

科技部補助
大專學生研究計畫研究成果報告

計 畫 名 稱	： 建立網路介面之風險計算工具-以有害空氣汙染物 PAHs為例
------------	------------------------------------

執行計畫學生：董芷廷

學生計畫編號：MOST 107-2813-C-040-023-E

研究期間：107年07月01日至108年02月28日止，計8個月

指導教授：張士昱

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 108年02月27日

摘要

多環芳香烴化合物(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是一種在環境中因不完全燃燒所生成的有害空氣污染物。長期暴露 PAHs 可能會有致癌性、突變性與致畸性的影響。台灣已發表許多 PAHs 於不同環境介質的採樣數據，但尚未開發出針對 PAHs 風險計算之工具，因此，本研究目的是利用 Visual Basic.Net 軟體，應用於(1)建立 21 種 PAHs 化合物或以暴露途徑分別進行風險計算，(2)以五種特徵比值(Diagnosis Ratio)來源判定標準，幫助使用者以簡易操作方式，建立指紋圖推測 PAHs 可能來源。此系統操作介面採用 GUI(Graphical User Interface)技術，以個別風險或多暴露計算出受試者之增量終身癌症風險(Incremental Lifetime Cancer Risk, ILCR)與危害風險(Hazard Quotient, HQ)。軟體分為三分頁，第一分頁以 21 種 PAHs 化合物濃度輸入欄位並計算非致癌與癌症風險；第二分頁為暴露途徑計算 ILCR，包含吸入、攝入與皮膚接觸三種途徑；第三分頁以五種不同判別 PAHs 來源的比值，包含 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{PA})$ 、 $\text{PA}/(\text{PA}+\text{Ant})$ 、 $\text{IND}/(\text{IND}+\text{BghiP})$ 、 $\text{FL}/(\text{FL}+\text{Pyr})$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})$ 。本研究開發軟體期望可應用於台灣之使用者採樣 PAHs 後，快速計算是否具有相關的風險值，以達到監督台灣民眾健康。然本研究之限制為(1)多數參數輸入雖有提供參考值，但仍需具備基礎風險認識人士使用，(2)提供的五種特徵比值，在來源判定僅為第一階段的初步判定，還需以其他污染源、受體模式或天氣資訊加以佐證，才可增加來源判定的解釋能力。

關鍵詞：健康風險評估、多環芳香烴化合物、PAHs、風險計算軟體、來源判斷

目錄

第一章、 前言	
1.1 研究動機.....	3
1.2 研究目的.....	3
第二章、 文獻回顧	
2.1 PAHs 生成機制與來源.....	4
2.2 PAHs 對人體健康危害.....	6
2.3 PAHs 來源判斷.....	7
2.4 風險計算軟體開發現況.....	8
第三章、 材料與方法	
3.1 研究架構.....	12
3.2 健康風險計算公式.....	12
3.3 內建參考數值及來源.....	15
3.4 PAHs 來源判定依據.....	18
3.5 案例演示.....	19
3.6 Visual Basic.....	19
第四章、 結果與討論	
4.1 軟體簡介.....	20
4.2 各種化合物計算風險－案例說明.....	22
4.3 暴露途徑計算風險－案例說明.....	27
4.4 判定暴露來源－案例說明.....	29
第五章、 結論與建議	
5.1 研究成果的應用性.....	32
5.2 軟體開發限制.....	32
參考文獻.....	33

第一章、前言

1.1 研究動機

現今的大眾逐漸重視空氣品質與食安問題。多環芳香烴化合物是可以藉由多種途徑暴露之污染物，再加上美國環保署與國際癌症中心目前確定對人體有機會造成致癌。台灣目前已發表許多 PAHs 於不同環境介質的採樣數據，卻無開發有關 PAHs 風險計算之工具。除此之外，PAHs 的來源多半為人類活動造成，有住家活動及工業活動等(Rezaei et al., 2018; Li et al., 2003; Shahtaheri et al., 2006; Shahtaheri et al., 2007)，而也有許多研究有針對不同 PAHs 的化合物進行來源分析解釋。

1.2 研究目的

本研究利用 Visual Basic.Net 建立一個風險計算模組與判定來源模組：

- (1) 風險計算程式中分別建立以 21 種 PAHs 化合物或以暴露途徑進行計算。
- (2) 判定來源以五種特徵比值(Diagnosis Ratio)來源判定標準，幫助使用者以簡易操作，建立指紋圖並推測其來源。

第二章、文獻回顧

2.1 PAHs 特性、生成機制與來源

多環芳香烴化合物(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一種於環境中結合多種結構及毒性的化合物(Nisbet and LaGoy, 1992; Dat and Chang, 2017)。PAHs 為兩個或兩個以上苯環鍵結而成之碳氫化合物，為非極性物質，不易溶於水，且具高熔點高沸點之特性，在 25°C 下，其蒸氣壓介於 10⁻²~ 10⁻¹¹mmHg 之間，且多為屬於半揮發性有機物(Semivolatile Organic Compounds, SOCs)，PAHs 因蒸氣壓之性質具有氣態與固態的形式。而 PAHs 之揮發性會根據分子量而有所變化，多半分子量低，其揮發性亦較低。本研究主要探討 21 種 PAHs，其名稱縮寫、分子量、蒸氣壓及結構式，如表一所示。






















PAHs 的形成原因是因為碳氫化合物的不完全燃燒(incomplete combustion)和熱解(Pyrolysis)作用所形成(Dat and Chang, 2017)。PAHs 的生成分為兩種機制：

- 一、碳化過程(Carbonization Process)：進行的過程中會產生放熱反應，所產生的溫度一般<300°C，導致不飽和碳氫化合物與碳之間的雙鍵或參鍵造成完全或不完全斷裂的現象，而斷裂後的不穩定產物經末端原子團互相吸引而聚合，形成穩定的多環芳香烴化合物。
- 二、熱解或不完全燃燒：碳氫化合物在高溫且缺氧的條件下會熱裂解成碳與碳鍵(C-C)及碳與氫鍵(C-H)，易形成自由基，此自由基在>400°C之環境下，易與未完全燃燒之碳氫化合物形成 PAHs。

多環芳香烴化合物的來源可分為自然與人為兩類。自然來源有森林大火、火山爆發等(Rezaei et al., 2018; Li et al., 2003; Moradi Rad et al., 2015; Shahtaheri et al., 2006)。而人類活動為 PAHs 主要來源，可分為移動源與固定源，其中移動源為交通排放；固定源為住家活動及工業活動等(Rezaei et al., 2018; Li et al., 2003; Shahtaheri et al., 2006; Shahtaheri et al., 2007)，相關研究調查台灣 21 種 PAHs 並估算出排放率，顯示出人為之 PAHs 來源為工業活動為主(Yang and Chen, 2004)。除了工業污染之外，PAHs 亦會發生於食物處理時，根據 Chen et al. (2013)調查台灣的男性每日肉品為 202.53 g/day；女性為 129.83 g/day，再加上因為燒烤後的香氣與味道，在居家或餐廳吃燒烤的人數大幅提升，但燒烤的油脂碰上木炭之後，高溫裂解會產生含 PAHs 的煙霧，並附著於食物表面上(Kao et al., 2014)，以導致

吸入與攝入同時暴露。

表一、21 種 PAHs 之分子量、蒸氣壓及結構式

化合物	縮寫	分子量	蒸氣壓 (mmHg)	結構式
Naphthalene	Nap	128	7.80×10^{-2}	
Acenaphthylene	AcPy	152	6.70×10^{-3}	
Acenaphthene	Acp	154	2.15×10^{-3}	
Fluorene	Flu	165	6.00×10^{-4}	
Phenanthrene	PA	178	1.20×10^{-4}	
Anthracene	Ant	178	6.00×10^{-6}	
Fluoranthene	FL	202	9.20×10^{-6}	
Pyrene	Pyr	202	4.50×10^{-6}	
Cyclopenta[cd]pyrene	CYC	228	-	
Benz[a]anthracene	BaA	228	2.10×10^{-7}	
Chrysene	CHR	228	6.40×10^{-9}	
Benzo[b]fluoranthene	BbF	252	-	
Benzo[k]fluoranthene	BkF	252	-	
Benzo[e]pyrene	BeP	252	-	
Benzo[a]pyrene	BaP	252	5.60×10^{-9}	
Perylene	PER	252	-	
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	IND	276	-	
Dibenz[a,h]anthracene	DBA	278	-	
Benzo[b]chrysene	BbC	278	-	
Benzo[ghi]perylene	BghiP	276	-	
Coronene	COR	300	-	

-: 表示無相關數據

2.2 PAHs 對人體健康危害

PAHs 的進入人體的主要途徑有三種，包含吸入、攝入與皮膚接觸。其中吸入途徑為大氣中的 PAHs 燒烤之煙霧或抽菸，菸品當中包含了很多種 PAHs，例如 BaP，與其他可能會致癌之化合物(Abdel-Shafy and Mansour, 2016; Lannerö et al., 2008)；攝入途徑為食用經由燒烤處理過後的食品、受汙染的食物、水等，或者誤食進受過受汙染的土壤。皮膚接觸可分為職業性暴露或非職業性暴露。有時暴露到 PAHs 並非只有單一路徑，也有可能同時暴露多個途徑，這會影響總暴露濃度與風險之結果(Abdel-Shafy and Mansour, 2016)。

