

通風空間中不同粒徑顆粒物質動態傳遞 與人體暴露之研究

國立台灣大學生物環境系統工程學系教授 廖中明

一、前言

民國 82 年 7 月起，行政院環保屬於全台灣省設立 66 個空氣品質監測站以建立台灣地區空氣品質監測網，各監測站所紀錄資料包括污染物時變濃度及基本氣象資料。依環保署之定義，顆粒物質(Particulate Matter, PM)係指由燃料燃燒及工業生產過程所產生之微粒子通稱，且為近年來台灣地區主要空氣污染物之一。環保署 2001 年公布之空氣污染指標(Pollution Standard Index, PSI)指數中，台灣地區空氣品質惡化主因為 PM 及臭氧。許多環境流行病學研究顯示，空氣污染與人體健康之間存在顯著的相關性，其中又以 PM₁₀(氣動直徑小於或等於 10 μm 之 PM)最受重視，PM₁₀ 將造成氣喘及慢性阻塞性肺部疾病症狀惡化，且不僅與呼吸道症狀惡化及死亡率增加有關，同時也與心臟血管死亡之增加有關。

由於一般人每天約有 70 – 90% 時間處於室內，因此對於瞭解 PM 由室外引導至室內，再經由呼吸作用進入肺部而引發之健康危害，為目前相當重要之研究課題。世界各國在 70 年代以後開始針對空氣污染管制而努力，美國環保署於 1977 年頒佈空氣清靜法(Clean Air Act)，世界衛生組織則於 1987 年發表了歐洲空氣品質標準指引。儘管近年來各國不斷努力降低空氣污染物濃度，以改善空氣品質，然而在目前空氣品質下，仍有研究陸續發表指出空氣污染物與健康之相關性。

為考量省能、經濟之優點，台灣地區常以水牆降溫及自然通風來達到室內除熱及溫控目的(Liao and Chiu, 2002)。對於以自然通風方式移除室內污染物亦曾有不少學者研究之，影響自然通風效應之因素為建築物配置、方位及通風開口之控制以達適切通風率及建築物內流場分佈等。前人研究定義之自然通風開口包括(i)窗戶、門、老虎窗及天窗、(ii)太子樓通風、(iii)煙囪及(iv)特殊設計之出入口等。台灣地區最常使用之自然通風開口為窗戶、門及屋頂通風。通風量計算式中，除風速及開口面積外尚考慮開口之有效性，影響開口有效性之因子為風速、開口周圍之粗糙度、風入射角及屋頂斜率等(Yu et al., 2002)。

通風空間中氣流常因通風系統配置、溫度差、壓力差及速度場作用而形成非完全混合之異質現象(Liao and Liang, 2003)，進而造成 PM 運動之不規則，影響 PM 濃度之機制有風場、PM 排放源、紊流膠結、重力沈降、紊流擴散沈澱、相態之改變、熱泳、吸濕作用及光泳等，但不同之研究重點及客觀條件常使研究者無法全盤考慮所有機制而必須權宜的忽略某些因素。粒徑較小 PM 之沈澱作用受紊流擴散沈澱(因氣體分子不規則撞擊所產生之移轉運動而沈澱於接觸表面)控制，PM 較大時則受紊流膠結(二或二者以上 PM 因素流碰撞形成一更大 PM 之過

程)及重力沈降控制。其中紊流擴散沈澱、重力沈降及通風之移除效應較紊流膠結效應顯著(Liao et al., 2000; 2001)。為瞭解 PM 粒徑分佈特性與紊流擴散沈澱、重力沈降、通風作用及紊流膠結對 PM 傳遞及移除之效應，可以數理模式配合實驗室中環境氣候箱(chamber)試驗驗證之。經由實驗結果可瞭解 PM 於不同通風系統、通風量及 PM 產生量所形成之濃度差異，以此為通風空間中室內移除或控制 PM 濃度之基礎(Liao et al., 2002)。

