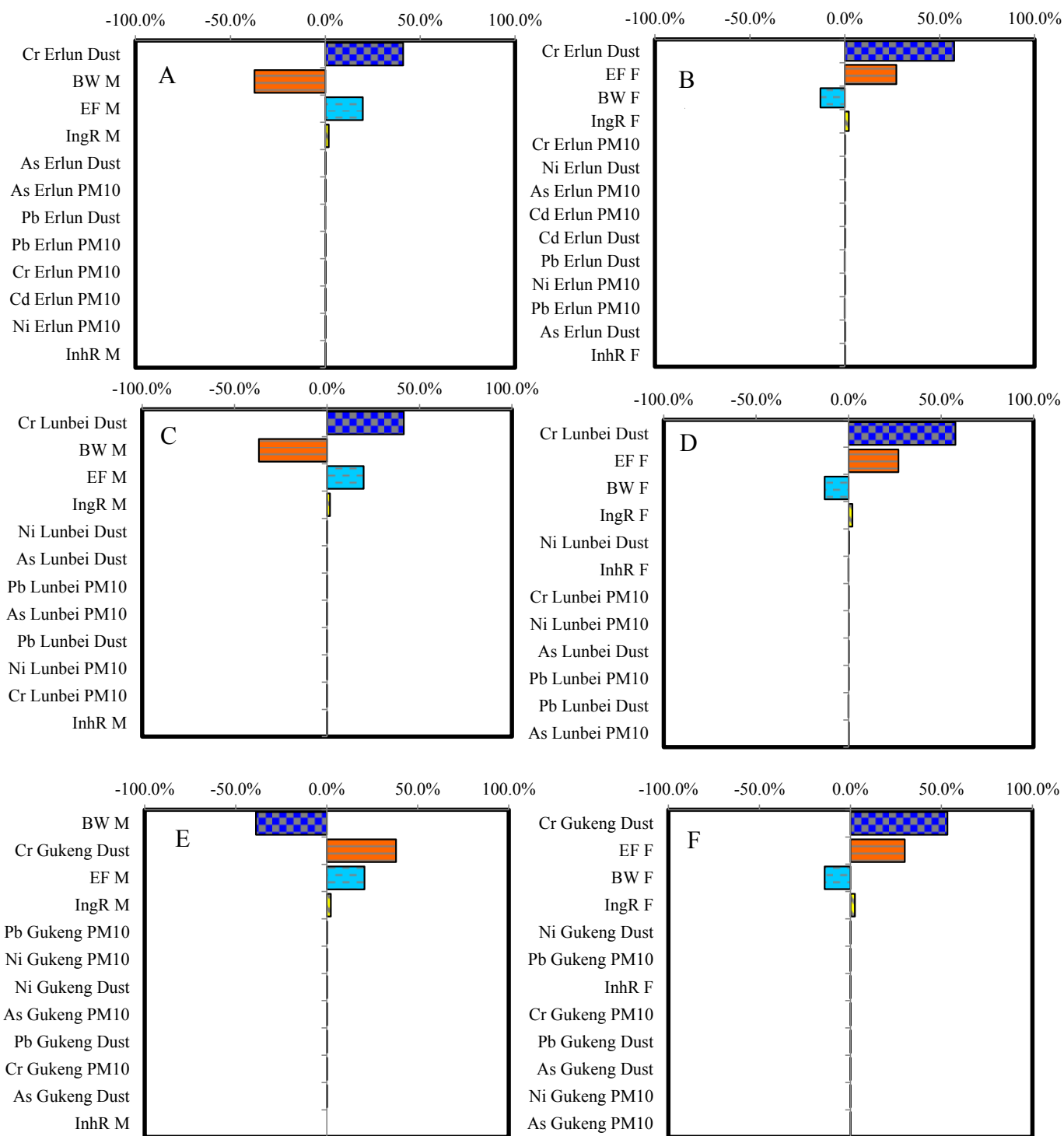
圖十一、暴露六年非致癌效應之靈敏度分析



圖十二、暴露六年致癌效應之靈敏度分析



圖十三、暴露十八年非致癌效應之靈敏度分析



圖十四、暴露十八年致癌效應之靈敏度分析

第五章、結論與建議

5.1 結論

依據過去揚塵期間重金屬採樣濃度與國小學童假設六年及十八年暴露期間及相關暴露參數評估，結果顯示暴露濃度與危害指數(HI)於性別及地區差異並不明顯，且五種金屬的 HI 評估後皆小於 1。而暴露濃度與致癌風險(CR)於性別及地區同樣差異不明顯，但兩情境之致癌風險加總數值在 10^{-6} ~ 10^{-4} 間，為可接受致癌風險。靈敏度分析結果顯示，對於暴露六年，暴露頻率(EF)對於 HI 最為相關($r=0.5$)，其次為體重因子；而塵土中鉻金屬(Cr)對於 CR 最為相關($r=0.5$)。對於暴露 18 年，男性對於體重(BW)對於 HI 最為相關($r=0.5$)，女性則為暴露頻率(EF)；而塵土中鉻金屬(Cr)對於 CR 最為相關($r=0.5$)。

因此，二崙、崙背及古坑地區之孩童在國小六年期間，甚至暴露於河川揚塵中 18 年中皆在可接受風險範圍內，不會對健康造成不良效應。

5.2 未來研究建議

1. 本研究之體重數據來自於台灣民眾暴露彙編，期望之後能有當地孩童正確體重資料。
2. 攝入率之數據來源為 USEPA IRIS，但美國與台灣之體重、習慣皆不相同，認為需有台灣自己統整之數據資料更為恰當。

第六章、參考文獻

1. Cui X, Wang X, Liu B. 2020. The characteristics of heavy metal pollution in surface dust in Tangshan, a heavily industrialized city in North China, and an assessment of associated health risks. *Journal of Geochemical Exploration*. 210: 106432.
2. Dirk S. 2012. Nickel species: Analysis and toxic effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 26:1-6.
3. Duker AA, Carranza EJ, Hale M. 2005. Arsenic geochemistry and health. *Environment International*. 31:631–641.
4. EPA, 2019. <https://www.epa.gov/fera/risk-assessment-carcinogenic-effects>.
5. International Agency for Research on Cancer, 2019. <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>.
6. Kuo CY, Lin CY, Huang LM, Wang S, Shieh PF, Lin YR, Wang JY. 2010. Spatial variations of the aerosols in river-dust episodes in central Taiwan. *Journal of Hazardous Materials*. 179:1022-1030.
7. Kuo CY, Yang HJ, Chiang YC, Lai DJ, Shen YH, Liu PM. 2014. Concentration and composition variations of metals in the outdoor PM₁₀ of elementary schools during river dust episodes. *Environmental Science and Pollution Research*. 21:12354-12363.