PAHs 對人體危害依致癌性分為兩種：非致癌性與致癌性。

一、非致癌性：根據 Unwin et al. (2006)，短期性最明顯的是受到職業性暴露的勞工，會導致他們噁心嘔吐、眼睛的刺激及腹瀉長期的影響包含皮膚紅腫、過敏、白內障、腎或肝受損、呼吸性問題及肺功能異常等可能。Abdel-Shafy and Mansour (2016)指出免疫增強時會使免疫細胞增加細胞激素，而導致發炎反應。也可能發生過敏，腫瘤生長或自體免疫疾病。

二、致癌性與致突變性：長期暴露可能引發癌症的風險，如生物化學破壞或細胞損害發生會導致突變、畸形、腫瘤和癌症。美國環保署(United States Environmental Protection Agency, US EPA)指出長期吸入 PAHs 下可能會導致肺癌，長期攝入則可能會導致胃癌(Chan et al., 2013)，而長期接觸則可能有皮膚癌。US EPA 與國際癌症研究中心(International agency for research on cancer, IARC)皆提出 PAHs 癌症性的分類，表二為 21 種 PAHs 物質癌症證據分類統整。其中 Benzo[a]pyrene(BaP)最為先被確認為人類致癌物質，而 NaP 為氣態 PAHs 之主要組成，雖然於 US EPA 與 IARC 致癌分類中較低，但其可能造成之影響仍不容忽視。

表二、21 種 PAHs 之美國環保署與國際致癌分類

化合物	縮寫	USEPA ^a	IARC ^b
Naphthalene	Nap	C	2B
Acenaphthylene	AcPy	D	-
Acenaphthene	Acp	-	3
Fluorene	Flu	D	3
Phenanthrene	PA	D	3
Anthracene	Ant	D	3
Fluoranthene	FL	D	3
Pyrene	Pyr	D	3
Cyclopenta[cd]pyrene	CYC	-	2A
Benz[a]anthracene	BaA	B2	2B
Chrysene	CHR	B2	2B
Benzo[b]fluoranthene	BbF	B2	2B
Benzo[k]fluoranthene	BkF	B2	2B
Benzo[e]pyrene	BeP	-	3
Benzo[a]pyrene	BaP	B2	1
Perylene	PER	-	3
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	IND	B2	2B
Dibenz[a,h]anthracene	DBA	B2	2A
Benzo[b]chrysene	BbC	-	3
Benzo[ghi]perylene	BghiP	B	3
Coronene	COR	-	3

^a 美國環保署致癌性分類。A: 已知人類致癌物; B: 疑似人類致癌物; B1: 在動物毒性實驗中, 有足夠證明為致癌物, 但流行病學中資料有限; B2: 在動物毒性實驗中, 足以證明的資料有限, 而在人類流行病學中無相關資料; C: 可能為人類致癌物; D: 無法確認是否為致癌物; E: 為非人類致癌物; -: 表示無相關數據。

^b 國際癌症研究中心(Volumes 1-120, 2017)。Group 1: 已證實為致癌物; Group 2A: 人類致癌證據有限; Group 2B: 可能為致癌因子; Group 3: 致癌性證據缺乏; Group 4: 已證明為非人類致癌物; -: 表示無相關數據

2.3 PAHs 來源判斷

大氣中 PAHs 有許多來源, 如前文提及的自然來源與人為來源。而排放來源取決於產生 PAHs 的過程(Tobiszewski and Namiesnik, 2012; Manoli et al., 2004)。當低溫燃燒時, 產生低分子量的 PAHs, 如: 木材燃燒; 而高溫燃燒時, 則形成更高分子量的 PAHs, 如: 引擎中的燃料燃燒(Tobiszewski and Namiesnik, 2012; Mostert et al., 2010)。大氣中 PAHs 多以混合來源, 除了指標性物種判斷污染物來源之外, 也利用 PAHs 組成成分比例或相對分子濃度比做為排放源之判斷(Tobiszewski and Namiesnik, 2012), 因此 PAHs 特徵比值(characteristic ratio/diagnostic ratios)可做為判定污染物來源之重要工具。

表三為 PAHs 來源之特徵比值整理, 其來源大約分為石油揮發、燃燒、生質燃燒、工業排放、汽柴油車排放等等。然而, 特徵比值可能因為採樣環境、儀器

設備及排放源高低，而有所差異(陳俊宇, 2016)。

2.4 風險計算軟體開發現況

目前風險計算開發情形，依分成兩種，如表四：

1. 危害物暴露風險工具：世界銀行與加拿大國際發展機構共同開發的 Persistent Organic Pollutant toolkit，此工具是針對暴露有機農藥的民眾所研發，此工具之優點操作介面清晰，且須填空處後面有詳細解釋。但由於此種風險計算工具需知暴露濃度、頻率等等資訊，較適合專業人士進行使用。
2. 疾病風險工具：此種是目前風險工具開發最多，多半採問答型或者是目前民眾可自行檢驗項目，則民眾可以藉由工具進行簡易的身體檢查。以 The Absolute CVD Risk/Benefit Calculator 為例，此工具是民間公司所研發，提供四種不同文獻的計算模式，使用者可自行選擇，操作簡易，結果以表情圖案表示風險程度，皆有提供文獻佐證，增加可信度。

表三、PAHs 判定來源之特徵比值

特徵比值	比率	來源	資料來源
Σ LMW/ Σ HMW	<1	熱裂解	Zhang et al., 2008; Tobiszewski and Namiesnik, 2012
	>1	石油揮發	
ANTHR/(PHE+ANTHR)	<0.1	石油揮發	Budzinski et al. 1997
	>0.1	燃燒	
FL/(FL+Pyr)	<0.4	石油揮發	Yunker et al., 2002; Tobiszewski and Namiesnik, 2012
	0.4-0.5	液態化石燃料	
	≥ 0.5	植物、木頭或煤	Sicre et al. 1987
	0.6-0.7	柴油機	
	0.4	汽油	Rogge et al. 1993
	0.53	煤	
	0.74	木柴	Pyysalo et al. 1987
	0.21-0.26	工業	Yang and Chen, 2004; Yang et al., 1998
BaA/(BaA+CHR)	<0.2	石油	Yunker et al., 2002
	0.2-0.35	石油或燃燒	
	>0.35	燃燒	
	0.5	工業	
	0.38-0.65	柴油機	Oliveira et al., 2011; Kavouras et al., 1999
	0.43	汽油機	Retnam et al., 2013; Kavouras et al., 2001
	0.22-0.55	汽油	Oliveira et al., 2011; Kavouras et al., 1999; Pio et al., 2001; Ravindra et al., 2006
	0.38-0.65	柴油	Retnam et al., 2013; Khalili et al., 1995
	0.21-0.22	汽油	Oliveira et al., 2011; Grimmer et al., 1983
	0.56	煤	Oliveira et al., 2011; Gogou et al., 1996
	0.62	木頭	Yang and Chen, 2004; Yang et al., 1998
	0.36-0.57	工業	
	BaA/CHR	0.17-0.36	柴油排放
0.28-1.20		汽油排放	
1.05-1.17		煤	
0.93		木頭	
(BbF+BkF)/BghiP	1.6	柴油	Yang and Chen, 2004; Li and Kamens, 1993
	0.33	汽油	Rogge et al. 1993
	2.18	木頭	
	7.1-11.2	工業	Yang and Chen, 2004; Yang et al., 1998
IND/(IND+BghiP)	0.18	汽油	Kavouras et al. 1999
	<0.2	石油	Yunker et al. 2002

表三(續)、PAHs 判定來源之特徵比值

特徵比值	比率	來源	資料來源
	0.2~0.5	液態化石燃料	Yunker et al. 2002
	>0.5	植物、木頭，煤	
IND/(IND+BghiP)	0.35-0.7	柴油	Kavouras et al. 1999; Pio et al. 2001; Ravindra et al. 2006; Rogge et al. 1993
	0.21-0.22	汽油	Khalili et al. 1995
	0.62	木頭	Gogou et al. 1996
BaP/(BaP+CHR)	0.73	汽油排放	Khalili et al. 1995
	0.68	柴油	
BaP/BghiP	0.46-0.81	柴油	
	0.3-0.4	汽油	Simcik et al. 1999
	0.9-6.6	煤	
IND/BghiP	0.27-0.4	汽油機	Caricchia et al. 1999
	1	柴油機	
	1.06-1.12	煤/焦煤	Caricchia et al. 1999; Dickhut et al. 2000
PHE/PHE+ANTHR	<0.7	生物質燃燒	Kavouras et al. 1999
	>0.7	化石燃料	Kavouras et al. 1999; Alves et al. 2001
	0.82	木頭	Barbosa et al. 2006
BeP/BaP	1	新懸浮微粒	Grimmer et al., 1983
	>1	舊懸浮微粒	
BeP/BeP+BaP	0.29-0.4	柴油	Rogge et al. 1993
	0.6-0.8	汽油	
	0.48	木頭	Pyssalo et al. 1987
	0.17-0.48	工業	Yang and Chen, 2004; Yang et al., 1998
Flu/(Flu+Pyr)	0.4-0.5	車輛排放	Kavouras et al. 1999; Yunker et al. 2002
	<0.5	石油排放	Ravindra et al., 2008b ;
	>0.5	柴油排放	Tobiszewski and Namiesnik, 2012
BbF/BkF	>0.5	柴油	Pandey et al. 1999; Park et al. 2002
	2.5-2.9	鋁冶煉廠排放	Callén et al., 2011
MePHE/PHE	<1	石油燃燒	Callén et al., 2011;
	>1	柴油燃燒	Tobiszewski and Namiesnik, 2012
	0.7	汽油	Barakat. 2002; Takada et al. 1990
	5.2	柴油	Barakat. 2002
	1.73-8.17	柴油	Takada et al. 1990
Pyr/BaP	~10	柴油	Ravindra et al. 2008a
	~1	汽油	

表四、目前風險工具開發現況

計算工具	開發單位	優點	軟體使用對象
危害 物暴 露	^a Persistent Organic Pollutant toolkit	1. Canadian International Development Agency 2. World Bank 3. Hatfield Consultants	1. 專業人士
疾病	^b The Absolute CVD Risk/Benefit Calculator	1. Therapeutics Education Collaboration 2. James McCormack 3. Pascal Pfiffner	1. 專業人士 2. 一般民眾
	^c Medical decision support tools	1. QxMD 2. 超過 400 種疾病風險評估	1. 專業人士
	^d Breast Cancer Risk Assessment Tool	1. National Cancer Institute 2. 介面簡單明瞭 3. 填寫方式簡單 3. 結果以圓餅圖表示風險 並加文字補充	1. 專業人士
	^e Heart Disease Risk Calculator	1. ^f Mayo Clinic 2. 最後會給使用者降低風 險之建議與風險因子為 何 2. 填寫飲食方面問題時會 給予計算的參考	1. 一般民眾

^a Retrieved October 04, 2018. <http://www.popstoolkit.com/riskassessment/riskcalculationtool.aspx>.

