



PM_{2.5} 改善策略及成效

中央大學環境工程研究所特聘教授 / 李崇德

關鍵字：PM_{2.5}，PM_{2.5} 改善行動方案，PM_{2.5} 改善成本

摘要

近十多年來，PM_{2.5} 空氣品質頗受國人關注。環保署為了在 2019 年達成 PM_{2.5} 年平均濃度為 $18 \mu\text{g m}^{-3}$ 的目標，針對固定和移動污染源提出 14 項管制行動方案，並預計從空污基金和公務預算投注 365 億元，同時盼望吸引民間資金投入 1,684 ~ 2,477 億元，經費投入的龐大可說是史無前例，充分展現出政府和民間改善 PM_{2.5} 的決心與毅力，當然，台電公司也投注 101 億元配合改善發電及污染防治技術。然而，管制行動方案的成效有賴事先推演及周延細膩配套措施，否則將陷入民眾陳情抗爭的窘境；同時，陳抗民眾也需要自我省思：為了持續改善空氣品質，自己可退讓接受的方案為何？未來 PM_{2.5} 空氣品質的改善需朝向降低污染源 NO_x 排放及去除工廠煙道可凝結性 PM_{2.5} 方面努力。

一、前言

PM_{2.5} 是指懸浮在空氣中氣動粒徑小於或等於 2.5 微米的微粒，又稱為細懸浮微粒，這是有別於氣動粒徑小於或等於 10 微米的懸浮微粒 (PM₁₀)，所以粒徑介於 2.5 和 10 微米之間的微粒就稱為粗懸浮微粒。如果沒有特別指出，一般人會以為空氣中微粒都是圓球體，但事實上微粒是各種形狀樣貌都有，如何界定出微粒的“直徑”？為了符合一般人認知的直徑，在實務上便以一個和擬探討微粒具有相同動力特性（沉降速度）的單位密度圓球顆粒來模擬，以解決擬探討微粒的非圓球體形貌問題。所以一群長短、寬扁、形狀、密度不相同的微粒，它們的氣動粒徑有可能一樣，這是一個有趣的現象。因此，在實質討論上，還是可以使用圓球體概念來表示懸浮在空氣中微粒直徑。



2.5 微米有多大？以人的頭髮直徑約有 50 微米來量度， $PM_{2.5}$ 大約是 1/20，這麼小的微粒懸浮在空氣中很有機會隨著人體呼吸氣流進入呼吸系統，經由細支氣管尾端的肺泡進入肺部血管，然後隨著血液循環進入心血管循環系統；理論上，進入體內的微粒會因為滯留效應或因攜帶有毒性化學成分，造成身體的傷害。對於微粒健康風險的研究多以流行病學方式進行，例如：哈佛大學的六個城市研究 [1]，這個研究蒐集 1974 到 1977 年美國六個城市從 25 到 74 歲共計 8,111 人案例，追蹤這些人在後續 14 到 16 年間死亡原因，研究結果發現死亡和抽菸關聯性最大，在調整抽菸和其他風險因子以後，空氣污染和死亡率有顯著的統計關係，且空氣污染和肺癌及心血管疾病有正相關，結論更明確指出：空氣污染物 $PM_{2.5}$ 或是和 $PM_{2.5}$ 結合的更複雜污染混合物對於六個城市的研究案例造成過多死亡率。Dockery 等人 [1] 的研究發表後，引起人們對 $PM_{2.5}$ 健康風險的關注，體認到 $PM_{2.5}$ 濃度增加和死亡具有關聯性；但美國空氣中 $PM_{2.5}$ 濃度當時是在降低當中，因此， $PM_{2.5}$ 濃度降低是否可以減少死亡率？於是 Laden 等人 [2] 延伸追蹤六個城市 $PM_{2.5}$ 平均濃度與死亡率關係，比較 1974 到 1989 年和 1990 到 1998 年兩段期間 $PM_{2.5}$ 平均濃度改善所減少的死亡率，研究結論除了確認 Dockery 等人 [1] 的成果外，也發現降低 $PM_{2.5}$ 濃度可以減少死亡率。臺灣多數城市 $PM_{2.5}$ 濃度較美國為高，國內學者對於 $PM_{2.5}$ 的動物或人體危害自然也相當重視 [3,4,5]。

近年來大陸工業高度發展，產業動力來源必然需要燃燒大量化石燃料，因而不可避免地產生空氣污染，於是當環境擴散不良時，

霧(灰)霾事件便不斷發生，使遠方建築物或山景無法辨識，嚴重時甚至連太陽都被遮蔽了，有如黃昏或暗夜。大陸中央電視台前記者柴靜的紀錄片「穹頂之下」公開播出後，點醒民眾瞭解這種霧霾天氣是空氣污染，和一般濃霧天氣不同。此後，每當環境中有較高 $PM_{2.5}$ 濃度，便引起民眾關切，甚至恐慌。Sun 等人 [6] 歸納大陸冬天霧霾事件的主要原因是停滯氣象狀況、燃燒煤炭、大氣二次反應使氣體轉化成微粒、以及外地的區域傳輸。