由吸入 PM 引發之生理反應主要視其沈積在呼吸道之位置及組織內之毒害影響而定。不同粒徑 PM 會分別沈積於鼻腔、口腔、上呼吸道、氣管、支氣管乃至於細微氣管及末梢肺泡中而引起差異極大之生理及病理反應，因此在探討吸入 PM 之暴露行為時，應考慮 PM 之粒徑變異，同時對於人體呼吸道(Human respiratory tract, HRT)之生理特性亦應一併考量以推求長時間暴露後之吸入累積劑量。人體呼吸系統可概分為兩大區域，即胸腔外區(Extrathoracic)及胸腔區(thoracic)，由於人們可以口腔或鼻腔進行呼吸，胸腔外區亦可區分為鼻腔區及口腔咽喉區。胸腔區則根據呼吸道幾何型態、構造及功能之不同而分成 3 主要區塊，即肺部主氣流流通之氣管/支氣管區、細微支氣管區及進行氣體交換之末梢肺泡區。考慮 PM 因呼吸作用進入人體後，於呼吸道中之各傳遞機制—紊流擴散沈澱、重力沈降、慣性衝擊及接觸附著損失等，可推估得呼吸道各區域中 PM 濃度、粒徑分佈特性、沈澱分量及累積劑量(Liao et al., 2003)。

二、研究結果

前述範疇之近五年相關研究成果將於此做一概要說明，依各研究重點分為：(1)量測通風豬舍中 PM 特性及推求 PM 態臭氣吸入劑量(Liao et al., 2000; 2001)；(2)以風洞試驗中建物縮尺模型推求自然通風建築物之開口有效性(Yu et al., 2002)；(3)以環境氣候箱實驗探討不同操作條件下，通風空間中 PM 移除動態行為(Liao et al., 2002)；(4)自然通風空間中 PM 質量室內/室外比(Indoor/Outdoor ratio, I/O ratio)(Liao et al., 2003)及(5)HRT 各區塊中 PM 濃度、粒徑分佈特性、沈澱分量及累積劑量之探討(Liao et al., 2003)。

(1)量測通風豬舍中 PM 特性及推求 PM 態臭氣吸入劑量

實驗於一成豬舍中進行，目的為獲得餵食及不餵食時之 PM 粒徑分佈及質量濃度。結果顯示餵食及不餵食時 PM 粒徑分佈並無明顯不同，對數常態分佈(Log-normal distribution)下，其幾何平均粒徑(Geometric mean diameter, GMD)及幾何標準偏差(Geometric standard deviation, GSD)分別為 $2.14 \pm 0.03 \mu\text{m}$ 及 1.73 ± 0.02 ；餵食及不餵食時之 PM 質量分別為 20.47 ± 8.23 及 $2.32 \pm 0.45 \text{ mg m}^{-3}$ 。圖 1 為 PM 粒徑分佈圖及電子顯微鏡放大 400 倍之 PM 攝像圖。PM 態甲苯(吸附於 PM 上之甲苯氣體)之吸入劑量隨暴露於豬舍中時間增長而增加，粒徑 1.85 及 $2.75 \mu\text{m}$ 之 PM 態甲苯濃度分別為 4×10^{-2} 及 $13.5 \times 10^{-2} \mu\text{g kg}^{-1}$ ，而粒徑 0.95 及 3.65

