

細懸浮微粒管制策略

謝燕儒

行政院環保署空氣品質保護及噪音管制處處長

黃偉鳴

行政院環保署空氣品質保護及噪音管制處科長

郭孟芸

行政院環保署空氣品質保護及噪音管制處技正

一、前言

懸浮微粒(particulate matter, PM)是一種懸浮在大氣環境中混合固態及液態的粒狀污染物，這污染物的組成分複雜且其粒徑大小涵蓋範圍廣泛；目前已明確知道空氣中懸浮微粒會對人體健康造成危害，粒徑愈小，經人體吸入後可停留於肺泡區，能直接或間接引起呼吸道疾病、心血管疾病等傷害，特別是對氣喘、呼吸道疾病、心肺功能疾病患者、老人及小孩等敏感族群造成較大的健康影響。

基於懸浮微粒對人體健康影響的重要性，各主要國家在其空氣品質標準中均會納入懸浮微粒項目，從早期的總懸浮微粒(TSP)、懸浮微粒(PM₁₀)，到目前各界最關注的細懸浮微粒(PM_{2.5})，標準納管的項目正逐漸從大顆粒調整為粒徑小的微粒，且濃度標準也逐漸加嚴。這趨勢代表民眾的健康可獲得更多保障，其背面意義也正是環境與健康評估科技的進步。

二、何謂細懸浮微粒

美國環保署將 PM₁₀ 稱為粗懸浮微粒(coarse particle)，PM_{2.5} 則稱為細懸浮微粒(fine particle)，就是以粒徑大小來區分。PM_{2.5} 是指空氣中氣動粒徑(aerodynamic diameter)等於或小於 2.5 微米(μm)的粒狀污染物，因其粒徑小(約為頭髮粗細的三十分之一)容易經由呼吸作用深入體肺部。

細懸浮微粒可分為原生性(primary)及衍生性(secondary)；原生性細懸浮微粒是直接從自然與人為活動所排放，未經化學反應生成，例如天然的海鹽飛沫、營建工地粉塵、車行揚塵及工廠直接排放的懸浮微粒等；而衍生性細懸浮微粒是自



然與人為活動排放到大氣環境中的 SO_2 、 NO_x 、 VOCs 與 NH_3 等氣態前驅物，在大氣中經過複雜化學反應形成，其反應過程包括氣相光化學反應、液相反應與氣固相反應與不同反應物間之競合作用等，因而細懸浮微粒濃度與前驅物排放量之間有顯著的非線性關係。細懸浮微粒主要成分有水分、硫酸鹽、硝酸鹽、銨鹽、元素碳、有機碳等。由於細懸浮微粒及其前驅物的排放源眾多，生成機制又極為複雜，也使得細懸浮微粒的管制工作相當困難。

美國環保署 2005¹ 年進行細懸浮微粒空氣品質標準提案初步評估時，就曾提出細懸浮微粒不像臭氧污染一般有固定污染高峰季節(臭氧污染多在夏季)，細懸浮微粒會因為各地因素(如：溫度、濕度、風速、雲量等)在全年不同季節出現高值，例如：西雅圖細懸浮微粒污染高峰值係在冬季，其微粒組成多來自木材及廢棄物燃燒；芝加哥高值則發生在 2 月至 4 月間。

三、細懸浮微粒空氣品質標準訂定

面對細懸浮微粒的管制工作，環保署主要是從訂定空氣品質標準著手，這種作法與主要國家相同，並且多以世界衛生組織(WHO)所發表的報告為參考依據。

2006 年 WHO 所發表報告² 建議，各國訂定空氣品質標準時，應考量當地空氣品質對於人體健康風險、切實可行的技術、經濟考慮，以及在政治、社會等相關因素間求取平衡，亦即須謹慎考慮當地的情況。WHO 所提出 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準則值(Air Quality Guideline, AQG)建議短期暴露(24 小時值)及長期暴露(年平均)兩類，並可採階段方式達成(如表 1)。

國際間目前尚無任一國家以世界衛生組織(WHO)提出之 AQG 作為國家空氣品質標準，美國是最早將細懸浮微粒納入空氣品質標準的國家，該國於 1997 年依據前 3 年監測結果，提出細懸浮微粒空氣標準年平均值 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，24 小時值 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，惟因訴訟問題未立即實施。2006 年強化健康風險考量，加嚴細懸浮微粒 24 小時值為 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均標準值仍維持 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。日本於 2009 年增訂細懸浮微粒空氣品質標準，濃度限值均與美國相同。歐盟於 2008 年採用 WHO 第二階段年平均建議值 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 為標準，惟無 24 小時值的標準值。中國大陸在 2012 年 2 月 29 日訂定發布之 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準在二級區(適用於居民區、商業交通居民混合區、文化區、工業區和農村地區)與 WHO 第一階段過渡期值一致，為 24 小時值 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均值 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在一級區(適用於自然保護區、風景