^b Retrieved October 04, 2018. <http://chd.bestsciencemedicine.com/calc2.html>.

^c Retrieved October 04, 2018. <https://qxmd.com/calculate/>.

^d Retrieved October 04, 2018. <https://bcrisktool.cancer.gov/calculator.html>.

^e Retrieved October 04, 2018. <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/heart-disease/in-depth/heart-disease-risk/itt-20084942>.

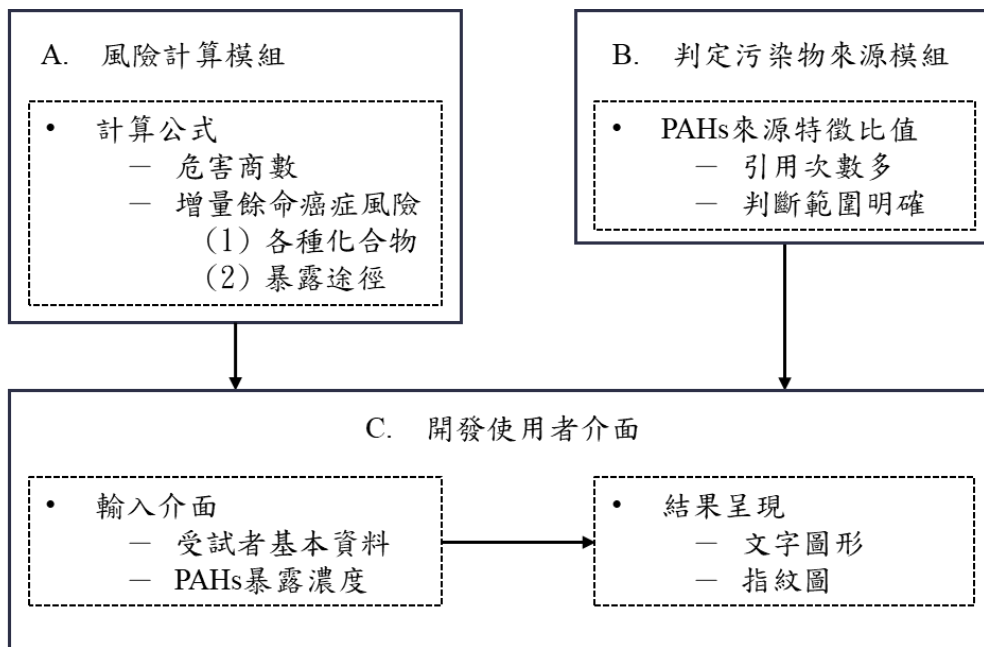
^f Mayo Clinic: 位於美國明尼蘇達州羅徹斯特 (Rochester) 的非營利性組織，一個全面的醫療保健系統，包括門診、醫院、醫學研究及醫學教育機構。

第三章、材料與方法

3.1 研究架構

圖一為本研究之架構圖，第一種功能為風險計算模組，開發能讓使用者利用現有資料進行受試者之健康風險的計算，依資料來源可區分為二類計算方式：(1) 已知 21 種 PAHs 之個別濃度(2) 已知多種暴露途徑之濃度。第二種功能為判定 PAHs 來源模組選出引用次數多且判斷範圍較明確之特徵比值並建立指紋圖。

本研究開發之模組介面採用 GUI 技術，以點選方式並搭配填空，以利高度使用者友善操作。本研究利用 Visual basic. net 電腦程式語言編碼，開發兩種模組：風險計算模組、判定污染物來源模組，依使用者需求而選用。



圖一、研究架構

3.2 健康風險計算公式

表五為程式中計算健康風險所使用之公式，其中意義如下：

(1) 每日暴露量估算(Average Daily Dose, ADD)

$C(\text{mg}/\text{m}^3)$ 為各介質採樣得到的 PAHs 濃度， $IR(\text{m}^3/\text{day})$ 為暴露參數，依據不同途徑有不同參數值。EF、ED 為暴露頻率與暴露期間。 $BW(\text{kg})$ 為體重，AT 為平均暴露到癌症風險的時間。

(2) 非致癌風險估算與參考劑量

非致癌風險計算中常使用參考濃度(Reference Concentration in Air(mg/m^3), RfC)及參考劑量(Reference Oral Dose($\text{mg}/\text{kg}\text{-day}$), RfD)當作參考值,而 RfC 與 RfD 是使用動物實驗推論到人的推估風險值。本研究參考 IRIS 的 PAHs 數據,探討非致癌風險估算,一併使用 RfD 當作參考劑量,表六所示。

非致癌風險是以危害商數(Hazard Quotient, HQ)表示,其中 ADD 為每日暴露濃度。暴露多個化合物之 HQ 相加可得危害指數(Hazard Index, HI)。當 $\text{HI} < 1$ 時,表示在評估條件下不會有非癌症風險,可忽略;反之,當 $\text{HI} > 1$ 時,表示在暴露評估條件下會有非致癌風險。

(3) 增量終生癌症風險估算(ILCR)

增量終生癌症風險 (incremental lifetime cancer risk, ILCR)為 US EPA 發展出來的公式,評估民眾在環境中暴露的致癌物質,計算終身癌症風險。依據不同暴露途徑,可分為吸入、攝入、皮膚接觸,其算式為表五中(4)、(5)及(6)。

其中 E 為每日 PAHs 暴露濃度(mg/m^3), CSF 為癌症斜率因子($\text{mg}/\text{kg}\text{-day}$)⁻¹, BW 為體重(kg), IR_{inh} 為吸入率(m^3/day), IR_{ing} 為攝入率(m^3/day), EF 為暴露頻率(day/year), ED 為暴露期間(year), AT 為平均暴露到癌症風險時間(day), AB 為皮膚吸收分率, SA 為皮膚接觸表面積(cm^2), EV 為暴露頻率(event/year), AF 為皮膚附著率($\text{mg}/\text{cm}^2\text{-event}$), cf 為轉換因子(10^{-6})。而美國環境保護署所建議標準為百萬分之一 (10^{-6})。公式中的平均體重預設是引用國家攝食資料庫(2016)之數據,而會依據使用者所填寫受試者的性別與年齡而變動,如表七。

表五、健康風險計算公式

$ADD(\text{mg / kg day}) = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$	(1)
$HQ = \frac{ADD}{RfD}$	(2)
$HI = \sum HQ$	(3)
$ILCR_{inh} = \frac{E_i \times \left(CSF_{inh} \times \left(\frac{BW}{\text{平均體重}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf$	(4)
$ILCR_{ing} = \frac{E_i \times \left(CSF_{ing} \times \left(\frac{BW}{\text{平均體重}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \times IR_{ing} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf$	(5)
$ILCR_D = \frac{E_d \times \left(CSF_D \times \left(\frac{BW}{\text{平均體重}} \right)^{\frac{1}{3}} \right) EV \times SA \times AF \times AB \times EF \times ED}{BW \times AT} \times cf$	(6)

表六、USEPA 中 PAHs 非致癌 RfC 與 RfD 值

化合物	RfC (mg/m ³)	RfD (mg/kg-day)	資料來源
Naphthalene	3*10 ⁻³	2*10 ⁻²	IRIS 數據 CASRN 91-20-3
Acenaphthene	-	6*10 ⁻²	IRIS 數據 CASRN 83-32-9
Fluorene	-	4*10 ⁻²	IRIS 數據 CASRN 86-73-7
Anthracene	-	3*10 ⁻¹	IRIS 數據 CASRN 120-12-7
Fluoranthene	-	4*10 ⁻²	IRIS 數據 CASRN 206-44-0
Benzo[a]pyrene	2*10 ⁻⁶	3*10 ⁻⁴	IRIS 數據 CASRN 50-32-8
Pyrene	-	3*10 ⁻²	IRIS 數據 CASRN 129-00-0

表七、系統預設的平均體重

參考值	單位	小孩				資料來源
		0~6	6~18	19~64	>=65	
體重 (BW)	kg	^a 17.17	^a 55.09	^a 69.33	^a 63.83	國家攝食資料庫(2016)
		^b 16.56	^b 47.84	^b 57.27	^b 57.07	

