

台灣可歸因於 PM_{2.5} 暴露之死亡負擔

羅偉成^{1,2} 謝瑞豪³ 詹長權^{4,5} 林先和¹

摘要：過去數十年來的研究顯示，細懸浮微粒(PM_{2.5})的暴露會造成明顯的健康危害。在制定與 PM_{2.5} 相關的環境與公共衛生政策時，透過風險評估的方式，可以整合 PM_{2.5} 的暴露資料以及流行病學上的關連性，進而量化因為過度暴露所造成的群體健康危害，以及減少暴露所能帶來的健康益處。過去數年來，全球疾病負擔(global burden of disease, GBD)的研究發展日益蓬勃，同時也被用來量化不同健康危險因子對於疾病負擔的影響。本文回顧全球疾病負擔報告中，關於台灣的比較性風險評估，尤其是 PM_{2.5} 暴露評估的結果。同時，我們也利用台灣高覆蓋率的空氣品質偵測系統以及健康資訊系統，分析台灣在全國以及地方縣市層級可歸因於 PM_{2.5} 暴露之疾病死亡負擔。我們發現，無論是在全球疾病負擔報告中的台灣 PM_{2.5} 健康風險評估，或是利用本土資料進行的健康風險評估，都發現每年有超過 6,000 個以上來自缺血性心臟病、中風、肺癌、慢性阻塞性肺病的死亡個案與 PM_{2.5} 的暴露有關(約佔這四個疾病的 18.6%)。此外，PM_{2.5} 之族群可歸因分率在縣市別分布上有顯著差異。環境中的 PM_{2.5} 暴露是引起台灣族群死亡的主要危險因子。為了降低空氣汙染對環境及人體健康的影響，積極、跨部門的介入計畫是必要的措施。

關鍵詞：疾病負擔，細懸浮微粒，地方層級分析

(台灣醫學 Formosan J Med 2016;20:396-405) DOI:10.6320/FJM.2016.20(4).7

前言

過去數十年來的研究顯示，細懸浮微粒(PM_{2.5})的暴露會造成明顯的健康危害。大型的流行病學研究發現，PM_{2.5} 與心肺疾病以及肺癌的死亡有顯著的關連性[1-4]。此外，美國的研究更發現，降低 PM_{2.5} 的暴露有可能進而提升平均餘命[5]。在制定與 PM_{2.5} 相關的環境與公共衛生政策時，透過風險評估的方式，可以整合 PM_{2.5} 的暴露資料以及流行病學上的關連性，進而量化因為過度暴露所造成的群體健康危害，以及減少暴露所能帶來的健康益處。

由於空氣汙染在空間區域上具有變異性，因此 PM_{2.5} 的風險評估，不僅在全球以及國家層級具重要性，在地方縣市層級亦然。了解 PM_{2.5} 暴露在國家以及地方縣市層級的影響，能夠協助中央及地方政府，在公共衛生及環境政策的擬訂與發展。過去在美國針對可歸因於 PM_{2.5} 之生命年數損失及死亡

人數的分析，發現顯著的區域性差異[6]。另一方面，亞洲國家因為經濟發展，以及快速的工業化及都市化，空氣汙染嚴重程度位居全球之首，然而這類關於空氣汙染的區域性(subnational)風險評估研究分析，卻不曾在亞洲國家進行[7]。

過去數年來，全球疾病負擔(global burden of disease, GBD)的研究發展日益蓬勃。除了探索了解不同疾病在不同國家或地區所造成的健康負擔之外，全球疾病負擔研究也量化不同危險因子對於疾病負擔的影響，這一部分的方法學架構，比較性風險評估架構(comparative risk assessment)，正好非常適合拿來進行 PM_{2.5} 的健康風險評估。本文將回顧全球疾病負擔報告中，關於台灣的比較性風險評估，尤其是 PM_{2.5} 暴露評估的結果，之後，我們也利用台灣高覆蓋率的空氣品質偵測系統以及健康資訊系統，分析台灣在全國(national)以及地方縣市層級(subnational)可歸因於 PM_{2.5} 暴露之疾病死亡負擔。

¹台灣大學公共衛生學院流行病學與預防醫學研究所，²台灣癌症登記中心，³台灣工業技術研究院綠能與環境研究所，

⁴台灣大學公共衛生學院職業醫學與工業衛生研究所，⁵台灣大學公共衛生學院全球衛生中心

通訊作者連絡處：詹長權，台大公衛學院職業醫學與工業衛生所，E-mail:ccchan@ntu.edu.tw。林先和，台大公衛學院流行病學與預防醫學研究所，台北市中正區徐州路 17 號，E-mail:hsienho@ntu.edu.tw。

