

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 環境學科

052602

「無印良品」—雷射影印機逸散之懸浮微粒時序
特徵與改善方法

學校名稱： 國立中央大學附屬中壢高級中學

作者：	指導老師：
高二 陳炫亦	甘禮安
高二 羅學佳	
高二 丁竣翊	

關鍵詞： 雷射影印機、室內空氣品質改善、懸浮微粒

摘要

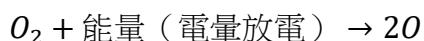
雷射影印機運作時，可能會釋放細懸浮微粒與臭氧，成為人體呼吸道健康的一大隱憂。本研究將探討雷射影印機的懸浮微粒與臭氧逸散特性，測量其排放的時序特徵，企圖減少影印機排放之汙染物。我們在一密閉壓克力箱中設置家用雷射影印機並在其影印過程中透過儀器量測其汙染物的數值變化，並在過程中排解干擾數值結果的環境變因（如：水氣）。亦透過數值模擬分析懸浮微粒的擴散情形，以提供改善建議。依據研究結果，本研究確立了懸浮微粒與臭氧在影印過程中的逸散，而加裝濾網後能使汙染的情形得到改善。電腦模擬結果則顯示，影印機的設置應距離呼吸道至少 0.3 公尺以上，則可有效降低人體吸入PM_{2.5}之風險。

壹、前言

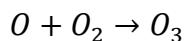
一、研究動機

影印機已成為現代生活中不可或缺的設備，無論是在學校、公司還是家庭中，都能見其蹤影。然而，影印機長時間運作時，經常散發出微弱的塑膠味或類似魚腥的氣味，影印店牆壁也常見黑色沉積物，這些現象可能與影印機加熱過程中釋放的汙染物有關。Kagi et al. (2007) 指出，影印機在運作時會排逸散來自紙張與碳粉的揮發性有機化合物（VOCs），其成核作用可形成二次氣膠。此外，機內零件亦可能逸散碳粉微粒，且較老舊的機型，缺乏防止碳粉逸散的裝置，相較於全新的機型，使用過的雷射影印機釋放的微粒濃度更高。雷射影印機是透過電暈放電（corona）的方式，使碳粉可以有效的附著在紙張表面。然而，Chang et al. (2002) 指出，在電暈處理的過程中，會提供足夠能量讓空氣中的氧氣發生電離與斷鍵，進而形成臭氧，反應式如下：

1. 氧分子被激發或鍵裂，形成原子態氧



2. 原子態氧在與周圍氧分子結合產生臭氧



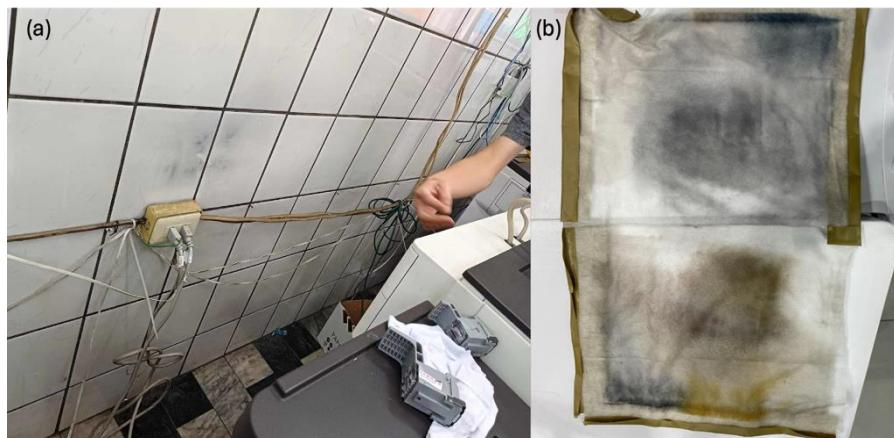
Wang et al. (2012) 則透過實驗證實，影印機所逸散出的臭氧和 VOCs 會發生反應，也會形成二次氣膠。

近年來，人們長時間處在室內，室內空氣品質（IAQ）對健康的影響日益受到重視。影

印機運作時會釋放懸浮微粒、VOCs 與臭氧等污染物，影響 IAQ。短期暴露可能引發咳嗽、喉嚨不適等呼吸道刺激反應；長期則可能導致氣喘、心血管疾病、肺部炎症甚至纖維化（Ewers & Nowak et al., 2006）。國際癌症研究機構（IARC）亦將雷射影印機逸散之汙染物如黑碳歸為 Group 2B 可能致癌因子，長期吸入恐增加肺癌風險。臭氧亦可能造成急性呼吸道症狀及慢性肺功能改變（Lippmann, 1989）。

影印機在運作時，周圍的溫度與濕度會隨時間上升，這些環境條件的變化可能會影響微粒的沉降與擴散（Hinds, 1999），進而影響微粒在空氣中的停留時間（Koivisto et al., 2010）。

儘管數位化逐漸普及，影印機仍在文件、書籍與報告製作中扮演重要角色，紙張的使用短期內難以完全取代。然而，根據我國現行法規，並未對影印機逸散汙染物設有具體規定，且在公共場所中亦未針對影印機機體逸散之微粒進行相關規範。



圖一：(a)位於影印店，影印機出風口位置的牆壁上，發現有明顯的黑色沉積物。(b)放置在影印機出風口處一段時間後的濾網，觀察到有許多碳粉附著。（圖片來源：研究者自行拍攝）

二、研究目的

本研究旨在探討雷射影印機於運作過程中產生的懸浮微粒（PM_{2.5}）與臭氧之逸散特性，並評估減排方法的可行性。在可控的室內環境下，本研究將測量影印機運作時的顆粒物和臭氧濃度及其隨時間變化的特性，並利用小型空間模型模擬典型室內環境，以評估影印機逸散之汙染物對室內空氣品質的影響。此外，本研究亦透過數值分析模型，模擬密閉空間內懸浮微粒濃度隨時間的變化趨勢與分布特徵，進一步分析懸浮微粒的停留時間與擴散行為，綜合提出有效的減排策略。

研究目的：

- (一) 分析雷射影印機逸散之PM_{2.5}與臭氧濃度在時序上的變化趨勢與特徵
- (二) 探討環境溫濕度變化對懸浮微粒濃度與擴散行為的影響
- (三) 測試改善影印機逸散之方法（安裝濾網、開空氣清淨機）的成效性
- (四) 透過數值模擬分析懸浮微粒在實驗環境中的擴散與沉降行為

貳、研究設備及器材

一、儀器設備

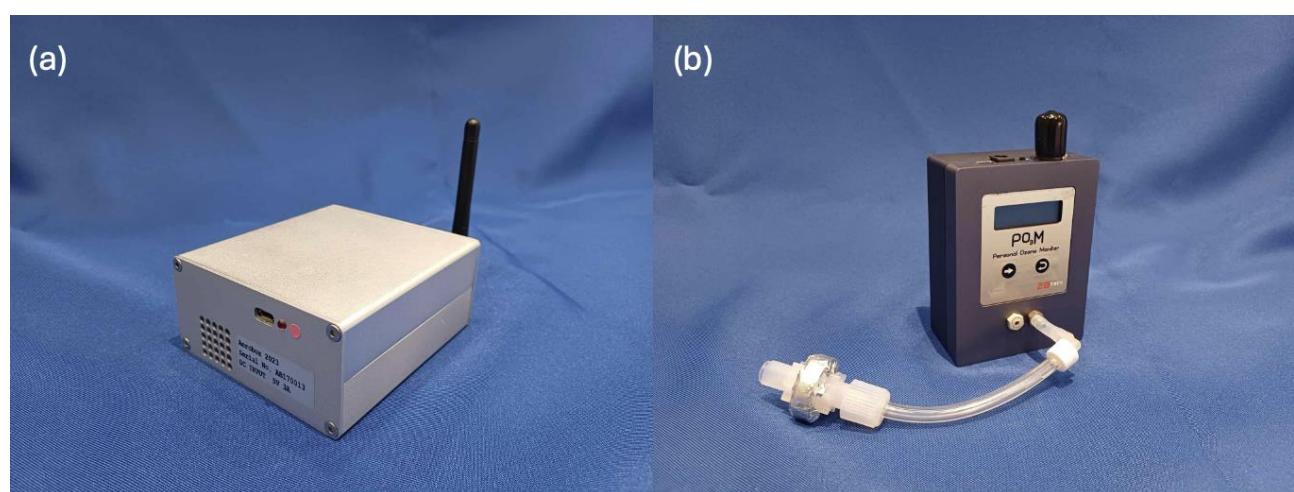
本研究選用微型懸浮微粒感測器（Aerobox）與臭氧監測儀（POM）作為儀器設備。

Aerobox採用米氏散射（Mie Scattering）作為懸浮微粒的量測原理，即透過雷射照射空氣中的懸浮顆粒物，使其散射，並在特定角度收集散射光。透過分析散射光強度變化，能以13秒的時間解析度測量0.3μm至10μm範圍內的懸浮微粒的重量濃度（μg/m³）。其量測項目包括溫度、相對濕度、PM_{2.5} 及二氧化碳（CO₂）濃度。

POM則是採用紫外線吸收法，利用臭氧分子在 254 奈米波長下的強吸收特性進行量測。其內部具有兩個吸收池與光源，分別測量並比較有去除臭氧的空氣和未處理的空氣，再透過 Beer-Lambert Law計算出臭氧濃度。

表一：Aerobox量測物與其量測單位時間（資料來源：研究者自行繪製）

	Common Parameter	Unit	Time resolution
Aerobox	Temperature	°C	13 sec
	Relative Humidity	%	
	PM _{2.5}	μg/m ³	
	CO ₂	ppm	



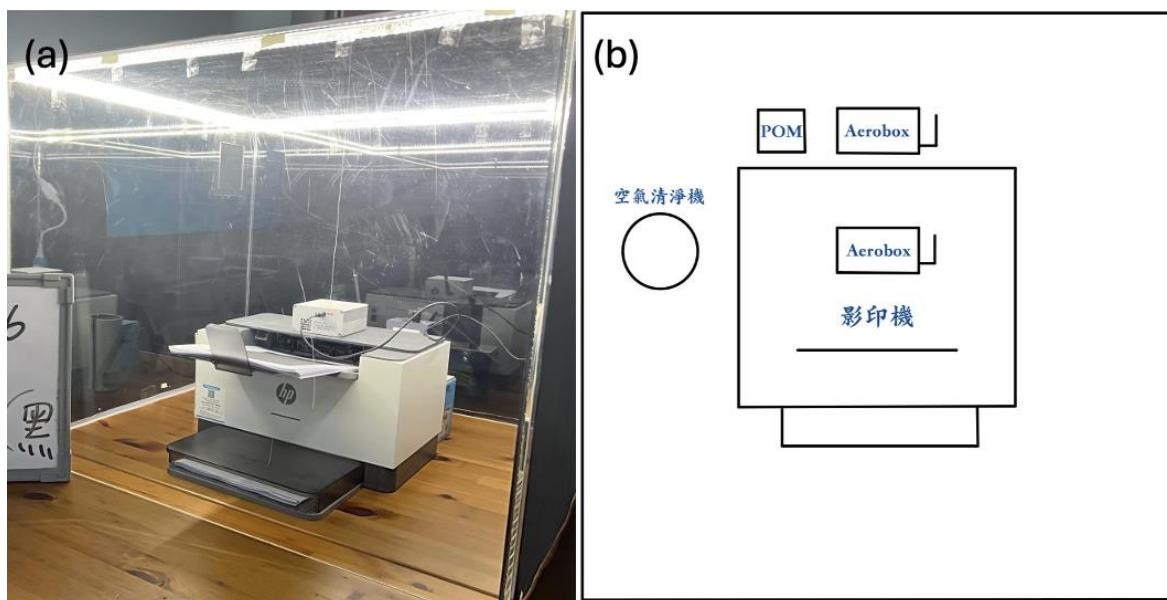
圖二：(a) 本研究所使用的儀器 Aerobox；(b) POM。（圖片來源：研究者自行拍攝）

影印機在運作時，其內部電子元件與加熱元件會產生熱量，內建的散熱風扇會將機體內熱空氣排出，以防止機器過熱。然而，這些排出的熱氣可能夾帶汙染物例如懸浮微粒與揮發性有機物（TVOC）。影印機透過加熱滾筒（定影單元） 將碳粉固定於紙張上，過程中也可能使出紙口逸散部份懸浮微粒。

根據上述原理，本研究假設影印機的主要懸浮微粒排放點為「出風口」與「出紙口」，並據此規劃感測器的擺放位置。實驗中，我們將一台 Aerobox（編號 A）擺放於影印機上方的出紙口，另一台 Aerobox（編號 B）與一台 POM 臭氧監測儀則放置於影印機背後的出風口，以量測懸浮微粒與臭氧濃度變化。

二、實驗密閉空間

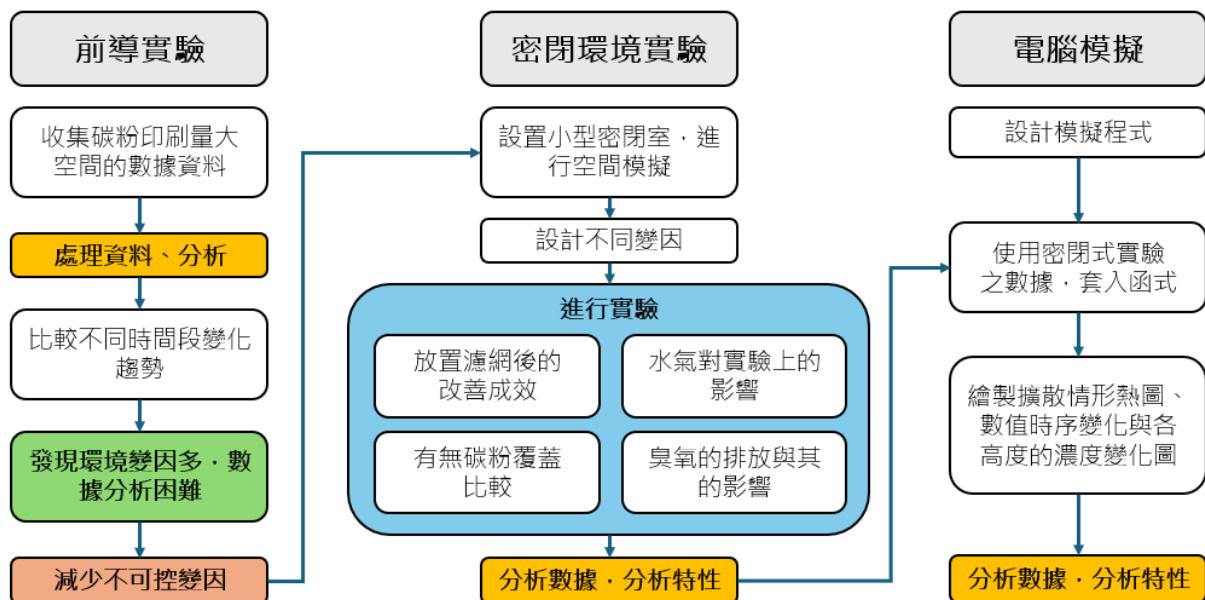
本研究以一個尺寸為 $0.75 \times 0.75 \times 0.6\text{ m}$ 的壓克力箱，作為模擬懸浮微粒行為的密閉實驗環境，箱體側邊預留孔洞以供線材通過，並以膠帶封住洞口，隔絕外部空氣，減少外部汙染物的干擾，確保量測結果僅反映影印機運作時產生的懸浮微粒及臭氧。



圖三：(a)大小為75*75*60公分的密閉壓克力箱；(b) 密閉壓克力箱內的儀器配置，其中影印機擺放於壓克力箱的正中央。（圖片來源：研究者自行拍攝）

參、研究過程或方法

本研究的研究流程主要分為三大架構：影印店初步實驗、閉密壓克力箱的量測、電腦模擬懸浮微粒的擴散。



圖四：研究架構流程圖（圖片來源：研究者自行繪製）

實驗一：影印店量測（初步測試）

本研究的初步測試地點選在大學旁的影印店，量測期間為 8 月 19 日至 8 月 25 日（其中 8 月 24 日為周六休息日），營業時間為 08:00 - 21:00。由於該影印店位於學區，影印量穩定，且營業時間長，有助於觀察不同時間區間的 $PM_{2.5}$ 變化趨勢，並確保數據變動的趨勢明顯。

本研究假設， $PM_{2.5}$ 濃度在營業時段將上升，而在營業結束後及公休日則下降，並維持低濃度的穩定狀態。測試結果顯示， $PM_{2.5}$ 濃度確實在營業時段上升，且在一週內呈現出規律的時序變化。然而，由於影印店環境中存在多種不可控因素，例如影印量每天不一樣；門的開關及冷氣運作影響室內氣流，可能加速或減少懸浮微粒的沉降；室外 $PM_{2.5}$ 濃度變化可能影響室內背景濃度，使影印機逸散的貢獻度難以準確推估等。由於影印店環境變因複雜，難以準確評估影印機對 $PM_{2.5}$ 逸散的影響，因此本研究進一步設計密閉壓克力箱測試，以排除外部影響，確保數據的可信度。

