

室內氣懸街塵在通風空間中移除之試驗研究

Experimental Study on Removal of Indoor Airborne Road Dust in a Ventilated Airspace

中國技術學院室內設計系
助理教授

黃美玉

Mei-Yu Huang

國立台灣大學生物環境系統
工程學系教授

廖中明

Chung-Min Liao

國立台灣大學生物環境系統
工程學系副教授

張倉榮

Tsang-Jung Chang

摘 要

本研究以台灣北部都市及郊區之街塵為對象，運用環境氣候箱實驗描述室內氣懸街塵之移除動態行為。環境氣候箱計六組實驗，其中四組採位移式系統(displacement system)和二組採短循環式系統(short-circuiting system)，分別量測兩區間之質量濃度，並以兩種通風量(210 ± 5 及 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ，空氣交換率為 1.04 ± 0.02 及 $0.52 \pm 0.01 \text{ h}^{-1}$)及兩種微粒產生量(0.1 ± 0.02 及 $0.05 \pm 0.01 \text{ g min}^{-1}$)進行實驗。實驗結果顯示台灣北部都市(古亭測站)與郊區(菜寮測站)，氣懸街塵之顆粒粒徑分布可以對數常態分布描述，其中幾何平均粒徑分別為 1.01 ± 0.03 及 $1.06 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ，及幾何標準偏差分別為 2.59 ± 0.04 及 2.62 ± 0.03 。當通風量為 210 ± 5 及 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ，微粒產生量為 0.1 ± 0.01 及 $0.05 \pm 0.01 \text{ g min}^{-1}$ 時，位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內累積氣懸街塵濃度範圍分別為 $73.77 \pm 3.78 \sim 223.71 \pm 13.49$ 及 $97.88 \pm 6.49 \sim 311.84 \pm 18.13 \mu\text{g m}^3$ 。對應比較得知位移式之累積氣懸街塵濃度較短循環式通風系統低，因此位移式較短循環式通風系統能有效移除氣懸街塵。本研究結果，期能作為通風空間中室內移除或控制室內氣懸街塵質量濃度設計之參考。

關鍵詞：街塵，微粒粒徑分布，通風，環境氣候箱。

ABSTRACT

Two sets of road dust collected from urban and suburban areas situated in northern Taiwan were used in an environmental chamber test to verify the removal dynamics of airborne road dust. Four displacement associated with two short-circuiting ventilation system modes were conducted in the chamber experiment. Two airflow rates (210 ± 5 and $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, $AC = 1.04 \pm 0.02$ 及 $0.52 \pm 0.01 \text{ h}^{-1}$) with two road dust generation rates

(0.1 ± 0.02 and 0.05 ± 0.01 g min⁻¹) were employed to perform the experiment to measure the mass concentration of airborne road dust. Results show that there is no significant variation for particle size distributions of those road dust samples obtained from urban and suburban areas in northern Taiwan, whereas both followed a lognormal distribution with average geometric mean diameters of 1.01 ± 0.03 and $1.06\pm 0.02\mu\text{m}$ and geometric standard deviations of 2.59 ± 0.04 and 2.62 ± 0.03 , respectively. The experimental results also demonstrate that cumulative mass concentrations of airborne road dust in displacement and short-circuiting ventilation systems are $73.77\pm 3.78 \sim 223.71\pm 13.49$ and $97.88\pm 6.49 \sim 311.84\pm 18.13\mu\text{g m}^3$, respectively, under airflow rate of 210 ± 5 and $105\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ with road dust generation rate of 0.1 ± 0.02 and 0.05 ± 0.01 g min⁻¹, indications cumulative mass concentration in displacement system is lower than that in short-circuiting system. Moreover, the cumulative mass concentrations under airflow rate of 210 ± 5 cm³s⁻¹ are lower than that under 105 ± 3 cm³s⁻¹, in both displacement and short-circuiting ventilation systems. Results also demonstrate that the removal efficiency of displacement ventilation system is higher than that of short-circuiting one. Results obtained from this research are expected to offer designers a control strategy for removal of indoor concentrations of airborne road dust from a ventilated airspace.

Keywords: Road dust, Particle size distribution, Ventilation, Environmental chamber.

一、前言

台灣地區最主要的空氣污染物為氣懸微粒及臭氧，尤其氣懸微粒中街道粉塵對室內空氣的影響，已成為台灣都市地區居住最嚴重的室內空氣污染源之一(Chen 等, 1997、Yang 等, 1999、Chiou 與 Tsai, 2001)。暴露於街道表面的道路粉塵係由複雜混合的土壤、沉降的汽機車排放微粒、輪胎夾帶、煞車磨耗、工廠設備碎片及其他生物物質等所組成(Rogge 等, 1993 及 Miguel 等, 1999)。

Pope 與 Dockery(1992)、Dockery 等(1993)、Schwartz(1993)、Seaton 等(1995)及 Ackermann-Lieblich 等(1997)在他們的醫學研究中均指出室外街塵中的微粒與肺功能、呼吸方面的疾病及死亡有非常密切的關聯，尤其吸入肺胸的氣懸街塵 (airborne road dust)PM10(氣動直徑(Aerodynamic equivalent diameter, AED))<10 μm) 及 PM2.5 (<2.5 μm 之 AED)影響最鉅。

根據 Dockey 等(1981)、Repace(1982)、Lebowitz 等(1984)及 Lanchenmyer 與 Hidy(2000)

研究發現一般民眾停留在室內環境的時間長達 70-90%以上，其中以停留居家環境占 60%，尤其老人、幼童及生病者等停留室內時間經常超過 90%以上。因人們停留居室時間長，街塵藉由氣流流動帶入室內，將對居住者產生危害。

目前國內並無建構完整的通風空間中氣懸街塵特性之相關研究，因此本研究針對台灣北部都市及郊區街塵的採樣，以數種通風型態之環境氣候箱進行實驗，瞭解氣懸街塵質量濃度的變化及粒徑分布特性，研究結果期望作為室內移除或控制室內氣懸街塵濃度設計之參考。

二、材料與方法

本研究以環境氣候箱實驗，考慮不同通風系統、通風量及微粒導入量之實驗條件所得逐時濃度變化，並瞭解不同通風系統之特性，及都市與郊區街塵之分布情形。依街塵採樣、實驗配置、實驗材料分述如下。

2.1 街塵採樣

本研究於 2002 年 1 月間在台北市都會地區

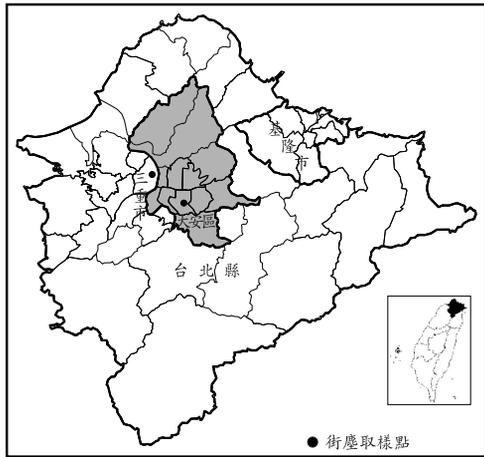


圖 2.1.1 台灣北部都市及郊區街塵採樣位置
(台北市-古亭測站及三重市-菜寮測站)