μm PM 則分別為 2×10^{-2} 及 $6.5 \times 10^{-2} \mu\text{g kg}^{-1}$ 。

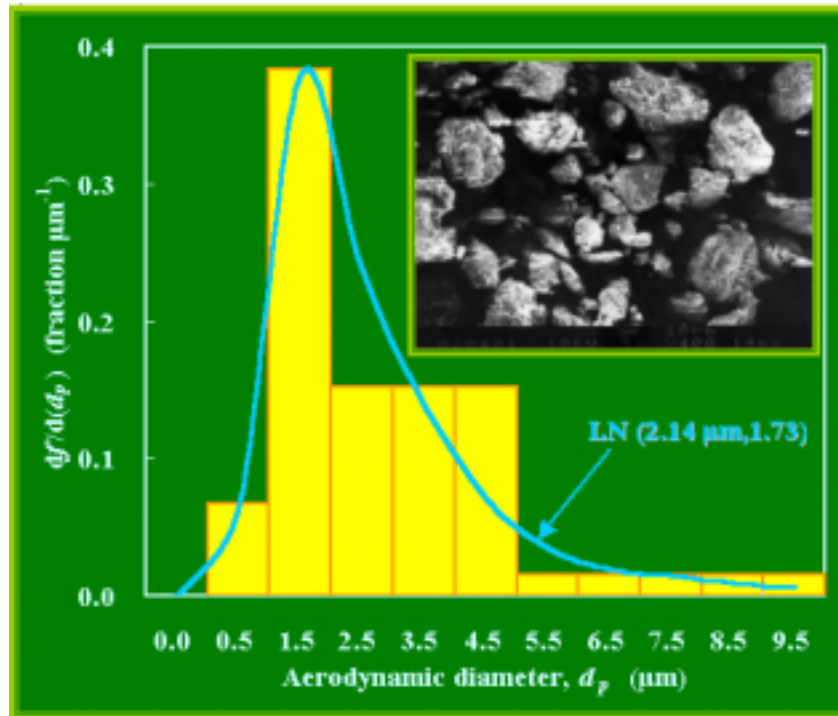


圖 1. PM 粒徑分佈圖及電子顯微鏡放大 400 倍之攝像。顯微鏡放大圖可知 PM 為不規則粒狀物，其中，量測之不同粒徑 PM 機率頻率之最佳擬合分佈式為對數常態分佈，LN(2.14 μm ,1.73)代表對數常態分佈下，幾何平均粒徑為 2.14 μm 、幾何標準偏差為 1.73。

本研究結果發現，增加通風率及縮短餵食時段可有效減少吸入之 PM 態臭氣。較大粒徑之 PM 具有較大之沈澱去除率，故增大 PM 粒徑可減少 PM 態臭氣之吸入劑量。

(2)以風洞試驗中建物縮尺模型推求自然通風建築物之開口有效性

本研究依變形尺度藉由巴金漢理論(Buckingham Pi theorem)決定無因次參數間之關係，以預測自然通風建築物之開口有效性。選用之無因次變數為雷諾數、風入射角度、開口高度與長度比及屋頂斜率等。於等溫狀況之風洞中進行模式驗證，選取之建物模型為一般型及太子樓型。由實驗結果發現，風之入射角度為 $10 - 90^\circ$ 、風速為 $1.5 - 4.5 \text{ m s}^{-1}$ 、開口高度與長度比為 $1/6 - 1/2$ 及屋頂斜率為 $10 - 30\%$ 時，一般型及太子樓型建物之開口有效性分別為 $0.11 - 0.48$ 及 $0.15 - 0.54$ ，影響開口有效性主因為風速。本實驗數據及演算法驗證下期能提供日後自然通風建物之設計參考，以利室內環境品質之控制。

(3)以環境氣候箱實驗探討不同操作條件下，通風空間中 PM 移除動態行為

本研究推導一質量平衡方程式描述通風空間中街塵移除之線性動態行為。此動態方程式可充分將通風空間中同時發生之 PM 紊流膠結(Turbulent coagulation, TC)、紊流擴散沈澱(Turbulent diffusive deposition, TD)、重力沈降(Gravitational sedimentation, GS)及通風系統等移除 PM 作用納入計算。以均方根誤差(Root mean square error, RMSE)檢視模式之性能發現，平均之 RMSE 為 $0.86 \pm 0.34 \text{ mg m}^{-3}$ 。實驗結果顯示當通風率為 210 ± 5 及 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ，PM 來源量為 0.1 ± 0.01 及 $0.05 \pm 0.01 \text{ mg min}^{-1}$ 時，位移及短路式通風系統下，氣候箱內 PM 濃度分別為 $73.77 \pm 3.78 - 223.71 \pm 13.49$ 及 $97.88 \pm 6.49 - 311.84 \pm 18.13 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ ，故知位移式通風系統之 PM 移除效率較短路式通風系統高。本研究結果期能作為通風空間中移除 PM 及控制質量濃度設計之參考。