^a 為男性之平均值; ^b 為女性平均值

3.3 內建參考數值及來源

為了讓使用者能夠更方便計算，程式提供參數的參考文獻，如表八至表十一。程式中所提供的參數值並非強制性使用，是為避免使用者無參數而無法做計算。

表八中的暴露期間使來自內政部統計處(2016)，所統計男女個別的平均餘命為參考，而平均暴露至癌症風險(AT)是以平均餘命乘上 365 天轉換而成。癌症斜率因子是參考 US EPA(2017)中 BaP 的癌症斜率因子，攝入癌症因子 1 mg/kg-day，吸入癌症因子為 $6 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。US EPA(2004)中提到皮膚吸收分率為 0.13，而小孩之皮膚附著率為 $0.2 \text{ mg}/\text{cm}^2\text{-event}$ ；成人之皮膚附著率為 $0.07 \text{ mg}/\text{cm}^2\text{-event}$ 。

表八、基本資料參考值

參考值	單位	數值	資料來源
暴露期間 (ED)	year	76.81(M); 83.42(F)	內政部統計處(2016)
平均暴露至癌症 風險期間 (AT)	day	28036(M); 30448(F)	內政部統計處(2016)
癌症斜率因子	mg/kg-day $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1(Ing); 6×10^{-4} (Inh)	US EPA(2017)
皮膚吸收分率	—	0.13	
皮膚附著率	($\text{mg}/\text{cm}^2\text{-event}$)	0.2(Children); 0.07(adult)	US EPA(2004)

M: male; F: female; Ing: 攝入癌症斜率因子; Inh: 吸入癌症斜率因子

表九至表十一是引用台灣一般民眾暴露參數彙編(2008)中的男女年齡層每人每日平均呼吸通氣量、平均飲水量及 19 至 64 歲總體表面積。

US EPA(1989)的報告中顯示，BaP 無論是吸入、攝入或皮膚接觸，皆有得到癌症的風險因此 BaP 在癌症風險中扮演重要的角色。目前許多研究有建立個別 PAHs 之相對毒性因子，並推估其相當於 BaP 之等當量相似值(BaP_{eq})，作為 PAHs 致癌性風險評估之依據，使各 PAHs 物種相對於等值 BaP 之毒性。以毒性最高 BaP 為基準，值定為 1，其餘 20 種化合物依據此基準進行致癌比較，本研究採用 Nisbet and LaGoy (1992)及 Kalberlah et al. (1995)為參考值，使用者可自行選擇，如表十二。將個別 PAHs 化合物之 TEFs 值乘上相對應之 PAHs 濃度，所得到的

值為毒性當量濃度(BaPeq)，加總所有個別的 BaPeq 可代表暴露 PAHs 之濃度，可依據不同暴露途徑，將暴露劑量及暴露參數代入 ILCR 模式計算癌症風險。

表九、各性別年齡層每人每日平均呼吸通氣量

性別	年齡(歲)	吸入率 (m ³ /day)	
		靜止	活動
男	1	5.90	13.97
	7	6.30	14.60
	8	6.87	13.33
	9	7.26	18.79
	10	7.80	19.26
	11	7.93	19.41
	12-14	9.03	18.31
	15-19	9.35	19.68
	20-24	9.74	18.42
	25-34	9.56	20.01
	35-54	9.58	16.57
	55-64	9.29	16.81
	女	6	5.29
7		5.70	11.70
8		6.08	13.37
9		6.54	16.34
10		7.01	16.81
11		6.95	18.05
12-14		7.45	12.48
15-19		7.14	12.62
20-24		7.14	11.86
25-34		7.47	11.79
35-54		7.50	13.72
55-64	7.58	11.54	

表十、各性別年齡層每日平均飲水量

性別	年齡	每日平均飲水量(L/day)
男	20-29	1.43
	30-39	1.52
	40-49	1.73
	50+	1.58
女	20-29	1.24
	30-39	1.35
	40-49	1.31
	50+	1.30

表十一、各性別 19 至 64 歲總體表面積

性別	年齡	19 至 64 歲總體表面積(平方公分)
男	19-24	17551.0
	25-29	17796.1
	30-34	17872.6
	35-39	17818.8
	40-44	17578.4
	45-49	17546.4
	50-54	17733.8
	55-59	17182.5
女	60-64	17120.3
	19-24	14971.6
	25-29	15537.9
	30-34	15256.2
	35-39	15249.4
	40-44	15550.0
	45-49	15475.2
	50-54	15870.3
55-59	15530.0	
60-64	15558.9	

表十二、PAHs 毒性當量因子(TEFs)

	Nisbet and LaGoy (1992)	Kalberlah et al. (1995)
Nap	0.001	—
AcPy	0.001	0.001
Acp	0.001	0.001
Flu	0.001	0
PA	0.001	0
Ant	0.01	0.01
FL	0.001	0.001
Pyr	0.001	0.001
BaA	0.1	0.1
CHR	0.01	—
BbF	0.1	0.1
BkF	0.1	0.1
BaP	1	1
IND	0.1	0.1
DBA	1	1
BghiP	0.01	0.01
COR	—	0.001

—：表示無相關數據

3.4 PAHs 來源判定依據

表十三為本研究使用於系統之判定來源的特徵比值，PAHs 之排放來源眾多，因不同污染物在不同條件下燃燒所產生之 PAHs 組成特性不同，而有許多相關研究建立了 PAHs 之特徵比值(Diagnostic/ Characteristic Ratio)來判定可能的來源，因此，本研究從文獻中挑選出五種引用次數多且範圍較明確之特徵比值作為初步判定來源之參考，以 $\text{Ant}/(\text{PA}+\text{Ant})$ 、 $\text{PA}/(\text{PA}+\text{Ant})$ 、 $\text{FL}/(\text{FL}+\text{Pyr})$ 、 $\text{IND}/(\text{IND}+\text{BghiP})$ 與 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})$ 為主。

表十三、來源判定之特徵比值

	比率	來源	資料來源	引用次數 (05.1.2019)
Ant/(PA+Ant)	<0.1	Petroleum 石油	Budzinski et al. 1997	1115
	≥ 0.1	Combustion 燃燒		
PA/(PA+Ant)	<0.7	Biomass burning 生質燃燒	Kavouras et al. 1999	140
	≥ 0.7	Fossil fuels 化石燃料		
FL/(FL+Pyr)	<0.4	Petrogenic 石油揮發	Tobiszewski and Namiesnik. 2012	732
	0.4~0.5	Fossil fuel combustion 化石燃料燃燒		
	≥ 0.5	Grass, wood, coal combustion		
IND/(IND+BghiP)	<0.2	Petrogenic 石油揮發	Yunker et al. 2002	2976
	0.2~0.5	Vehicular 交通		
	>0.5	Coal combustion 煤燃燒		
Flu/(Flu+Pyr)	<0.5	Petrol emissions 汽油排放	Tobiszewski and Namiesnik. 2012	732
	≥ 0.5	Diesel emissions 柴油排放		

3.5 案例演示

本研究第一種功能風險計算模組之演示引用陳俊宇(2016)之夏季雲林臨海地區土壤中 PAHs 的採樣濃度進行軟體案例說明，假設受試者為 21 歲之女性且三種暴露途徑之濃度皆相同，而第二種功能判定污染物來源模組之演示引用陳俊宇(2016)之第三季採樣日間氣態 PAHs 平均濃度與判定標準。

3.6 Visual Basic

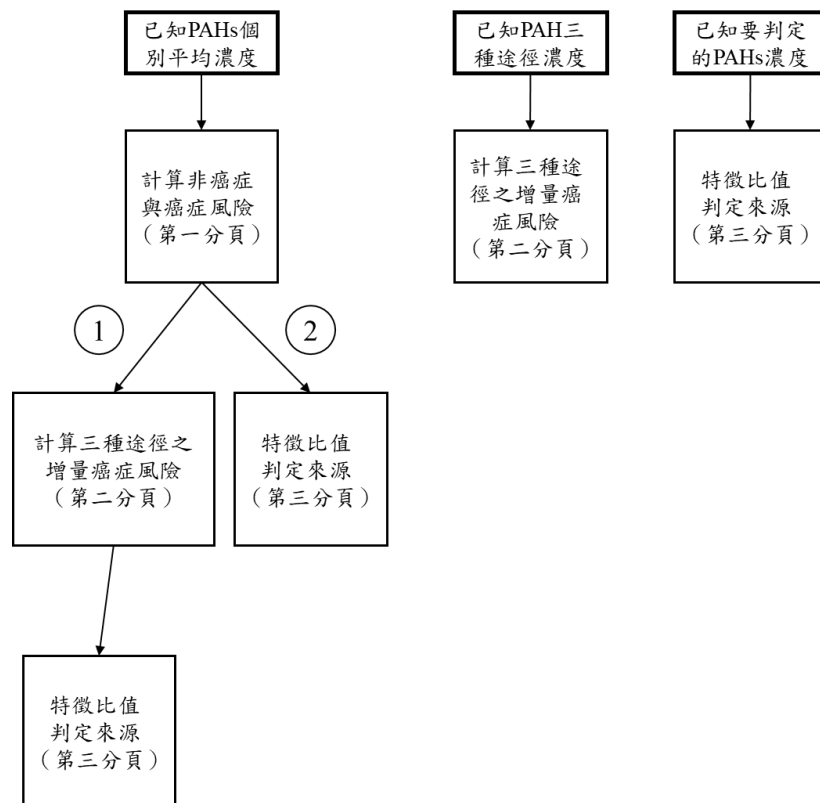
本研究使用的是 Visual Studio 2017 是微軟發表之軟體開發工具，以 .Net 平台為構想，此平台內建 Visual Basic(VB)、C#、C++與 J#四種語言，運行於 .Net 平台之 Visual Basic 稱之為 Visual Basic.Net(VB.Net)。而 VB 為物件導向之程式語言，提供設計程式需要用到的圖形介面工具及程式開發工具，優點是具有物件功能與視覺化，使程式設計者可以更簡易的撰寫程式。