全球疾病負擔報告與 PM_{2.5} 風險評估

全球疾病負擔計畫最早是在 1994 年由 Lopez 與 Murray 所提出的，目的是利用系統性的分析架構量化全球疾病負擔分布情形[8,9]。隨著時間的演進，全球疾病負擔在方法學，以及研究範疇的廣度與深度都有持續的進展與更新，除了疾病所造成的死亡與失能分布之外，全球疾病負擔也評估了重要危險因子在疾病負擔的影響。在全球疾病負擔 2013 最新的報告中，全球疾病負擔計畫已經針對 306 個疾病與意外事故傷害與 79 個重要危險因子，在 188 個國家作完整的評估與分析[10-12]。而全球疾病負擔計畫為了克服國家地區之間的健康資料品質落差，發展出一個具有可比較性與一致性的研究分析框架：比較性風險評估。這個研究架構於 1999 年由 Murray 與 Lopez 所建立，被使用於評估危險因子在現實分布與假設分布(counterfactual distribution)中，所引起的疾病負擔，同時它也考量了多階層危險因子與多重危險因子所建構的聯合分布，不僅可以評估死亡或非死亡的健康結果，甚至可以考量疾病嚴重程度與病程等因素[13]。

比較性風險評估的分析架構主要建立在族群可歸因分率(population attributable fraction, PAF)上，族群可歸因分率代表在特定族群中，若是將危險因子的暴露情形，改變至另一個較低的暴露情形(例如，假設所有的人都不吸菸，或是假設所有人的血糖分布都在正常範圍)，所能避免的疾病負擔比。舉例來說，若是某族群中吸菸對於心血管疾病死亡的族群，可歸因分率是 20%，那就表示這群人中的所有心血管死亡人數中，有 20%是可以歸因於吸菸的暴露，換句話說，如果時光可以倒流，而所有的人都不曾吸菸的話，那麼在這群人之中的心血管疾病死亡數目，將會比目前看到的要減少 20%。要推估族群可歸因分率，首先需要大型的流行病學研究，提供危險因子暴露與疾病之間的相關性，並且經由謹慎的評估之後，認為此相關性很可能具有因果關係。之後，根據此相關性的強度(一般來說是使用相對風險, relative risk)，以及族群中暴露於該危險因子的比例與強度，即可進一步推算族群可歸因分率。

在全球疾病負擔分析中，PM_{2.5} 暴露及疾病別死亡之間的相對風險關係，是利用過去發表的大型世代研究中所得到的相對風險，而各國的 PM_{2.5} 暴露資料，則是透過衛星遙測的方式來進行推估。利用此一分析方法，全球疾病負擔研究發現 2013 年的總死亡人數中有 5.3%可以歸因於 PM_{2.5}，其中包含 2,209,000 個心肺疾病死亡個案，以及 387,000 個肺癌死亡個案[12]。在該報告中所探討的 79 個重要危險因子中，PM_{2.5} 暴露所造成的死亡負擔排名在第七位(圖一 A)[14]。而在全世界疾病負擔針對台灣所進行的分析結果當中，發現除了抽菸、高血壓、高血糖與肥胖之外，室內外空氣污染是導致國人死亡的重大因素(圖一 B)，其中 PM_{2.5} 的暴露與 7,526 個死亡人數有關，約佔台灣總死亡人數的 4.9%[14]。

台灣本土 PM_{2.5} 風險評估及結果

利用全球疾病負擔的方法學，我們最近進行了一項本土研究，整合了台灣全國空氣品質監測網、全國死亡登記資料以及暴露-風險關係(exposure-response model)的資料，估計全國以及地方縣市層級，可歸因於 PM_{2.5} 暴露的死亡人數[15]。我們的研究包含了過去大型流病研究顯示與 PM_{2.5} 暴露之間有強烈因果關係證據的四個主要疾病，包括缺血性心臟病、腦血管疾病(中風)、肺癌、慢性阻塞性肺病。以下將簡單介紹該研究的方法與主要發現。

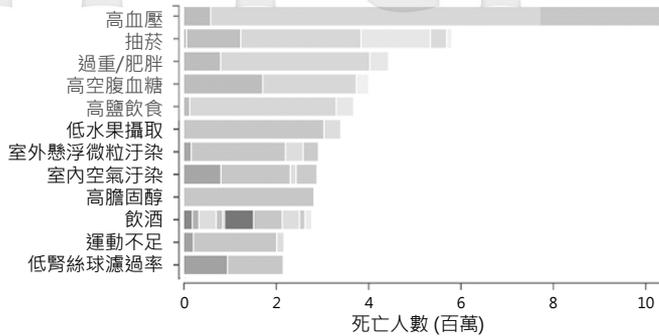
PM_{2.5} 暴露估計

台灣縣市層級的年平均 PM_{2.5} 暴露濃度是取自台灣空氣品質監測網絡[16]。當單一縣市中有多個監測站時，我們採用人口密度大於 10,000(人數/平方公里)的鄉鎮區域(人口密度最高的區域)監測站數值，以取得足以代表縣市層級多數人口之暴露量[17]。利用以上資料，我們估算出 2014 年縣市別 PM_{2.5} 暴露量之年平均及標準誤分布。