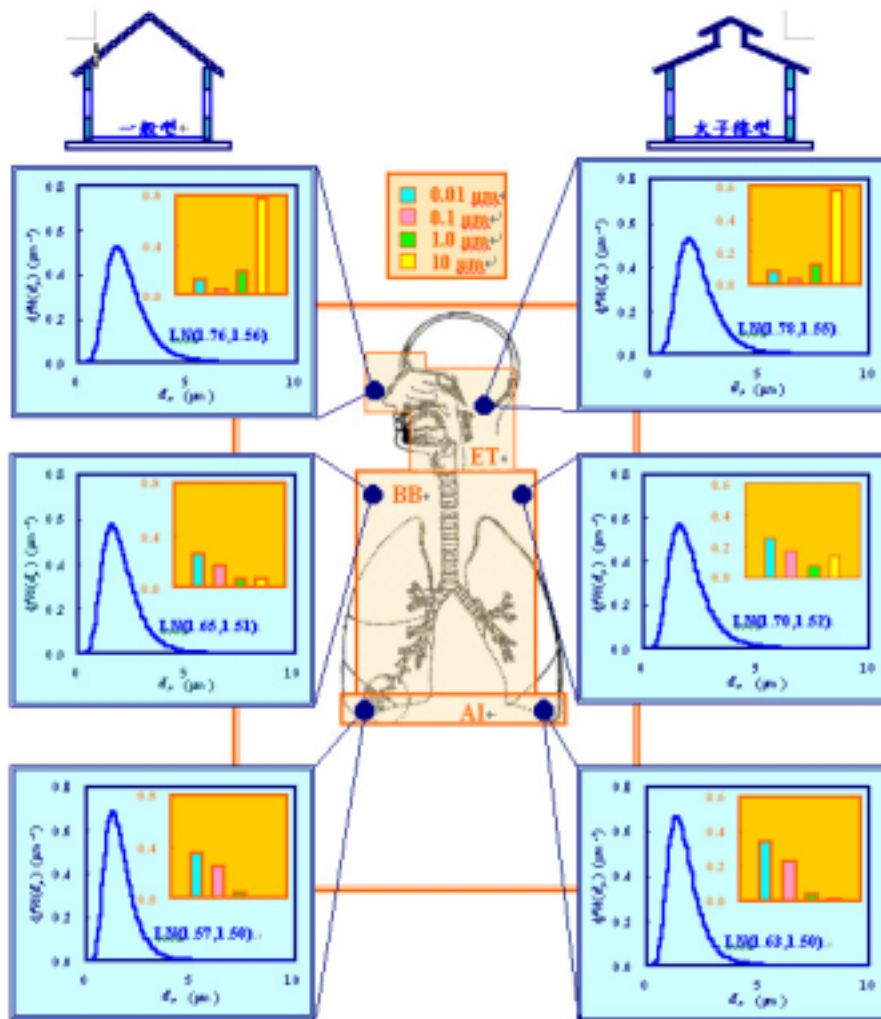


圖 2. 暴露於一般型及太子樓型建物中，HRT 各區塊 PM 粒徑特性及不同粒徑之沈澱分量圖。10 μm PM 大部分沈澱於 ET 區塊中，愈小之 PM 達深入呼吸道之機會愈高。