除了霧霾外， $PM_{2.5}$ 長時間懸浮在空氣中，還會造成其他環境效應，例如：對於太陽光的直接反射及吸收將造成大氣溫度的降低和提升，或是在 $PM_{2.5}$ 進入雲層，吸收雲中水蒸氣形成雲滴後對太陽光反射及吸收。這種環境效應一般民眾感覺不出來，但在科學上是存在的。

二、 $PM_{2.5}$ 改善策略及成效

如前所定義， $PM_{2.5}$ 是泛指氣動粒徑小於或等於 2.5 微米的各類微粒，大氣 $PM_{2.5}$ 可能來自自然源和人為源，以來源地方來說，可能有在地污染源排放、污染源排放前驅氣體的二次光化學反應、夜間反應、境外或境內其他區域傳輸，然而，對於 $PM_{2.5}$ 空氣品質改善最有效益的方式還是針對在地污染源排放的管制，因為這是最能掌握的改善策略。事實上，經過多年來的努力，北、中、南部空品區 $PM_{2.5}$ 年平均濃度幾乎是逐年降低，圖 1 呈現臺灣西部地區 $PM_{2.5}$ 年平均濃度逐年變化趨勢 [7]，三個空品區都是在 2011 年以後開始明確呈現下降走勢，南部空品區濃度最高且在 2015 年以後又有上升的趨勢，需要再檢討努力。

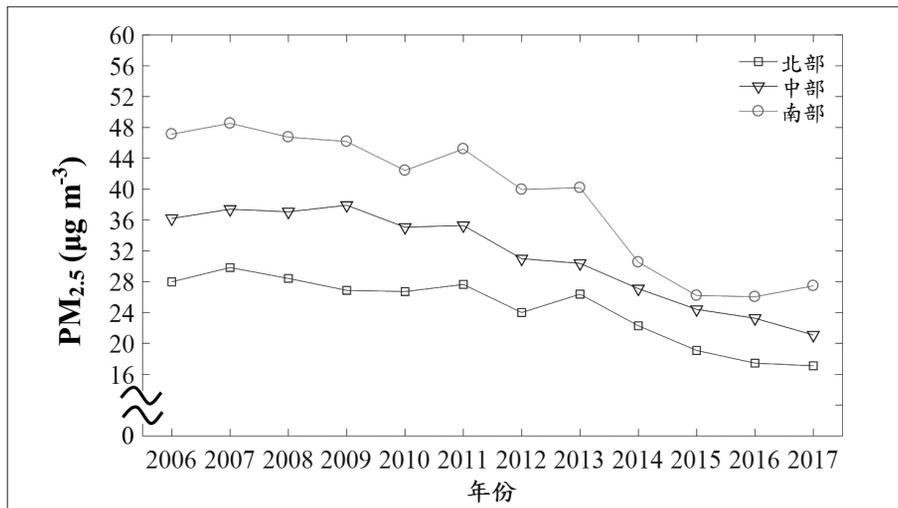


圖 1 臺灣北、中、南部空品區 PM_{2.5} 年平均濃度逐年變化趨勢 [7]

環保署為了在 2019 年達成 PM_{2.5} 年平均濃度為 18 $\mu\text{g m}^{-3}$ 的目標，針對固定和移動污染源總共列出 14 項管制行動方案，如表 1 所示 [8]。表 1 不僅列出 PM_{2.5} 預期減量，也列出其他污染物減量，這是因為相同污染源不只排放一種污染物，更何況氣體污染物是 PM_{2.5} 前驅污染物，這些氣體污染物在大氣環境的存在將會因為發生光化學或夜間反應，產生 PM_{2.5}；當然有些污染活動管制後的減量很難加以量化，例如：固定污染源的農業廢棄物燃燒和餐飲油煙管制排放的氮氧化物及揮發性有機物，移動污染源的提升公共運輸及軌道貨運運能，這些行動方案因難以估算排放係數或活動強度，無法預估減量成效。

表 1 顯示在達成固定污染源各項管制行動方案後，環保署預計 PM_{2.5} 可減量 2,339 公噸，移動污染源更可減量 6,107 公噸，移動污染源的減量是固定污染源的 2.6 倍，由於移動污染源排放高度接近戶外活動人群的呼吸高

度，車輛流動分布區域又比固定污染源更廣泛，如果能達成預期減量，對於民眾健康的保護將會有很大的效益。底下針對 PM_{2.5} 減量成效較大管制行動方案加以說明：

(一) 汰換一、二期柴油大貨車

在各項管制行動方案中，汰換一、二期柴油大貨車對 PM_{2.5} 減量可達 5,395 公噸，是最具有成效的管制行動方案，環保署的目標是至 2019 年淘汰 8 萬輛一、二期柴油大貨車，擬訂行動方案有：加強路邊攔檢管制、推廣雇用環保車隊、補助加速汰舊、修法劃定空品淨區限制進出，要有效達成管制需由環保署、交通部、財政部、工程會、地方政府進行跨部會合作。柴油車排放微粒非常細小且多由碳黑微粒 (soot) 和多環芳香烴構成 [10,11,12]，加拿大政府衛生部 [13] 歸納柴油車微粒急性 (短期暴露) 健康效應有氣喘和心血管疾病，慢性 (長期暴露) 健康效應有慢性阻塞性肺病。聯合國世界衛生組織國際癌症