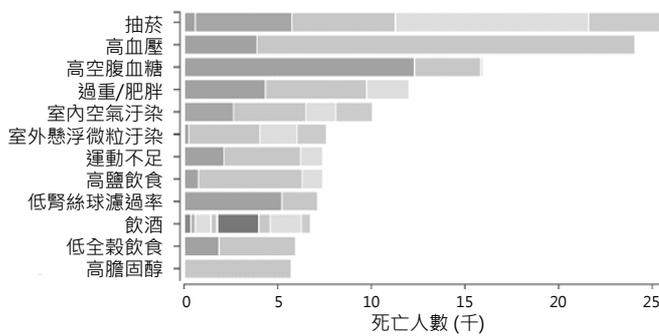
相對危險性公式

PM_{2.5} 暴露與疾病別死亡之間的相對風險關係

(A) 全球可歸因於危險因子之死亡負擔



(B) 台灣可歸因於危險因子之死亡負擔



- 人類免疫缺乏病毒/後天免疫缺乏症候群及結核疾病/下呼吸道感染/其他
- 癌症
- 心血管疾病
- 慢性呼吸道疾病
- 肝硬化
- 消化道疾病
- 神經系統疾病
- 精神疾病及藥物濫用
- 糖尿病/泌尿系統/循環系統/內分泌系統疾病
- 骨骼肌肉疾病
- 其他非傳染性疾病
- 交通運輸傷害
- 意外傷害
- 自殺及暴力
- 戰爭及災難

圖一：可歸因於危險因子之死亡負擔分佈，(A)全球、(B)台灣(引用自參考文獻[14])

是採用全球疾病負擔 2010 的資料[18]。此公式中的理想 PM_{2.5} 暴露濃度(相對危險性為 1)是取自目前為止最大的空汙世代研究(Cancer Prevention Study II, CPS II cohort)中的最低暴露群(信賴區間上下界分別為 5.8 μg/m³ 及 8.8 μg/m³)，我們以此當作本研究在分析族群，可歸因分率時的理想暴露濃度。

縣市層級死亡資料

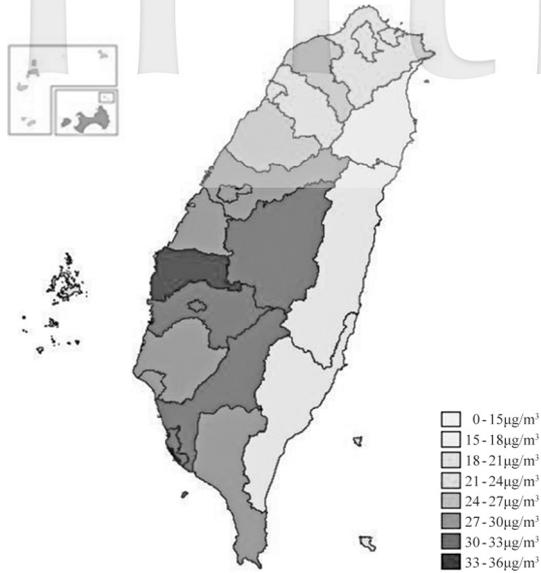
2014 年縣市層級的 25 歲以上成人死亡資料，是由國家死亡登記系統取得，並使用 ICD-10 編碼定義疾病：缺血性心臟病(120-125)；中風(I60-I67, I69.0, I69.1, I69.2, I69.3)；肺癌(C33,C34)；慢性阻塞性肺病(J40-J44)。依據年齡別、性別、以及縣市別，估計各死因別之可歸因死亡數、總歸因死亡數、早發可歸因死亡數(attributable premature deaths)(死亡年齡小於 2014 年出生平均餘命；男性

為 76.7 歲；女性為 83.2 歲)。

結果

圖二為 2014 年縣市別年平均 PM_{2.5} 暴露濃度，結果呈現台灣西部 PM_{2.5} 暴露濃度普遍高於東部。暴露濃度最高的雲林縣(34.37 μg/m³)與暴露濃度最低的台東縣(11.04 μg/m³)相差三倍，值得注意的是，台灣所有縣市的 PM_{2.5} 暴露濃度皆超過世界衛生組織公布之標準暴露濃度(10 μg/m³)，也高於本研究中的相對風險理想暴露值(5.8-8.8 μg/m³)。