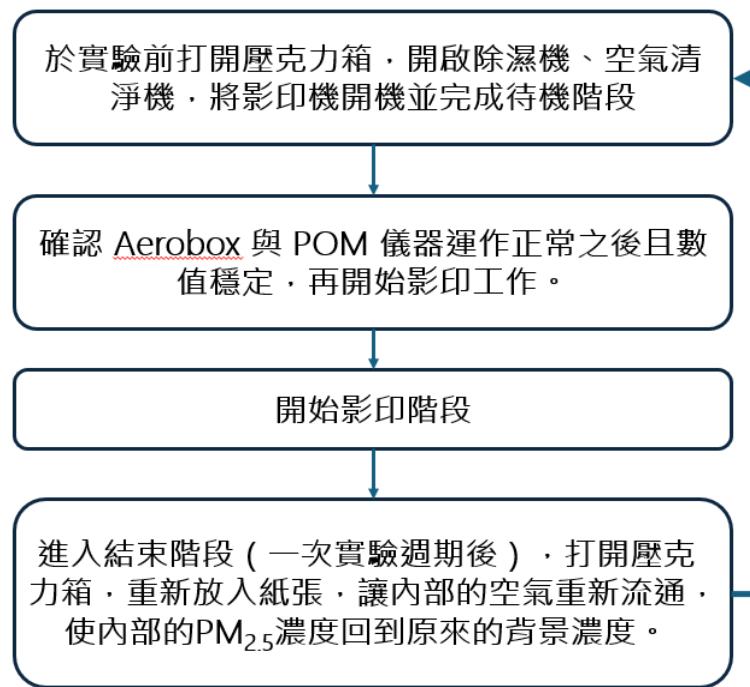


圖五：影印店內部空間，設有四台雷射式影印機（圖片來源：研究者自行拍攝）

實驗二：密閉空間實驗

本研究的儀器設置與研究方法，參考 Koivisto et al. (2010) 和 Naoki Kagi et al. (2007) 針對影印機於模擬辦公室中逸散的研究。本研究使用 HP LaserJet m211dw 黑白雷射影印機。根據製造商提供的數據，該機型於 2024 年製造，列印速度為 29 頁/分鐘，待機至啟動 7 秒，解析度 600×600 dpi，機體尺寸 355×279.5×205 mm。本研究於實驗期間，Aerobox 不間斷地測量數據。本研究在實驗週期分為待機、影印與結束三個階段。具體步驟如下：

- 待機階段：紙盤裝載 A4 規格 (210×297 mm)，選用 Double A PREMIUM $80\text{g}/\text{m}^2$ 影印紙。影印機預熱至運行溫度，使碳粉定影滾筒達到最佳工作狀態。
- 影印階段：透過軟體啟動影印機，執行 100 張連續影印，影印過程結束時，即進入下一階段。
- 結束階段：影印完成後，持續監測 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度 10 分鐘，以記錄濃度變化趨勢。



圖六：實驗週期流程圖（圖片來源：研究者自行繪製）

本研究針對影印機操作時產生的 $PM_{2.5}$ 與臭氧的逸散設計實驗，包含影印機懸浮微粒與臭氧排放驗證、水氣影響測試與改善措施評估。

實驗二-1：影印 5% 黑色覆蓋的紙張

1. 實驗目的：確認影印機逸散的 $PM_{2.5}$ 主要來自碳粉，並量測其上升幅度。
2. 實驗假設： $PM_{2.5}$ 濃度主要來自碳粉，影印含碳粉的紙張將導致 $PM_{2.5}$ 濃度上升，且每次影印的數值變化應具有一致性。
3. 影印紙張：5% 碳粉覆蓋（根據藍天使標章，單色影印機覆蓋率為 5%）
4. 影印張數：100 張
5. 影印次數：同樣的100 張紙重複影印 4 次。

實驗二-2：影印 0% 碳粉覆蓋的紙張（白紙）

1. 實驗目的：本實驗為實驗二-1 的對照組，影印無碳粉覆蓋的紙張，驗證 $PM_{2.5}$ 濃度變化是否來自碳粉逸散。
2. 實驗假設：影印無碳粉的白紙不會造成 $PM_{2.5}$ 濃度上升
3. 影印紙張：0% 碳粉覆蓋（白紙）
4. 影印張數：100張
5. 影印次數：同樣的100張紙列印4次

實驗二-3：水氣干擾測試（熱水產生水滴）

1. 實驗目的：探討水氣干擾對 $PM_{2.5}$ 測量的影響，驗證 Aerobox 是否將小水滴誤判為懸浮微粒。
2. 實驗假設：若 Aerobox 會誤判小水滴，則 $PM_{2.5}$ 數值應上升。
3. 量測方式：於測量儀器旁放置一盆熱水，觀察 $PM_{2.5}$ 濃度變化。

實驗二-4：影印三次白紙+一次 50% 黑色覆蓋的紙張

(文後所述的影印白色為0%碳粉印刷，黑色為有碳粉印刷的)

1. 實驗目的：排除紙張內水分蒸發對 $PM_{2.5}$ 濃度的影響，使測得的 $PM_{2.5}$ 變化主要來自影印機逸散，並同時觀測臭氧濃度的變化。
2. 實驗假設：影印白紙（0% 碳粉覆蓋）時紙張內的水分因高溫蒸發，重新凝結後的小水滴可能影響 $PM_{2.5}$ 測值。重複影印 3 次同樣的 100 張白紙以降低水氣的影響後，影印 1 次黑色碳粉覆蓋紙張，則 $PM_{2.5}$ 濃度變化應來自碳粉逸散，且影印過程中，臭氧濃度應會有所上升。
3. 影印紙張：0% 碳粉覆蓋（白紙）+ 50% 碳粉覆蓋（黑色碳粉）
4. 影印張數：100張
5. 影印次數：同樣的100張紙列印4次（3次全白、1次50%黑）

實驗二-5：加裝濾網在影印機出風口（改善方法之測試）

（一）加裝濾網

1. 實驗目的：實驗設計如實驗二-4，在影印機的主要排放點（出風口）加裝等級 H13 的 HEPA 濾網（能有效過濾直徑大於 0.3 微米的微小粒子，其過濾效率達到 99.97% 以上），並透過計算 $PM_{2.5}$ 總排放質量與排放率，評估濾網對 $PM_{2.5}$ 與臭氧的減排效果。
2. 實驗假設：若 HEPA 濾網能有效降低 $PM_{2.5}$ 逸散，則影印黑色碳粉覆蓋的紙張時， $PM_{2.5}$ 濃度上升幅度應顯著降低，而對臭氧可能沒有顯著的改善。
3. 影印紙張：0% 碳粉覆蓋（白紙）+ 50% 碳粉覆蓋（黑色碳粉）
4. 影印張數：100 張
5. 影印次數：同樣的 100 張紙列印 4 次（3 次全白、1 次 50% 黑）

6. 驗證濾網成效之方法：透過計算影印過程中的 $PM_{2.5}$ 總排放質量與排放率，比較放濾網前及放濾網後的差異。

排放率：

$$Q = \frac{M}{\Delta t}$$

- Q：排放率 ($\mu g/s$)
- M：總排放質量 (μg)
- t：時間 (s)

總排放質量：

$$M = \sum_{i=1}^N C_i \times V \times \Delta T$$

- C_i ：第 i 次測量的 $PM_{2.5}$ 濃度 ($\mu g/m^3$)
- V：壓克力箱體積 (m^3)
- T：測量間隔 (Aerobox 量測時間解析度 13 秒)
- N：總測量次數

(二) 開空氣清淨機

1. 實驗目的：實驗設計如實驗二-4，在壓克力箱內部放置具有活性碳濾網的空氣清淨機，並透過計算 $PM_{2.5}$ 總排放質量與排放率，評估空氣清淨機對 $PM_{2.5}$ 與臭氧的減排效果。
2. 實驗假設：若空氣清淨機能有效降低 $PM_{2.5}$ 逸散，則影印黑色碳粉覆蓋的紙張時， $PM_{2.5}$ 濃度上升幅度應 顯著降低，而因本研究使用之空氣清淨機具有活性碳濾網，能吸附或催化分解臭氧，故其可能對臭氧濃度有一定程度的下降。
3. 影印紙張： 0% 碳粉覆蓋 (白紙) + 50% 碳粉覆蓋 (黑色碳粉)
4. 影印張數：100 張
5. 影印次數：同樣的 100 張紙列印 4 次 (3 次全白、1 次 50% 黑)

實驗三：電腦模擬 模擬粒子三維擴散情形

本研究透過數值模擬，分析影印機釋放的 $PM_{2.5}$ 在密閉空間中的擴散與沉降行為。模擬過

程中，採用三維高斯擴散方程描述PM_{2.5}在空間中的傳播機制，並進一步考慮重力對懸浮微粒沉降的影響。此外，根據實驗測得的溫度與濕度變化數據轉化成矩陣型是代入擴散與沉降的程式參數，PM_{2.5}的濃度以使模擬結果更符合實際實驗環境。

三維高斯擴散方程：

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right)$$

- C(x,y,z,t)：空間中每個座標PM_{2.5}的濃度（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。
- (x₀,y₀,z₀)：汙染源位置。
- $\sigma = \sqrt{2Dt}$ ：擴散範圍的標準差。
- D：擴散係數（ m^2/s ），表示粒子在空氣中的擴散速度。
- M：實驗測得的PM_{2.5}的總排放質量（ μg ）

本研究假設雷射影印機為穩定汙染點源，均勻釋放氣膠粒子，並使用菲克第二定律（Fick's Second Law）來描述PM_{2.5}濃度隨時間變化的過程：

菲克第二定律：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\nabla^2 C$$

- $\nabla^2 C$ ：濃度場的拉普拉斯運算，表示濃度的空間變化率。由於擴散涉及多個方向上的物質傳輸，其來量化某一點濃度相對於周圍點的變化率。

拉普拉斯運算：

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

考慮到溫度變化會影響 PM_{2.5} 的擴散與沉降行為，本研究考慮以下兩個機制：

(一) 擴散係數與溫度的關係

擴散係數通常隨溫度上升而增加，可由斯托克斯-愛因斯坦方程（Stokes-Einstein relation）描述：

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r_p}$$

- D：擴散係數（ m^2/s ）

- k_B : 波茲曼常數 (1.380649×10^{-23} J/K)
- T : 溫度 (K)
- η : 空氣動力黏滯係數 (Pa · s)
- r_p : 粒子半徑 (m)

空氣的黏度會隨溫度變化，本實驗使用薩瑟蘭定律 (Sutherland's Law) 來描述這種關係：

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + C}{T + C}$$

- μ : 溫度 T 下的黏度
- μ_0 : 參考溫度 T_0 下的黏度
- C : Sutherland 常數，空氣 ≈ 120 K

(二) 沉降速率與溫度的關係

沉降速率受空氣黏滯度影響，而空氣黏滯度隨溫度變化，當溫度升高時，空氣黏滯度增加，降低了粒子的沉降速率。由斯托克斯定律 (Stokes' Law) 描述：

$$V_s = \frac{2}{9} \frac{(\rho_p - \rho_{air}) g r_p^2}{\eta}$$

- V_s : 沉降速率 (m/s)
- ρ : 粒子密度 (kg/m^3)
- ρ_{air} : 空氣密度 (kg/m^3)，本研究設為 $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$
- g : 重力加速度 ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)
- r_p : 粒子半徑 (m)

濕度會影響微粒的質量，在高濕度條件下，顆粒可能改變其沉降速率。這個公式來自 κ -Köhler 理論 (Petters & Kreidenweis, 2007)，用於描述水蒸氣對氣溶膠的吸附影響，Köhler 理論原是用來描述雲凝結核 (CCN) 的成長，其核心是拉午爾定律 (Raoult's law) 和開爾文效應 (Kelvin effect) 的結合，但計算變得複雜，本實驗使用前人計算出的 κ 參數 (Hygroscopicity parameter)，使用通用變數來描述顆粒的吸濕性，簡化電腦分析的過程：

顆粒的粒徑增長因子 G(H)之簡化公式：

$$G(H) = \left(1 + \kappa \frac{H}{100 - H} \right)^{1/3}$$

- $G(H)$: 顆粒在相對濕度 H 下的粒徑增長因子（無因次）。
- κ : 氣膠溶解度參數 (Hygroscopicity parameter)，用來描述顆粒吸濕能力
 - 疏水性顆粒（如碳黑） $\kappa \approx 0.1$ 。
- H : 當前相對濕度 (%)。

當顆粒因濕度沉降速率變快時，其新的沉降速率 $V_s(H)$ 可表示為：

$$V_s(H) = V_{s0} \times G(H)^2$$

- $V_s(H)$: 在相對濕度 H 下的沉降速率。
- V_{s0} : 基準濕度 $H_{typical}$ (設為 50 %) 下的沉降速率。

本研究將結合上述公式計算粒子擴散過程，繪製 $PM_{2.5}$ 濃度隨時序變化三維分布圖，呈現粒子在密閉空間內的擴散情形。並繪製粒子擴散時序圖，分析影印機逸散懸浮粒子的運動軌跡及沉降變化。並將結果使用 python 繪製。

肆、研究結果

一、影印店量測（初步測試）



圖七：實驗一，影印店一週的 $PM_{2.5}$ 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，8/19 到 8/25，週六為休息日(8/24)（圖

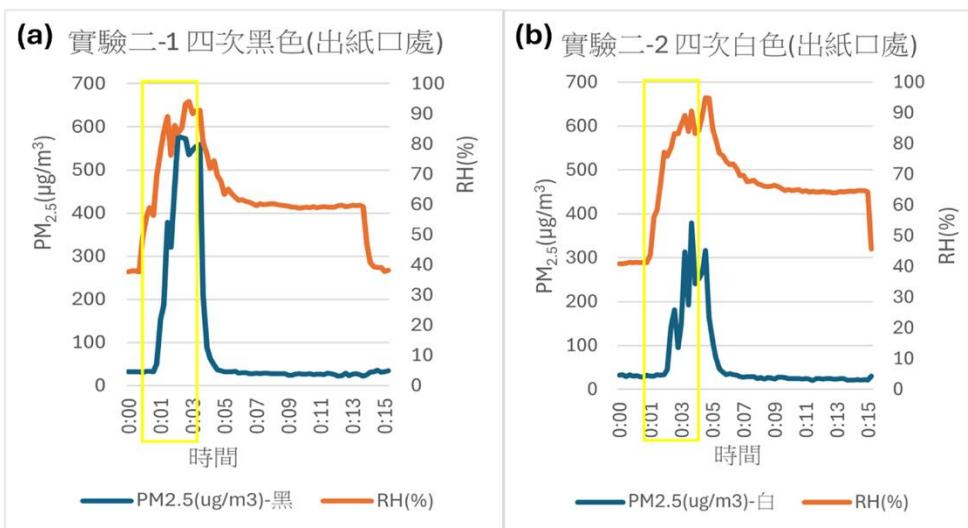
片來源：研究者自行繪製）



圖八：實驗一，8/19 到 8/15(除 8/24)工作日 PM_{2.5} 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，營業時間為早上 8 點至晚上 9 點（圖片來源：研究者自行繪製）

如圖七所示，影印店內工作日（8/19 - 8/25），PM_{2.5} 濃度的變化呈現一定的規律變化，而在周六休息日（8/24）時濃度則相對較低。進一步分析工作日日內變化趨勢（如圖八），發現 PM_{2.5} 濃度在營業開始前（上午 8 點前）上升，營業期間（08:00 - 21:00）緩降並維持相對穩定，而營業結束（21:00）後逐漸下降。

二、紙張有無碳粉影印的差異



圖九：實驗二-1，影印四次 5% 碳粉覆蓋紙張後，(儀器 A，於出紙口) PM_{2.5} 濃度和相對濕度變化，藍線為 PM_{2.5} 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，橘線為相對濕度(%)變化，黃色方框部分為影印階段（圖片來源：研究者自行繪製）



圖十：進行實驗二-1 與實驗二-2 時觀測到壓克力箱箱壁上附著大量小水滴（圖片來源：研究者自行拍攝）

在實驗二-1 中，根據圖九(a)，儀器 A (置於出紙口) 測得的 $PM_{2.5}$ 濃度有上升的情形，約會上升至 $580(\mu g/m^3)$ ，相對溼度在影印過程中也有上升的趨勢。