表 1 環保署空氣污染管制行動方案及預期減量成效 (累計至 2019 年) [8,9]

排放量減量預期成效 (公噸)						
	管制行動方案	懸浮微粒 (PM ₁₀)	細懸浮微粒 (PM _{2.5})	硫氧化物 (SO _x)	氮氧化物 (NO _x)	揮發性有機物 (VOCs)
固定污染源	電力設施管制	205	143	12,092	17,163	—
	鍋爐管制	851	175	4,962	2,936	7
	農業廢棄物燃燒排煙管制	513	466	—	—	—
	營建及堆置場揚塵管制	3,360	672	—	—	—
	餐飲油煙管制	841	788	—	—	—
	改變風俗習慣	135	95	—	30	—
	河川揚塵防制	900	—	—	—	—
移動污染源	汰換一、二期柴油大貨車	6,142	5,395	—	71,149	7,584
	三期柴油車加裝濾煙器	247	243	—	—	—
	汰除二行程機車	563	457	1	260	7,743
	港區運輸管制	6	5	38	110	3
	提升公共運輸使用人次	—	—	—	—	—
	提升軌道貨運運能	—	—	—	—	—
	推動電動蔬果運輸車	7	7	—	34	9
合計	13,770	8,446	17,093	91,682	15,346	

研究機構更在 2012 年 6 月 12 日於法國里昂召開的研討會宣告：柴油引擎廢氣歸類為第一級 (對人類有確認的致癌性) 肺部致癌物。這個宣告是基於研究證據所做出的結果，主要目的是希望各國訂出管制標準，以標準來驅動新的科技，例如：降低柴油含硫量、改變柴油引擎設計使柴油燃燒更有效率、降低柴油引擎廢氣排放，有了新的科技又可以帶動更嚴謹的管制標準，這樣才能走向正向循環，使環境越來越乾淨 [14]。

(二) 餐飲油煙管制

餐飲業是民眾日常生活接觸最頻繁的行業，環保署估計如果至少 7,000 家餐廳增設防

制設備，PM_{2.5} 油煙排放估計可減量 788 公噸。目前地方政府多訂有「餐飲業空氣污染防制設備管理辦法」，可加強宣導及督促餐飲業者加裝空氣污染防制設備、監督業者做好防制設備操作與維護保養工作、進行稽巡查、蒐集大型餐飲業污染防制設備操作參數等現況資料。內政部及衛福部則可做區位管理，包括：在建築技術規範中要求設置控制設備行動方案、規劃油煙排氣集中處理方案、規劃特定區域 (住宅區) 禁設油煙大餐飲業、於「公共飲食場所衛生管理辦法」規定餐飲業應裝設污染防制設備始得登記營業等工作。經濟部可訂定油煙收集及處理設備國家標準及研發油煙處理技術及設備。



(三) 營建及堆置揚塵管制

營建工程造成粉塵逸散雖然主要是粗微粒，但仍然有 PM_{2.5}，當空氣污染防治設施查核符合率由 80% 提升至 90% 以上，環保署預計可減量 672 公噸。事實上，環保署已於 2003 年公告 (2007 年修改) 有「營建工程空氣污染防治設施管理辦法」，規範營建業主對於營建工地堆置材料、車行路徑、裸露地表、施工機具等應採行有效抑制粉塵防制設施，並在運送材料車輛出入口設置洗車台。營建工地粉塵逸散容易引起民怨，地方政府都會依照前述管理辦法加強工地稽、巡查，若有污染都會要求營建工地限期改善，嚴重者往往逕行告發處分。除了督導稽查外，過去地方政府常碰到業者以缺乏污染防治經費而敷衍防制設施的設置，因此，環保署希望工程會能修正施工規範及契約範本，促使工程業主編列充足污染防治經費及採行防制設施。

(四) 農業廢棄物燃燒排煙管制

農業廢棄物或是生質燃燒由於會跨區域傳輸，因此受到舉世矚目，這些燃燒會排放大量 PM_{2.5} 以及氣體污染物，對於環境影響很大 [15]。在過去，每當二期稻作收割時，搭乘高鐵或開車經過新竹以南至臺南以北國道 1 號及 3 號高速公路兩旁，常可看到稻草燃燒濃煙四起，甚至遮蔽用路人視線燻嗆居民眼鼻，近年來地方政府強力進行稽查管制，有些縣、市則補助農民將稻稈碾碎掩埋至田地，灑下益菌肥 (腐化菌)，農業廢棄物露天燃燒狀況已有改善，環保署提出持續進行露天燃燒稽巡查作業、掌握農業廢棄物露天燃燒現況、在收割前宣導或示範推廣活動、稻作收割期則做高頻率查核；同時，敦促農委會補助腐化菌，並鼓勵稻田轉作及研發稻草