利用 PM_{2.5} 暴露濃度及暴露-風險關係式，我們計算出縣市別四大疾病可歸因於 PM_{2.5} 之族群可歸因分率(圖三)。在不同縣市中，PM_{2.5} 對於這四大疾病的族群，可歸因分率從 3.8%到 30.7%不等。在 2014 年，台灣有 6,282 個死亡人數可以歸因於 PM_{2.5} 的暴露(佔該年度總死亡人數的 3.8%)；其中有 4,028 個死亡數為早發死亡(係指該死亡個案發



圖二：臺灣地區 2014 年縣市別 PM_{2.5} 年平均暴露濃度(改編自參考文獻[15])

生在小於出生平均餘命之前，男性為 76.7 歲；女性為 83.2 歲；圖四 A 及表一)。可歸因於 PM_{2.5} 暴露的死亡人數中，缺血性心臟病佔最高比例(2,244 人死亡)；其次為中風(2,140 人)；肺癌(1,252 人)；以及慢性阻塞性肺病(645 人)。而 PM_{2.5} 暴露造成以上四個疾病的族群可歸因分率為 18.6%(95%信賴區間:16.9-20.3%)，但是呈現顯著的縣市別地理分布差異(圖四 B)。台灣南部的縣市相較其他縣市有較高的族群可歸因分率，其中以雲林縣最高(21.8%)，而花蓮縣(8.7%)及台東縣(9.1%)的族群可歸因分率最低。以死亡人數來看，新北市(874 人死亡)及高雄市(829 人)有最多的可歸因於 PM_{2.5} 的死亡人數(圖四 B 及表一)

討論

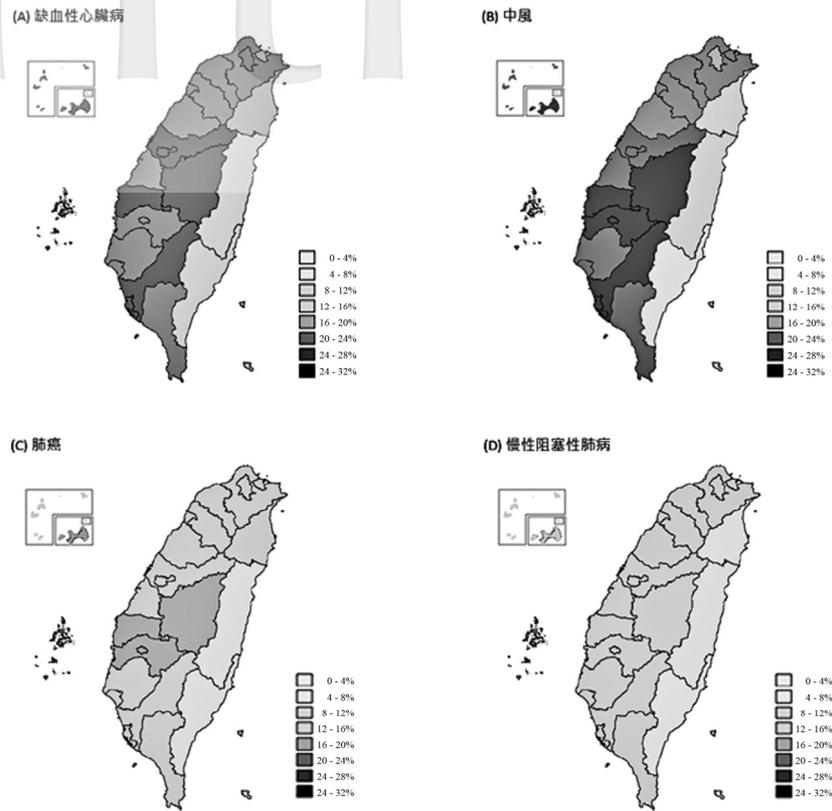
我們發現，無論是在全球疾病負擔報告中的台灣 PM_{2.5} 風險評估，或是利用本土空氣品質監測網絡資料與死亡登記資料進行的風險評估，都發現每年有超過 6,000 個以上來自缺血性心臟病、中風、肺癌、慢性阻塞性肺病的死亡個案與 PM_{2.5} 的暴露有關。而在這四個疾病的所有死亡人數當中，有將近五分之一的死亡可以歸因於 PM_{2.5}。更重要

的是，由於空汙的局部地理性差異，其可歸因分率在縣市別分布上也有很大差異，最高的 PM_{2.5} 族群可歸因分率出現在台灣南部。就絕對死亡人數而言，新北市及高雄市兩個台灣主要都市，則有最高的可歸因之死亡人數。