名勝區及其它需要特殊保護的地區)為 24 小時值 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均值 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，並自 2016 年實施。新加坡尚未訂定 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準，但訂定於 2020 年達成 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均價值達成 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之目標。

表 1 世界衛生組織 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質準則值及過渡時期目標

	濃度值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	濃度選擇依據
年平均值		
第一段過渡期目標(IT-1)	35	長期暴露於會提高15%死亡風險
第二段過渡期目標(IT-2)	25	比較起第一段過渡期會降低6% (2-11%)死亡風險
第三段過渡期目標(IT-3)	15	比較起第二段過渡期會降低6% (2-11%)死亡風險
空氣品質指導原則(AQG)	10	相較於此濃度，濃度較高者，全死因、 心血管與肺癌死亡率會增加
24 小時值		
第一段過渡期目標(IT-1)	75	增加5%短期暴露死亡率
第二段過渡期目標(IT-2)	50	增加2.5%短期暴露死亡率
第三段過渡期目標(IT-3)	37.5	增加1.2%短期暴露死亡率
空氣品質指導原則(AQG)	25	根據24小時與年平均濃度關係訂定

環保署相當重視這項新興且重要的空氣污染物，自 2005 年起先以自動連續監測方式，監測空氣中細懸浮微粒濃度，並自 2007 年 7 月起就開始運用該些自動監測數據進行細懸浮微粒空氣品質指標預報。2009 年 9 月起，更推動細懸浮微粒管制上位計畫，從空氣品質標準值訂定方法論、監測及檢測方法建置、微粒健康影響評估、境外貢獻源比例分析及管制策略推動等面向，建立完整配套策略。經過為期 3 年進行 $\text{PM}_{2.5}$ 對人體健康影響評估研究，專家學者建議我國訂定 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準應以健康影響為優先考量，因此在評估我國空氣品質現況、確實可行技術、社會及經濟發展等相關因素後，環保署訂定我國 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準 24 小時值為 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均值為 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，此標準值與美國 2006 年及日本 2009 年發布之 $\text{PM}_{2.5}$ 空氣品質標準值一致，為目前國際間納入法規規範中較為嚴格的標準，該標準並已於 2012 年 5 月 14 日發布實施。環保署黃金 10 年行動計畫並訂定 2016 年全國 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均濃度達 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，2020 年達 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下之目標，從標準值及改善期程之訂定，均已充分展現改善空氣品質決心。



四、細懸浮微粒主要減量策略

細懸浮微粒的管制可從原生性污染源及 SO_2 、 NO_x 、 VOCs 與 NH_3 等前驅物之管制著手。以污染源類別區分管制方式，固定污染源之管制措施包括訂定固定污染源空氣污染物排放標準、固定污染源最佳可行控制技術、燃料含硫量管制、徵收固定污染源空氣污染防制費及逸散污染源管制等；移動污染源部分則是使用中車輛與新車排放及管制制度、發展及鼓勵使用低污染/零排放車輛、油品管制及徵收空氣污染防制費等。因應各地方的污染物排放情形不同，應該採取的減量策略也不相同。

美國環保署 2007 年提出 $\text{PM}_{2.5}$ 與其前驅物減量政策之思考重點，原生性 $\text{PM}_{2.5}$ ，例如有機碳、元素碳及金屬等應予以減量， SO_2 、 NO_x 、 VOCs 與 NH_3 等前驅物的管制則需掌握其對 $\text{PM}_{2.5}$ 的貢獻度。從美國經驗來看，該國東岸因工廠密度高且大型電廠林立，管制對象為電廠、石化廠等重工業，主要減量為硫氧化物；西岸人口密集，車輛活動頻繁及港口運輸活絡，管制對象以柴油車、飛機、大型船隻及長途火車等移動源為主，減量考量以氮氧化物為主。在固定源上改善污染控制設備效能，加強氮氧化物燃燒控制等；在移動源上則以訂定燃料含硫量及加嚴排放標準為主；歐盟也是以固定源及道路運輸優先，大型電廠、焚化爐承諾 10~15 年達成減量目標；車輛與非道路車輛分別於 2011 及 2008 年達成含硫量 $<10\text{ppm}$ 目標；同時配合減緩氣候變遷政策的實施，推動交通管理、車輛油品、航空器、船舶、路上交通工具等管制策略，減少 $\text{PM}_{2.5}$ 前趨物產生。跟我國鄰近的新加坡認為該國一半的 $\text{PM}_{2.5}$ 來源為柴油車，所以將引進 Euro IV 柴油車排放標準（我國於 2005 年 9 月已實施）來減少移動源污染。