現地處理技術，希望能將稻草露天燃燒面積減少 90%，估計可以比目前狀況減少 466 公噸 PM_{2.5} 的排放。

(五) 汰除二行程機車

機車具有耐久、機動性高和價錢相對便宜的優點，是我國民眾長期倚賴的交通工具，但老舊的二行程機車，排放污染濃度很高，各地環保局的街道機車攔檢，絕對都是二行程比四行程機車排放污染高出很多。在最新通過的空污法第 36 條授權環保署得視空氣品質需求，加嚴出廠 10 年以上交通工具原適用之排放標準，如果開始執行這個條款，高污染二行程機車的騎乘勢必發生困難，甚至可能在 2020 年被全面禁止上路。為促進民眾儘早報廢老舊二行程機車，各地方政府都訂出獎勵辦法，除報廢外，民眾也可更換電動機車，以大幅度降低污染物排放。環保署希望在 2019 年能淘汰全部二行程機車 (目前估計尚有 100 萬輛)，如果達標，將可減少 457 公噸 PM_{2.5} 的排放。

(六) 三期柴油車加裝濾煙器

柴油車會排放高濃度碳黑微粒和 NO_x，裝設濾煙器和選擇性觸媒轉化系統是有效的控制設備。濾煙器是美國 2007 年以後出廠大貨運卡車的標準配備，相對於沒有裝設濾煙器的 2004-2006 年柴油車，2007-2009 年柴油車碳黑排放量降低了 65-70%，2010 年以後柴油車更是降低 90% 以上碳黑排放量，美國加州空氣資源局從 2010 年就要求在港口和鐵道載貨老舊柴油卡車必須進行翻新整修或淘汰，2012 年全加州上路的大貨運車隊都已經現代化，這包括裝設濾煙器和觸媒轉化系統 [16]。促使柴油大卡車去污染化是先進國家環保主



流，環保署於是訂定「大型柴油車加裝濾煙器補助辦法」推廣民間車隊使用，補助 15 個縣市辦理垃圾車加裝濾煙器示範運行，預計至 2019 年將推動 3 萬 8,000 輛柴油車加裝濾煙器，雖然這麼大規模行動只降低 243 公噸 PM_{2.5} 排放量，但這些車輛都是民眾日常生活會密切接觸的機動車輛，且含有一級致癌物，對於民眾健康保護具有很大效益。

(七) 鍋爐管制

鍋爐是各事業單位產生動力和蒸氣的設施，環保署預計 2020 年 1 月 1 日起加嚴全臺灣 6,000 座中小型鍋爐排放標準。針對 1,000 座商用鍋爐，臺中市、桃園市、高雄市在 106 年至 107 年已經補助改用天然氣；對於 5,000 座工業鍋爐，經濟部藉由區域能源整合及天然氣管線布設，輔導中小型工廠降載 / 減少排放量。達成加嚴中小型鍋爐排放標準後，將可減少 175 公噸 PM_{2.5} 的排放。

(八) 電力設施管制

電力設施為大型燃燒排放源，近年來台電公司雖然有新廠的設置，但老舊機組依然不少，在採用最佳效率技術使單位發電空氣污染物排放量降到最低的總目標下，進行各項管制策略：(1) 老舊高污染機組除役，將現有燃煤電廠亞臨界機組(台中電廠、興達電廠)儘速汰換為超超臨界機組；(2) 天然氣機組增設去除氮氧化物設備，並逐一檢視各發電機組防制效率提升空間；(3) 在空氣品質不良期間，優先調度燃氣機組，減少燃煤機組排放量；(4) 新設機組發電效率增加，防制設備採用最佳可行控制技術，使單位發電量的空污排放降至最低。台電公司的管制策略達成後，PM_{2.5} 排放將減少 143 公噸。

以上介紹了排放減量較大的 8 項管制行動方案，其他方案雖然減量較小，但對於民眾健康的影響或促進國家現代化都有正面的意義，即使 14 項管制方案已經幾乎涵蓋污染管制所有實質面向，但環保署仍然歡迎其他有效而因地制宜策略，因此，曾統稱這些方案為 14+N 方案。