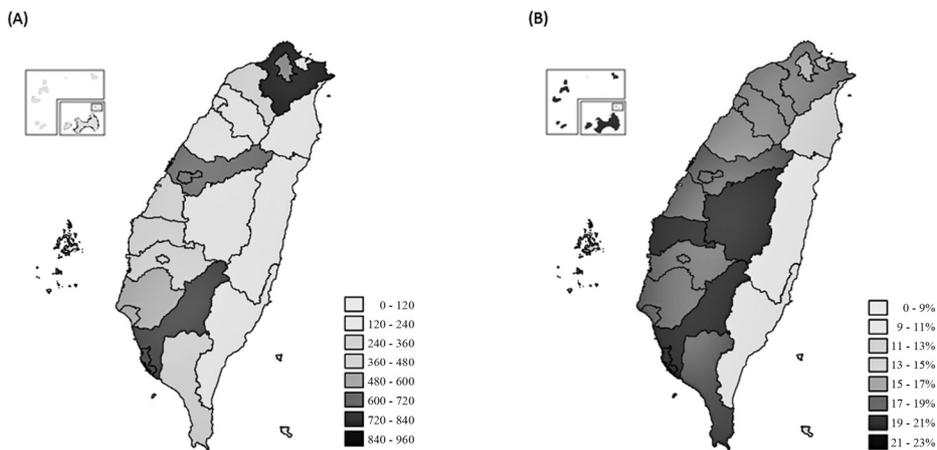
我們的本土研究結果與全球疾病負擔 2013 的結果類似，在全球疾病負擔 2013 的報告中，台灣可歸因於 PM_{2.5} 的死亡人數為 7,526，26.6%來自缺血性心臟病；26.3%來自肺癌；23.4%來自中風；3.2%來自慢性阻塞性肺病[12]。在全球疾病負擔的分析中，PM_{2.5} 的暴露濃度是利用衛星影像及大氣模型來估計，而在本土研究中，則是利用位於地表的空氣監測站資料推估 PM_{2.5} 暴露濃度。過去研究發現衛星影像與地表監測的 PM_{2.5} 的暴露估計，具有很高的相關性[19-24]，但我們本土研究的優勢是能夠使用縣市層級的暴露以及死亡資料，並且根據實際上測站附近的人口密度進行調整，因此我們的研究結果，可以提供不同縣市地區間的評估結果供地方政府作為政策參考。

近年來台灣的 PM_{2.5} 濃度有下降的趨勢，台灣平均 PM_{2.5} 濃度自 2005 年的 36.2 µg/m³ 下降至 2014 年的 25.0 µg/m³，然而現今的 PM_{2.5} 濃度與世界衛生組織建議的理想暴露濃度仍有很大的距離[25,26]。相較於個人生活型態的健康危險因子，例如吸菸喝酒不運動等，居住在同一地區的民眾往往會暴露到相同的 PM_{2.5} 污染，因此，透過個人行為的努力來避免 PM_{2.5} 暴露，效果往往很有限，這亦凸顯政府在處理環境中健康危險因子議題上，扮演了極重要的角色。

我們發現台灣的 PM_{2.5} 暴露濃度以及可歸因於 PM_{2.5} 的疾病負擔，有很大的縣市別差異，過去在美國進行的研究也指出，不同區域間空氣汙染對健康造成的危害落差[6]。這些地理區域上的差異與都市化程度、工業發展、汙染物傳播息息相關，而台灣地區別之間 PM_{2.5} 暴露濃度及其對健康造成的影響，亦凸顯了環境與健康議題上社會不平等的情況。近年來國民健康署將彌除健康上的不平等，作為重要的施政目標，我們的研究發現健康促進與環境、經濟因素密不可分，為了解決這個複雜且刻不容緩的空汙問題，衛生福利部、環境保護署、經濟部等單位，需要進行跨部門的合作，共同研擬相關



圖三：臺灣地區 2014 年 PM_{2.5} 可歸因分率縣市別分布，(A)缺血性心臟病、(B)中風、(C)肺癌、(D)慢性阻塞性肺病(改編自參考文獻[15])



圖四：臺灣地區 2014 年 PM_{2.5} 之(A)可歸因死亡人數與(B)可歸因分率縣市別分布(改編自參考文獻[15])

政策。

我們發現在台灣中南部地區有較高比例缺血性心臟病、中風、肺癌及慢性阻塞性肺病的死亡，

可歸因於 PM_{2.5} 暴露，其中高濃度的 PM_{2.5} 暴露原因，可能來自於火力發電廠以及重工業的空汙排放 [27-29]，中台灣地區已經證實火力發電廠及石油化

表一：台灣地區縣市別可歸因於 PM_{2.5} 暴露之疾病別死亡人數, 2014 年(改編自參考文獻[15])