(4)自然通風空間中 PM 質量室內/室外比

本研究以一簡易室內空氣品質模式結合戶外量測及環保署資料探討台灣地區自然通風空間中，PM I/O ratio 關係，研究中採用兩種建築型態，分別為一般型及太子樓型，研究結果可獲得台灣北、中及南部地區 PM 質量濃度及粒徑分佈特性，進一步推求 PM I/O ratio。一般型及太子樓型建物中，PM₁₀ I/O ratio 分別為 0.15– 0.24 及 0.20 – 0.32；PM_{2.5} I/O ratio 則分別為 0.26– 0.50 及 0.38 – 0.62，此結果顯示太子樓型建物之 PM I/O ratio 高於一般型建物；研究結果亦顯示郊區之 PM 濃度高於都市地區，且 PM I/O ratio 亦較高。靈敏度分析發現，PM I/O ratio 受室外風速、PM 沉降速率、開口面積及風入射角之影響，其中以室外風速影響最顯著、開口面積及風入射角次之，PM 沉降速率為最低。

(5)HRT 各區塊中 PM 濃度、粒徑分佈特性、沈澱分量及累積劑量之探討

本研究中，PM 於 HRT 之沈積行為以 3 區塊模式模擬之：(i)胸腔外區 (Extrathoracic, ET)；(ii)氣管/支氣管區(Bronchial-bronchiolar, BB)及(iii)肺泡區 (Alveolar-interstitial, AI)。圖 2 為暴露於一般型及太子樓型建物內，HRT 各區塊中 PM 特性及沈澱分量。PM 於呼吸道中機制包括紊流擴散沈澱、重力沈降、慣性衝擊及接觸附著損失，研究顯示以慣性衝擊損失為主要沈澱機制(沈澱率為 $1.28 \times 10^{-2} - 5.89 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)。北部及中部地區自然通風建築物中，ET、BB 及 AI 區塊，PM₁₀ 質量肺部/室內比(Lung/Indoor ratio, L/I ratio)分別為 0.67 – 0.78 與 0.66 – 0.74、0.36 – 0.57 與 0.33 – 0.47 及 0.05 – 0.35 與 0.02 – 0.22。模擬得之呼吸道中 PM 沈澱分量與 ICRP66 結果比較之 RMSE 為 0.17，與非 ICRP66 結果比較則為 0.05。本研究計算之 HRT 中 PM 之 L/I ratio 及沈澱效率可進一步推算累積劑量，將可提供流行病學研究一參考依據。

三、結語

本研究結果在學術上可提供室內空氣品質及通風工程一操作方向，對於環境 PM 污染日益嚴重的今日不啻為一項新的衝擊；實際應用上則可配合通風控制手法及改變 PM 特性以減低室內濃度，提升通風環境品質。

四、參考文獻

- Liao, C.M., Chen, J.S, Chen, J.W. 2000. Dynamic model for predicting dust-borne odour concentrations in ventilated animal housing. Applied Mathematical Modelling 24, 131-145.
- Liao, C.M., Chen, J.W., Huang, M.Y., Chen, J.S., Chang. T.J. 2001. An inhalation dose model for assessing dust-borne VOC-odor exposure from feeding in swine buildings. Transactions of the ASAE 44, 1813-1824.

- Liao, C.M., Chiu, K.H. 2002. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. *Building and Environment* 37, 177-187.
- Liao, C.M., Huang, M.Y., Chen, J.W., Chang, T.J. 2002. Removal dynamics of airborne road dust in a ventilated airspace. *Journal of Environmental Science and Health A* 37, 1009-1027.
- Liao, C.M., Chen, J.W., Huang, S.J. 2003. Size-dependent PM_{10} indoor/outdoor/personal relationships for a wind-induced naturally ventilated airspace. *Atmospheric Environment*: 37, 3065-3075.
- Liao, C.M., Liang, H.M. 2003. A linear model of the effects of residence time distribution on mixing pattern in a ventilated airspace. *Building and Environment* 38, 11-21.
- Yu, H., Hou, C.H., Liao, C.M. 2002. Scale model analysis of opening effectiveness for wind-induced nature ventilation openings. *Biosystems Engineering* 82, 199-207.