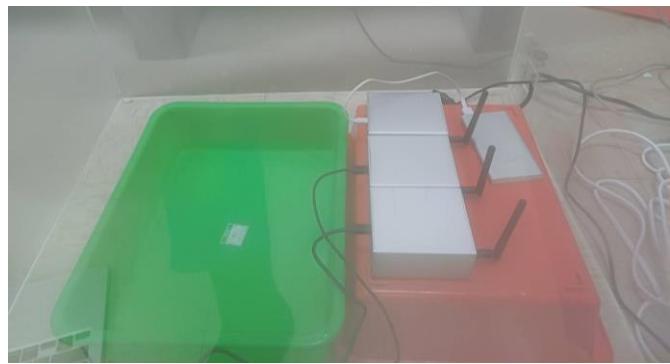
在實驗二-2 中，根據圖九(b)，影印 0% 碳粉覆蓋的白紙時， $PM_{2.5}$ 濃度變化趨勢與影印 5% 碳粉覆蓋的紙張時相似， $PM_{2.5}$ 濃度上升至約 $380(\mu g/m^3)$ 。

此外，根據圖十，影印過程中觀察到箱內產生大量霧狀細小水滴凝結於壓克力箱壁上。

三、水滴粒子對儀器量測的影響



圖十一：實驗二-3，擺放一盆熱水時 $PM_{2.5}$ 濃度的變化（圖片來源：研究者自行繪製）



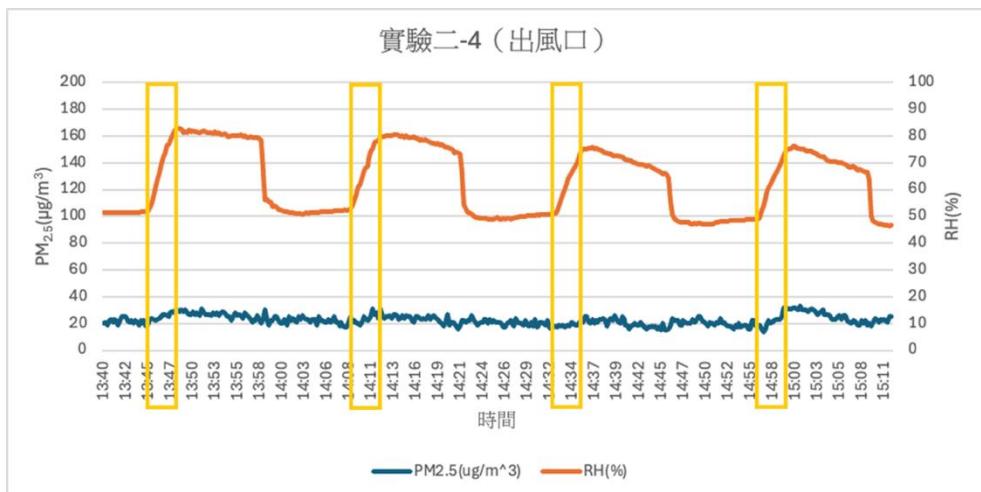
圖十二：實驗二-3，實驗架設（圖片來源：研究者自行拍攝）

根據圖十一，當在密閉壓克力箱內儀器旁放置一盆熱水時，PM_{2.5} 濃度數值顯著上升，最高測得值約為 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

四、不同儀器擺放位置的數值特徵差異



圖十三：實驗二-4，影印三次白紙一次 50% 碳粉覆蓋紙張後（儀器 A，於出紙口）PM_{2.5} 濃度和相對濕度變化，藍線為 PM_{2.5} 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，橘線為相對濕度(%)變化，黃色方框部分為影印階段（見表三）（圖片來源：研究者自行繪製）



圖十四：實驗二-4，影印三次白紙一次 50% 碳粉覆蓋紙張後（儀器 B，於出風口）PM_{2.5} 濃度和相對濕度變化，藍線為 PM_{2.5} 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，橘線為相對濕度(%)變化，黃色方框部分為影印階段（見表三）（圖片來源：研究者自行繪製）

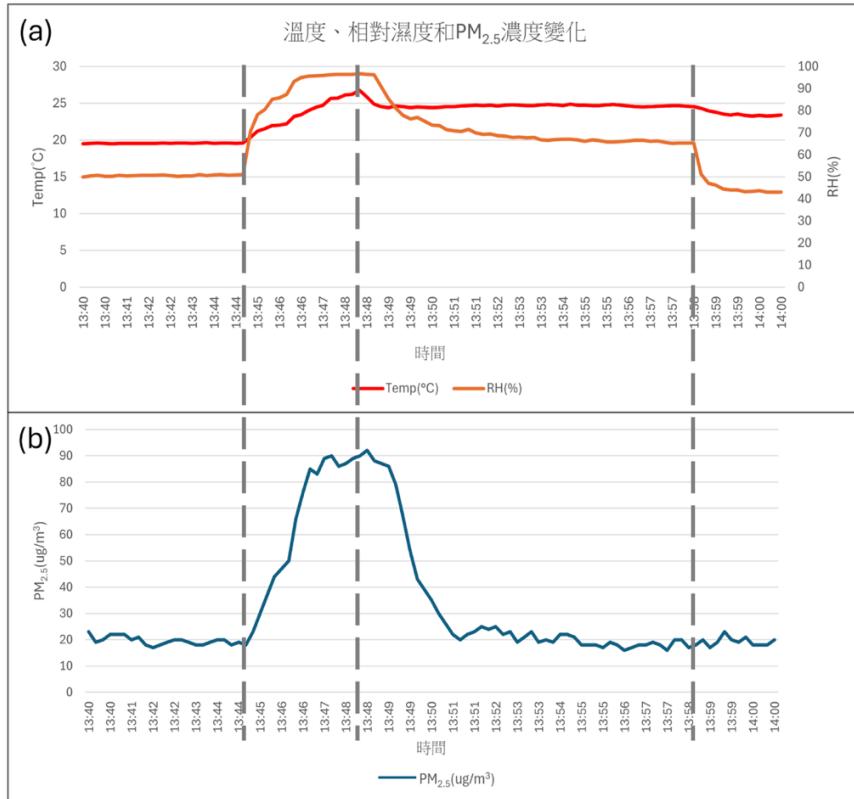
表二：影印開始、結束、打開箱子的時間及碳粉覆蓋率（資料來源：研究者自行繪製）

	開始時間	結束時間	影印時間	開箱時間	關箱時間	印刷紙張
第一次	13:45:00	13:48:24	00:03:24	13:58:24	14:03:24	0%
第二次	14:08:28	14:11:52	00:03:24	14:21:52	14:26:52	0%
第三次	14:32:20	14:35:44	00:03:24	14:45:44	14:50:44	0%
第四次	14:55:57	14:59:21	00:03:24	15:09:21		50%

由上圖十三可知，儀器 A 在前兩次影印階段 PM_{2.5} 濃度明顯上升，但在第三次影印時，濃度變化趨於平穩，第四次影印 50% 碳粉時出現上升。圖十四顯示，儀器 B 在前三次影印階段所量測到 PM_{2.5} 濃度曲線始終維持平緩，無明顯波動，第四次有上升起伏。

進一步對照表三可發現，影印階段內相對濕度皆有規律的變化趨勢，且在影印階段的前期，置於出紙口的儀器 A 相較於置於出風口的儀器 B，濕度有更明顯地上升，隨後趨緩。

五、單次影印週期的溫度、濕度變化特性



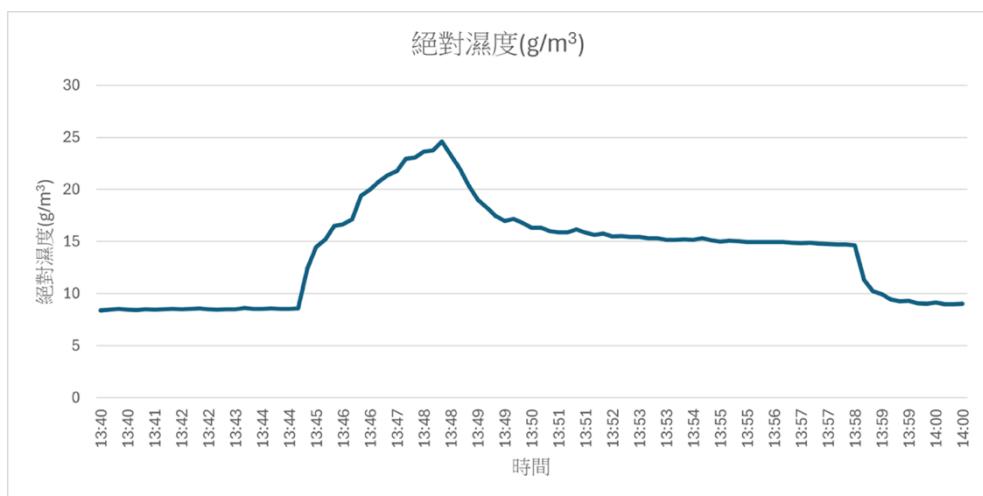
圖十五：取自於實驗二-4 圖十三第一次影印白紙時，（儀器 A，於出紙口）溫度、相對濕度和 PM_{2.5} 濃度變化比較，(a)為溫度和相對濕度變化，藍線為溫度($^{\circ}\text{C}$)變化，橘線為相對濕度

(%)變化，(b)為PM_{2.5}濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，灰色虛線將整段數據分為個四區間，由右至左分別為一至四區間（圖片來源：研究者自行繪製）

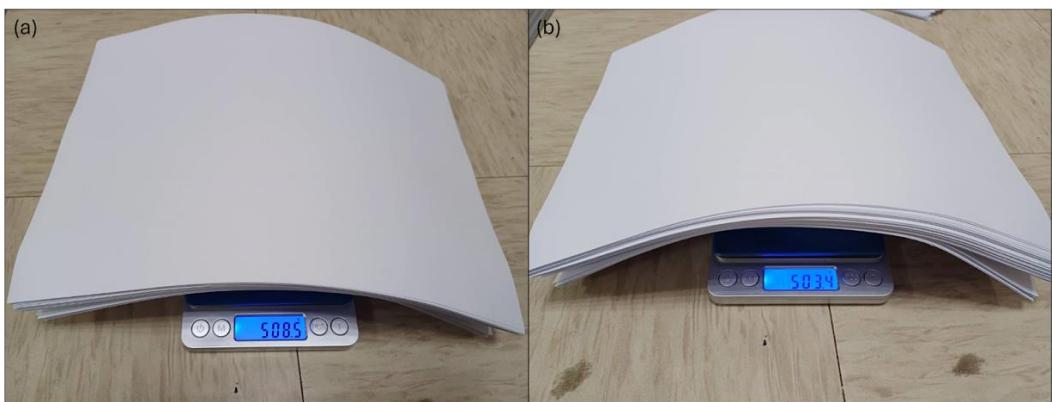
由圖十五和表二得知，第一區間為影印開始前，溫度、相對濕度和PM_{2.5}濃度皆維持穩定。進入第二區間（開始影印）後，PM_{2.5}濃度、溫度與相對濕度均出現上升趨勢，且相對濕度攀升至90%，PM_{2.5}濃度上升至約90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

到了第三區間（影印結束），溫度和相對濕度開始下降，PM_{2.5}濃度也隨後下降。第四區間（打開壓克力箱）時，相對濕度大幅下降，溫度小幅度下降，PM_{2.5}濃度趨於平緩。以實驗週期的整體來看，影印前後的溫度上升，相對濕度下降。

六、確認水滴粒子的來源



圖十六：取自於實驗二-4 圖十三第一次影印白紙時，儀器A(於出紙口)絕對濕度(g/m³)變化
(圖片來源：研究者自行繪製)

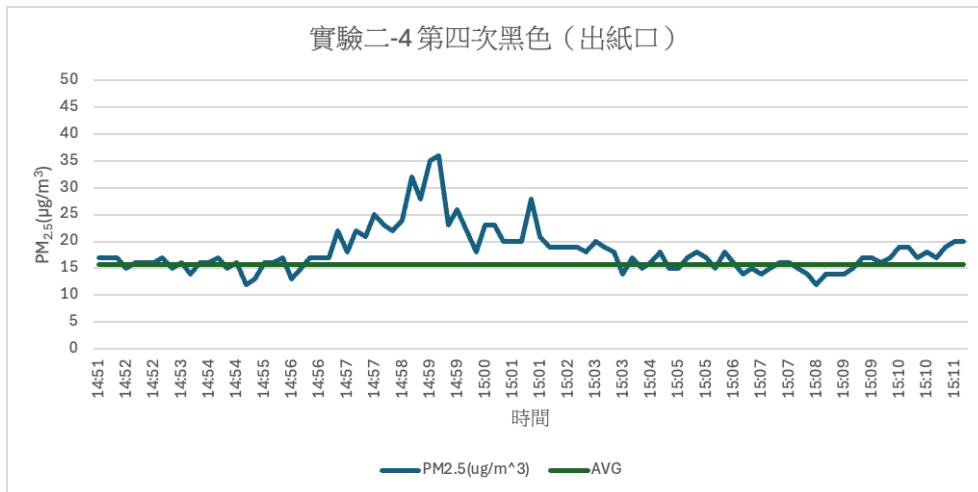


圖十七：實際量測影印前後紙張重量差異，(a)為第一次影印前重量，(b)為第一次影印後重量。(圖片來源：研究者自行拍攝)

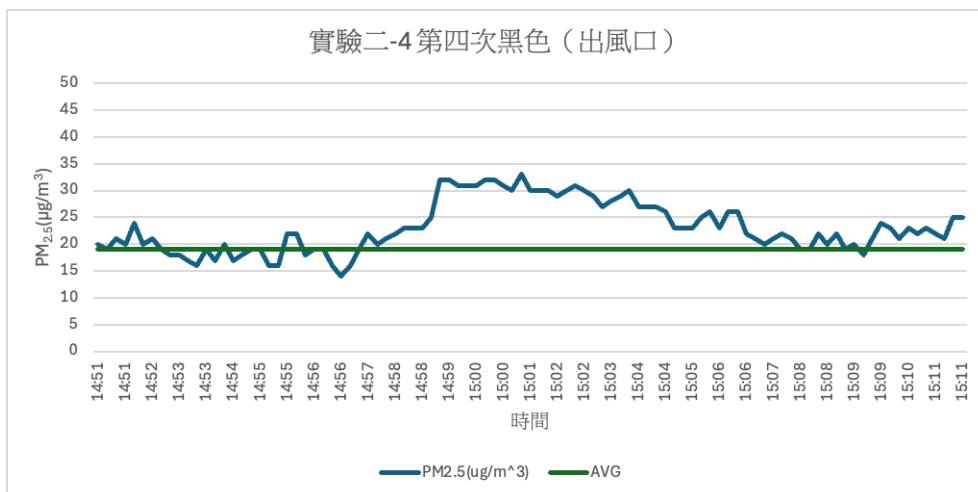
如圖十六所示，絕對濕度的變化趨勢在影印過程中，空間中的水氣含量隨時間上升至峰值，影印後隨之逐漸下降。影印前後，環境中的水氣含量增加約 17 g/m^3 ，顯示影印過程中，確實有額外的水分被釋放至空氣中。

進一步分析紙張的重量變化，如圖十七所示，第一次影印前後，100 張紙的總重量減少了 5.1 克。

七、不同儀器擺放位置於影印碳粉時的 $\text{PM}_{2.5}$ 變化



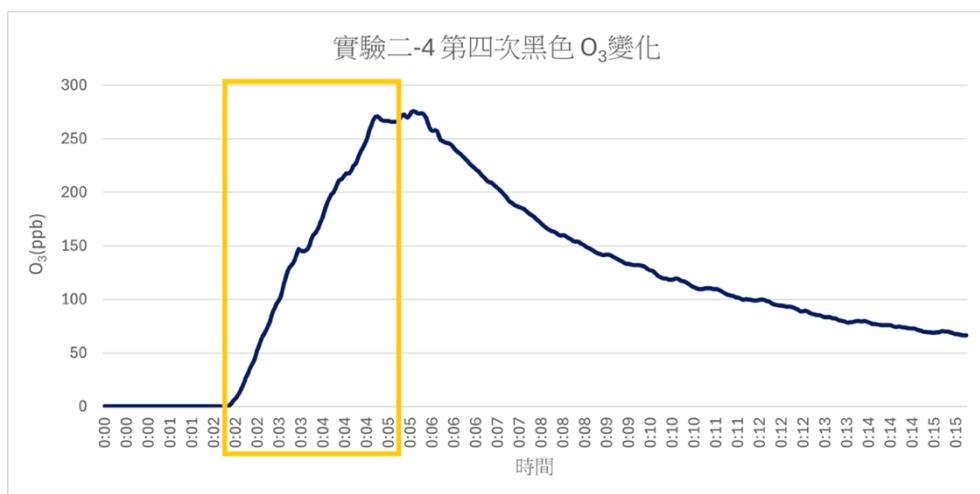
圖十八：取自於實驗二-4 圖十三第四次影印 50% 碳粉覆蓋紙張時，置於出紙口儀器的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度變化比較，藍線為 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，綠線為影印開始前 5 分鐘的背景濃度平均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (圖片來源：研究者自行繪製)