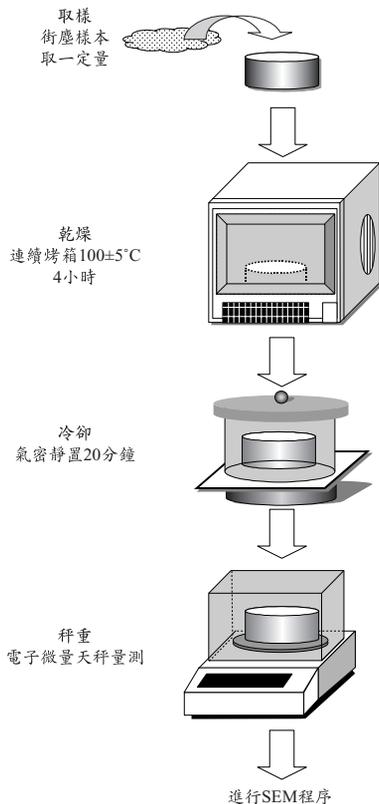


圖 2.1.2 街塵樣本乾燥過程

(和平東路二段-古亭測站)及郊區(三重市中山路-菜寮測站)如圖 2.1.1 所示，分別在同一街道旁，連續一星期以掃街方式採樣，使用樣本前，先除

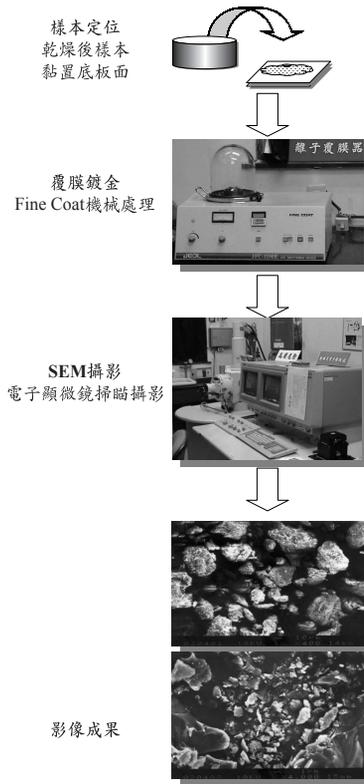


圖 2.1.3 街塵 SEM 掃描攝影過程

去過大的顆粒及雜物，再以 2mm 格網過篩，以利實驗的進行。為瞭解街塵的形狀，取一定量樣本使用電子天秤(AND HF-3000 MAX.3100g d=0.01)量測重量，再使用乾燥烤箱(DRYING OVEN 506-3816 TEMP CONTROL CHANNEL DV602 18A 200°C 220V)加熱至 100±5°C持續 4 小時，使樣本完全乾燥，再置於氣密乾燥冷卻箱中靜置 20 分鐘，冷卻後使用電子天秤量測乾燥後樣本重量(如圖 2.1.2 所示)，由此可算出街塵樣本的含水量。並將乾燥後的街塵樣本，經鍍金過程，於電子顯微鏡(SCANNING ELECTRON MICROSCOPE JEOL JSM-6300，如圖 2.1.3)下掃描攝影。

2.2 實驗配置

實驗依環境氣候箱的特性，考量通風系統(通風型態及進排氣口位置)、通風量(高風速及低風速)及微粒導入量(高微粒濃度及低微粒濃度)

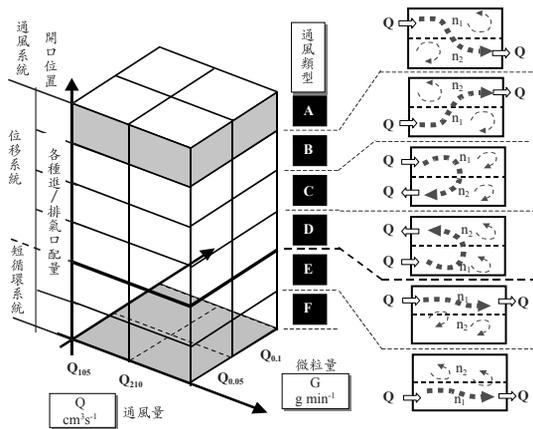


圖 2.2.1 環境氣候箱實驗架構示意

等主要因子。在通風系統中環境氣候箱實驗考量二區間位移式系統(Displacement system)及二區間短循環式系統(Short-circuiting system)兩種型態，並考量以上兩種通風型態之各種進/排氣口位置，計六組實驗，其中四組位移式系統和二組短循環式系統，分別量測兩區間之質量濃度，每組分別採用兩種通風量(210 ± 5 及 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)代表不同風速及兩種微粒產生量(0.1 ± 0.02 及 $0.05 \pm 0.01 \text{ g min}^{-1}$)代表高濃度及低濃度的狀況，進行為期 30 分鐘連續實驗，合計 24 項環境氣候箱實驗，每項量測兩個區間，總計 48 個逐時街塵濃度變化資料。本實驗架構如圖 2.2.1 所示，實驗配置如表 2.2.1 所列。

2.3 實驗材料

本研究使用實驗材料由環境氣候箱、空氣傳輸系統、街塵產生系統、分析系統等構成。實驗設備置於溫度為 $19.3 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 及相對溼度 45-55% 的實驗室中，實驗所構成的系統單元分別說明如下。

2.3.1 環境氣候箱

實驗室所使用的環境氣候箱由壓克力所組成，其長、寬及高分別為 $90 \times 90 \times 90 \text{ cm}$ ，環境氣候箱構造及實驗設備如圖 2.3.1 所示。本實驗運用環境氣候箱模擬狹孔之正壓通風系統，並在環境氣候箱底部設置 4 個直徑 12cm 的風扇(AC AXIAL FAN(GULF)，MODEL：4C.115PSL，

表 2.2.1 環境氣候箱實驗配置

類別	實驗	通風系統	進排位置	通風量	導入微粒	濃度	
Mode	序號			Q	量 G	變化	
				($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$)	(g min^{-1})	量測點	
A	A-1	01	二區間位移式	105	0.1	n_1, n_2	
A	A-2	02	對側	105	0.05	n_1, n_2	
A	A-3	03		高進	210	0.1	n_1, n_2
A	A-4	04		低出	210	0.05	n_1, n_2
B	B-1	05	二區間位移式	105	0.1	n_1, n_2	
B	B-2	06	對側	105	0.05	n_1, n_2	
B	B-3	07		低進	210	0.1	n_1, n_2
B	B-4	08		高出	210	0.05	n_1, n_2
C	C-1	09	二區間位移式	105	0.1	n_1, n_2	
C	C-2	10	同側	105	0.05	n_1, n_2	
C	C-3	11		高進	210	0.1	n_1, n_2
C	C-4	12		低出	210	0.05	n_1, n_2
D	D-1	13		二區間位移式	105	0.1	n_1, n_2
D	D-2	14	同側	105	0.05	n_1, n_2	
D	D-3	15		低進	210	0.1	n_1, n_2
D	D-4	16		高出	210	0.05	n_1, n_2
E	E-1	17		二區間短循環	105	0.1	n_1, n_2
E	E-2	18	對側	105	0.05	n_1, n_2	
E	E-3	19		高進	210	0.1	n_1, n_2
E	E-4	20		高出	210	0.05	n_1, n_2
F	F-1	21		二區間短循環	105	0.1	n_1, n_2
F	F-2	22	對側	105	0.05	n_1, n_2	
F	F-3	23		低進	210	0.1	n_1, n_2
F	F-4	24		低出	210	0.05	n_1, n_2

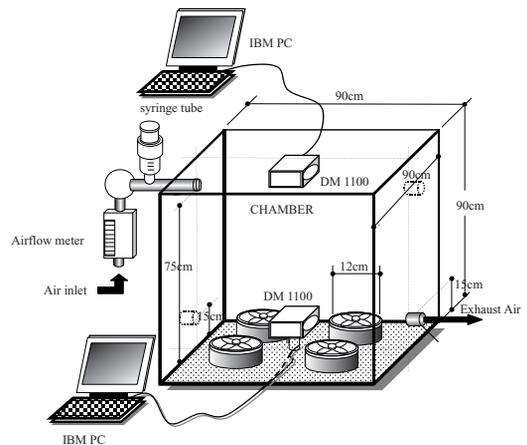


圖 2.3.1 環境氣候箱及實驗設備配置

50HZ，18W，0.24A)，使街塵在環境氣候箱內完全混合。

2.3.2 空氣傳輸系統

環境氣候箱為機械通風，以空氣壓縮機傳送 105 ± 3 和 $210 \pm 5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 兩種通風量，藉由定壓氣流量測器量測通風量。兩氣流進入位置分別為離地版面 15 和 75cm，進入環境氣候箱的空氣，穿過一個直徑約 1cm 的圓形狹孔，排氣口的位置分別離頂版或地版到出入口各為 15cm，以量測六組