三、PM_{2.5} 管制效益

推動 14 項管制行動方案需要投入很多人力和經費，表 2 列出表 1 所擬推動各項空氣污染管制行動方案預計投入資金，這些資金分由空污基金、公務預算、民間、台電公司投入。空污基金投入最多的管制行動方案為「汰換一、二期柴油大貨車」，其次為「汰除二行程機車」；公務預算投入最多的管制行動方案為「提升公共運輸使用人次」，其次為「鍋爐管制」；民間資金投入最多的管制行動方案為「汰換一、二期柴油大貨車」，其次為「汰除二行程機車」；台電公司投入資金也不在少數。統合起來，投入資金最多的管制行動方案為「汰換一、二期柴油大貨車」，其次為「汰除二行程機車」，這兩項管制行動方案同時需要空污基金和民間資金的投入，且民間投入將為空污基金投入的 10 倍，如果順利達成將成為政府資金引導民間資金改善國家空氣品質的典範。其他如：公務預算投入的「提升公共運輸使用人次」，以及民間資金投入的「營建及堆置揚塵管制」和「鍋爐管制」都各彰顯政府施政及民間因營利需連帶降低空氣污染的責任。

環保署訂定各項管制行動方案固然都是出於改善空氣品質的需求，但從預計投入資



表 2 各項空氣污染管制行動方案預計投入資金 (累計至 2019 年) [8,9]

	管制行動方案	政府投入 (億)		民間投入 (億)	台電投入 (億)
		基金預算	公務預算		
固定污染源	電力設施管制	—	—	46.2	101.2
	鍋爐管制	4.9	20	90	—
	農業廢棄物燃燒排煙管制	2.3	—	1.1	—
	營建及堆置場揚塵管制	7.1	—	139.3	—
	餐飲油煙管制	2.4	—	7	—
	改變風俗習慣	2.1	—	—	—
	河川揚塵防制	3.1	2.7	—	—
移動污染源	汰換一、二期柴油大貨車	137.5	—	1,078 ~ 1,725	—
	三期柴油車加裝濾煙器	26	—	68.4	—
	汰除二行程機車	11.5	—	244 ~ 390	—
	港區運輸管制	—	1.1	0.8	—
	提升公共運輸使用人次	—	140.9	5.3	—
	提升軌道貨運運能	—	0.1	0.3	—
	推動電動蔬果運輸車	3.5	—	3.6	—
	合計	200.4	164.8	1,684 ~ 2,477	101.2

註：台電公司 2020 年後將再投資 221.6 億元

金和各污染物改善量，可進一步評估各項空氣污染物每單位排放減量預計投入資金，因而得以瞭解各管制行動方案和管制行動方案污染物減量的成本。表 3 列出各項空氣污染管制行動方案每單位排放減量預計投入資金，為了快速估算所需的成本，本文將每項管制行動方案預計由政府 and 民間投入資金加總起來，並假設各污染物的去除所需資金無連帶關係，顯然這並不符合實際狀況；由於各項管制行動方案的總目標是對 PM_{2.5} 減量，因此，其他污染物減量成本就只做為參考。明顯地，單純檢視 PM_{2.5} 減量以台電公司的「電力設施管制」成本最高，每噸 PM_{2.5} 減量需付出 1 億 308 萬元的成本，其次為「推動電動蔬果運輸車」需付出 1 億 143 萬元 / 每噸 PM_{2.5} 的成本，

接下來分別是「汰除二行程機車」的 5,591 ~ 8,786 萬元 / 每噸 PM_{2.5}，以及「鍋爐管制」的 6,566 萬元 / 每噸 PM_{2.5} 的成本。台電公司是寡佔事業，政府又是最大股東，長期受到民間及媒體關注，近年來對於污染排放改善不遺餘力，所投入資金雖是全民買單，但污染改善總是有利於提升環境品質。「推動電動蔬果運輸車」單位成本頗高，但對民眾及商家具有空氣品質和健康維護的利益。除了可估算的污染物減量外，如果「提升公共運輸使用人次」能大量增加，將可大幅度減少民眾單獨使用交通工具，對於空氣品質和民眾健康維護會有重大改善，雖然投入的 146 億元，無法估算其污染物減量，但其效益可能是無窮的。



表 3 各項空氣污染管制行動方案每單位排放減量預計投入資金 (累計至 2019 年) [8,9]

各分項污染物單位排放減量預計投入金額 (萬元 / 公噸)							
	管制行動方案	懸浮微粒 (PM ₁₀)	細懸浮微粒 (PM _{2.5})	硫氧化物 (SO _x)	氮氧化物 (NO _x)	揮發性有機物 (VOCs)	所有汙染物單位減量金額 (萬 / 噸)
固定污染源	電力設施管制	7,190	10,308	122	86	—	50
	鍋爐管制	1,350	6,566	232	391	164,143	129
	農業廢棄物燃燒排煙管制	66	73	—	—	—	35
	營建及堆置揚塵管制	436	2,179	—	—	—	363
	餐飲油煙管制	112	119	—	—	—	58
	改變風俗習慣	156	221	—	700	—	81
	河川揚塵防制	64	—	—	—	—	64
	合計	1,562 ~ 2,138	2,546 ~ 3,485	1,258 ~ 1,722	235 ~ 321	1,401 ~ 1,918	147 ~ 201
移動污染源	汰換一、二期柴油大貨車	1,979 ~ 3,032	2,253 ~ 3,452	—	171 ~ 262	1,603 ~ 2,456	135 ~ 206
	三期柴油車加裝濾煙器	3,822	3,885	—	—	—	1,927
	汰除二行程機車	4,538 ~ 7,131	5,591 ~ 8,786	#	#	330 ~ 519	283 ~ 445
	港區運輸管制	3,167	3,800	500	173	6,333	117
	提升公共運輸使用人次	—	—	—	—	—	—
	提升軌道貨運運能	—	—	—	—	—	—
	推動電動蔬果運輸車	10,143	10,143	—	2,088	7,889	1,246