第四章、結果與討論

4.1 軟體簡介

此開發軟體使用於計算台灣多環芳香烴化合物之健康風險，針對的使用對象為專業人員。此軟體以三個分頁分為三大部分，第一部分以 21 種化合物濃度計算非致癌與致癌風險；第二部分，以不同暴露途徑計算增量終生癌症風險值，例如：吸入、攝入與皮膚接觸；第三部分，以五種不同判別 PAHs 來源的比值推估使用者採樣處可能的來源，並呈現出指紋圖以供使用者判斷。之後章節會引用文獻數據做為案例呈現結果。

此軟體除了個別使用的情形之外，還有以下兩種特殊情形，如圖二。當使用者有 21 種以下的 PAHs 之平均濃度時，第一情形：使用完第一分頁後，在未刪除數據的條件下，可以繼續使用第二分頁及第三分頁，計算出三種暴露途徑之增量終生癌症風險與指紋圖。第二情形：使用完第一分頁後，直接使用第三分頁，進行特徵比值判別來源與做出指紋圖。


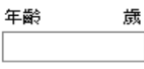
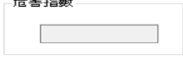
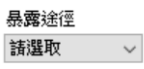
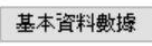
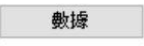
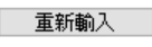
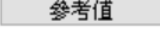
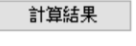



圖二、使用說明圖

表一說明軟體中不同選項及按鍵之功能與圖例。

1. 點選方式，每個點選的選項皆為單選，被選取之選項呈現黑點，例如性別。
2. 白色空格，是由使用者自行填寫數字，以利系統計算結果，此種亦為本軟體中最多之選項。填寫過程中雖需花一些時間，但可增加使用者的彈性，而計算上也更加精準。例如：年齡、頻率、測量濃度等等。
3. 灰色空格，是系統藉由使用者於白色空格輸入的資料進行結果計算，而呈現結果之處，但此處使用者不能進行任何修正或填寫之動作，例如：每日暴露量、危害商數、吸入結果等。
4. 下拉式選項則是系統提供多個選項，由使用者自行選擇，例如：暴露途徑、判定之比值。
5. 「基本資料數據」出現於第一分頁與第二分頁，當使用者無論先以何種方式計算風險，在未刪除資料的情況下，此按鍵可以將資訊欄位中重疊之部分資料進行連動至另一分頁，以減少使用者重複輸入資訊且能節省時間。
6. 「數據」出現於第二分頁與第三分頁，當使用者使用完第一分頁且尚未刪除數據，可轉換至第二分頁或連動至第三分頁使用，以節省使用者時間。
7. 「重新輸入」則為當使用者想計算新的數據，需要刪除已填入之空格與選項時所用，系統會自動清除所有數據，以便使用者繼續使用，且只會刪除使用者正使用的頁面，不會刪除到其他分頁之內容。
8. 當使用者如有缺少某些必須填寫之計算數據，則可點選「參考值」之按鈕，會跳出一個新的視窗，其中含有許多分頁，代表著不相同之資訊，讓使用者以自身需求而使用。而每項資訊皆有提供來源出處，使用者可以藉由來源查詢其他資訊。
9. 「計算結果」或「新增」，則可使系統開始進行運算，並於結果處呈現計算後的結果。

表一、軟體中各種按鍵意義

圖例	解釋	使用
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 單選 2. 選取者一黑點 	性別
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 呈現白色空格 2. 使用者自行填寫 	年齡、頻率、癌症斜率因子、測量濃度等
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 呈現灰色空格 2. 系統自動計算，此處為使用者欲知結果 	每日暴露量、危害商數、吸入結果、攝入結果等
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 下拉式選取 2. 禁止使用者自行新增選項 	暴露途徑、毒性當量因子、X 軸、Y 軸
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 傳遞分頁間資訊欄中重複之數據 	各種化合物計算風險、暴露途徑計算風險
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 藉由第一分頁之數據傳遞至其他分頁進行計算 2. 可減少使用者填寫時間 	暴露途徑計算風險、判定暴露來源
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 重新計算新數據時 2. 介面上須輸入或設定之空格會清空 	—
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 缺少某些數據時可做參考 2. 新視窗且以分頁呈現 	—
	<ol style="list-style-type: none"> 1. 資料輸入完畢時按下，可呈現結果 	—
		

軟體下載連結：https://drive.google.com/file/d/1_Jue86q_mFQ97-FpjpgM7i56mORfV7xo8/view?usp=sharing

4.2 各種化合物計算風險－案例說明

本研究引用陳俊宇(2016)之夏季雲林臨海地區採樣數據進行軟體案例說明，且假設欲算風險之受試者為 21 歲之女性。表二為土壤中 21 種 PAHs 個別平均濃度。表三為研究中使用之風險計算參數。

此為 21 種多環芳香烴化合物計算健康風險，此介面分為三個欄位，「資訊」、「數據」、「結果」。使用者介面如圖三所示。

表二、夏季臨海地區採樣土壤中 PAHs 平均濃度(n=4)

PAHS	平均濃度(ng/g)
Nap	2.07
AcPy	1.99
Acp	0.064
Flu	3.81
PA	4.89
Ant	6.76
FL	7.67
Pyr	7.22
CYC	0.144
BaA	1.22
CHR	1.03
BbF	0.358
BkF	0.471
BeP	ND
BaP	0.378
PER	—
IND	0.443
DBA	2.26
BbC	—
BghiP	ND
COR	1.12

ND：表示低於偵測極限

—：表示尚未採樣

表三、成人風險計算參數

參數	單位	來源
Body weight	64.5 kg	台灣一般民眾暴露參數彙編，2008
Exposure frequency	365 day/year	
Exposure duration	53 year	Liao and Chiang, 2006
Inhalation rate	15.09 m ³ /day	台灣一般民眾暴露參數彙編，2008
Dust ingestion	100 mg/day	US EPA, 2001
Dermal exposure area	5333 cm ²	Liao and Chiang, 2006
Dermal adherence factor	0.02 mg/cm ²	Liao and Chiang, 2006

表三、成人風險計算參數(續)

參數	單位	來源	
Dermal absorption factor	0.13	-	Liao and Chiang, 2006
Average life span	25550	day	Liao and Chiang, 2006
CSF _{ingestion}	7.3	kg-day/mg	Wei et al., 2015
CSF _{dermal}	25	kg-day/mg	Wei et al., 2015
CSF _{inhalation}	3.85	kg-day/mg	Wei et al., 2015

圖三、21 種 PAHs 化合物之使用介面

- 使用流程分為三大步驟。第一步驟：填寫「資訊」欄位。其中流程如下：
1. 選擇「性別」，可點選男性或女性。
 2. 填寫欲計算風險之受試者「年齡」、「體重」。
 3. 下拉式點選受試者之暴露途徑，分為空氣吸入、土壤攝入、水體攝入、食物攝入或皮膚接觸。
 4. 填寫預計算風險之參數，「暴露頻率」、「暴露期間」、「呼吸率/攝入率」、「平均暴露到癌症風險時間」。

5. 下拉式點選使用者參考毒性當量因子之文獻，分為 Nisbet and LaGoy, 1992 與 Kalberlah et al., 1995 兩篇，可藉由「參考值」按鍵中之分頁查詢內容。

6. 填寫「癌症斜率因子」。

第二步驟：填寫「數據」欄位，填入使用者採樣 21 種化合物的平均濃度。假使單位需要換算，可直接於白色空格中以科學記號形式填入。如果採樣之化合物不到 21 種，可以直接省略空格，系統會直接視為 0 計算。

第三步驟：按下「計算結果」，系統會以科學記號於右方灰色空格中呈現每化合物之每日暴露量、危害商數、危害指數與增量終生癌症風險估算，而右下方結果欄會以說明欄中的判定標準，以圖與文字呈現受試者風險的嚴重程度。如果想重新計算新風險，可按下「重新輸入」之按鍵，所有空格皆會跳回初始值，以便使用者進行下一筆的風險計算。本研究引用陳俊宇(2016)之採樣數據並使用軟體演示結果如圖四、圖五。

此受試者於假設的條件下，所測出來的 ILCR 為 1.68×10^{-11} 未超過 US EPA 建議之標準 10^{-6} ，表示目前尚未有癌症風險；而危害指數為 3.68×10^{-3} ，未超過 1，則表示目前尚未有非癌症風險。

PAHs風險評估計算器

各種化合物計算風險 暴露途徑計算風險 判定暴露來源

資訊
 性別 男 女
 年齡 歲 21
 體重 Kg 64.5
 暴露途徑 土壤攝入
 暴露頻率 days/year 365
 暴露期間 year 53
 攝入率 Kg/day 0.1
 平均暴露到癌症風險時間 5333 day
 毒性當量因子 Nisbet and LaG
 癌症斜率因子 1 per mg/Kg day
 基本資料數據 重新輸入 參考值 計算結果