縣市	缺血性心臟病		中風		肺癌		慢性阻塞性肺病		總死亡數		早發性死亡數*	
	N	95% CI	N	95% CI	N	95% CI	N	95% CI	N	95% CI	N	95% CI
基隆市	70	(63-77)	28	(24-33)	18	(14-22)	8	(5-12)	124	(115-134)	81	(75-87)
台北市	283	(255-311)	176	(143-209)	106	(80-132)	54	(30-79)	619	(563-675)	367	(342-393)
新北市	365	(331-398)	271	(225-317)	165	(131-200)	73	(46-101)	874	(802-946)	584	(542-627)
桃園市	134	(121-148)	172	(140-205)	84	(66-102)	38	(23-54)	429	(387-471)	269	(248-290)
新竹縣	76	(67-84)	91	(73-108)	35	(27-42)	18	(11-25)	220	(198-242)	134	(123-144)
宜蘭縣	45	(39-50)	26	(21-31)	19	(15-24)	10	(5-15)	100	(90-110)	61	(56-66)
苗栗縣	69	(62-76)	74	(60-87)	30	(23-36)	19	(12-27)	191	(173-210)	117	(107-126)
台中市	193	(176-211)	220	(180-260)	132	(108-157)	68	(43-92)	613	(557-669)	399	(369-430)
彰化縣	124	(111-138)	147	(122-172)	97	(76-117)	47	(32-63)	415	(377-454)	262	(241-284)
南投縣	59	(53-66)	80	(67-92)	41	(33-49)	33	(22-43)	213	(193-232)	136	(125-147)
雲林縣	111	(98-123)	105	(86-124)	73	(60-87)	36	(25-47)	325	(296-354)	203	(187-218)
嘉義縣	100	(87-112)	105	(85-124)	76	(61-92)	39	(26-53)	320	(289-351)	185	(171-200)
台南市	155	(140-171)	197	(161-232)	120	(97-142)	60	(41-79)	531	(483-580)	342	(314-370)
高雄市	286	(258-314)	283	(239-328)	178	(144-211)	82	(58-106)	829	(762-896)	570	(529-612)
屏東縣	104	(94-115)	119	(99-139)	55	(44-65)	46	(32-60)	324	(296-352)	215	(199-232)
馬公市	9	(8-10)	6	(5-7)	5	(3-6)	1	(1-2)	22	(20-24)	14	(13-15)
花蓮縣	21	(18-24)	18	(14-23)	7	(5-9)	6	(3-9)	52	(46-59)	33	(29-36)
台東縣	27	(23-31)	11	(8-15)	5	(4-7)	3	(2-5)	47	(42-53)	35	(31-39)
金門縣	11	(10-12)	10	(8-12)	7	(5-8)	2	(1-3)	30	(27-33)	19	(17-20)
連江縣	1	(1-2)	1	(1-1)	1	(0-1)	0	(0-0)	3	(2-3)	2	(2-2)
台灣地區	2244	(2015-2473)	2140	(1760-2520)	1252	(995-1509)	645	(418-872)	6282	(5716-6847)	4028	(3719-4338)

*早於出生時平均餘命發生的死亡

工產業是懸浮粒子的主要來源[28,30]。而南投縣雖然並沒有大量懸浮微粒的排放源，卻遭受附近縣市的工業排放影響，有較高濃度的 PM_{2.5} 暴露[16]。另一方面，位於南台灣的海港城市：高雄，數十年來皆是重工業發展重鎮，其造成的空氣污染，也間接影響周遭縣市，尤其以屏東縣最為嚴重。近年來環保署提出高屏地區污染物總排放限制的政策，這將會是解決大高屏地區空汙問題的重要關鍵措施。

在目前的全球疾病負擔報告中，由於資料取得的關係，大部份的報告都是局限在國家層級的層面(national level)，然而，對於實際政策擬定，以及像空氣污染這種具有高度地區性差異的因子，僅僅在國家層面的資料往往不敷使用。因此，我們採用了全球疾病負擔的研究架構，但是加上本土的縣市層級資料進行健康風險評估，這可以補足全球疾病負擔中國家層面報告之不足。然而，此本土研究仍有一些研究上的限制。首先，該研究使用的相對危險性公式，是取自全球疾病負擔的全球性研究，由於環境污染對長期人體健康影響的評估，在亞洲國家較為少見，儘管這類研究主要來自北美以及歐洲地區[31]，但香港及中國大陸所進行的空氣污染及心肺疾病的研究，與西方研究結果一致[32,33]。此外，該研究僅探討 PM_{2.5} 暴露造成的死亡負擔為主，而 PM_{2.5} 暴露所造成的疾病失能並未列入討論，但由於醫療科技的進步，平均餘命逐漸延長，也讓非致命疾病及失能調整生命年數(disability-adjusted life years, DALYs)的評估更顯重要，在未來研究應一併列入評估。最後，本研究僅針對具有充分流行病學證據的 PM_{2.5} 暴露所導致的疾病進行探討，近年有越來越多研究指出，空氣污染不只與心肺疾病有相關性，與糖尿病、阿茲海默症、結核病及慢性腎臟病亦有相關[34-37]，因此本研究僅保守估計空氣污染對人體健康的影響。