在訂定細懸浮微粒空氣品質標準前，環保署早已著手推動相關管制工作，例如粒狀物的管制亦有助於粒徑小的 $\text{PM}_{2.5}$ 的改善， SO_2 、 NO_x 及 VOCs 等前驅物亦有相當完整之管制措施，目前管制情形及未來作法說明如下：

(一)粒狀污染物

2003 年訂定「營建工程空氣污染防制設施管理辦法」及 2009 年訂定「固定污染源逸散性粒狀物空氣污染防制設施管理辦法」，針對可能引起揚塵之營建工程、港區、砂石場、一般道路、裸露地及煉鋼廠等逸散性污染源進行管制，以提升空氣品質的改善成效。另外，亦徵收營建工程空氣污染防制費，提高營建業主採行空氣污染防制設施的經濟誘因，減少粒狀物排放量。在柴油車

管制方面，自 1993 年 7 月 1 日起實施第二期排放管制標準，將重型柴油車之 PM(0.7g/bhp-hr)納入管制。1999 年 7 月 1 日實施第三期排放標準，加嚴重型柴油車各項污染物排放管限制值，PM 由二期標準的 0.7g/bhp-hr 加嚴為 0.1g/bhp-hr，加嚴幅度 85%；於 2006 年 10 月 1 日施行第四期排放標準，PM 管限制值維持不變，自四期標準施行後，市售柴油車輛開始搭配濾煙器等污染防制設備。為持續與國際管制趨勢接軌，環保署已公告自 2012 年 1 月 1 日起施行柴油車第五期排放標準，該標準係參考歐盟 EURO 5 及美國聯邦 2010 年管制規範訂定，PM 由四期標準的 0.1 g/ bhp-hr 加嚴為 0.01g/ bhp-hr，加嚴幅度 90%。

(二) 硫氧化物

訂定「固定污染源空氣污染物排放標準」、「廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準」、「電力設施空氣污染物排放標準」、「鋼鐵業燒結工場空氣污染物排放標準」、「鉛二次冶煉廠空氣污染物排放標準」等 SO_x 排放標準，並督導高雄市、台中市(原台中縣)、桃園縣及新北市等檢討及加嚴「電力設施空氣污染物排放標準；另亦公告「含硫量超過百分之〇·五之液體燃料，供固定污染源使用者，為易致空氣污染之物質」及「公私場所固定污染源引擎使用之液體燃料超過限值或種類者，為易致空氣污染之物質」規定。且對排放硫氧化物之固定污染源徵收空氣污染防制費。在移動源部分亦管制油品之含硫量，2009 年 7 月 29 日發布「車用汽柴油成分管制標準」於 2011 年 7 月 1 日及 2012 年 1 月 1 日起陸續降低柴油及汽油硫含量至 10ppm，與世界先進國家同步。

(三) 氮氧化物

訂定「固定污染源空氣污染物排放標準」、「廢棄物焚化爐空氣污染物排放標準」、「電力設施空氣污染物排放標準」、「鋼鐵業燒結工場空氣污染物排放標準」、「玻璃業氮氧化物排放標準」等氮氧化物排放標準。另亦針對排放氮氧化物之固定污染源徵收空氣污染防制費用，促使工廠業者投資裝設污染防制設備，減少污染排放。另柴油車廢氣排放標準，初期僅管制黑煙排放；後續並將重型柴油車之 NO_x 納入管制且與國際管制趨勢同步，逐期加嚴排放標準。我國於加入世界貿易組織(WTO)後，開放柴油小客車進口，並參考美國聯邦 2004 年標準及歐盟 EURO 4 標準，於 2006 年 10 月 1 日施行第四期



排放標準，NO_x 則由三期標準的 5.0 g/bhp-hr 加嚴為 2.4 g/bhp-hr，加嚴幅度 52%。自四期標準施行後，市售柴油車輛開始搭配濾煙器等污染防制設備。為持續與國際管制趨勢接軌，環保署已公告自 2012 年 1 月 1 日起施行柴油車第五期排放標準，該標準係參考歐盟 EURO 5 及美國聯邦 2010 年管制規範訂定，NO_x 則由四期標準的 2.4g/bhp-hr 加嚴為 0.2 g/bhp-hr，加嚴幅度 91%。第五期標準實施後，預期所有柴油車輛均須搭載濾煙器、尿素還原觸媒(SCR)及車上診斷系統(OBD)等污染防制設備始能符合嚴格之管制標準，其 NO_x 排放量將大幅下降。