圖十九：取自於實驗二-4 圖十四第四次影印 50% 碳粉覆蓋紙張時，置於出風口儀器的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度變化比較，藍線為 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，綠線為影印開始前 5 分鐘的背景濃度平均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (圖片來源：研究者自行繪製)

圖十八顯示，當影印 50% 黑色碳粉覆蓋的紙張時，儀器 A（出紙口）在影印開始時，PM_{2.5} 濃度相較於背景濃度平均值有明顯上升了約 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，且影印結束後隨即下降。圖十九顯示，在影印過程中，儀器 B（出風口）所量測的 PM_{2.5} 濃度也會相對於背景濃度平均值升高了 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，並且濃度呈現緩慢下降的趨勢。

八、影印碳粉過程中臭氧濃度變化



圖二十：實驗二-4，第四次影印 50% 黑色時臭氧濃度變化。藍色為臭氧濃度(ppb)變化；黃色方框部分為影印階段。(圖片來源：研究者自行繪製)

如圖二十所示，當影印 50% 黑色碳粉覆蓋的紙張時，影印初期臭氧濃度快速上升，影印結束後則緩慢下降。

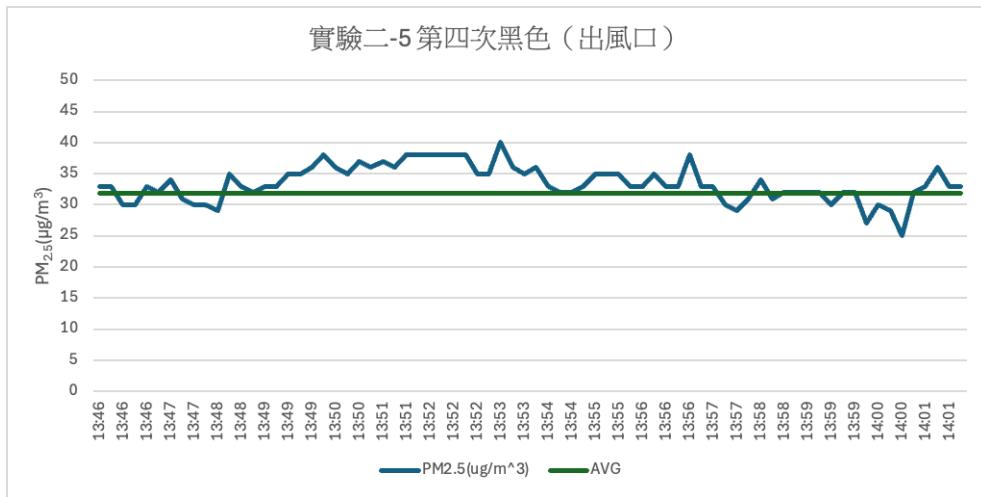
九、改善方法（放濾網）

(一) 加裝濾網

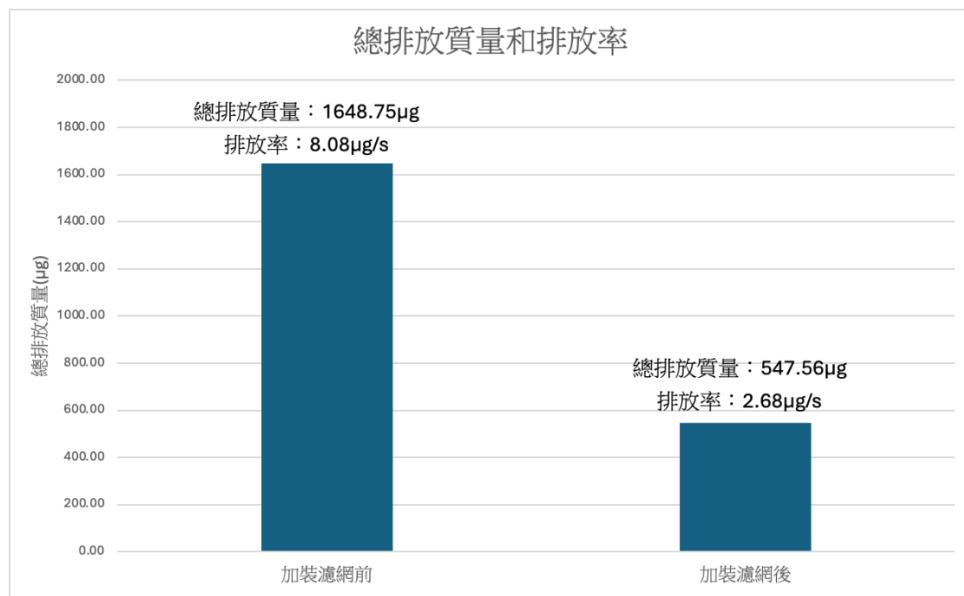


圖二十一：實驗二-5，影印時加裝濾網，第四次影印 50% 碳粉覆蓋紙張時，儀器 A(於出紙

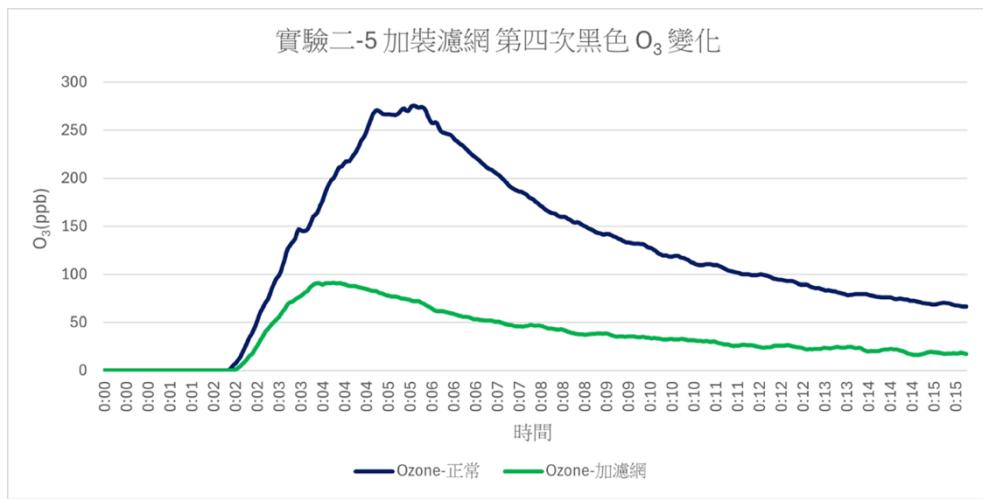
口)相對濕度和 PM_{2.5}濃度變化比較，藍線為 PM_{2.5}濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，綠線為影印開始前 5 分鐘的背景濃度平均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)（圖片來源：研究者自行繪製）



圖二十二：實驗二-5，影印時加裝濾網，第四次影印 50% 碳粉覆蓋紙張時，儀器 B(於出風口)相對濕度和 PM_{2.5} 濃度變化比較，藍線為 PM_{2.5} 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)變化，綠線為影印開始前 5 分鐘的背景濃度平均值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)（圖片來源：研究者自行繪製）



圖二十三：出風口處，加裝濾網前後懸浮微粒的總排放質量和排放率（資料來源：研究者自行繪製）



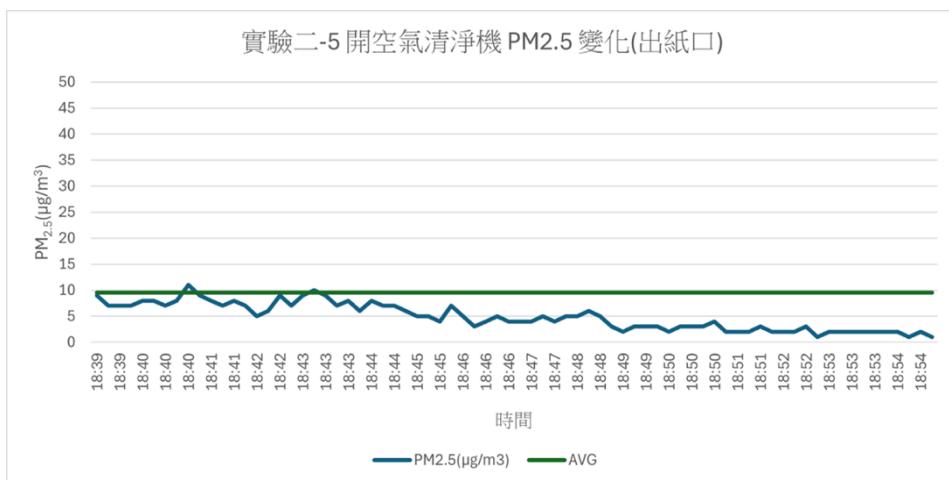
圖二十四：實驗二-5，影印時加裝濾網，第四次影印 50% 黑色時，臭氧濃度變化。藍色為臭氧濃度(ppb)；綠色為加裝濾網後的臭氧濃度(ppb)。(圖片來源：研究者自行繪製)

根據圖二十一的數據，儀器 A (出紙口) 在影印開始時，PM_{2.5} 濃度相較於背景濃度平均值上升了約 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，且影印結束後，濃度隨即下降，與圖十八未加濾網時結果相似。圖二十二顯示，儀器 B (出風口) 所量測的 PM_{2.5} 濃度相對於背景濃度平均值升高了 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，並且濃度呈現緩慢下降的趨勢。

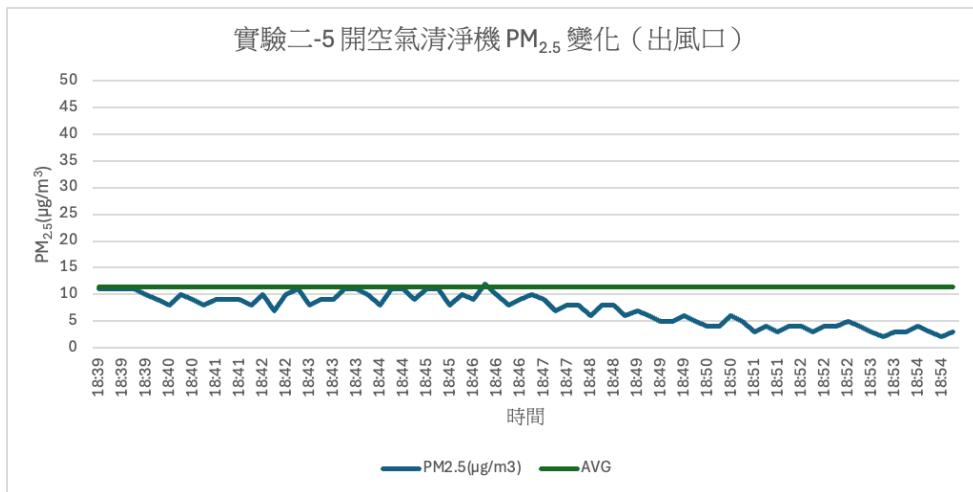
根據圖二十三，加裝濾網後，影印過程中的排放率和總排放質量顯示明顯的下降。影印前後的總排放質量從 $1648.75 \mu\text{g}$ 下降至 $547.56 \mu\text{g}$ ，排放率從 $8.08 \mu\text{g}/\text{s}$ 下降至 $2.68 \mu\text{g}/\text{s}$ 。

圖二十四顯示，在加裝濾網之情況下，臭氧濃度有明顯的下降，最高值僅達 90 ppb。

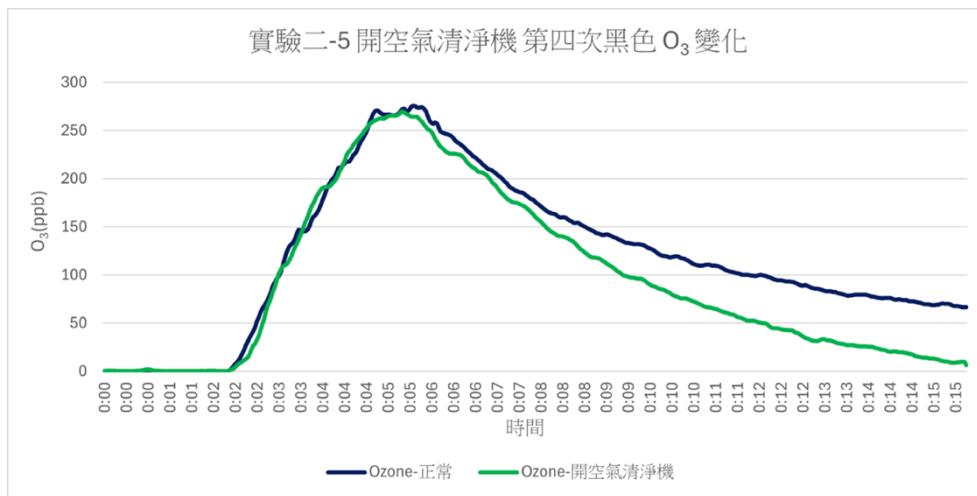
(二) 開空氣清淨機



圖二十五：實驗二-5，影印時開空氣清淨機，第四次影印 50% 黑色時，儀器 A (出紙口) 之 PM_{2.5} 濃度變化。藍色為 PM_{2.5} 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)；綠色為影印開始前 5 分鐘的背景濃度平均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。(圖片來源：研究者自行繪製)



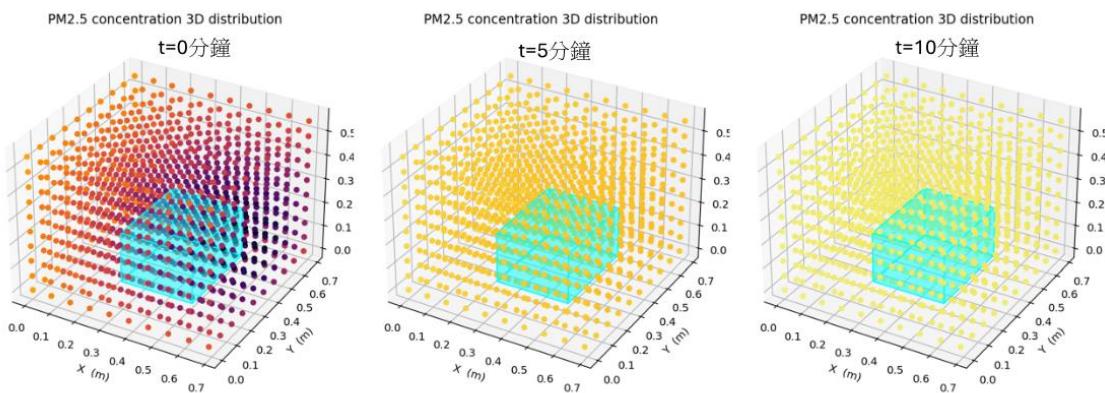
圖二十六：實驗二-5，影印時開空氣清淨機，第四次影印 50% 黑色時，儀器 B（出風口）之 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度變化。藍色為 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)；綠色為影印開始前 5 分鐘的背景濃度平均值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。(圖片來源：研究者自行繪製)



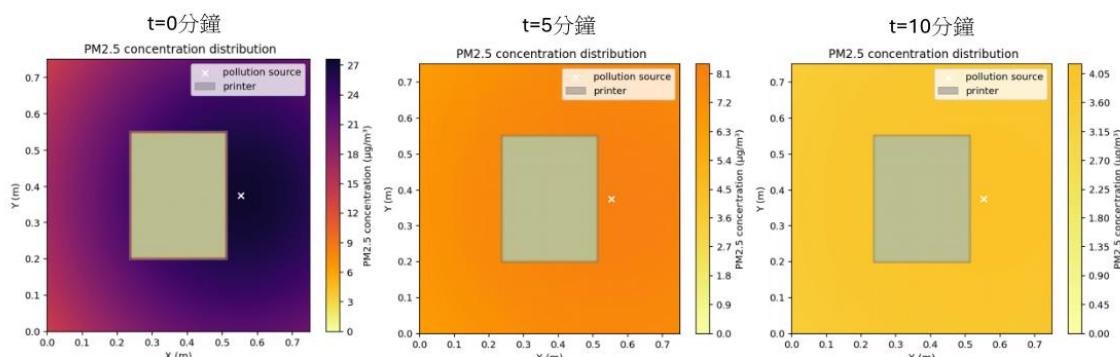
圖二十七：實驗二-5，影印時開空氣清淨機，第四次影印 50% 黑色時，臭氧濃度的變化。藍色為未開空氣清淨機的臭氧濃度(ppb)；綠色為開空氣清淨機後的臭氧濃度(ppb)。(圖片來源：研究者自行繪製)

根據圖二十五和二十六的數據顯示，開空氣清淨機後，不論釋出紙口還是出風口的 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度皆會相對於平均下降，大約下降 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而根據圖二十七，對於臭氧的排放，開空氣清淨機並不會讓汙染量降低，都會排放出約 270 ppb，但開空氣清淨機之後，臭氧的濃度下降較快，約 10 分鐘就可以回到原本的背景濃度。