實驗條件下之氣懸街塵動態行為。

2.3.3 街塵產生系統

本研究環境氣候箱實驗的兩種街塵來源產生量分別為 $0.1 \pm 0.02 \text{ g min}^{-1}$ 及 $0.05 \pm 0.01 \text{ g min}^{-1}$ ，每分鐘放入一次，並隨空氣傳輸系統吹入氣流進入環境氣候箱。

2.3.4 分析系統

本實驗街塵分析系統，運用可攜帶式的雷射街塵量測儀二台(1100 系列，Grimm Labortechnik GmbH & Co. KG, Airing, Germany；簡稱爲 DM1100)分別設於環境氣候箱中央約距箱頂及底部 15cm 處，同步紀錄環境氣候箱上、下區塊之街塵微粒的顆粒數及質量濃度。DM1100 結合分離及光散射微粒偵測的原理，量測微粒氣動直徑 0.5 至 $10 \mu\text{m}$ 範圍。DM1100 可量測微粒質量濃度 1.0 至 $50000 \mu\text{g m}^{-3}$ 範圍。量測區段範圍爲氣動直徑 0.5~1, 1~2, 2~5, 5~10, 及 $>10 \mu\text{m}$ 。量測前，DM1100 以已知的 Uniform Latex Microspheres Polystyrene ($0.5 \mu\text{m}$) 及 Polymer Microspheres Styrene Vinyltoluene ($3 \mu\text{m}$) (Duke Scientific, Palo Alto, CA) 微粒進行校正。DM1100 以 $1.2 \text{ L min}^{-1} \pm 10\%$ 的氣流量取樣操作，可連續量測 24 小時。DM1100 的量測結果以 $\mu\text{g m}^{-3}$ 及 particles L^{-1} 格式輸出，且二台攜帶式街塵量測儀(DM1100)於同一條件下其量測濃度一致，並利用二台 IBM 電腦分別連結並同時紀錄及分析上、下兩區塊 DM1100 的取樣資料。

依前述規劃條件，街塵實驗每分鐘放入樣本一次，DM1100 每 5 秒讀取質量濃度並紀錄一次，每次實驗記錄歷時 30 分鐘的逐時濃度，每一量測點由 12 筆數據平均，同時以溫濕度計(Humidity STICK™，量測範圍：5 to 95% RH，-5 to 160°F)紀錄環境氣候箱內空氣濕度及溫度的變化，且每一次實驗前後均需清除環境氣候箱內的街塵使箱內濃度低於 $50 \mu\text{g m}^{-3}$ ，以確保實驗質量濃度量測之準確性。

三、結果與討論

依實驗所獲得結果，進行氣懸街塵粒徑分布、移除動態試驗、通風型態移除差異性及實驗

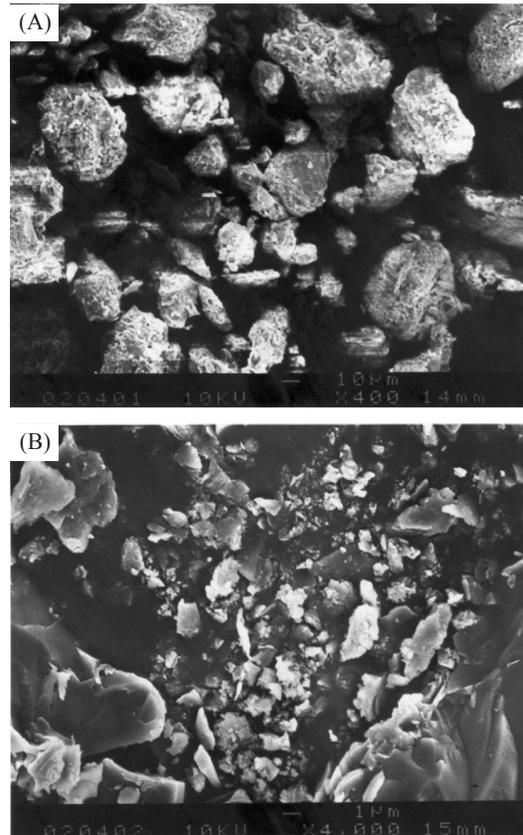


圖 3.1.1 街塵電子顯微鏡攝影 (A) ($\times 400$ 倍)，(B) ($\times 4000$ 倍)

誤差等說明及討論。

3.1 氣懸街塵粒徑分布

爲瞭解街塵含水量，都市(台北市-古亭測站)及郊區(三重市-菜寮測站)分別量測樣本乾燥前爲 120.25g 及 196.23g(含盆重，盆重 71.88 g)，乾燥冷卻後爲 119.97g 及 195.25g(含盆重)，得知街塵含水量分別爲 0.58% 及 0.79%，其含水量低，利於實驗。並由電子顯微鏡掃描攝影街塵樣本，可明瞭街塵的形狀，如圖 3.1.1 所示。

實驗結果顯示，都市(台北市-古亭測站)及郊區(三重市-菜寮測站)氣懸街塵對數常態分布幾何平均粒徑(GMD)分別爲 $1.01 \pm 0.03 \mu\text{m}$ 及 $1.06 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ，標準幾何偏差(GSD)分別爲 2.59 ± 0.04 及 2.62 ± 0.03 ，如圖 3.1.2 所示，且台北市及近郊地區幾何平均粒徑非常趨近，因此實驗僅取都市

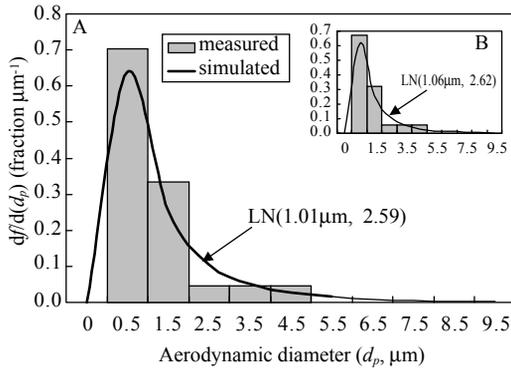


圖 3.1.2 北台灣(A)都市(古亭測站)及(B)郊區(菜寮測站)氣懸街塵對數常態分布模式模擬與實驗結果

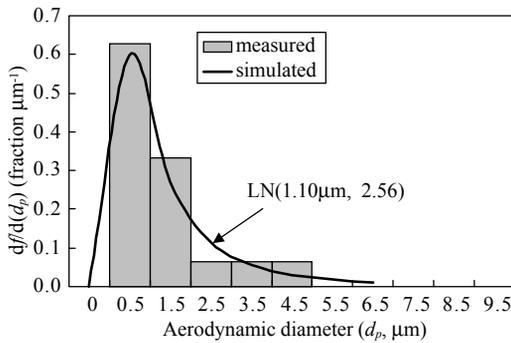


圖 3.1.3 北台灣都市地區(古亭測站)氣懸街塵對數常態分布模式模擬與實驗結果(Liao 等, 2002)

之樣本。實驗結果都市地區氣懸街塵粒徑分布與 Liao 等(2002)研究北台灣都市地區極為接近(GMD 為 $1.10\mu\text{m}$ 及 GSD 為 2.56, 如圖 3.1.3 所示)。