* 各管制行動方案下各污染物單位削減量投入金額=(執行該管制行動方案投入總金額/各污染物削減量)

** 所有汙染物單位減量金額=(執行該管制行動方案投入總金額/執行該管制行動方案下各污染物削減量和)

數值不合理, 未列出

四、現階段檢討

改善 PM_{2.5} 空氣品質是民眾所熱切期待的, 上述空氣污染管制行動方案幾乎已經遍及各重要污染源, 也是環保署管制空氣污染多年來淬鍊出的成果, 但管制方向固然正確, 管制成效在時間及空間 (普遍度) 尺度仍然過於樂觀, 以空污基金和民間資金共同投入最

多和次多的管制行動方案「汰換一、二期柴油大貨車」和「汰除二行程機車」來說, 環保署的目標是至 2019 年要淘汰 8 萬輛一、二期柴油大貨車和 100 萬輛老舊二行程機車, 空污基金提供每輛柴油大貨車平均 17 萬元補助, 預估民間資金每輛柴油大貨車平均還需投入 135 ~ 216 萬元; 汰除二行程機車空污基金提供每輛機車平均 1,150 元補助, 若換購



電動機車，各地方政府可增加補助 2 ~ 3 萬元，一般民眾反映還是認為誘因不足。環保單位雖然有新空污法 40 條：劃設空氣品質維護區管制老舊污染車輛不得進入以及新空污法 36 條：加嚴出廠 10 年以上交通工具原適用排放標準等兩項防制措施可使用，但還沒宣告，已經掀起車主一陣陣的陳情和抗爭，主要訴求包括：老舊車輛不一定是污染車輛、政府不應只找弱勢機車族開刀、強迫車主換車，等於斬斷收入來源等。環保署李應元署長於 2018 年 8 月 3 日親自舉例說明換購一台 200 萬元的 11 噸新車，最高可獲得政府各機關合計 24 萬元補助，幾乎等於是無息貸款。此外，環保署承諾，加嚴排氣標準會經公聽會及配套措施完成後才會上路。這些陳抗及政府退讓顯示較激烈管制措施推動前，周延細膩配套方案必須事先經過推演。同時，民眾及媒體也需要自我省思：在改善空氣品質前提下，思考出可退讓接受方案。美國規定新大貨運卡車要裝設濾煙器和選擇性觸媒轉化系統以及加州 2010 年規定在港口和鐵道載貨老舊柴油卡車必須進行翻新整修或淘汰，這些管制措施美國人可以接受，我國地狹人稠為大家健康著想應該也可以接受。

大氣 PM_{2.5} 濃度來源眾多，除了人為和自然源外，還有異地傳輸、光化學以及夜間反應，進一步來說，即使前述產生源都一樣，仍然受到風場以及大氣溫、濕度變化影響；所以，即使各人為源刪減排放量，仍然需要以含括污染源排放量、氣象資料、大氣物理化學反應機制的三維空間網格模式進行模擬，以估算大氣 PM_{2.5} 濃度，無法直接以人為源排放刪減量來評估大氣 PM_{2.5} 濃度。如果使用簡單的法則或是簡化的模式，則只能做一個概估，不應視為可以預測大氣 PM_{2.5} 濃度，甚

至使用到三維空間網格模式進行模擬，結果的不準確度仍然需要審慎評估。以筆者大氣 PM_{2.5} 量測經驗來說，使用相同檢測方法在同址進行比對，濃度變化能在 1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以內都是很不錯的結果，因此，探討濃度變化在 1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以內的數值，都屬於不準確度範圍內，其意義並不大。基本上，在合理的不準確度範圍內，模式模擬可做為改變一個特定條件下的前、後數值比較。

五、未來挑戰

根據筆者從 2014 年以來對大氣 PM_{2.5} 化學分量測 [17,18,19]，發現國內每當 PM_{2.5} 日平均發生高濃度 ($\geq 35 \mu\text{g m}^{-3}$)，PM_{2.5} 化學成分的硝酸根離子濃度及占比都會比低濃度 ($<35 \mu\text{g m}^{-3}$) 高出許多，這顯示硝酸根離子前驅物 NO_x 排放源需要做較多的減量。在過去，由於排放源 NO_x 的減量較被忽視，未來這方面的減量在台電各火力發電廠擴增了 NO_x 處理量，以及新型柴油車和電動車的推動下，應該可降低大氣 NO_x 濃度。