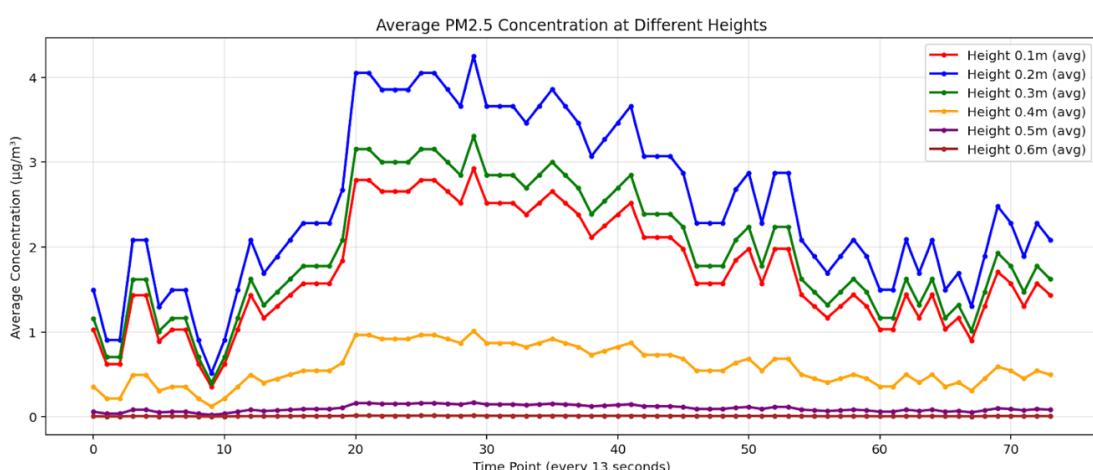
十、電腦程式模擬



圖二十八：實驗二-4，電腦程式模擬，第四次影印 50% 黑色時，影印階段後 0、5、10 分鐘內的空間內懸浮粒子濃度分布 3D 熱圖。備註：每個熱圖顏色對照表 colorbar 最大值與最小值不同。(圖片來源：研究者自行繪製)



圖二十九：實驗二-4，電腦程式模擬，第四次影印 50% 黑色時，距地面 0.2 公尺影印階段後 0、5、10 分鐘內空間內懸浮粒子濃度分布 2D 切片熱圖。備註：每個熱圖 colorbar 的最大值與最小值不同。(圖片來源：研究者自行繪製)



圖三十：實驗二-4，電腦程式模擬，第四次影印 50% 黑色時，實驗階段內二維切片濃度熱圖的各高度的平均濃度數值折線圖。距地面 0.1 公尺（紅線）、0.2 公尺（藍線）、0.3 公尺（綠線）、0.4 公尺（黃線）、0.5 公尺（紫線）、0.6 公尺（棕線）。距地面 0.2 公尺為模擬中影印機排放源高度。（圖片來源：研究者自行繪製）

伍、討論

一、影印店量測

透過影印店的初步測試，研究確認了PM_{2.5}濃度在營業期間的變化趨勢。根據圖七，工作日的PM_{2.5}濃度明顯高於休息日，圖八則顯示，白天營業時段PM_{2.5}濃度高於晚上。結果顯示，影印店內的PM_{2.5}濃度確實與營業時間有關，推測工作日與白天時段的影印活動釋放之懸浮微粒會造成PM_{2.5}上升。而開始營業前的PM_{2.5}上升，根據後續實驗二的結果，推測是因為營業開始前影印機開始預熱，加熱空間中的水氣而造成小水滴的產生，進而讓PM_{2.5}濃度上升。

由於影印店內存在大量影響測量的變因，如影印量、室內通風程度、顧客人數和其他汙染源等，這些因素使得濃度變化難以準確追蹤並分析，因此本研究於密閉壓克力箱中進行後續實驗，以影印機作為空間中唯一排放源。

二、紙張有無碳粉影印的差異

在實驗二-1中，影印了100張覆蓋5%黑色的紙張。根據圖九所示，從出紙口的儀器A數據中發現，影印後PM_{2.5}濃度出現上升，與實驗假設相符。作為對照，實驗二-2以相同方式影印 100 張白色紙張。假設PM_{2.5}濃度的上升主要來自影印黑色紙張時碳粉粒子的釋放，影印白色紙張時，PM_{2.5}濃度應不會有顯著的變化。然而影印白色紙張時的 PM_{2.5}濃度變化趨勢與影印黑色紙張時相近，與原先假設不符。

此外，如圖十，在影印過程中，觀察到箱內產生大量細小水滴，導致內部呈現肉眼可見的霧狀，且從圖九中也發現相對濕度有上升的情形。就此推測，本研究所使用的儀器在測量PM_{2.5}濃度時，可能將這些小水滴誤判為懸浮微粒，進而影響測量結果。

三、水滴粒子對儀器量測的影響

由圖十一可知，本研究使用的儀器Aerobox在測量PM_{2.5}濃度時，會將小水滴納入測量範圍。為進一步確認此影響，就儀器的測量原理，是透過米氏散射的原理來測量粒子濃度，此

技術無法區分固體顆粒與液滴，因此水滴同樣會被儀器偵測並計入PM_{2.5}濃度，影響最終測量結果。

絕對濕度的定義為每立方公尺空氣中所含水蒸氣的質量：

$$\rho_w := \frac{e}{R_w T}$$

- ρ_w 為絕對濕度 (g/m³)
- e 為實際水氣壓 (Pa)
- $R_w=461.5\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 為水蒸氣氣體常數
- T 為溫度 (K)

絕對濕度的增加可以證明在此箱內有額外的水氣補充進空氣中，從圖十六中得知在每立方公尺中大約增加了 17 克，所以在此實驗之壓克力箱中大約增加 5.7 克，當我們量測影印紙在影印前後的重量，如圖十七，發現在第一次減少了5~7克，且在影印結束後，紙張的觸感會有明顯的不同，從影印前的滑順感到影印後的乾燥粗糙感，故本研究推測箱內額外水氣的來源主要是紙張所含水分提供。

四、不同儀器擺放位置的數值特徵差異

從實驗二-2影印100張白色四次的結果中，發現在影印第三次後PM_{2.5}濃度已無明顯的上升，所以將實驗設計為影印三次白色後印黑色，而本研究主要關注的是第四次影印黑色時所逸散的懸浮微粒，雖然在第四次影印時可能還有少許小水滴產生，但推測所量測到的會以影印機逸散出的懸浮微粒為主。

由上圖十三和圖十四可得知，置於出紙口的儀器所量測到的PM_{2.5}濃度在前兩次有明顯高值，相對於置於出風口的一直都很平穩，由此可知，小水滴產生的地方主要在出紙口的地方，進而導致儀器A會先有明顯的高值，再逐漸趨緩，而儀器B沒有明顯高值。

圖十八與圖十九顯示，出紙口的 PM_{2.5} 濃度相較於背景濃度平均值上升幅度較大，約增加了 20 μg/m³，而出風口則上升約 10 μg/m³，推測皆為影印時逸散之懸浮微粒所致。然而，出紙口處的濃度下降較快，這可能是因為影印過程中，紙張上殘留部分未完全附著的碳粉，導致 PM_{2.5} 濃度短時間內上升，並在影印結束後下降。另一方面，影印機的排熱風扇位於出風口，隨著機器排熱，機殼內殘留的碳粉微粒會逐漸逸散至外部環境。亦有部分懸浮微粒可

能來自影印機所逸散之臭氧與 VOCs 的二次氣膠。

由於出紙口與出風口皆會逸散出懸浮微粒，因此本研究提出的改善方法是於這兩處放置濾網，以降低微粒逸散量。

此外，在第四次影印有黑色覆蓋的紙張並且打開壓克力箱後，會從紙張和影印機內部飄出臭味，味道如同前言所述類似魚腥的氣味，推測和為影印機所逸散出的氣體有關。

五、單次影印週期的溫度、濕度變化特性

從圖十五可以得知，第一區間為影印前，溫度、相對濕度和PM_{2.5}濃度都是平穩的。開始影印後進入到第二區間，相對濕度和溫度皆有上升，根據相對濕度的定義，代表箱內裡的實際水氣壓上升，可推得在箱內有額外的水氣提供，而背景的懸浮微粒可做為水氣凝結的凝結核（CCN），所以當相對濕度達約90%時，水氣開始凝結成小水滴，PM_{2.5}濃度開始上升，達到最高點約 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

當進入到影印結束的第三區間時，溫度下降導致飽和水氣壓降低，而相對濕度也下降，顯示出實際水氣壓亦下降許多，推測原因為，影印結束時不再有額外水氣提供，且原產生的水氣已擴散到箱壁周圍，遇冷凝結成小水滴。儀器周圍因不再有水氣凝結，故PM_{2.5}濃度隨後下降至背景濃度平均值。

影印結束後十分鐘，打開壓克力箱，進入第四區間，箱內環境與外面混合，箱壁上小水滴變回水氣，相對濕度大幅下降。以整體來說影印前後的溫度上升，相對濕度下降，可知影印機在影印加熱時，會使環境的溫度上升。

六、影印碳粉過程中臭氧濃度變化

由圖二十顯示出，在影印50%黑色過程之初期，臭氧濃度呈現上升的趨勢，最可達大約270 ppb，影印結束後，濃度則緩慢下降。

七、改善方法成效

(一) 加裝濾網

圖二十一和二十二顯示，放置濾網於出風口處時，PM_{2.5}濃度約下降了5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，為了驗證濾網是否有效，如圖二十三，可以得知，排放率從8.08 $\mu\text{g}/\text{s}$ 下降至2.68 $\mu\text{g}/\text{s}$ ，加裝濾網對於出風口碳粉可以有效地降低影印機懸浮粒子的排出量。

圖二十四則顯示，相較於正常情況，加裝濾網時，臭氧呈現出較低的濃度趨勢，

此實驗結果與先前的假設不符。推測可能原因為，由於加裝濾網會使阻風率上升，使影印機內部之空氣較難流出外部，所以其產生的部分臭氧被滯留在內部，導致空間中的臭氧濃度較低。

（二）開空氣清淨機

圖二十五和圖二十六顯示，開空氣清淨機後，PM_{2.5}呈現下降的趨勢，推測是若以本研究所使用的小型空氣清淨機來講，對於密閉空間是很有效的。

圖二十七則顯示，不論是否開啟空氣清淨機，影印初期臭氧濃度皆會迅速上升並達到相近的高值，但在開啟空氣清淨機時影印結束後，臭氧濃度下降分解的速率相對沒開空氣清淨機時來得快。推測可能原因為，影印初期，空氣清淨機還未有立即的顯著介入，待影印結束後，空間中累積的臭氧會被吸入空氣清淨機，活性碳濾網能快速吸附或催化分解臭氧，形成氧氣或無害的副產物，因此下降速度加快；而沒開空氣清淨機時，臭氧僅能靠自然分解，所以下降較緩慢。

八、電腦模擬成果

（一）二維與三維濃度變化的觀察

從圖二十八中可以看到，在汙染源釋放PM_{2.5}後，懸浮微粒會從源頭開始向外均勻擴散，在影印階段初期在排放源附近形成明顯的高濃度區，形成類似同心圓的濃度分布。並隨著時間延長，濃度逐漸降低並擴散至整個空間。在圖二十九中，除了水平方向的擴散，也可看到懸浮微粒會向上擴散與受重力影響向下沉降集中於較低的高度。

（二）不同高度平均濃度隨時間變化

透過圖三十，每一個時間點的平均濃度變化曲線。結果顯示：

- 接近排放源的高度（如距離影印機出風口 0.1 公尺內）：數值變化最接近排放源測得濃度趨勢，且整體濃度偏高。
- 離排放源一點距離高度（如距離影印機約 0.2 公尺）：濃度也會隨時間上升，濃度較接近排放源的高度略低。
- 較遠離排放源高度（如距離影印機 0.3 公尺以上）：的濃度上升最不明顯，且濃度始終偏低。

陸、結論

一、懸浮微粒逸散時序特徵

本研究驗證雷射影印機在運作時會造成懸浮微粒濃度的上升。研究結果表明，雷射影印機在影印含黑色碳粉覆蓋的紙張時會釋放懸浮微粒（PM_{2.5}），約提升 15~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，這些微粒的主要逸散源為影印機的出風口和出紙口。實驗中測得的 PM_{2.5} 濃度在影印階段初期微粒濃度迅速升高，並且在影印過程結束後，隨著懸浮粒子的擴散與沉降，且在約十分鐘內即可恢復至原背景濃度，且在電腦模擬的成果裡，也看到相似的變化趨勢。

二、水氣影響空間中的濕度

本研究驗證雷射影印機在影印過程裡，紙張中的水分會隨著高溫蒸發並再次凝結為小水滴，進一步影響室內相對濕度的變化，而在本研究實驗過程中，發現這些水滴也會影響 PM_{2.5} 測量儀器的誤判，導致測量誤差。

三、臭氧排放時序特徵

本研究驗證雷射影印機在影印過程中會釋放出臭氧。實驗中測得臭氧濃度在影印階段初期迅速升高，數值上升約 270 ppb，需約 15~20 分鐘才能回到原背景濃度而在影印結束後，濃度緩慢的下降。

四、改善措施成效

本研究證明安裝 HEPA 濾網可以有效改善懸浮微粒的逸散情形。實驗結果顯示，在影印機出風口加裝濾網後，相較未加裝濾網 PM_{2.5} 總排放質量與懸浮微粒排放率的數值下降約 67%，且同時也可使排入空間中的臭氧濃度降低。在開啟具有活性碳濾網的空氣清淨機後，PM_{2.5} 也會有明顯的下降，而臭氧雖然不會有明顯的濃度降低，但可以使濃度下降的速率增快。

五、本研究提供之建議

(一) 本研究使用的家用影印機運作時，為了減少懸浮微粒與臭氧被吸入進人體呼吸道的可能。因此，建議影印過程中避免長時間近距離接觸，或使用濾網阻隔和空氣清淨機，皆能有效的改善汙染情形。

(二) 若使用散射原理的微型懸浮微粒感測器做觀測或量測微粒濃度時，需注意其中是

否有水滴被誤判的影響。

(三) 當使用者操作如本研究所使用之家用型雷射影印設備時，若其呼吸位置距離影印機出風口至少 0.3 公尺以上，則可有效降低吸入 PM_{2.5} 之風險。

六、後續研究方向

(一) 雷射影印機的汙染物排放與粒子擴散情形可能受多種因素影響，包括碳粉類型、設備老化程度。這些因素皆可能影響汙染物的排放量與擴散行為。

(二) 針對水滴影響儀器數據的問題，本研究提出解決方案，以提升測量結果的準確性，使實驗數據更符合研究需求。此外，電腦模擬程式納入環境變數調整，進一步優化模擬結果，使其更貼近實際情況。

(三) 本研究測試並比較不同的改善方案，例如濾網種類、厚度及通風條件等，甚至利用有機金屬骨架捕捉臭氧，分析各方案對汙染物濃度降低的成效，提供最佳化建議。

柒、參考資料及其他

- Chang, J. S., Lawless, P. A., & Yamamoto, T. (2002). Corona discharge processes. IEEE Transactions on plasma science, 19(6), 1152-1166.
- Ewers, U., & Nowak, D. (2006). Health hazards caused by emissions of laser printers and copiers?. GEFAHRSTOFFE REINHALTUNG DER LUFT-GERMAN EDITION-, 66(5), 203.
- Hinds, W. C. (1999). Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons.
- Kagi, N., Fujii, S., Horiba, Y., Namiki, N., Ohtani, Y., Emi, H., ... & Kim, Y. S. (2007). Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers. Building and Environment, 42(5), 1949-1954.
- Koivisto, A. J., Hussein, T., Niemelä, R., Tuomi, T., & Hämeri, K. (2010). Impact of particle emissions of new laser printers on modeled office room. Atmospheric Environment, 44(17), 2140-2146.
- Lippmann, M. (1989). Health effects of ozone a critical review. Japca, 39(5), 672-695.