並以均方根誤差(root mean squared error, RMSE)評估圖 3.1.2. 及圖 3.1.3 對數常態分佈模式的符合性, 以下列方程式計算:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [C_{m,i} - C_{p,i}]^2}{N}}$$

其中, N 代表粒徑尺寸分布區間的數量, $C_{m,i}$ 代表相對資料點 i 之量測濃度, 及 $C_{p,i}$ 代表相對資料點 i 之計算預測濃度。結果顯示 RSEM 數值為

3.7%, 表示符合性相當吻合。

實驗結果得知都市地區氣懸街塵 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值為 0.92, 郊區為 0.9, 而國內相關文獻 Yang 等(1997、1999)、Fang 等(1999a、1999b、2000) 及 Cheng 與 Tsai(2000)對台灣都市及郊區氣懸街塵取樣研究得知, 氣懸街塵 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值為 0.60~0.78。本研究由於實驗經費有限, 係在夜間自道路旁以掃街的方式採樣搜集台北市區及郊區街塵樣本後帶回實驗室進行環境氣候箱實驗。實驗街塵與相關文獻所量測取樣的氣懸微粒由於其來源不同, 前者為累積於道路旁的街塵, 後者為懸浮在道路空氣中的微粒, 故本研究與國內大氣懸浮微粒之粒徑分佈呈現差異性, 其 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 比值較大。無論實驗結果或相關文獻顯示, 北台灣地區都市與近郊地區氣懸街塵主要構成皆為 $\text{PM}_{2.5}$, 因此, $\text{PM}_{2.5}$ 將成為環境控制策略的重要關鍵及主要研究的對象。

3.2 移除動態試驗

環境氣候箱內, 以不同的通風型態、通風量及微粒產生量(表 2.2.1), 觀察街塵移除動態行為, 如圖 3.2.1~3.2.24 顯示。其中圖 3.2.1~3.2.16, 以二區間位移式通風系統實驗狀況下, 為 A、B、C 及 D 通風型態氣懸街塵逐時濃度變化; 其中圖 3.2.17~3.2.24, 以二區間短循環式通風系統實驗狀況下, 為 E 及 F 通風型態氣懸街塵逐時濃度變化。

3.3 通風型態移除差異性

如表 3.3.1 及圖 3.3.1 所示, 當通風量為 $105\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.1\pm 0.02\text{g min}^{-1}$ 時, 位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內累積濃度分別為 223.71 ± 13.49 及 $311.84\pm 18.13\mu\text{g m}^3$, 當通風量為 $105\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.05\pm 0.01\text{g min}^{-1}$ 時, 位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內累積濃度分別為 100.54 ± 9.43 及 $147.15\pm 2.38\mu\text{g m}^3$, 當通風量為 $210\pm 5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.1\pm 0.02\text{g min}^{-1}$ 時, 位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內累積濃度分別為 150.57 ± 8.11 及 $218.81\pm 9.09\mu\text{g m}^3$, 當通

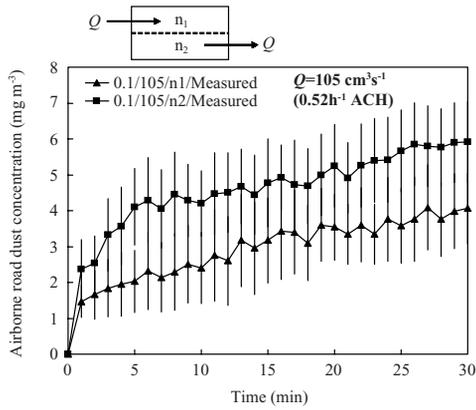


圖 3.2.1 Mode A-1 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{ g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ，量測值表示為 $\text{mean} \pm 1\text{SD}$)。

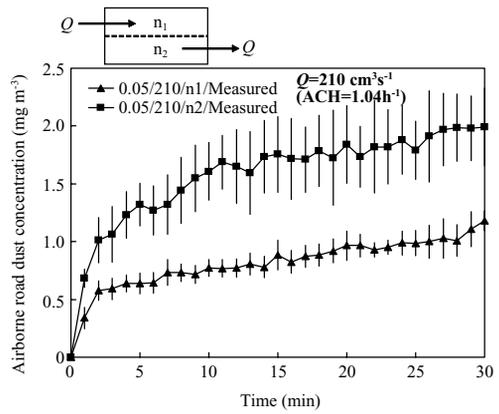


圖 3.2.4 Mode A-4 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{ g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)。

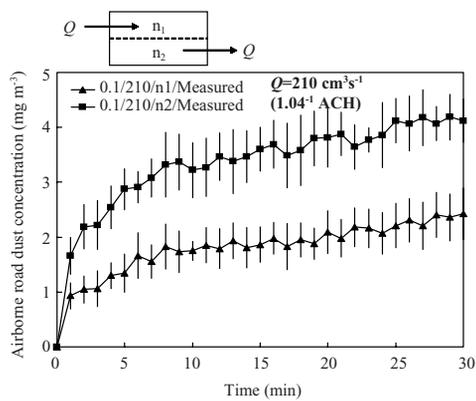


圖 3.2.2 Mode A-2 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{ g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)。

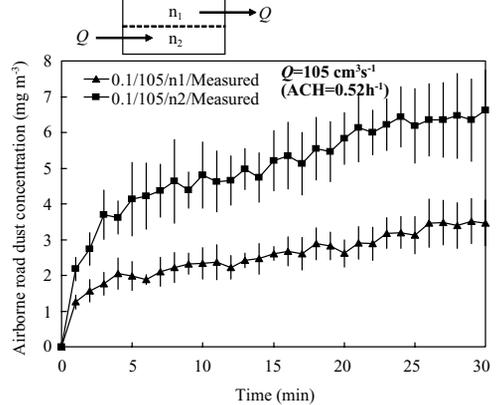


圖 3.2.5 Mode B-1 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{ g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)。

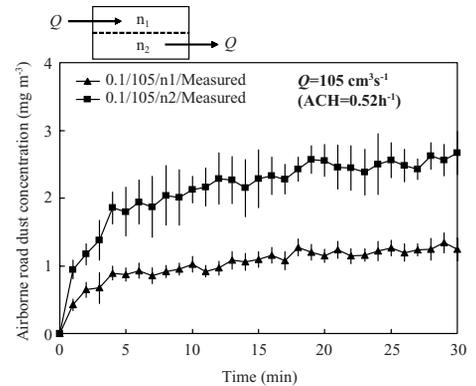


圖 3.2.3 Mode A-3 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{ g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)。

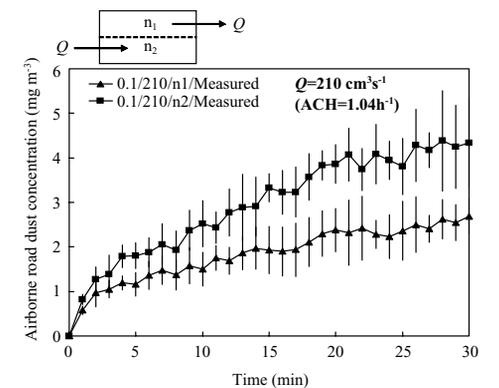


圖 3.2.6 Mode B-2 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{ g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$)。