工廠煙道微粒排放過去都是量測總懸浮微粒，為了檢測 PM_{2.5}，環保署公告了可過濾性 PM_{2.5}(NIEA A212.10B) 及可凝結性 PM_{2.5}(NIEA A214.70) 檢測方法，Yang 等人 [20] 檢測國內鋼鐵廠各項製程，發現可凝結性 PM_{2.5} 比可過濾性 PM_{2.5} 高出許多，這些可凝結性 PM_{2.5} 含有高占比硫酸根離子，與一般文獻認定硫酸根離子都是二次反應物不同，顯示工廠煙道微粒在去除以前，必須考慮先對氣流降溫或使酸性氣體溶入濕式滌除設備，這推展出空氣污染防治技術新的需求，當然對於 PM_{2.5} 空氣品質改善的掌握度又更提升了。



霧霾事件造成大氣能見度降低，大氣能見度主要受到 PM_{2.5} 散光係數及氣象因子的影響 [21,22]，PM_{2.5} 散光係數則受到 PM_{2.5} 硫酸根離子和硝酸根離子濃度的影響 [23]，這兩種化學成分都屬於潮解鹽類，遇到高相對濕度環境會吸濕氣變成水珠 [24,25,26]，使大氣能見度受到更大的衰減，因此，即使相同的 PM_{2.5} 濃度，當大氣相對濕度較高時，大氣能見度會比低相對濕度環境變差很多 [27]，所以，即使大氣 PM_{2.5} 濃度已有改善，當環境相對濕度高時，大氣能見度仍然不會好，民眾對空氣品質自然不會滿意，這雖然是事實，但環保單位如何宣導和讓民眾瞭解也是一個重要課題。

環保署擬定目標在 2019 年達成 PM_{2.5} 年平均濃度為 18 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，但世界衛生組織已經將 PM_{2.5} 年平均濃度指導值訂為 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，24 小時平均濃度指導值訂為 25 $\mu\text{g m}^{-3}$ [28]，我國顯然還需要繼續做更大的努力來改善大氣 PM_{2.5} 濃度。

六、結論

國人對於 PM_{2.5} 有甚高的關注，雖然是因為微粒的健康風險，但頻繁發生的霧霾現象才是引起全民重視的催化劑。最近 12 年來，PM_{2.5} 空氣品質已持續改善中，環保署為了在 2019 年達成 PM_{2.5} 年平均濃度為 18 $\mu\text{g m}^{-3}$ 的目標，根據過去管制污染源經驗，淬鍊出針對固定和移動污染源的 14 項管制行動方案，並預計從空污基金和公務預算投注 365 億元，同時盼望吸引民間資金投入 1,684 ~ 2,477 億元，經費的龐大可說是史無前例，若可達成目標將展現出政府和民間改善 PM_{2.5} 的決心與毅力，當然，台電公司也展現誠意投注 101 億元配合改善發電及污染防制技術。然而，

管制行動方案不是提出就可坐等達成，以投入資金最多、最具指標性的「汰換一、二期柴油大貨車」和「汰除二行程機車」行動方案為例，空污新法一經立法院修訂通過，車主的陳情抗爭已經如影隨形排山倒海而來，環保署只好強調說明政府高額補助款，並承諾開完公聽會及配套措施完成後才會加嚴標準，顯示若無事先推演訂出周延細膩配套方案，將再陷入窘境。當今，環保署雖然暫時退讓，但民眾不能只單方面要求政府給予好的空氣品質，大家也需要自我省思：因為有了先進的法規標準，才可驅動新科技，有了新科技又可帶動更嚴謹的管制標準，這樣才會走向正向循環，我國 PM_{2.5} 空氣品質才可持續改善，因此，在改善空氣品質前提下，前述車主當自問可退讓接受的方案為何？未來 PM_{2.5} 空氣品質的持續改善需朝向降低污染源 NO_x 排放及去除工廠煙道可凝結性 PM_{2.5} 方面努力，另一方面，民眾宣導及慎思也需要加把勁。◆

參考文獻

1. Dockery, D.W., Pope, C.A. III, Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. Jr, Speizer, F.E., "An association between air pollution and mortality in six US cities," *The New England Journal of Medicine* 329, 1753-1759, 1993.
2. Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F.E., Dockery, D.W., "Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities study," *The American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 173, 667-672, 2006.
3. Lei, Y.-C., Chan, C.-C., Wang, P.-Y., Lee, C.-T., Cheng, T.-J., "Effects of Asian dust event particles on inflammation markers in peripheral blood and bronchoalveolar lavage in pulmonary hypertensive rats," *Environmental Research* 95, 71-76, 2004.
4. Chuang, K.-J., Chan, C.-C., Su, T.-C., Lee, C.-T., Tang, C.-S., "The Effect of urban air pollution on inflammation, oxidative stress, coagulation, and autonomic dysfunction in young adults," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 176, 370-376, 2007.