針對空氣污染這個全球最重要的單一環境風險暴露因子，第 68 屆世界衛生大會(World Health Assembly)決議指出了空汙對人體健康影響的重要性。我們的研究顯示空氣污染，特別是 PM_{2.5} 的暴露在台灣是一個急需解決的公共衛生議題，環保署需要針對 PM_{2.5} 制定更嚴格的排放標準，以促進人民健康。同時，衛生福利部需要積極提高大眾對

PM_{2.5} 污染的意識，以降低空氣污染產生的健康成本，並與經濟部建立合作關係，確保空氣污染議題能夠在國家、縣市地區層級的經濟發展政策中列入考慮。除了跨部會合作外，衛生福利部必須建立一個包含空氣品質監測及健康登記的公共衛生系統，以利監測空氣污染對人民造成的疾病負擔。

聲 明

本研究之利益衝突：無。知情同意：無。受試者權益：無人體或動物實驗。

參 考 文 獻

1. Pope CA, Dockery DW: Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc* 2006;56:709-42.
2. Krewski D, Jerrett M, Burnett RT, et al: Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Res Rep Health Eff Inst* 2009;5-114; discussion 115-36.
3. Cooke RM, Wilson AM, Tuomisto JT, et al: A Probabilistic characterization of the relationship between fine particulate matter and mortality: Elicitation of European experts. *Environ Sci Technol* 2007;41:6598-605.
4. Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA 3rd, et al: Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 2010;121:2331-78.
5. Pope CA 3rd, Ezzati M, Dockery DW: Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *N Engl J Med* 2009;360:376-86.
6. Fann N, Lamson AD, Anenberg SC, et al: Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM_{2.5} and ozone. *Risk Anal* 2012;32:81-95.
7. Su TC, Chen SY, Chan CC: Progress of ambient air pollution and cardiovascular disease research

- in Asia. *Prog Cardiovasc Dis* 2011;53:369-78.
8. Murray CJ, Lopez AD, Jamison DT: The global burden of disease in 1990: summary results, sensitivity analysis and future directions. *Bull World Health Organ* 1994;72:495-509.
 9. Murray CJ: Quantifying the burden of disease: the technical basis for disability-adjusted life years. *Bull World Health Organ* 1994;72: 429-45.
 10. Salomon JA, Haagsma JA, Davis A, et al: Disability weights for the Global Burden of Disease 2013 study. *Lancet Glob Health* 2015;3:e712-23.
 11. GBD 2013 Mortality and Causes of Death Collaborators: Global, regional, and national age-sex specific all-cause and cause-specific mortality for 240 causes of death, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* 2015;385:117-71.
 12. Global Burden of Disease Study 2013 Collaborators: Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 301 acute and chronic diseases and injuries in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* 2015;386:743-800.
 13. Murray CJ, Lopez AD: On the comparable quantification of health risks: lessons from the Global Burden of Disease Study. *Epidemiology* 1999;10:594-605.
 14. (IHME) IHMaE. GBD Compare. In. Seattle, WA, IHME, University of Washington; 2015. pp. <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/> Accessed March 4, 2016.
 15. Lo WC, Shie RH, Chan CC, et al: Burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure in Taiwan. *J Formos Med Assoc* 2016 Feb 10. pii: S0929-6646(15) 00414-3.
 16. TWEPA: Taiwan Air Quality Monitoring Network, 2014.
 17. Monthly Bulletin of Interior Statistics. 1.7 Population for Township and District and by Urban Area. Taipei City, Statistics Department, Ministry of the Interior, Taiwan, 2014.
 18. Burnett RT, Pope CA 3rd, Ezzati M, et al: An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. *Environ Health Perspect* 2014;122:397-403.
 19. Van Donkelaar A, Martin RV, Park RJ: Estimating ground-level PM_{2.5} using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *J Geophys Res: Atmospheres* (1984-2012) 2006;111.
 20. Liu Y, Sarnat JA, Coull BA, et al: Validation of Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) aerosol optical thickness measurements using Aerosol Robotic Network (AERONET) observations over the contiguous United States. *J Geophys Res: Atmospheres* (1984-2012) 2004;109.
 21. Kahn RA, Gaitley BJ, Martonchik JV, et al: Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR) global aerosol optical depth validation based on 2 years of coincident Aerosol Robotic Network (AERONET) observations. *J Geophys Res: Atmospheres* (1984-2012) 2005;110.
 22. Hutchison KD, Smith S, Faruqui SJ: Correlating MODIS aerosol optical thickness data with ground-based PM_{2.5} observations across Texas for use in a real-time air quality prediction system. *Atmos Environ* 2005;39: 7190-203.
 23. Gupta P, Christopher SA, Wang J, et al: Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmos Environ* 2006;40:5880-92.
 24. Chu DA, Kaufman YJ, Zibordi G, et al: Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *J Geophys Res: Atmospheres* 2003;108.
 25. Europe WHO, Organization WH: Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter,

- ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide: World Health Organization, 2006.
26. EPA US: National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Proposed Rule. Federal Register 2012,77:38889-9055.
 27. Hsu YC, Lai MH, Wang WC, et al: Characteristics of water-soluble ionic species in fine (PM_{2.5}) and coarse particulate matter (PM_{10-2.5}) in Kaohsiung, southern Taiwan. *J Air Waste Manag Assoc* 2008,58:1579-89.
 28. Fang GC, Chang CN, Wu YS, et al: Ambient suspended particulate matters and related chemical species study in central Taiwan, Taichung during 1998-2001. *Atmos Environ* 2002,36:1921-8.
 29. Chen KS, Lin CF, Chou YM: Determination of source contributions to ambient PM_{2.5} in Kaohsiung, Taiwan, using a receptor model. *J Air Waste Manag Assoc* 2001;51:489-98.
 30. Chen YC, Hsu CY, Lin SL, et al: Characteristics of concentrations and metal compositions for PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in Yunlin county, Taiwan during air quality deterioration. *Aerosol and Air Quality Research*. 2015;15:2571-83.
 31. Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, et al: Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ Health* 2013;12:43.
 32. Zhang P, Dong G, Sun B, et al: Long-term exposure to ambient air pollution and mortality due to cardiovascular disease and cerebrovascular disease in Shenyang, China. *PLoS One* 2011,6:e20827.
 33. Wong CM, Lai HK, Tsang H, et al: Satellite-based estimates of long-term exposure to fine particles and association with mortality in elderly Hong Kong residents. *Environ Health Perspect* 2015;123:1167-72.
 34. Wu YC, Lin YC, Yu HL, et al: Association between air pollutants and dementia risk in the elderly. *Alzheimers Dement (Amst)* 2015;1:220-8.
 35. Lue SH, Wellenius GA, Wilker EH, et al: Residential proximity to major roadways and renal function. *J Epidemiol Community Health* 2013;67:629-34.
 36. Lai TC, Chiang CY, Wu CF, et al: Ambient air pollution and risk of tuberculosis: a cohort study. *Occup Environ Med* 2016;73:56-61.
 37. Chen H, Burnett RT, Kwong JC, et al: Risk of incident diabetes in relation to long-term exposure to fine particulate matter in Ontario, Canada. *Environ Health Perspect* 2013,121:804-10.

The Attributable Mortality Burden Due to PM_{2.5} Exposure in Taiwan

Wei-Cheng Lo^{1,2}, Ruei-Hao Shie³, Chang-Chuan Chan^{4,5}, Hsien-Ho Lin¹

Abstract: There is compelling epidemiological evidence that links air pollution to increased risk of mortality from cardiopulmonary disease and lung cancer. We reviewed the Global Burden of Disease (GBD) 2013 report on the attributable mortality burden due to PM_{2.5} exposure in Taiwan. We also conducted a local analysis to quantify the burden of mortality attributable to PM_{2.5} among Taiwan population in 2014 at the national and subnational levels. Subnational PM_{2.5} exposure levels were obtained from Taiwan Air Quality Monitoring Network. Relative risks were derived from previously developed exposure-response model. Population attributable fraction for cause-specific mortality was estimated at the county level using the estimated ambient PM_{2.5} concentrations and the relative risk functions. We found that, both in the GBD analysis and the local analysis, PM_{2.5} exposure accounted for a substantial mortality burden (over 6,000 deaths) in the Taiwanese population. Nationally the population attributable mortality fraction of PM_{2.5} for the four disease causes (ischemic heart disease, stroke, COPD, and lung cancer) was 18.6%. Substantial geographic variation in PM_{2.5} attributable mortality fraction was found. Ambient PM_{2.5} pollution is a major mortality risk factor in Taiwan. Aggressive and multi-sectoral intervention strategies are urgently needed to bring down the impact of air pollution on environment and health.

Key Words: burden of disease, fine particulate matter, subnational analysis

(Full text in Chinese: Formosan J Med 2016;20:396-405) DOI:10.6320/FJM.2016.20(4).7

¹Institute of Epidemiology and Preventive Medicine, Collage of Public Health, National Taiwan University; ²Taiwan Cancer Registry; ³Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute; ⁴Institute of Occupational Medicine and Industrial Hygiene, Collage of Public Health, National Taiwan University; ⁵Global Health Center, Collage of Public Health, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

Address correspondence to: Chang-Chuan Chan, Institute of Occupational Medicine and Industrial Hygiene, Collage of Public Health, National Taiwan University. E-mail: ccchan@ntu.edu.tw; Hsien-Ho Lin, Institute of Epidemiology and Preventive Medicine, Collage of Public Health, National Taiwan University, No.17, Xuzhou Rd., Taipei, Taiwan, E-mail:hsienho@ntu.edu.tw.