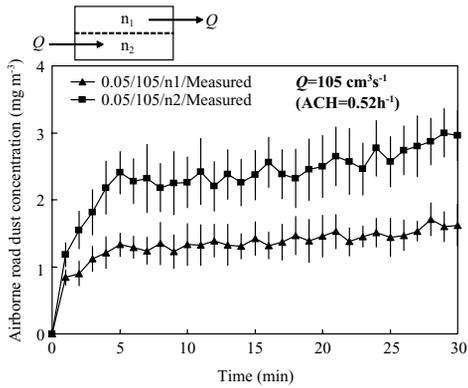


圖 3.2.7 Mode B-3 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

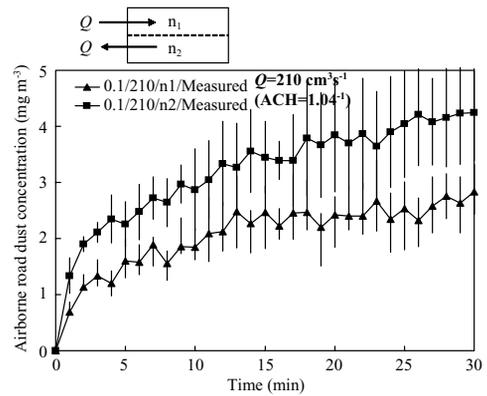


圖 3.2.10 Mode C-2 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

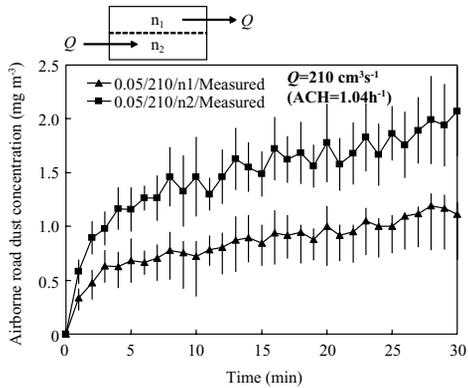


圖 3.2.8 Mode B-4 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

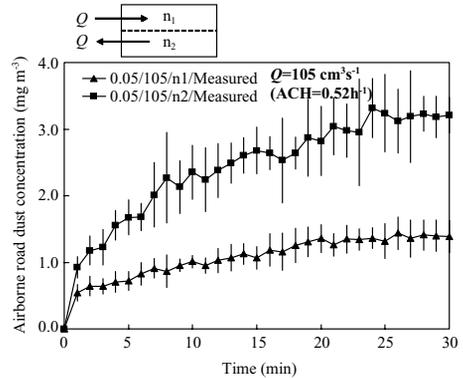


圖 3.2.11 Mode C-3 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

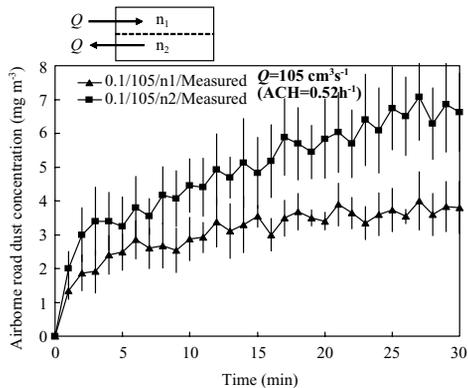


圖 3.2.9 Mode C-1 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

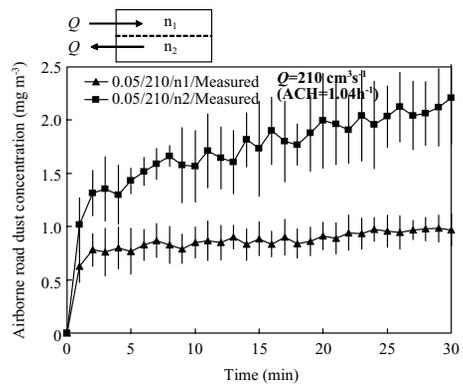


圖 3.2.12 Mode C-4 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

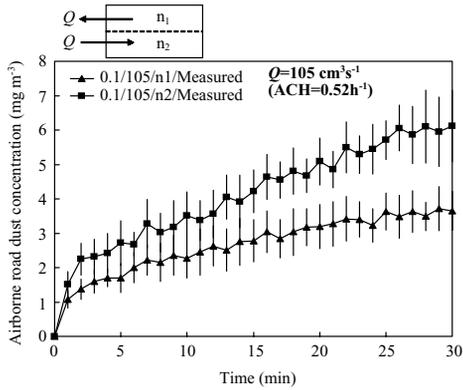


圖 3.2.13 Mode D-1 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

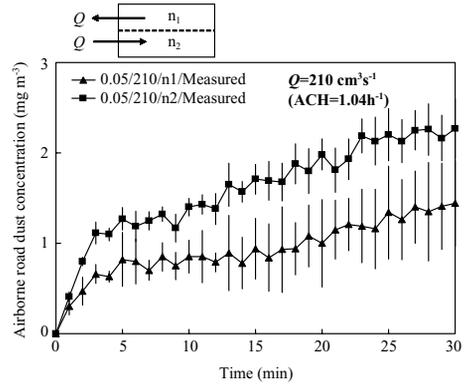


圖 3.2.16 Mode D-4 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

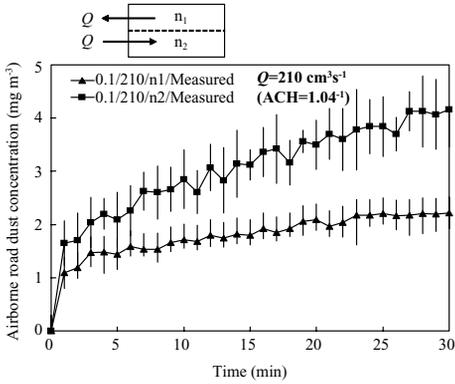


圖 3.2.14 Mode D-2 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

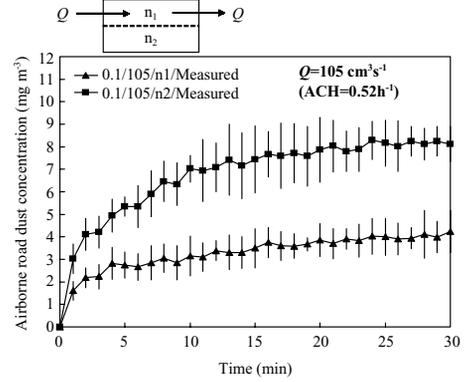


圖 3.2.17 Mode E-1 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

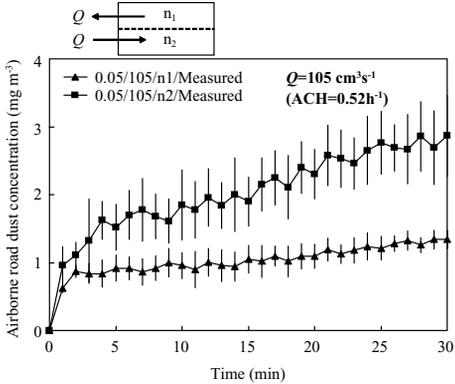


圖 3.2.15 Mode D-3 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

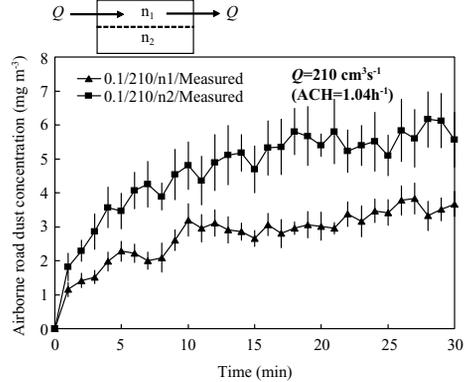


圖 3.2.18 Mode E-2 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

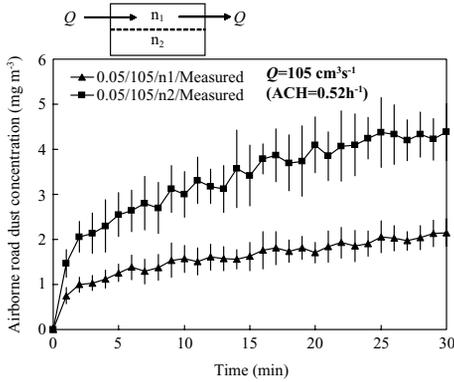


圖 3.2.19 Mode E-3 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

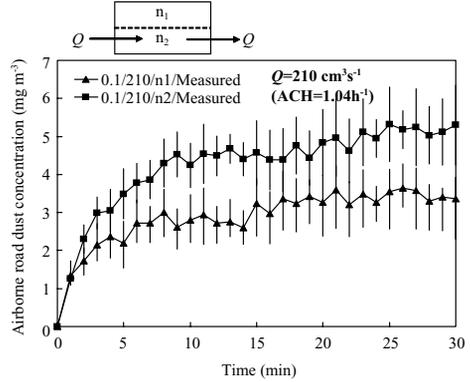


圖 3.2.22 Mode F-2 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

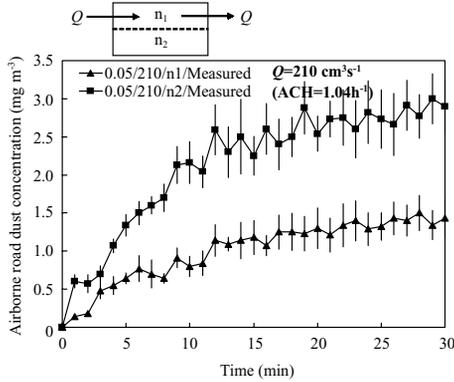


圖 3.2.20 Mode E-4 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

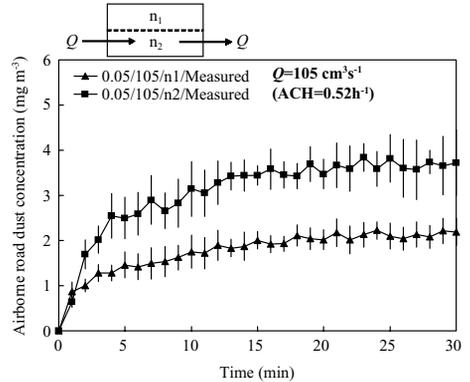


圖 3.2.23 Mode F-3 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

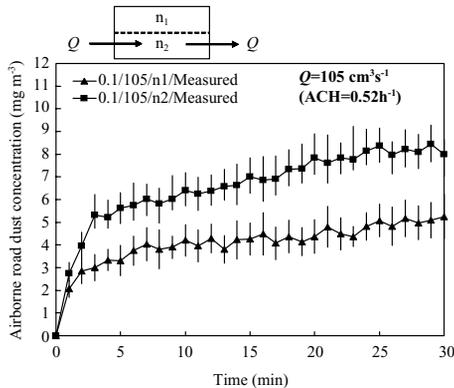


圖 3.2.21 Mode F-1 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.1 \pm 0.02 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $105 \pm 3 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

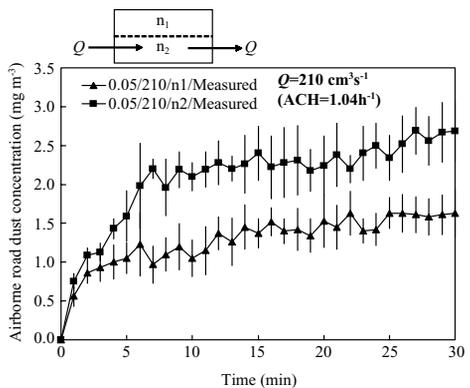


圖 3.2.24 Mode F-4 實驗量測之氣懸街塵移除動態行為(微粒產生量為 $0.05 \pm 0.01 \text{g min}^{-1}$ 、通風量為 $210 \pm 5 \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)。