5. Chen, B.-Y., Chao, H. J., Chan, C.-C., Lee, C.-T., Wu, H.P., Cheng, T.-J., Guo, Y.-L., "Effects of fine particulates and fungal spores on lung function in schoolchildren," *Pediatrics*, 127, e690-698, 2011.
6. Sun, Y., Jiang, Q., Wang, Z., Fu, P., Li, J., Yang, T., Yin, Y., "Investigation of the sources and evolution processes of severe haze pollution in Beijing in January 2013," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119, 4380-4398, 2014.
7. 李崇德、孫紹恩、張育仁、陳思穎，「台灣北、中、南空品區細懸浮微粒 (PM_{2.5}) 及二氧化硫 (SO₂)、二氧化氮 (NO₂)、非甲烷碳氫化合物 (NMHC) 與臭氧 (O₃) 觀測數值時間序列分析」，106 年度「科技部/環保署空污防制學術合作計畫」期末報告 (MOST 106-EPA-F-005-005)，2018 年 9 月 6 日。
8. 行政院環保署，「空氣污染防制策略」，行政院環保署，2017 年。
9. 蔡國聖，「固定污染源種類及空污防制相關權責及整合執行」，行政院環保署空氣品質暨噪音管制處，2018 年 3 月 2 日。
10. Gross, D.S., Galli, M.E., Silva, P.J., Wood, S.H., Liu, D.-Y., Prather, K.A., "Single particle characterization of automobile and diesel truck emissions in the Caldecott Tunnel," *Aerosol Science and Technology* 32, 152-163, 2000.
11. Jones, K.H., "Diesel truck emissions, an unrecognized source of PCDD/PCDF exposure in the United States," *Risk Analysis* 13, 245-252, 1993.
12. Miguel, A.H., Kirchstetter, T.W., Harley, R.A., Hering, S.V., "On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel Vehicles," *Environmental Science and Technology* 32, 450-455, 1998.
13. Health Canada, "Human Health Risk Assessment for Diesel Exhaust," Fuels Assessment Section, Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada. Cat: H129-60/2016E-pdf, March 2016.
14. International Agency for Cancer Research, World Health Organization, United Nation, Press Release 2012, Available at: http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2012/pdfs/pr213_E.pdf, 2012.
15. Andreae, M.O., Metlet, P., "Emission of trace gases and aerosols from biomass burning," *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 955-966, 2001.
16. Preble, C.V., Cados, T.E., Harley, R.A., Kirchstetter, T.W., "In-use performance and durability of particle filters on heavy-duty Diesel trucks," *Environmental Science and Technology* 52, On-line publication, 2018.
17. 李崇德、周崇光、張士昱、蕭大智。"細懸浮微粒 (PM_{2.5}) 化學成分監測計畫"，期末報告 (定稿本)，環保署 EPA-103-FA11-03-A119，台北，2015 年 3 月。
18. 李崇德、周崇光、張士昱、蕭大智。"104-105 年細懸浮微粒 (PM_{2.5}) 化學成分監測計畫"，期末報告 (定稿本)，環保署 EPA-104-L102-02-103，台北，2016 年 5 月。
19. 李崇德、周崇光、張士昱、蕭大智、許文昌。"細懸浮微粒 (PM_{2.5}) 化學成分監測及分析計畫"，期末報告 (定稿本)，環保署 EPA-105-U102-03-A284，台北，2017 年 12 月。
20. Yang, H.-H., Lee, K.-T., Hsieh, Y.-S., Luo, S.-W., Huang, R.-J., "Emission characteristics and chemical composition of both filterable and condensable fine particulate from steel plants," *Aerosol and Air Quality Research* 15, 1672-1680, 2015.
21. Lee, C.-T., Shen, C.-T., "Visibility and its estimating model in Taipei metropolitan area," *Proceedings of the National Science Council*, 19, 506-513, 1995.
22. Lee, C.-T., Hsu, W.-C., "Effects of local pollution and environmental humidity on aerosol size spectra and light-scattering coefficients in southern Taiwan," *Environment International*, 25, 433-441, 1999.
23. Lee, C.-T., Cheng, J.-P., "The effects of aerosol species and meteorological factors on visibility in Taipei metropolitan area," *Journal of Chinese Institute Engineering*, 6, 21-30, 1996.
24. Lee, C.-T., Hsu, W.-C., "The measurement of water mass associated with collected hygroscopic particles," *Journal of Aerosol Science*, 31, 189-197, 2000.
25. Chang, S.-Y., Lee, C.-T., "Applying GC-TCD to investigate the hygroscopic characteristics of mixed aerosols," *Atmospheric Environment*, 36, 1521-1530, 2002.
26. Lee, C.-T., Chang, S.-Y., "A GC-TCD method for measuring the liquid water mass of collected aerosols," *Atmospheric Environment*, 36, 1883-1894, 2002.
27. Zhang, Q., Quan, J., Tie, X., Xia, L., Liu, Q., Gao, Y., Zhao, D., "Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China," *Science of The Total Environment*, 502, 578-584, 2015.
28. World Health Organization, "Ambient (outdoor) air quality and health" in News/Fact sheets/Detail, 02 May 2018.