數據

化合物	測量濃度 mg/Kg soil	參考劑量 (RfD) mg/kg day
Naphthalene	2.07E-3	0.02
Acenaphthylene	1.99E-3	
Acenaphthene	6.4E-5	0.06
Fluorene	3.81E-3	0.04
Benzo[a]pyrene	3.78E-4	0.004
Anthracene	6.76E-3	0.3
Fluoranthene	7.67E-3	0.04
Pyrene	7.22E-3	0.02
Cyclopenta[cd]pyrene	1.44E-4	
Benz[a]anthracene	1.22E-3	
Chrysene	1.03E-3	
Benzo[b]fluoranthene	3.58E-4	
Benzo[k]fluoranthene	4.71E-4	
Benzo[e]pyrene		
Phenanthrene	4.89E-3	
Perylene		
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	4.43E-4	
Dibenz[a,h]anthracene	2.26E-3	
Benzo[b]chrysene		
Benzo[ghi]perylene		
Coronene	1.12E-3	

結果
 每日暴露量 (mg/Kg day) 危害商數 增量終生癌症風險估算
 危害指數

說明
 1. 當HI<1時，表示不會有非癌症風險。
 當HI>1時，表示會有非致癌風險。
 2. 當LCR<E-6時，表示為可接受的癌症風險。
 當LCR>E-6時，表示為不可接受的致癌風險。

結果

圖四、各種化合物計算風險之使用者填寫完數據後畫面

PAHs風險評估計算器

各種化合物計算風險 暴露途徑計算風險 判定暴露來源

資訊
 性別 男 女
 年齡 歲 21
 體重 Kg 64.5
 暴露途徑 土壤攝入
 暴露頻率 days/year 365
 暴露期間 year 53
 攝入率 Kg/day 0.1
 平均暴露到癌症風險時間 5333 day
 毒性當量因子 Nisbet and LaG
 癌症斜率因子 1 per mg/Kg day
 基本資料數據 重新輸入 參考值 計算結果

數據

化合物	測量濃度 mg/Kg soil	參考劑量 (RfD) mg/kg day
Naphthalene	2.07E-3	0.02
Acenaphthylene	1.99E-3	
Acenaphthene	6.4E-5	0.06
Fluorene	3.81E-3	0.04
Benzo[a]pyrene	3.78E-4	0.004
Anthracene	6.76E-3	0.3
Fluoranthene	7.67E-3	0.04
Pyrene	7.22E-3	0.02
Cyclopenta[cd]pyrene	1.44E-4	
Benz[a]anthracene	1.22E-3	
Chrysene	1.03E-3	
Benzo[b]fluoranthene	3.58E-4	
Benzo[k]fluoranthene	4.71E-4	
Benzo[e]pyrene		
Phenanthrene	4.89E-3	
Perylene		
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	4.43E-4	
Dibenz[a,h]anthracene	2.26E-3	
Benzo[b]chrysene		
Benzo[ghi]perylene		
Coronene	1.12E-3	

結果

每日暴露量 (mg/Kg day)	危害商數	增量終生癌症風險估算
1.16E-005	5.82E-004	1.68E-011
1.12E-005		
3.60E-007	6.00E-006	
2.14E-005	5.36E-004	
2.13E-006	5.31E-004	
3.80E-005	1.27E-004	
4.31E-005	1.08E-003	
4.06E-005	1.35E-003	
8.10E-007		
6.86E-006		
5.79E-006		
2.01E-006		
2.65E-006		
0.00E+000		
2.75E-005		
0.00E+000		
2.49E-006		
1.27E-005		
0.00E+000		
0.00E+000		
6.30E-006		

 危害指數 3.68E-003

說明
 1. 當HI<1時，表示不會有非癌症風險。
 當HI>1時，表示會有非致癌風險。
 2. 當LCR<E-6時，表示為可接受的癌症風險。
 當LCR>E-6時，表示為不可接受的致癌風險。

結果

 在評估條件下不會有非癌症風險和癌症風險

圖五、各種化合物計算風險之結果畫面

4.3 暴露途徑計算風險－案例說明

此部分為暴露途徑計算健康風險，以吸入途徑、攝入途徑及皮膚接觸三個途徑計算 ILCR，分為四個欄位：「資訊」、「吸入」、「攝入」、「皮膚接觸」及「結果」，使用者介面如圖六所示。

使用流程分為三大步驟。第一步驟：填寫資訊欄位。其流程如下：

1. 點選受試者之「性別」。
2. 填寫受試者之「年齡」、「體重」。
3. 填寫受試者暴露 PAHs 之「暴露頻率」、「暴露期間」、「平均暴露到癌症風險時間」。若使用者一開始先使用第一分頁計算 21 種 PAHs 之健康風險，且尚未刪除輸入之資訊數據，可直接按下「基本資料數據」按鍵，使第一分頁之資訊連動至第二分頁，以節省使用者時間。

資訊	吸入	攝入	皮膚接觸
性別 <input checked="" type="radio"/> 男 <input type="radio"/> 女	吸入濃度 [] mg/m ³	攝入濃度 [] mg/m ³	接觸濃度 [] mg/m ³
年齡 [] 歲	吸入率 [] m ³ /day	攝入率 [] m ³ /day	皮膚接觸癌症斜率因子 [] m ³ /day
體重 [] Kg	吸入癌症斜率因子 [] (mg/kg-day) ⁻¹	攝入癌症斜率因子 [] (mg/kg-day) ⁻¹	皮膚吸收分率 []
暴露頻率 [] day/year			皮膚接觸面積 [] cm ²
暴露期間 [] year			暴露頻率 [] event/year
平均暴露到癌症風險時間 [] day			皮膚附著率 [] mg/cm ² -event
基本資料數據	數據	數據	數據
重新輸入	結果 吸入結果 []	結果 攝入結果 []	結果 皮膚接觸結果 []
參考值			
計算結果			

圖六、暴露途徑計算風險之使用介面

第二步驟：填寫「吸入」、「攝入」與「皮膚接觸」欄位。依序填入濃度與風

險參數。每欄下方皆有「數據」之按鍵，使用時機為使用者先使用第一分頁以 21 種 PAHs 化合物計算風險，且尚未刪除 21 種 PAHs 之平均濃度的情況下，按下此按鍵，系統會依使用者於第一分頁資訊欄位中所選的「毒性當量因子」進行轉換，並傳輸至使用者所選途徑的濃度空格中，以增加使用者方便性。

第三步驟：按下「計算結果」，系統會以科學記號於下方結果欄位中分別在灰色空格中呈現三種暴露途徑之增量終生癌症風險估算與加總後結果，而下方會以判定標準，使用圖與文字呈現受試者風險的嚴重程度。本研究引用陳俊宇(2016)之採樣數據，假設三種暴露途徑之濃度相同的情況下，圖七、圖八表示使用軟體演示後之填寫數據後與結果之畫面。

此受試者於假設的條件下，系統所計算出的吸入途徑之 ILCR 為 5.08×10^{-11} ，攝入途徑 ILCR 為 9.63×10^{-11} ，皮膚接觸途徑 ILCR 為 1.67×10^{-6} ，三種暴露途徑加總後的 ILCR 為 1.67×10^{-6} ，超過 US EPA 建議標準 10^{-6} ，表示此受試者有癌症風險的可能。

資訊	吸入	攝入	皮膚接觸
性別 <input type="radio"/> 男 <input checked="" type="radio"/> 女	吸入濃度 0.002992814 mg/m ³	攝入濃度 0.002992814 mg/m ³	接觸濃度 0.002992814 mg/m ³
年齡 21 歲	吸入率 15.09 m ³ /day	攝入率 100 m ³ /day	皮膚接觸癌症斜率因子 25 m ³ /day
體重 64.5 Kg	吸入癌症斜率因子 3.85 (mg/kg-day) ⁻¹	攝入癌症斜率因子 7.3 (mg/kg-day) ⁻¹	皮膚吸收分率 0.13
暴露頻率 365 day/year			皮膚接觸表面積 5333 cm ²
暴露期間 53 year			暴露頻率 365 event/year
平均暴露到癌症風險時間 25550 day			皮膚附著率 0.02 mg/cm ² -event
基本資料數據	數據	數據	數據
重新輸入	吸入結果	攝入結果	皮膚接觸結果
參考值		結果	
計算結果			

圖七、暴露途徑計算風險之使用者填寫完數據後畫面

PAHs風險評估計算器

各種化合物計算風險 | 暴露途徑計算風險 | 判定暴露來源

資訊

性別: 男 女

年齡: 21 歲

體重: 64.5 Kg

暴露頻率: 365 day/year

暴露期間: 53 year

平均暴露到癌症風險時間: 25550 day

吸入

吸入濃度: 0.002992814 mg/m³

吸入率: 15.09 m³/day

吸入癌症斜率因子: 3.85 (mg/kg-day)⁻¹

攝入

攝入濃度: 0.002992814 mg/m³

攝入率: 100 m³/day

攝入癌症斜率因子: 7.3 (mg/kg-day)⁻¹

皮膚接觸

接觸濃度: 0.002992814 mg/m³

皮膚接觸癌症斜率因子: 25 m³/day

皮膚吸收分率: 0.13

皮膚接觸面積: 5333 cm²

暴露頻率: 365 event/year

皮膚附着率: 0.02 mg/cm²-event

結果

吸入結果: 5.08E-011

攝入結果: 9.63E-011

皮膚接觸結果: 1.67E-006

結果: 1.67E-006

超過美國環保署建議之標準，有風險！

重新輸入 | 參考值 | 計算結果

圖八、暴露途徑計算風險之結果畫面

4.4 判定暴露來源—案例說明

此部分為五種較常見之特徵比值判定 PAHs 來源，分為兩個欄位：「資料」與「結果」，使用者介面如圖九。

PAHs風險評估計算器

各種化合物計算風險 | 暴露途徑計算風險 | 判定暴露來源

資料

X軸: [Dropdown]

Y軸: [Dropdown]