表 3.3.1 各種通風模式下氣懸街塵量測質量濃度值

Ventilation System	Ventilation Mode ^a	Type-1 ($G=0.1/Q=105$) ^b	Type-2 ($G=0.05/Q=105$)	Type-3 ($G=0.1/Q=210$)	Type-4 ($G=0.05/Q=210$)
		Total concentration (mg m^{-3})			
Displacement system	Mode-A	225.14±2.04	95.02±0.40	155.05±0.77	71.96±0.37
	Mode-B	226.22±1.20	110.20±0.60	143.87±0.91	69.91±0.37
	Mode-C	240.01±1.52	105.02±0.57	158.25±1.07	77.16±0.44
	Mode-D	203.48±1.15	91.91±0.57	145.09±0.71	76.05±0.47
	Average concentration	223.71±13.49	100.54±9.43	150.57±8.11	73.77±3.78
Short-circuiting system	Mode-E	302.77±1.61	148.33±0.80	223.35±0.98	94.64±0.43
	Mode-F	320.90±1.49	145.95±0.67	214.26±1.19	101.13±0.51
	Average concentration	311.84±18.13	147.14±2.38	218.81±9.09	97.88±6.49

^a See Table 2.2.1. °

^b G in g min^{-1} and Q in cm^3s^{-1} °

表 3.3.2 各種通風模式下兩區間氣懸街塵量測質量濃度值

Ventilation System	Ventilation Mode ^a	Type-1 ($G=0.1/Q=105$) ^b		Type-2 ($G=0.05/Q=105$)		Type-3 ($G=0.1/Q=210$)		Type-4 ($G=0.05/Q=210$)	
		n_1 (mg m^{-3})	n_2 (mg m^{-3})	n_1 (mg m^{-3})	n_2 (mg m^{-3})	n_1 (mg m^{-3})	n_2 (mg m^{-3})	n_1 (mg m^{-3})	n_2 (mg m^{-3})
Displacement system	Mode-A	87.59±1.00	137.55±1.05	30.80±0.11	64.22±0.28	54.28±0.34	100.77±0.43	24.40±0.10	47.56±0.28
	Mode-B	76.09±0.40	150.13±0.80	40.03±0.23	70.17±0.37	55.09±0.40	88.77±0.50	25.32±0.12	44.59±0.25
	Mode-C	91.95±0.54	148.06±0.97	32.27±0.18	72.75±0.39	61.93±0.40	96.33±0.66	25.63±0.14	51.53±0.29
	Mode-D	79.92±0.52	123.56±0.63	30.73±0.17	61.18±0.40	53.78±0.23	91.31±0.47	28.06±0.30	47.99±0.17
	Average concentration	83.89±7.84	139.82±12.36	33.46±4.38	67.08±5.84	56.27±3.77	94.29±5.67	25.85±1.47	47.92±2.46
Short-circuiting system	Mode-E	98.75±0.64	204.03±0.97	47.85±0.27	100.48±0.54	82.50±0.32	140.85±0.65	30.25±0.17	64.39±0.26
	Mode-F	122.45±0.67	198.46±0.82	53.22±0.25	92.73±0.42	86.80±0.54	127.46±0.66	38.54±0.23	62.59±0.28
	Average concentration	110.60±23.70	201.24±5.57	50.53±5.37	96.61±7.76	84.65±4.30	134.16±13.39	34.39±8.29	63.49±1.80

^a See Table 2.2.1. °

^b G in g min^{-1} and Q in cm^3s^{-1} °

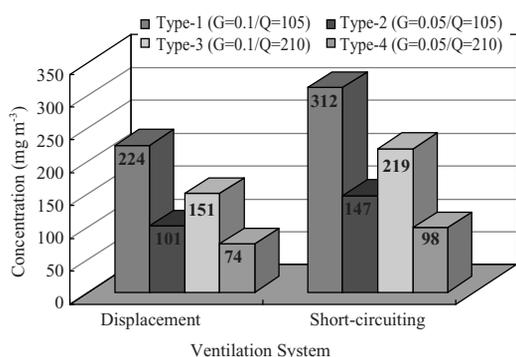


圖 3.3.1 各種通風模式下氣懸街塵量測質量濃度值比較

風量為 $210\pm 5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.05\pm 0.01\text{g min}^{-1}$ 時，位移式及短循環式通風系統之環境氣候