- Petters, M. D., & Kreidenweis, S. M. (2007). "A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity." *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(8), 1961-1971.
- Wang, H., He, C., Morawska, L., McGarry, P., & Johnson, G. (2012). Ozone-initiated particle formation, particle aging, and precursors in a laser printer. *Environmental science & technology*, 46(2), 704-712.
- 吳宜靜(2019)，室內空污拉警報 辦公室最衰位子在印表機旁，【環保辦公室】系列，環境資訊中心
- 賴品瑀(2016)，整合 PM_{2.5}、臭氧 新式空污指標「AQI」12月1日上路，環境資訊中心

【評語】052602

本作品探討雷射影印機之懸浮微粒與臭氧之逸散特性，經影印店作業環境之量測，到設置小型密閉式之實驗與模擬，再將數據進行模擬分析，得知裝設濾網可以改善污染狀況，且影印機應離呼吸道至少 0.3 公尺以上，可有效降低人體吸入 PM2.5 之風險。研究動機有趣、假設合理、目標清楚、實驗設計具系統性、數據整理清楚、實驗結果聚焦且具建樹性。其他相關建議與可進一步思考問題如下：

1. 專有名詞要先寫英文全名佐以簡寫，後面內文才能以簡寫貫穿全文。
2. 如何區別測得的 PM2.5 為水汽抑或是水汽+碳黑？建議可搭配其他儀器分析目標污染物。
3. 圖譜線條顏色避免選用相同色系，以得到視覺上清楚的差別。
4. 水汽與臭氧生成有無關連？
5. 為何 PM2.5 橫向分佈不明顯？

作品海報

「無印良品」 雷射影印機逸散之懸浮微粒時序特徵與改善方法

雷射影印機運作時，可能會釋放細懸浮微粒與臭氧，成為人體呼吸道健康的一大隱憂。本研究將探討雷射影印機的懸浮微粒與臭氧逸散特性，測量其排放的時序特徵，企圖減少影印機排放之污染物。本研究在一密閉壓克力箱中設置家用雷射影印機，透過儀器量測影印過程中粒徑 0.3~10 微米懸浮微粒與臭氧濃度數值變化與測試改善方法的成效。此外，透過數值模擬分析懸浮微粒的擴散及沉降情形，提供使用建議。本研究發現在影印開始時 PM_{2.5} 與臭氧的濃度有明顯上升，影印結束後約 10~15 分鐘濃度下降至背景濃度。加裝濾網與使用空氣清淨機後，能使污染的情形得到改善。此外也發現空氣中的小水滴會影響儀器的量測。電腦模擬結果顯示，使用影印機時，宜保持至少 0.3 公尺以上的距離，可有效降低人體吸入 PM_{2.5} 之風險。

02

研究動機

影印機常見於各類室內空間，其運作時會釋放懸浮微粒與臭氧等污染物，影響室內空氣品質 (IAQ)。這些污染物可能引發呼吸道不適、肺部炎症，甚至有潛在致癌風險。儘管數位化逐漸普及，影印機仍在文件、書籍與報告製作中扮演重要角色，紙張的使用短期內難以完全取代。本研究旨在探討影印機污染物排放特性及其隨時序變化情形，評估對室內空氣品質的影響，並尋求減少污染的可行對策，以提升室內健康環境品質。



圖一：影印機後方濾網（自行拍攝）

03

研究目的

- (一) 分析雷射影印機逸散之 PM_{2.5} 與臭氧濃度時序變化趨勢與特徵
- (二) 探討溫濕度變化對懸浮微粒濃度與擴散行為的影響
- (三) 測試改善影印機逸散之方法的成效
- (四) 透過數值模擬分析懸浮微粒在實驗環境中的擴散與沉降行為

04

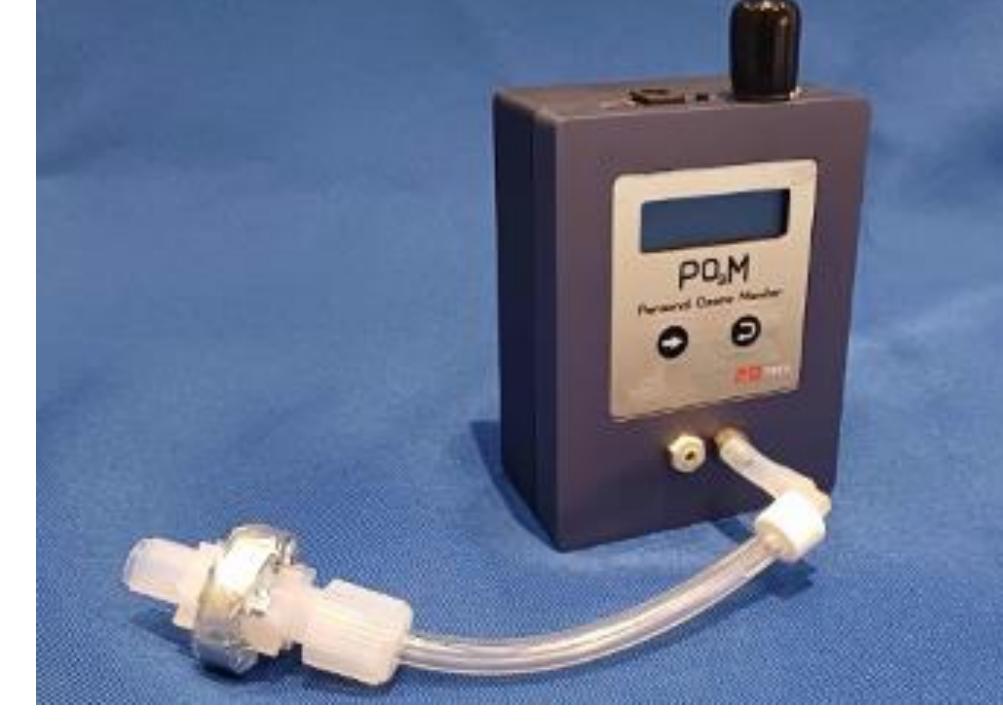
使用儀器

量測懸浮微粒



圖二：Aerobox（自行拍攝）

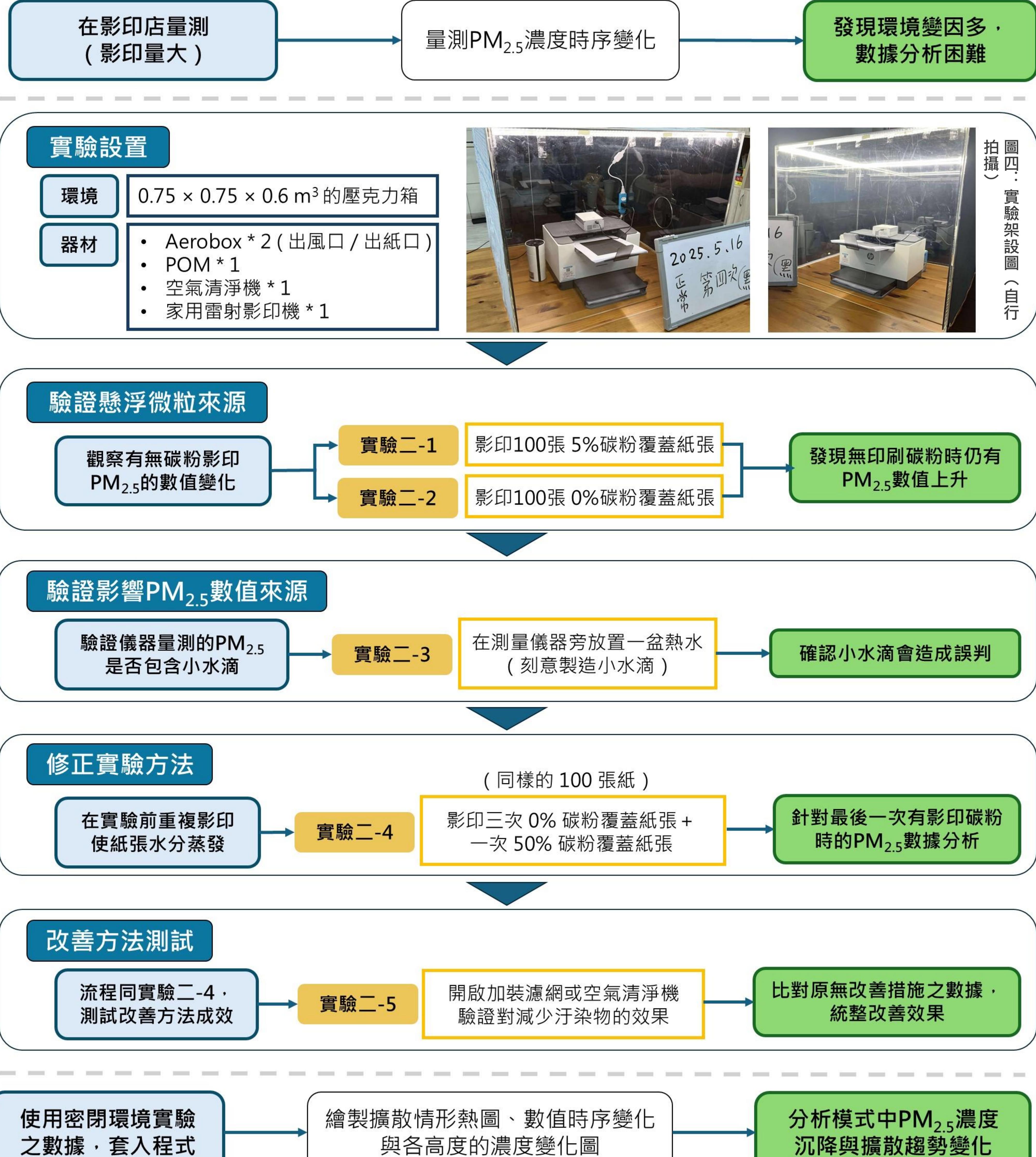
量測臭氧



圖三：POM（自行拍攝）

05

研究過程與方法

前導
實驗密閉
空間
實驗嘗試
分析
微粒
沉降
擴散
情形電腦
模擬

擴散
情形

三維高斯擴散方程

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}\right)$$

菲克第二定律

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C$$

拉普拉斯運算

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

溫度

斯托克斯-愛因斯坦方程

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r_p}$$

薩瑟蘭定律

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \frac{T_0 + C}{T + C}$$

斯托克斯定律

$$V_s = \frac{2(\rho_p - \rho_{air})gr_p^2}{9\eta}$$

濕度

粒徑增長因子G(H)

$$G(H) = \left(1 + \kappa \frac{H}{100 - H}\right)^{1/3} \quad V_s(H) = V_{s0} \times G(H)^2$$

- C : PM_{2.5}濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- (x_0, y_0, z_0) : 汚染源位置
- $\sigma = \sqrt{(2Dt)}$: 擴散範圍的標準差
- D : 擴散係數 (m^2/s)
- M : PM_{2.5}的總排放質量 (μg)
- k_B : 波茲曼常數 (J/K)
- T : 溫度 (K)
- η : 空氣動力黏滯係數 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
- r_p : 粒子半徑 (m)
- C : 薩瑟蘭常數
- V_s : 終端沉降速度 (m/s)
- ρ : 粒子密度 (kg/m^3)
- ρ_{air} : 空氣密度 (kg/m^3)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- κ : 氣膠溶解度參數
- H : 相對濕度 (%)