請輸入濃度值(mg/m³):

1: [Input]

2: [Input]

3: [Input]

4: [Input]

數據 | 刪除數據

重新輸入 | 參考值 | 新增

結果

PAHs判定

結果可能為

圖九、判定暴露來源之使用介面

使用流程分為兩大步驟。第一步驟：填寫資訊欄位。其流程如下：

1. 下拉式選擇 X 軸與 Y 軸之特徵比值，選項方別為 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{PA})$ 、 $\text{PA}/(\text{PA}+\text{Ant})$ 、 $\text{IND}/(\text{IND}+\text{BghiP})$ 、 $\text{FL}/(\text{FL}+\text{Pyr})$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})$ ，而兩軸不可以選擇相同特徵比值，當使用者選擇相同選項時，系統會自動跳出警告並清除所有選項。
2. 填寫化合物之平均濃度。若使用者一開始使用第一分頁計算風險，且尚未刪除數據時，可按下「數據」按鍵，系統會自動填入相應的平均濃度，增加使用者的方便性及效率。

第二步驟：按下「新增」，系統會於「結果」之欄位呈現指紋圖，並以文字說明推測之來源。當使用者有許多數據，且在按下「重新輸入」前，可以無限制增加指紋圖上數據，「刪除數據」按鍵可以快速清除四項平均濃度以利使用者輸入其他數據。此部分演算引用陳俊宇(2016)之夏季採樣日間氣態 PAHs 平均濃度與判定標準，如表四、表五所示。使用軟體演算後，結果如圖十、圖十一。

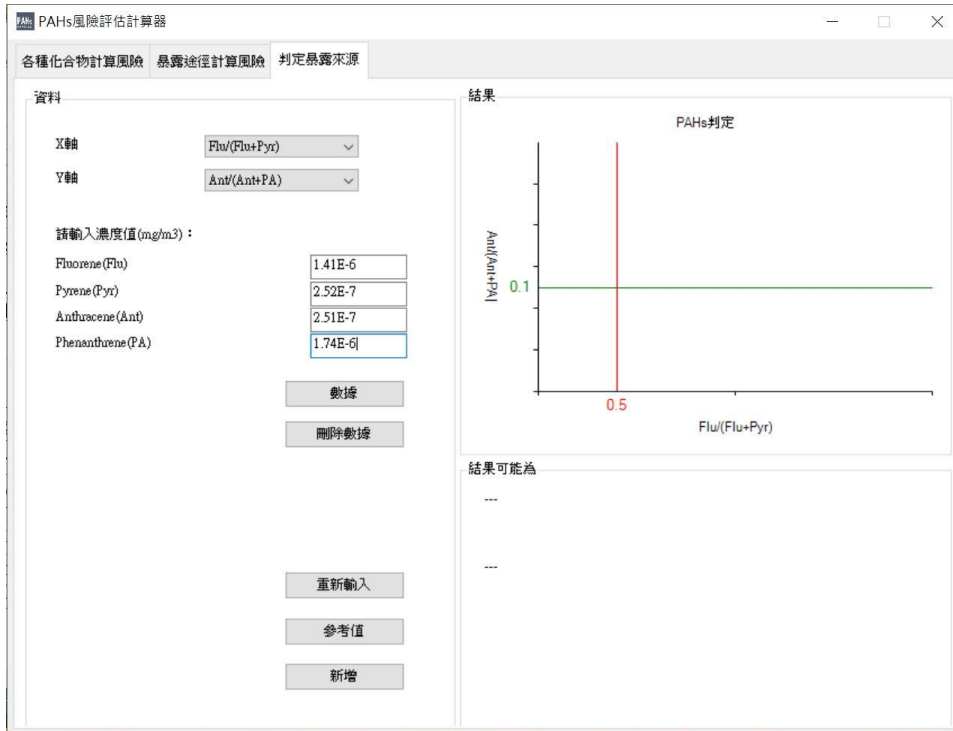
結果發現於夏季採樣兩次結果皆為 $\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr}) > 0.5$ 且 $\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{PA}) > 0.1$ ，故依文獻參考推測雲林地區夏季臨海地區氣態 PAHs 之來源可能為柴油燃燒，此結果與陳俊宇(2016)研究結果相符。

表四、演算所使用之特徵比值

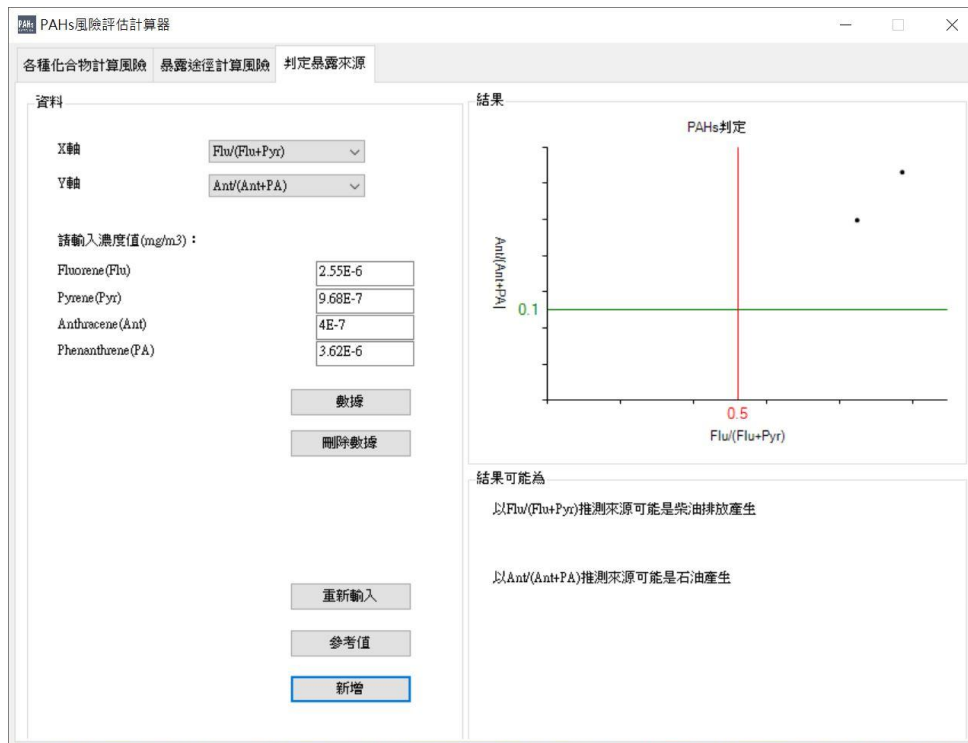
PAHs 之特徵比值	比值範圍	可能來源	參考文獻
$\text{Ant}/(\text{Ant}+\text{PA})$	<0.1	石油	Budzinski et al., 1997
	>0.1	燃燒	
$\text{Flu}/(\text{Flu}+\text{Pyr})$	<0.5	汽油	Ravindra et al., 2008b
	>0.5	柴油	

表五、夏季臨海地區採樣氣態之 PAHs 平均濃度 (ng/m³)

PAHs	夏季-1(n=20)	夏季-2 (n=20)
Ant	0.251	0.40
PA	1.74	3.62
Flu	1.41	2.55
Pyr	0.252	0.968



圖十、判定暴露來源之使用者填寫完數據後畫面



圖十一、判定暴露來源之結果畫面

第五章、結論與建議

5.1 研究成果的應用性

本研究期望能應用於台灣使用者採樣 PAHs 後，能快速計算相關風險值與可能來源，以控制民眾暴露到 PAHs 的情形，降低民眾的健康危害。也期望未來可以新增多暴露途徑之危害商數、判定來源之特徵比值與軟體使用功能，並開發成手機應用軟體，增加方便性與效率。

5.2 軟體開發限制

- (1) 多數參數輸入雖有提供參考值，但仍需具備基礎風險認識人士使用。
- (2) 提供的特徵比值僅為第一階段的初步判定，還需以其他污染源、受體模式或天氣資訊加以佐證，才可增加來源判定的解釋能力。

參考文獻

1. Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. 2016. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25, 107-123.
2. Alves C, Pio C, Duarte A. 2001. Composition of extractable organic matter of air particles from rural and urban Portuguese areas. *Atmospheric Environment*. 35, 5485-5496.
3. Barakat AO. 2002. PAHs and petroleum markers in the atmospheric environment of Alexandria city, Egypt. *Water Air and Soil Pollution*. 139, 289-310.
4. Barbosa JM, Ré-Poppi N, Santiago-Silva M. 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons from wood pyrolysis in charcoal production furnaces. *Environmental Research*. 101, 304-311.
5. Budzinski H, Jones I, Bellocq J, Piérard C, Garrigues P. 1997. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. *Marine Chemistry*. 58, 85-97.
6. Callén MS, de la Cruz MT, López JM, Mastral AM. 2011. PAH in airborne particulate matter. Carcinogenic character of PM10 samples and assessment of the energy generation impact. *Fuel Processing Technology*. 92, 176-182.
7. Canadian International Development Agency (CIDA). Persistent organic pollutant toolkit. Retrieved October 04, 2018. Available from <<http://www.popstoolkit.com/riskassessment/riskcalculationtool.aspx>>
8. Caricchia AM, Chiavarini S, Pezza M. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmospheric particulate matter in the city of Naples (Italy). *Atmospheric Environment*. 33, 3731-3738.
9. Chan DSM, Aune D, Norat T. 2013. Red meat intake and colorectal cancer risk: a summary of epidemiological studies. *Current Nutrition Reports*. 2, 56-62.
10. Chen S, Kao TH, Chen CJ, et al. 2013. Reduction of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in meat by sugar-smoking and dietary exposure assessment in Taiwan. *Agricultural and Food Chemistry*. 61, 7645-7653.
11. Dat ND, Chang MB. 2017. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Science of the Total Environment*. 609, 682-693.
12. Dickhut RM, Canuel EA, Gustafson KE, et al. 2000. Automotive sources of

- carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons associated with particulate matter in the Chesapeake Bay Region. *Environmental Science & Technology*. 34, 4635-4640.
13. Gogou A, Stratigakis N, Kanakidou M, Stephanou E. 1996. Organic aerosols in Eastern Mediterranean: components source reconciliation by using markers and atmospheric back trajectories. *Organic Geochemistry*. 25, 36-79.
 14. Grimmer G, Jacob J, Naujack K. 1983. Profile of the polycyclic aromatic compounds from crude oils Part 3. Inventory by– GCGC/MS– PAH in environmental materials. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. 314, 29-36.
 15. IRIS. 1993. Reference Dose (RfD): Description and Use in Health Risk Assessments. Background Document 1A.
 16. Kalberlah F, Frijus-Plessen N, Hassauer M. 1995. Toxicological criteria for the risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in existing chemical. Part 1: the use of equivalent factors. *Altlasten-Spektrum*. 5, 231-237.
 17. Kao TH, Chen S, Huang CW, Chen CJ, Chen BH. 2014. Occurrence and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in kindling-free-charcoal grilled meat products in Taiwan. *Food and Chemical Toxicology*. 71, 149-158.
 18. Kavouras I, Koutrakis P, Tsapakis M, et al. 2001. Source apportionment of urban particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) using multivariate methods. *Environmental Science & Technology*. 35, 2288-2294.
 19. Kavouras I, Lawrence J, Koutrakis P, Stephanou E, Oyola P. 1999. Measurement of particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons in Santiago de Chile: source reconciliation and evaluation of sampling artifacts. *Atmospheric Environment*. 33, 4977-4986.
 20. Khalili NR, Scheff PA, Holsen TM. 1995. PAH source fingerprinting for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions. *Atmospheric Environment*. 29, 533-542.
 21. Lannerö E, Wickman M, Van Hage M, et al. 2008. Exposure to environmental tobacco smoke and sensitisation in children. *Thorax*. 63, 172-176.
 22. Li CH, Lin YC, Lee WJ, Tsai PJ. 2003. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons and their carcinogenic potencies from cooking sources to the urban atmosphere. *Environment Health Perspectives*. 111, 483-487.
 23. Li CK, Kamens RM. 1993. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling. *Atmospheric Environment Part A*. 27, 523-532.

24. Manoli E, Kouras A, Samara C. 2004. Profile analysis of ambient and source emitted particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons from three sites in northern Greece. *Chemosphere*. 56, 867-878.
25. Mayo Clinic. Heart disease risk calculator. Retrieved October 04, 2018. Available from <<https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/heart-disease/in-depth/heart-disease-risk/itt-20084942>>
26. Moradi-Rad R, Omidi L, Kakooei H, et al. 2015. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on activated carbons: kinetic and isotherm curve modeling. *International Journal of Occupational Hygiene*. 6, 43-49.
27. Mostert MMR, Ayoko GA, Kokot S. 2010. Application of chemometrics to analysis of soil pollutants. *Trends in Analytical Chemistry*. 29, 430-445.
28. National Cancer Institute. Breast cancer risk assessment tool. Retrieved October 04, 2018. Available from <https://bcrisktool.cancer.gov/calculator.html>
29. Nisbet ICT, LaGoy PK. 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicological Pharmacology*. 16, 290-300.
30. Oda J, Nomura S, Yasuhara A, Shibamoto T. 2001. Mobile sources of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in a roadway tunnel. *Atmospheric Environment*. 35, 4819-4827.
31. Oliveira C, Martins N, Tavares J, et al. 2011. Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in a roadway tunnel in Lisbon, Portugal. *Chemosphere*. 83, 1588-1596.
32. Pandey PK, Patel KS, Lenicek J. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons: need for assessment of health risks in India? Study of an urban-industrial location in India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 59, 287-319.
33. Park SS, Kim YJ, Kang CH. 2002. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*. 36, 2917-2924.
34. Pio C, Alves C, Duarte A. 2001. Identification, abundance and origin of atmospheric organic particulate matter in a Portuguese rural area. *Atmospheric Environment*. 35, 1365-1375.
35. Pyysalo H, Tuominen J, Wickström K, et al. 1987. Polycyclic organic material (POM) in urban air. Fractionation, chemical analysis and genotoxicity of

- particulate and vapour phases in an industrial town in Finland. *Atmospheric Environment*. 21, 1167-1180.
36. QxMD. Medical decision support tools. Retrieved October 04, 2018. Available from <<https://qxmd.com/calculate/>>
 37. Ravindra K, Bencs L, Wauters E, et al. 2006. Seasonal and site-specific variation in vapour and aerosol phase PAHs over Flanders (Belgium) and their relation with anthropogenic activities. *Atmospheric Environment*. 40, 771-785.
 38. Ravindra K, Sokhi R, Van Grieken R. 2008a. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation. *Atmospheric Environment*. 42, 2895-2921.
 39. Ravindra K, Wauters E, Van Grieken R. 2008b. Variation in particulate PAHs levels and their relation with the transboundary movement of the air masses. *Science of the Total Environment*. 396, 100-110.
 40. Retnam A, Zakari MP, Juahir H, et al. 2013. Chemometric techniques in distribution, characterization and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS) in aquaculture sediments in Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*. 69, 55-66.
 41. Rezaei F, Kakooei H, Ahmadkhaniha R, et al. 2018. Inhalation exposure and health risks for newsagents exposed to atmosphere polycyclic aromatic hydrocarbons in Tehran, Iran. *Urban Climate*. 24, 796-802.
 42. Rogge WF, Hildemann LM, Mazurek MA, Cass GR, Simoneit BRT. 1993. Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks. *Environmental Science & Technology*. 27, 636-651.
 43. Shahtaheri SJ, Ibrahimi L, Golbabaie F, Hosseini M, Fouladi B. 2006. Optimization of sample preparation for 1-hydroxypyrene as a major biomarker of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons prior to high performance liquid chromatography. *Iranian Journal of Public Health*. 35, 33-41.
 44. Shahtaheri SJ, Ibrahimi L, Golbabaie F, Hosseini M, Fouladi Dehghi B. 2007. Solid phase extraction for 1-hydroxypyrene as a biomarker of occupational exposure to PAHs prior to high performance liquid chromatography. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 26, 75-81.
 45. Sicre MA, Marty JC, Saliot A, et al. 1987. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in different sized aerosols over the Mediterranean Sea: Occurrence and origin.

- Atmospheric Environment*. 21, 2247-2259.
46. Simcik MF, Eisenreich SJ, Liroy PJ. 1999. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan. *Atmospheric Environment*. 33, 5071-5079.
 47. Takada H, Onda T, Ogura N. 1990. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dusts and their source materials by capillary gas chromatography. *Environmental Science & Technology*. 24, 1179-1186.
 48. Therapeutics Education Collaboration. The absolute CVD risk/benefit calculator. Retrieved October 04, 2018. Available from <http://chd.bestsciencemedicine.com/calc2.html>
 49. Tobiszewski M, Namieśnik J. 2012. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution*. 162, 110-119.
 50. Unwin J, Cocker J, Scobbie E, Chambers H. 2006. An assessment of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in the UK. *Annals of Occupational Hygiene*. 50, 395-403.
 51. USEPA. 1989. IRIS substance file, Office of Health and Environment Assessment. U.S. Environmental Protection Agency.
 52. USEPA. 2004. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (Part E, supplement guidance for dermal risk assessment). EPA/540/R/99/005 Washington, DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation U.S. Environmental Protection Agency. Available from <https://www.epa.gov/risk/risk-assessment-guidance-superfund-rags-part-e>
 53. USEPA. 2017. Toxicological review of Benzo[a]pyrene. EPA/635/R-170/003Fa Washington, DC: Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Available from https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/toxreviews/0136tr.pdf
 54. Yang HH, Chen CM. 2004. Emission inventory and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere at a suburban area in Taiwan. *Chemosphere*. 56, 879-887.
 55. Yang HH, Lee WJ, Chen SJ, Lai SO. 1998. PAH emission from various industrial stacks. *Journal of Hazardous Materials*. 60, 159-174.
 56. Yunker M, Macdonald R, Vingarzan R, et al. 2002. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition.

- Organic Geochemistry*. 33, 489-515.
57. Zhang W, Zhang S, Wan C, et al. 2008. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall. *Environmental Pollution*. 153, 594-601.
 58. 行政院內政部統計處， the Department of Statistics in the Ministry of the Interior， 2016， <https://www.moi.gov.tw/stat/chart.aspx>
 59. 行政院衛生署，台灣一般民眾暴露參數彙編，國立台灣大學公共衛生學院健康風險及政策評估中心，2008。
 60. 陳俊宇，2016，探討多環芳香烴化合物(PAHs)在雲林地區其氣/固相分布與逸散平衡之情形。中山醫學大學公共衛生學系碩士班。碩士論文。
 61. 溫敬峰，2013，探討雲林地區氣膠及乾沈降中多環芳香烴化合物(PAHs)其濃度及組成變化。中山醫學大學公共衛生學系碩士班。碩士論文。
 62. 衛生福利部食品藥物管理署，Food and Drug Administration，2016，105 年度攝食量計算結果。