箱內累積濃度分別為 73.77 ± 3.78 及 $97.88\pm 6.49\mu\text{g m}^{-3}$ ，對應比較得知位移式通風系統之累積濃度較短循環式通風系統低，位移式或短循環式通風系統通風量為 $210\pm 5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 比通風量為 $105\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 之累積濃度低，因此位移式通風系統之氣懸街塵移除較短循環式通風系統有效率，且在相同的通風系統時，通風量為 $210\pm 5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 比通風量為 $105\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 有效率。

如表 3.3.2 及圖 3.3.2 所示，當通風量為 $105\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.1\pm 0.02\text{g min}^{-1}$ 時，位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內進氣區間累積濃度分別為 83.89 ± 7.84 及 $110.60\pm 23.70\mu\text{g m}^{-3}$ ，另一區間累積濃度分別為 139.82 ± 12.36 及 $201.24\pm 5.57\mu\text{g m}^{-3}$ ，當通風量為 105

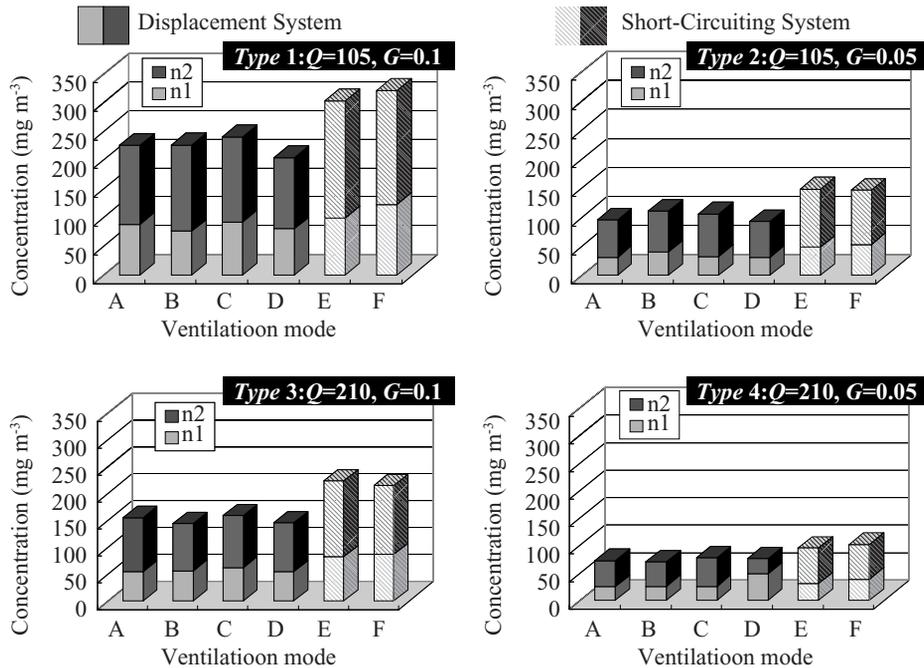


圖 3.3.2 各種通風模式下兩區間氣懸街塵量測質量濃度值比較

$\pm 3\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.05\pm 0.01\text{g min}^{-1}$ 時，位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內進氣區間累積濃度分別為 33.46 ± 4.38 及 $50.53\pm 5.37\mu\text{g m}^3$ ，另一區間累積濃度分別為 67.08 ± 5.84 及 $96.61\pm 7.76\mu\text{g m}^3$ ，當通風量為 $210\pm 5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.1\pm 0.02\text{g min}^{-1}$ 時，位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內進氣區間累積濃度分別為 56.27 ± 3.77 及 $84.65\pm 4.30\mu\text{g m}^3$ ，另一區間累積濃度分別為 94.29 ± 5.67 及 $134.16\pm 13.39\mu\text{g m}^3$ ，當通風量為 $210\pm 5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$ 及微粒產生量為 $0.05\pm 0.01\text{g min}^{-1}$ 時，位移式及短循環式通風系統之環境氣候箱內進氣區間累積濃度分別為 25.85 ± 1.47 及 $34.39\pm 8.29\mu\text{g m}^3$ ，另一區間累積濃度分別為 47.92 ± 2.46 及 $63.49\pm 1.80\mu\text{g m}^3$ ，對應比較得知無論風速高低、微粒導入量大小，空間中進風區間之微粒濃度(n_1)均較另一區間濃度(n_2)低，且無論位移式或短循環式通風系統，當進/排氣口配置不同位置時，進氣區間微粒濃度(n_1)較另一區間濃度(n_2)低，因此得知同一通風系統下，不會因通風口位置不同，進/排氣區間濃度高低而有所改變，且進氣區間比另一區間移除效率佳。

3.4 實驗誤差

3.4.1 環境氣候箱實驗濃度變化較數值模擬快趨於平衡

實驗量測很快達到平衡狀態(如圖 3.2.1~3.2.24 所示)，原因可能是空氣壓縮機之壓力使溫度降低，空氣飽和含水量降低，形成空氣壓縮機進氣管產生水氣，微粒量輸入因此受影響，環境氣候箱內的溼度也因此增加。由於空氣中的水分子與微粒膠結，發生濕增長(Hygroscopic Growth)作用，使微粒沉降造成移除及濃度降低的情形，正如 Chan(2001)研究指出相對溼度影響街塵 PM10 的質量濃度，Liao 等(2002)指出環境氣候箱實驗期間，氣懸街塵在溼度較高的環境下，如介於 0.5 到 $1\mu\text{m}$ 間之氣懸街塵可增大粒徑至 1.5 至 $2.75\mu\text{m}$ 間，然而粒徑增大造成大量的氣懸街塵沉降及附著至表面結果。因此實驗微粒濃度曲線，約 $10\sim 15$ 分鐘漸趨於平衡狀況。由圖 3.4.1 環境氣候箱內溫溼度變化記錄曲線得知， $10\sim 15$ 分鐘溼度反轉漸增，與實驗結果之曲線變化現象相符。

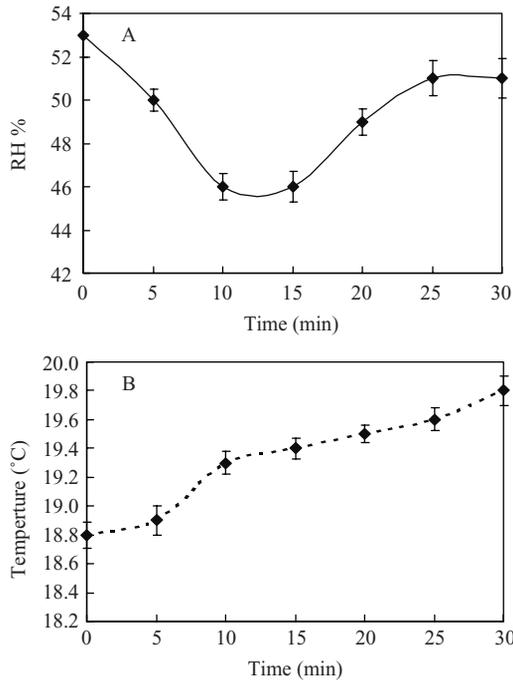


圖 3.4.1 實驗環境氣候箱內(A)相對濕度，(B)溫度逐時變化曲線

3.4.2 環境氣候箱實驗濃度值隨時間呈上下震盪而增加

環境氣候箱實驗濃度值隨時間變化之曲線呈現鋸齒狀，如圖 3.2.1~3.2.24 顯示，由於實驗街塵產生源以每分鐘導入一次定量樣本所導致，因此實驗量測數值鋸齒曲線變化情形，反映出街塵產生源每分鐘導入時，完全混合過程之時滯現象。但 DM1100 儀器每 5 秒鐘讀取一次，每分鐘計 12 筆資料，可改善實驗街塵樣本導入設備的誤差。