8. Li Z, Ma Z, Kuijp TJ, Yuan Z, Huang L. 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*. 468-469:843-853.
9. Lin CY, Lee YH, Kuo CY, Chen WC, Sheng YF, Su CJ. 2018. Impact of river-dust events on air quality of western Taiwan during winter monsoon: Observed evidence and model simulation. *Atmospheric Environment*. 192:160-172.
10. Lin MC, Liao CM. 2008. Assessing the risks on human health associated with inorganic arsenic intake from groundwater-cultured milkfish in southwestern Taiwan. *Food Chem Toxicol*. 46:701–709.
11. Men C., Liu R., Xu F., Wang Q., Gou L., Shen Z. 2018. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China. *Science of the Total Environment*. 612:138-147.
12. Rehman A, Liu G, Yousaf B, Rehman MZ, Ali MU, Rashid MS, Farooq MR, Javed Z. 2020. Characterizing pollution indices and children health risk assessment of potentially toxic metal(oid)s in school dust of Lahore, Pakistan. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 190:110059.
13. Sharafi K, Yunesian M, Nodehi RN, Mahvi AH, Pirsahab M. 2019. A systematic literature review for some toxic metals in widely consumed rice types (domestic and imported) in Iran: Human health risk assessment, uncertainty and sensitivity analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 176:64-75.
14. Xu P, Chen Y, He S, Chen W, Wu L, Xu D, Chen Z, Wang X, Lou X. 2020. A follow-up study on the characterization and health risk assessment of heavy metals in ambient air particles emitted from a municipal waste incinerator in Zhejiang, China. *Chemosphere*. 246:125777.

15. Yang Q, Li Z, Lu X, Duan Q, Huang L, Bi J. 2018. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment*. 642:690-700.
16. 國家毒物環境中心，2019，
http://nehrc.nhri.org.tw/toxic/toxfaq_detail.php?id=65。
17. 經濟部工業局，2006，重金屬土壤及地下水污染預防整治技術手冊。