06

研究結果與討論

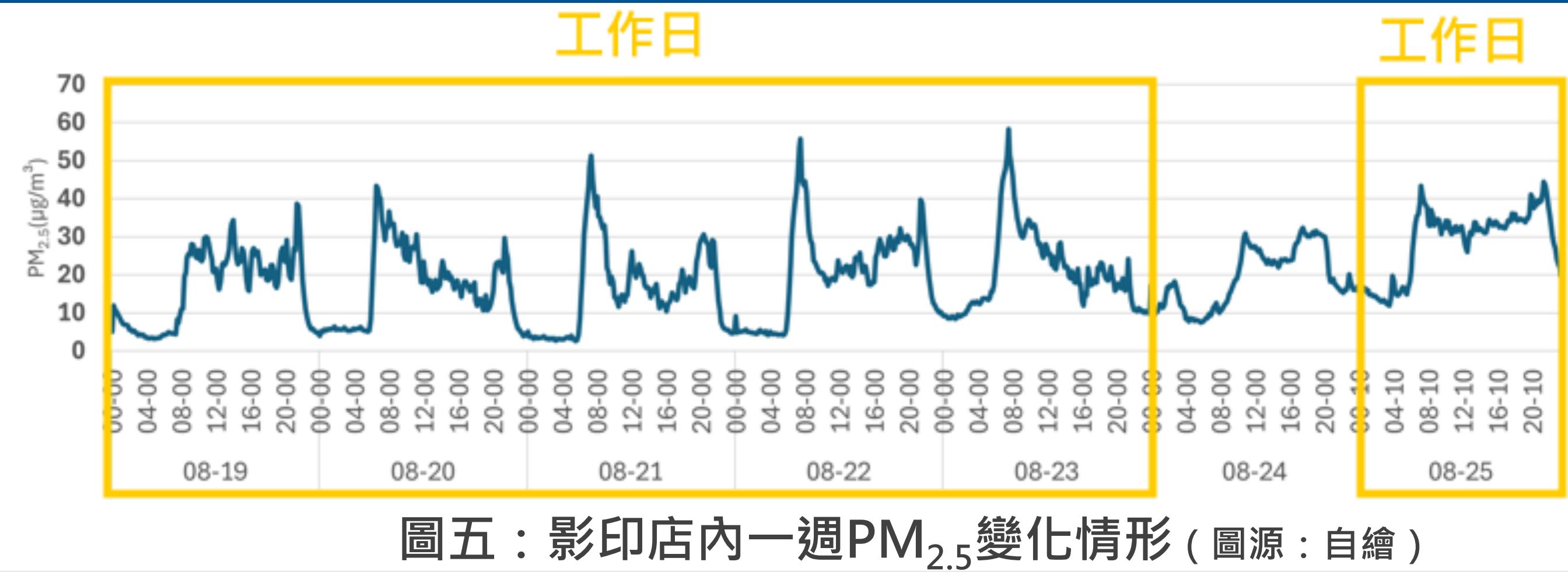
一、前導實驗

目的

確認影印機運作是否會造成PM_{2.5}上升。

小結

在白天營業時間，影印機的運作會造成PM_{2.5}濃度的上升，呈現規律變化。



圖五：影印店內一週PM_{2.5}變化情形（圖源：自繪）

二、密閉空間實驗

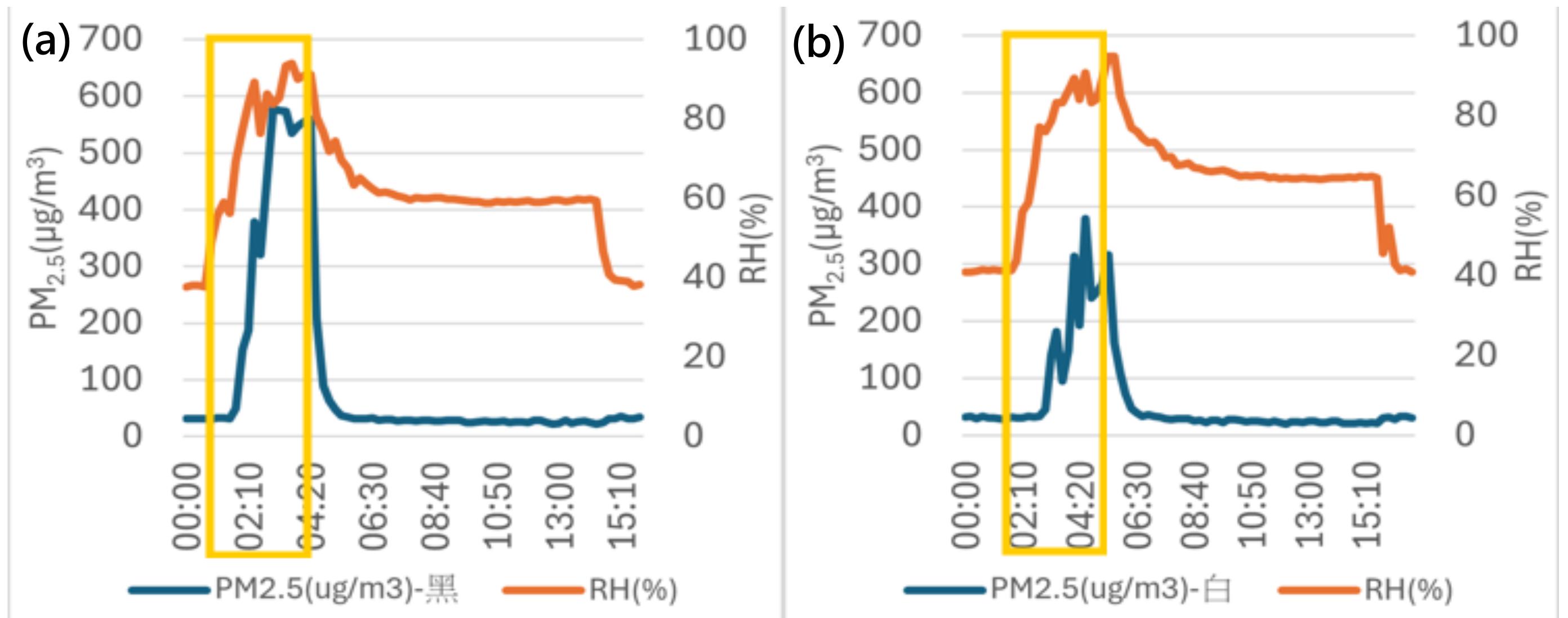
實驗二-1& 實驗二-2

目的

確認PM_{2.5}測得數值是否主要來自影印機逸散之懸浮微粒。

小結

有無影印碳粉PM_{2.5}皆上升，可能有其他因素的影響。



圖六：出紙口(a)影印5%碳粉覆蓋紙張；(b)影印0%碳粉覆蓋紙張（圖源：自繪）

實驗二-3

目的

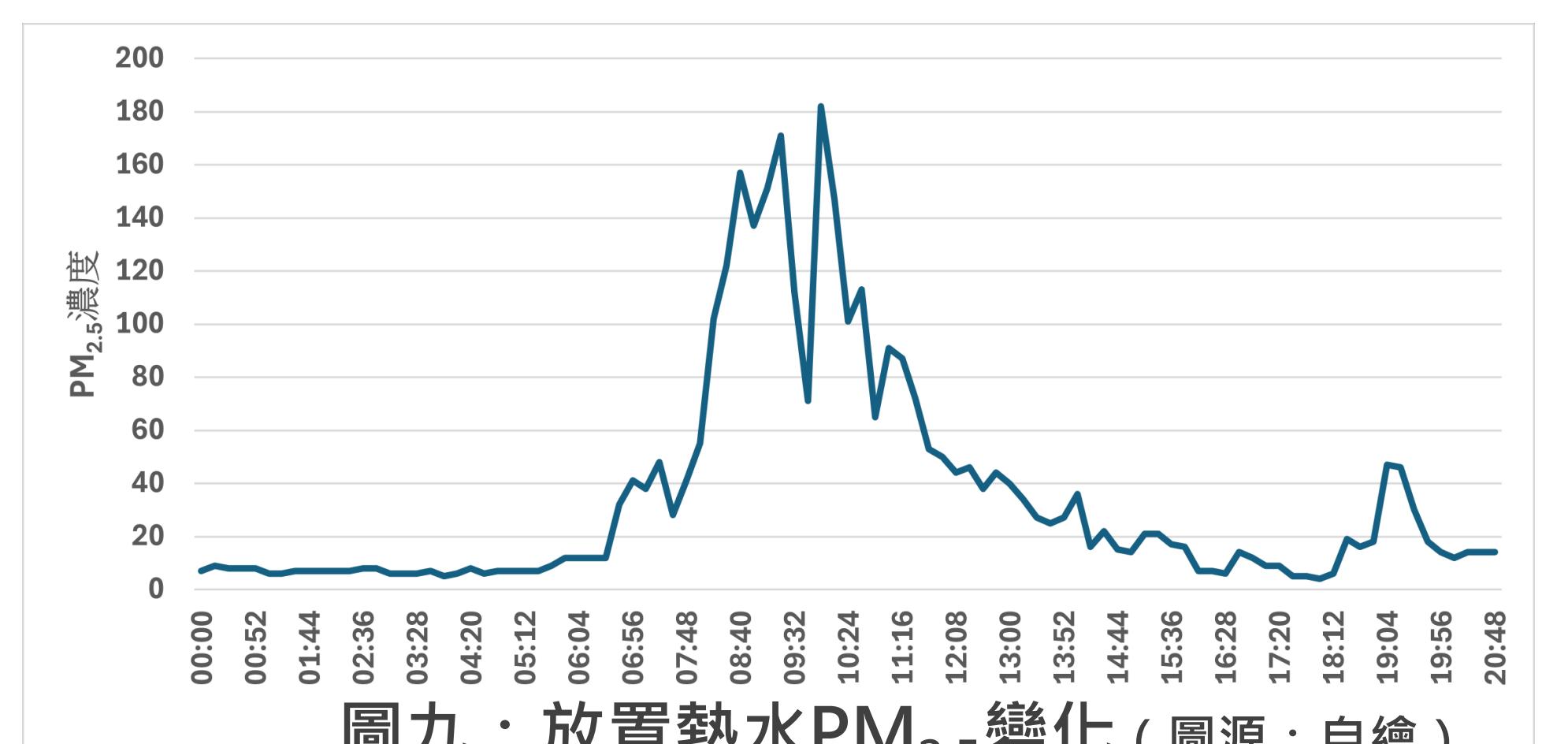
探討小水滴干擾對PM_{2.5}測量數值的影響，驗證儀器是否會將小水滴誤判為懸浮微粒。



圖七：觀測到大量小水滴（自行拍攝）



圖八：實驗二-3，實驗架設（自行拍攝）



圖九：放置熱水PM_{2.5}變化（圖源：自繪）

小結

本研究所使用的Aerobox，量測原理為米氏散射，會將小水滴誤判為PM_{2.5}。

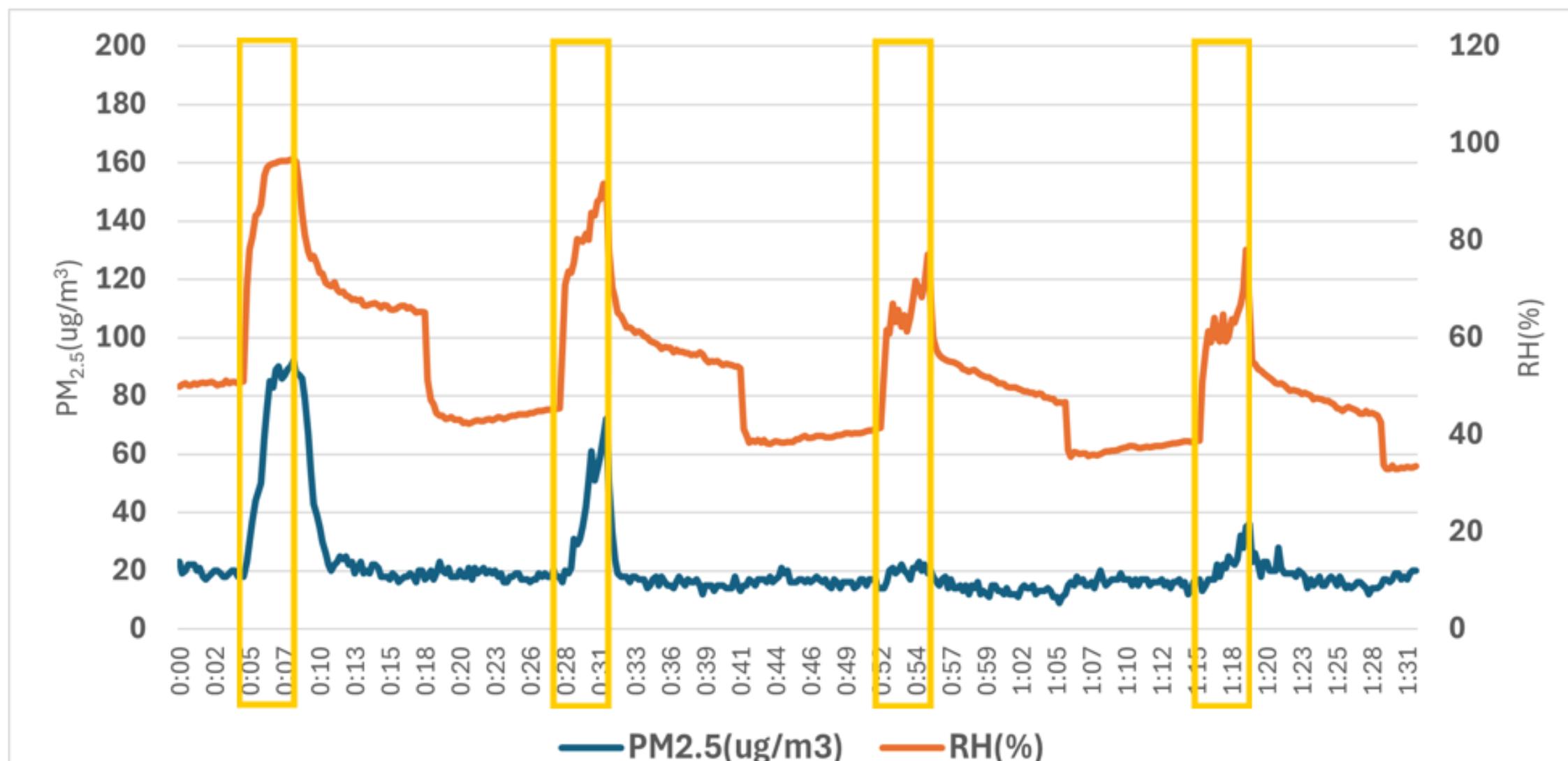
實驗二-4

目的

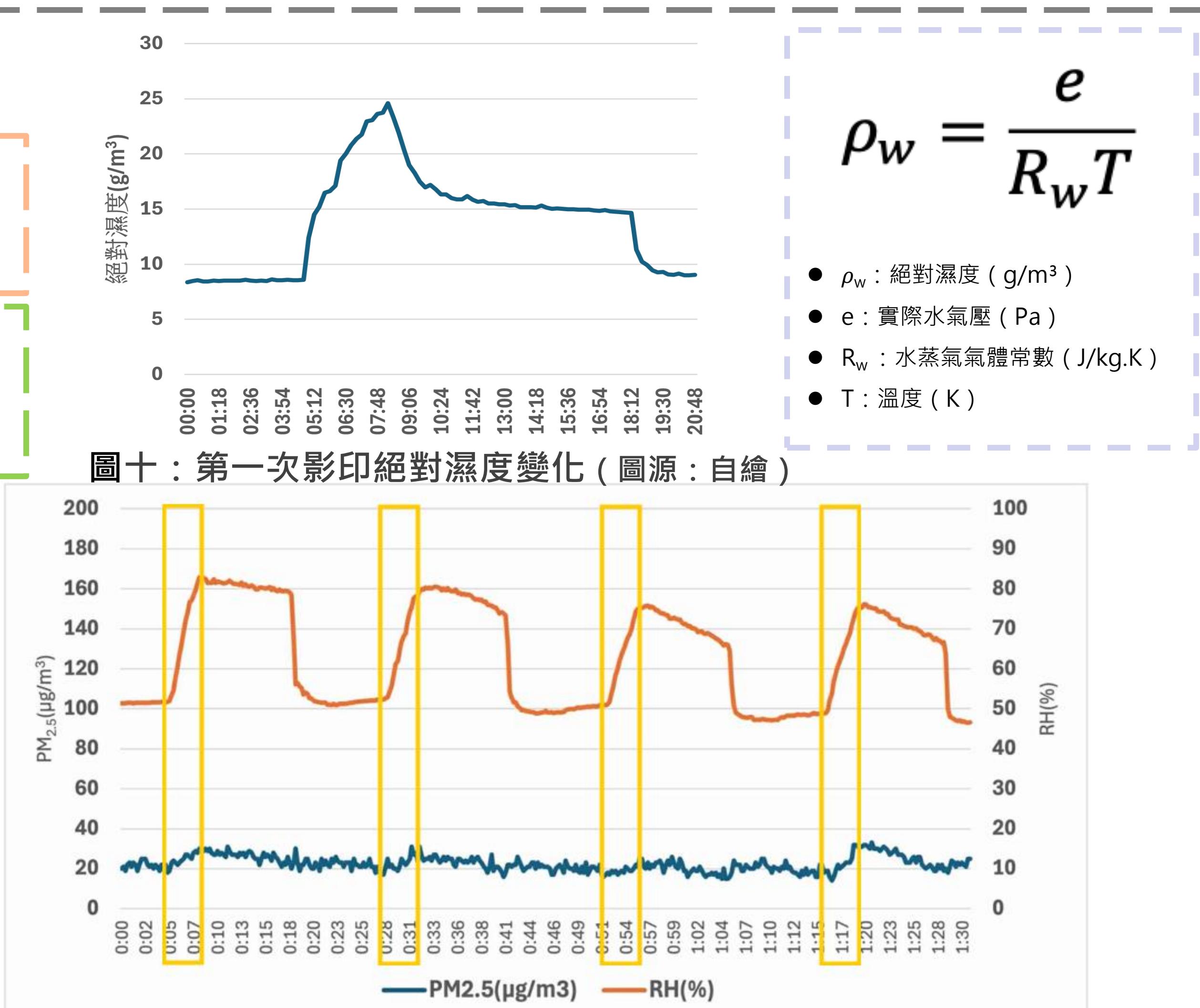
排除紙張水分影響，使測得PM_{2.5}變化主要來自影印機逸散懸浮微粒。

小結

第四次影印碳粉覆蓋時兩儀器PM_{2.5}皆有上升，相對濕度也有規律變化，箱內額外水氣的來源主要是由紙張水分提供。



圖十一：影印三次0%覆蓋 + 一次50%碳粉覆蓋紙張（出紙口）（圖源：自繪）



圖十二：影印三次0%覆蓋 + 一次50%碳粉覆蓋紙張（出風口）（圖源：自繪）

$$\rho_w = \frac{e}{R_w T}$$

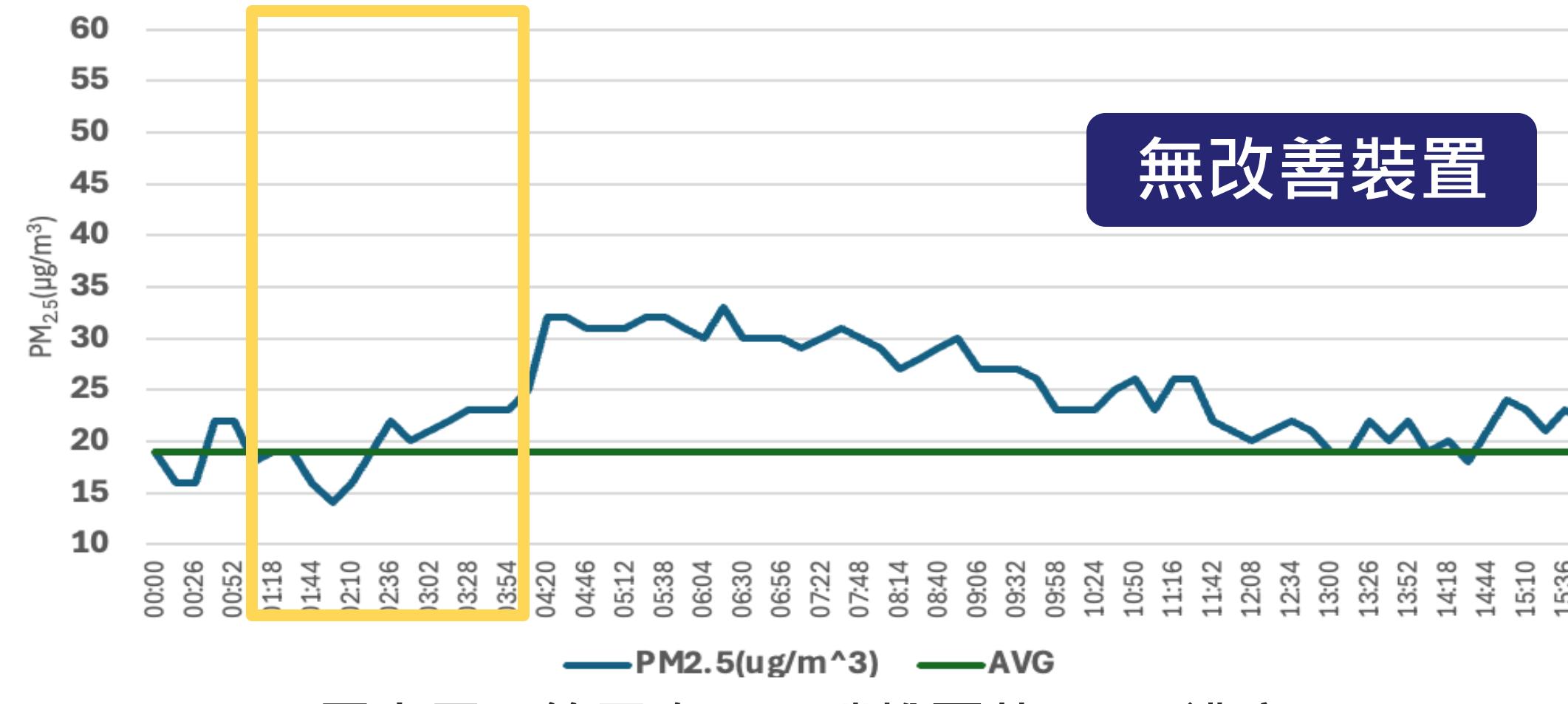
- ρ_w : 絶對濕度 (g/m^3)
- e : 實際水氣壓 (Pa)
- R_w : 水蒸氣氣體常數 ($\text{J}/\text{kg.K}$)
- T : 溫度 (K)