(四)揮發性有機物

訂定「汽車製造業表面塗裝作業空氣污染物排放標準」、「聚氨基甲酸酯合成皮業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」、「乾洗作業空氣污染防制設施管制標準」、「半導體製造業空氣污染管制及排放標準」、「揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」、「光電材料及元件製造業空氣污染管制及排放標準」及「膠帶製造業揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」等固定污染源相關揮發性有機物管制法規，並陸續修正加嚴排放標準。2011 年 2 月 1 日再次修正發布「揮發性有機物空氣污染管制及排放標準」，加嚴對於石化製程設備元件及廢氣燃燒塔之管制。此外，揮發性有機物的管制亦將經濟誘因的管制思維導入，於 2007 年 1 月 1 日開徵揮發性有機物空氣污染防制費。在移動源的管制方面，則逐期加嚴汽車及柴油車排放標準，2012 年 10 月 1 日起實施之汽油汽車五期排放標準，與歐盟 EURO 5 標準同步。2012 年 1 月 1 日起實施的柴油車五期排放標準則將重型柴油車 NMHC 管制加嚴至 0.14 g/bhp-hr，較四期標準加嚴達 30%。

依國內空氣品質監測站空氣品質監測數據顯示，2006 年至 2011 年期間我國空氣中 SO₂、NO_x 與 PM_{2.5} 濃度平均年改善幅度分別約為 4%、3%及 2%，無論是前驅物的管制或 PM_{2.5} 的改善均已展現初步成效。更進一步分析台灣細懸浮微粒成因及來源的研究結果指出，我國 PM_{2.5} 約有 30%來自於境外傳輸，而來自於國內本身排放貢獻的部分，在排除空氣中水份後，原生性及衍生性 PM_{2.5} 的來源比例分別約為 50%，顯示原生性及衍生性來源的管制與境外傳輸影響的掌握與改善，均為推動 PM_{2.5} 空氣品質改善的工作重點。另外，研究結果亦顯示，原生性 PM_{2.5} 主要來源為裸露地土壤揚塵、固定污染排放管道中的元素碳、有機碳、重

金屬及車輛排放的粒狀物等，而衍生性 $PM_{2.5}$ 主要成分為硫酸鹽、硝酸鹽與氨鹽，硫酸鹽之貢獻源主要來自各空品區之固定污染源。硝酸鹽則主要來自於移動污染源源的貢獻。

配合細懸浮微粒空氣品質標準實施，環保署已依研究結果進一步加嚴各項管制作為，減少細懸浮微粒及其前驅物排放量，2012 年 6 月 14 日修正發布鋼鐵業加嚴排放標準，即加嚴粒狀污染物、硫氧化物及氮氧化物排放標準。2013 年 7 月 5 日修正公告營建工程空氣污染防制費收費費率，修正疏濬工程之費率及費基，促使業主設置或採行空氣污染防制設施，減少河川疏濬過程(含砂石車運輸土石作業)逸散的原生性粒狀物。另外，環保署近幾年積極推動電動車及電池交換營運系統，加速電動車普及化，並規劃推動電動公車取代柴油公車，改善機動車輛空氣污染，可直接減少民眾暴露於柴油公車所排放的 $PM_{2.5}$ 及其他廢氣，已注入歐美最新的 $PM_{2.5}$ 管制思維，即從減少民眾暴露風險的角度出發，採行有效的空氣品質改善策略。除了推動國內污染源改善，有效解決境外傳輸影響，也是改善國內空氣品質必須處理的環節，環保署近期積極推動兩岸環保交流，空氣污染管制合作是一種重要的主題，我國海峽交流基金會及中國大陸海峽兩岸關係協會已決議將「兩岸空氣品質監測合作」納入下次交流議題，環保署已逐步將合作範圍延伸至各項管制措施的交流與合作，促使對岸空氣污染物排放減量，我國空氣品質亦獲得改善。

五、結語

由於空氣具有傳輸性質， $PM_{2.5}$ 的管制不僅是地方性而且是區域性的議題。 $PM_{2.5}$ 及 SO_2 、 NO_x 、 $VOCs$ 與 NH_3 等前驅物排放減量工作，與能源使用、產業政策及交通運輸政策等均極為相關，需要政府各相關部會，從中央到地方配合，同時有民間力量的投入與民眾的共同參與推動，才能達成空氣品質改善目標。

良好的空氣品質是民眾共同的期待，實施 $PM_{2.5}$ 空氣品質標準將會把現有空氣品質管理工作帶向新的紀元，同時提供民眾更健康、更清新的好空氣。



六、參考文獻

1. USEPA, 2005. EPA White Paper: Preliminary analyses of proposed PM2.5 NAAQS alternatives. Office of Air Quality Planning and Standards. Dec. 12.
2. WHO, 2006. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global update 2005: summary of risk assessment.
3. Ministry of the Environment and Water Resources, 2006. The Singapore Green Plan 2012. 2006 edition.