3.4.3 環境氣候箱實驗量測濃度初期曲線變化劇烈

由圖 3.2.1~3.2.24 得知量測濃度於環境氣候箱實驗初期，濃度曲線劇幅增加，此現象可能是環境氣候箱尺寸較小，由進氣口以強迫式導入的街塵，集中通過 DM110 讀取口附近，使得濃度在初始時有濃度快速增加的情形，待數分鐘後每分鐘導入一次的街塵樣本逐漸完全混合於環境氣候箱，濃度則緩等地隨時間呈穩定的增加。

四、結論與建議

4.1 結論

綜合前述有關通風空間中氣懸街塵移除之六種通風型態環境氣候箱實驗量測的結果得以下幾點結論。

1. 根據實驗結果顯示，台灣北部都市(古亭測站)與郊區(菜寮測站)，氣懸街塵對數常態分布之幾何平均粒徑分別為 1.01 ± 0.03 及 $1.06 \pm 0.02 \mu\text{m}$ ，幾何標準偏差分別為 2.59 ± 0.04 及 2.62 ± 0.03 ，街塵主要構成為 PM_{2.5}，PM_{2.5}/PM₁₀ $\approx 90\%$ 。
2. 根據實驗結果顯示，位移式及短循環式通風系統之累積濃度分別為 $73.77 \pm 3.78 \sim 223.71 \pm 13.49$ 及 $97.88 \pm 6.49 \sim 311.84 \pm 18.13 \mu\text{g m}^3$ ，因此，位移式通風系統氣懸街塵移除較短循環式通風系統有效率。
3. 實驗結果顯示，位移式或短循環式通風系統之進風區間移除效果較佳，當通風量為 $210 \pm 5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ (空氣交換率為 $1.04 \pm 0.02 \text{ h}^{-1}$)，移除氣懸街塵的效率較通風量為 $105 \pm 3 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ (空氣交換率為 $0.52 \pm 0.01 \text{ h}^{-1}$) 佳。

4.2 建議

對本研究所探討通風空間中室內氣懸微粒移除試驗，有以下幾點建議。

1. 由於北台灣地區街塵主要構成為 PM_{2.5}，後續之研究，可針對 PM_{2.5} 之室內/室外相關性及人體暴露濃度的推估。
2. 除瞭解街塵微粒之物理特性，如粒徑分布、濃度等，後續的研究可對室內氣懸微粒化學性質成分進行研析，追蹤污染來源，進而管制，以降低室內氣懸微粒濃度。並進行居室現場室內/外之量測實驗，建立全尺寸實驗與縮尺環境氣候箱轉換之相關係數。
3. 由於濕度對街塵微粒濃度的影響頗鉅，設計環境氣候箱實驗時，濕度控制，以降低對實驗成果的影響，除實驗室的溫濕度控

- 制外，尤其空氣傳輸系統若使用馬達時，需加裝集水器以減少濕氣，加長實驗時間。
4. 為維持較佳居室空氣品質，對通風量及通風系統等通風控制策略進行相關之研究，使研究成果能廣泛運用於日常生活中。

參考文獻

1. Ackermann-Liebrich, U. A., P. H. Leuenberger, J. Scwartz, C. H. Schindler, C. H., Monn, and SAPALDIA. Team. 1997. Lung function and long term exposure to air pollutants in Switzerland. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 155: 122-129.
2. Chen, W. C., C. S. Wang, and C. C. Wei. 1997. An assessment of source contributions to ambient aerosols in Central Taiwan. *J. Air Water Manage. Associ.* 47: 501-509.
3. Cheng, M. T., and Y. I. Tsai. 2000. Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas. *Sci. Total Environ.* 263: 101-114.
4. Chiou, S. F., and C. J. Tsai. 2001. Measurement of emission factor of road dust in a wind tunnel. *Powder Tech.* 118: 10-15.
5. Dockery, D. W., and J. D. Spengler. 1981. Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. *Atmos. Environ.* 15: 335-343.
6. Dockery, D. W., C. A. Pope, and X. Xu. 1993. An association between air pollution and mortality in six US cities. *N. Engl. J. Med.* 329: 1753-1759.
7. Fang, G. C., C. N. Chang, N. P. Wang, Y. S. Wu, V. Wang, P. P. C. Fu, C.D. Cheng, and S. C. Chen. 2000. The study of TSP, PM2.5-10 and PM2.5 during Taiwan Chi-Chi Earthquake in the traffic site of central Taiwan, Taichung. *Chemosphere* 41: 1727-1731.
8. Fang, G. C., C. N. Chang, Y. S. Wu, P. P. C. Fu, D. G. Yang, and C. C. Chu. 1999a. Characteristic of chemical species in PM2.5 and PM10 aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan. *Sci. Total Environ.* 234: 203-212.
9. Fang, G. C., C. N. Chang, Y. S. Wu, P. P. C. Fu, K. F. Chang, and D. G. Yang. 1999b. The characteristic study of TSP, PM2.5 in the rural site of central Taiwan. *Sci. Total Environ.* 232: 177-184.
10. Lanchenmyer, C. and G. M. Hidy. 2000. Urban measurements of outdoor-indoor PM2.5 concentrations and personal exposure in the deep south. Part I pilot study of mass concentrations for nonsmoking subjects. *Aerosol Sci. and Technol.* 32: 34-51.
11. Lebowitz, M. D., G. Corman, O. Rourke and C. J. Holberg. 1984. Indoor-Outdoor air pollution, allergen and metrological monitoring in an Arid Southwest area. *J. Air Pollution Control Association* 34: 1036-1038.
12. Liao, C. M., M. Y. Huang, J. W. Chen, and T. J. Chang. 2002. Removal dynamics of airborne road dust in a ventilated airspace. *J. Environ. Sci. Health A* 37(6):1009-1027.
13. Miguel, A. G., G. R. Cass, M. M. Glovsky, and J. Weiss. 1999. Allergens in paved road dust and airborne particles. *Environ. Sci. Tech.* 33: 4159-4168.
14. Pope, A., and D. W. Dockery. 1992. Acute health effects pf PM10 pollution on symptomatic and asymptomatic children. *Am. Rev. Respir. Dis.* 145: 1123-1128.
15. Repace, J. L. 1982. Proceeding of indoor air pollution. *Environ. Int.* 8: 21-36.
16. Rogge, W. F., L. M. Hildemann, M. A. Mazurek, and G. R. Cass. 1993. Sources of fine organic aerosol. 3. road dust, tire debris and Organometallic break lining dust: roads as sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 27: 1892-1904.

17. Schwartz, J. 1993. Particulate air pollution and chronic respiratory disease. *Environ. Res.* 62: 7-13.
18. Seaton, A., W. MacNee, K. V. Donaldson, and D. Godden. 1995. Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet* 345: 176-178.
19. Yang, H. H., C. F. Chiang, W. J. Lee, K. P. Hwang, and E. M. Y. Wu. 1999. Size distribution and dry deposition of road dust PAHs. *Environ. Int.* 25(5): 585-597.
20. Yang, H. H., W. J. Lee, L. J. Theen, and C. W. Kua. 1997. Particle size distributions and PAH content of road dust. *J. Aerosol Sci.* 28: S125-S126.

收稿日期：民國 94 年 4 月 13 日

修正日期：民國 94 年 5 月 18 日

接受日期：民國 94 年 5 月 18 日