實驗二-5

目的

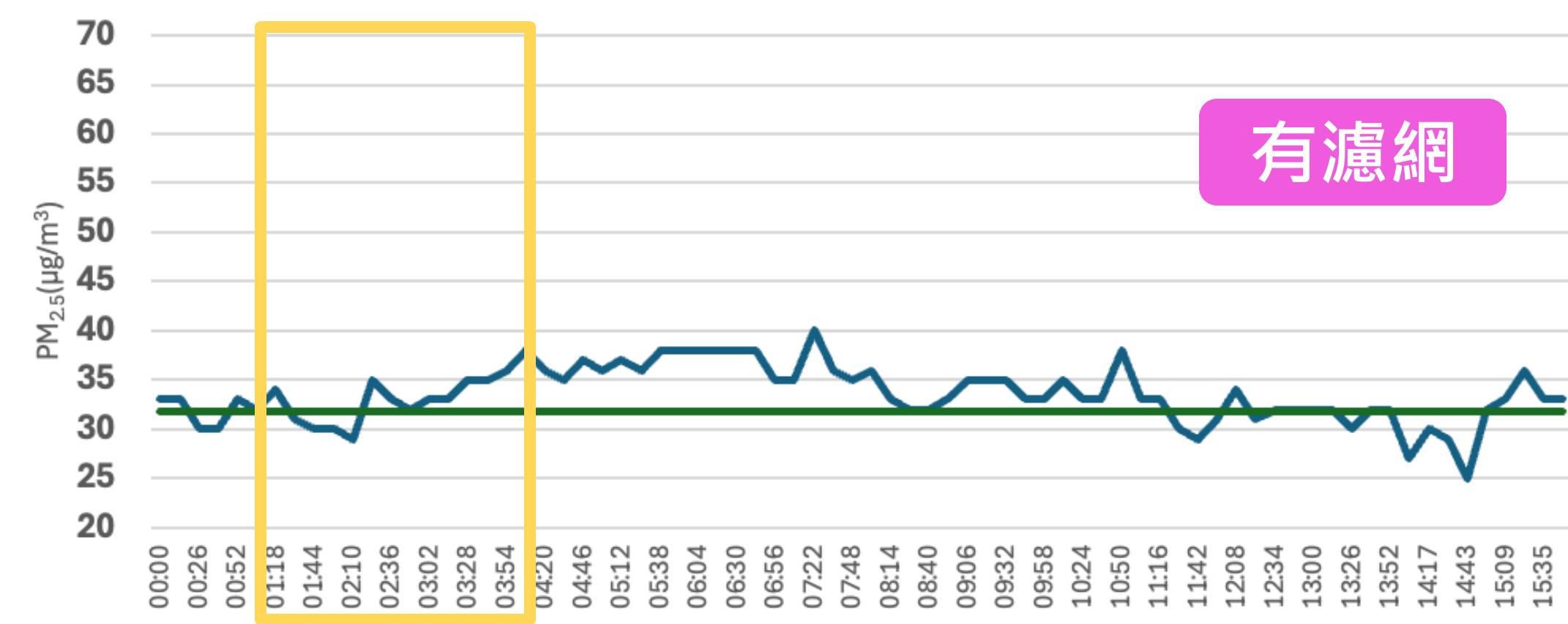
於出風口加裝Hepa濾網或開啟空氣清淨機，觀察PM_{2.5}與臭氧濃度的變化，評估減排效果。

PM_{2.5}



無改善裝置

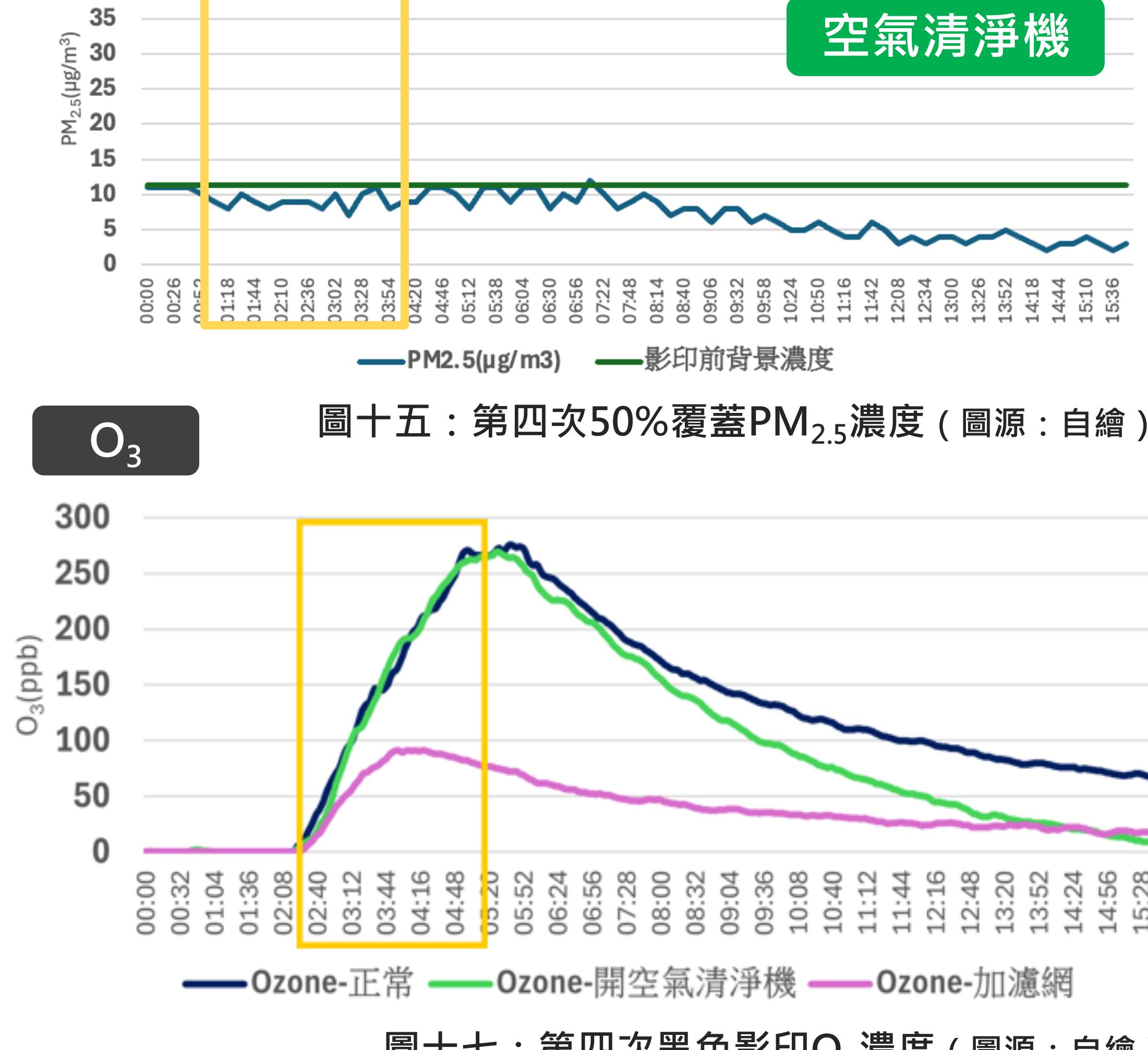
圖十三：第四次50%碳粉覆蓋PM_{2.5}濃度（圖源：自繪）



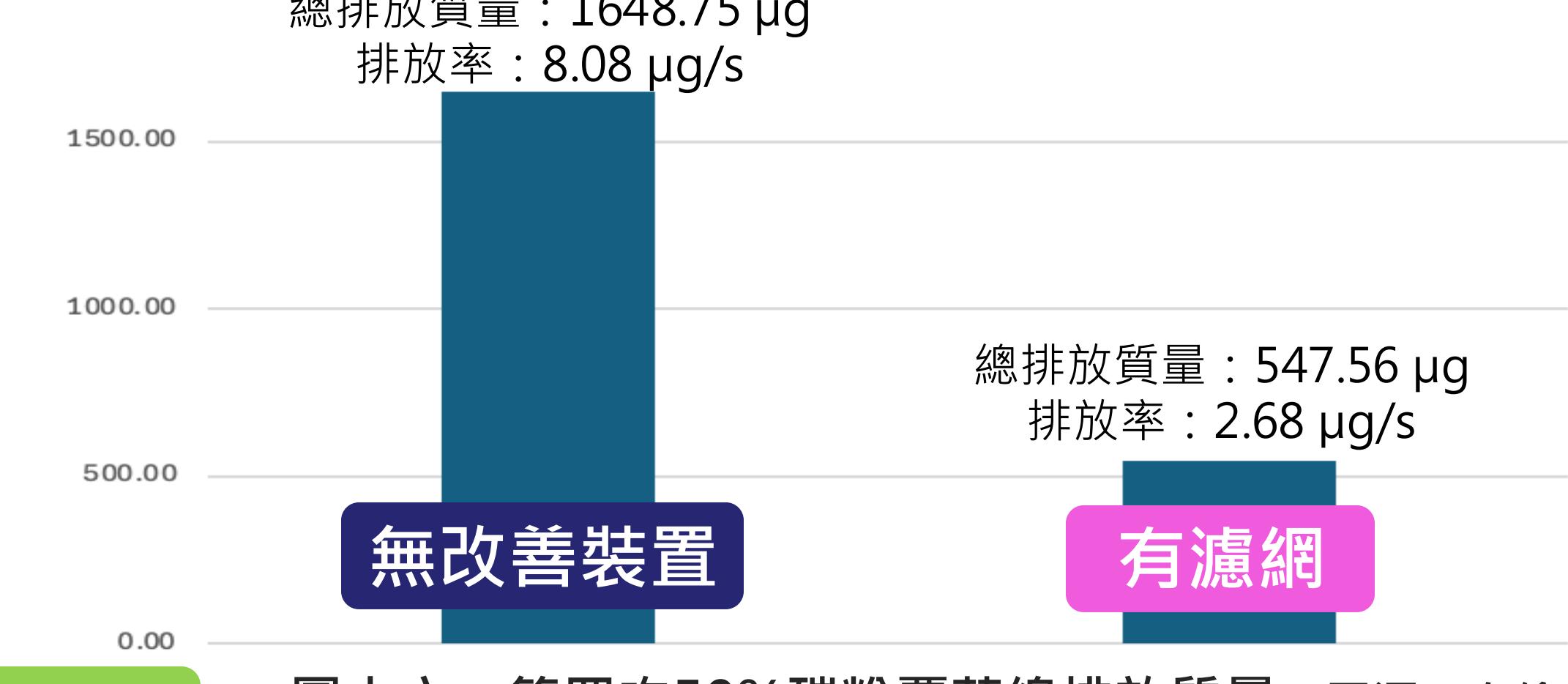
有濾網

圖十四：第四次50%碳粉覆蓋PM_{2.5}濃度（圖源：自繪）

O₃



圖十五：第四次50%覆蓋PM_{2.5}濃度（圖源：自繪）



無改善裝置

有濾網

圖十六：第四次50%碳粉覆蓋總排放質量（圖源：自繪）

小結

PM_{2.5}

加裝濾網後，PM_{2.5}濃度有下降趨勢，總排放質量下降約67%。在開啟具活性碳濾網的空氣清淨機後，PM_{2.5}濃度有明顯下降，近乎無數值上升。

O₃

加裝濾網後，O₃有較平緩的趨勢。開空氣清淨機後，O₃最高濃度雖相同，但下降速率增快。

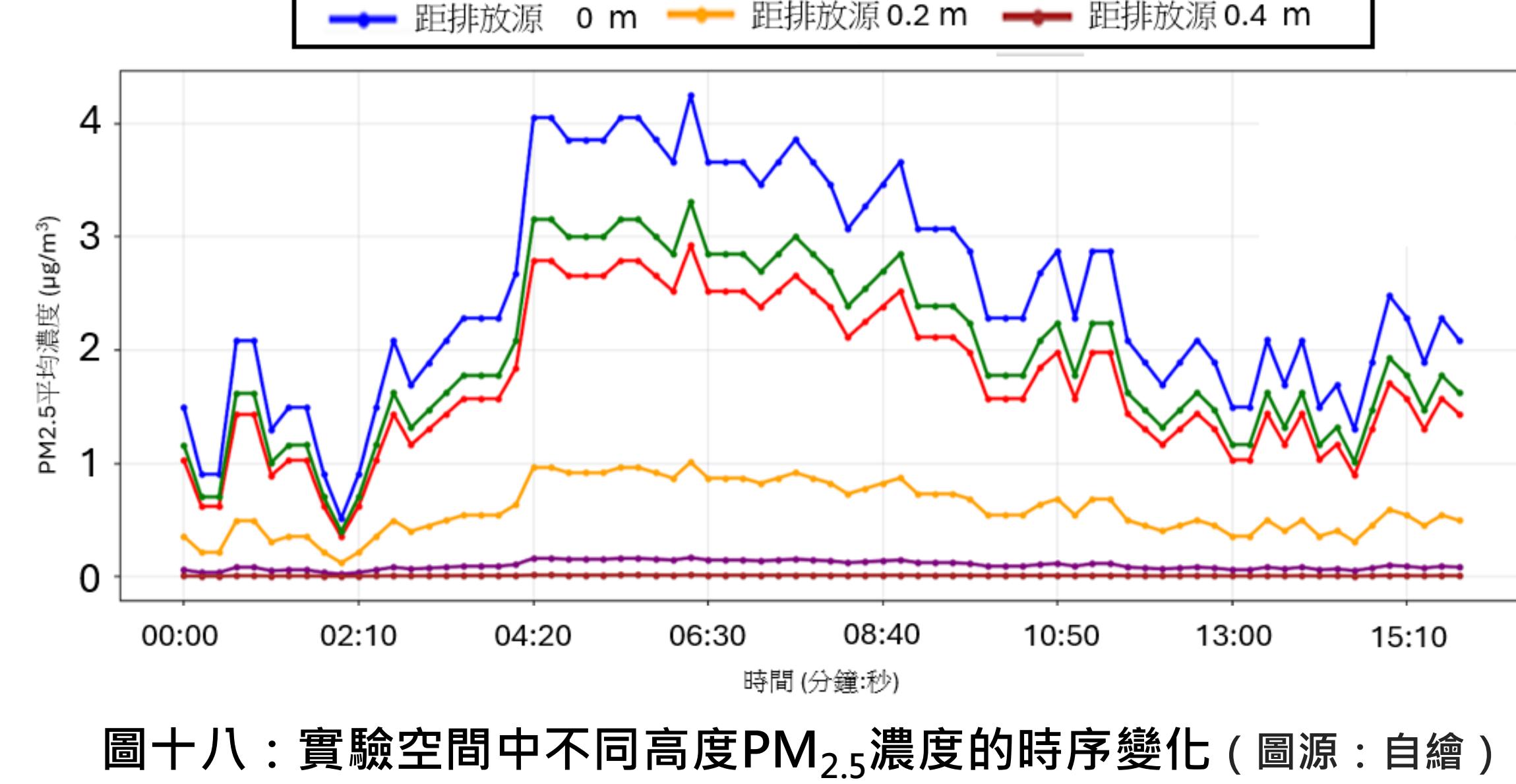
三、電腦模擬

目的

使用 python 模擬實驗空間中粒子的擴散與沉降情形。

小結

經過10分鐘，汙染源周圍濃度降至影印階段結束時的0.064倍，在影印階段結束後10至15分鐘內下降至背景濃度。建議呼吸道距離影印機出風口至少 0.3 公尺以上。



圖十八：實驗空間中不同高度PM_{2.5}濃度的時序變化（圖源：自繪）

07 結論

一、懸浮微粒與臭氧逸散時序特徵

雷射影印機釋放之懸浮微粒(PM_{2.5})與臭氧濃度皆在影印初期上升，後隨著粒子的擴散與沉降逐漸下降。**影印過程中，PM_{2.5}可增加約15 μg/m³；臭氧濃度則可達280ppb，超過環境部室內空氣品質標準(60 ppb)。**

二、小水滴的影響

驗證雷射影印機在影印過程中，紙張的水分會隨著高溫蒸發並再次凝結為小水滴，且發現**小水滴會造成PM_{2.5}測量儀器的誤判**，導致測量誤差。

三、改善措施成效

在影印機出風口加裝濾網後PM_{2.5}總排放質量與排放率數值**下降約 67%**，且臭氧濃度下降。在開啟具活性碳濾網的空氣清淨機後，PM_{2.5}有明顯的下降，而臭氧雖無明顯濃度降低，濃度下降速率較快。

四、本研究提供之建議

- 家用雷射影印機對PM_{2.5}濃度**影響較小**。需**保持與呼吸道垂直高度0.3公尺以上**，或使用濾網阻隔。
- 若使用散射原理的微型感測器做觀測或量測懸浮微粒濃度時，需注意小水滴被誤判的可能。

五、後續研究方向

- 使用不同儀器如：冷凝粒子計數器(CPC)、奈米粒徑量測儀(SMPS)等，測量懸浮微粒粒徑，更了解排出粒子的特性，亦能使電腦模擬的結果更貼近現實情形。
- 測試更多不同改善方案（如：設計噴灑水霧的裝置透過洗除作用減少PM_{2.5}），提供最佳改善建議。

08 參考文獻資料