

低成本感測器準確性研究與應用

台灣 PM_{2.5} 監測與控制產業發展協會

洪廣華 ghhong.ev05g@nctu.edu.tw

許多文獻指出 PM_{2.5}(細懸浮微粒)會對人體造成長期和短期的健康影響，因而世界衛生組織 (WHO, World Health Organization)的國際癌症研究機構 (IARC, International Agency for Research on Cancer)於 2013 年將室外空氣污染物及 PM_{2.5} 列為第一級致癌物 (IARC-WHO, 2013)。為了改善空氣品質及維護國人身體健康，我國於 2012 年訂定空氣品質標準，24 小時 PM_{2.5} 濃度平均值訂為 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均值為 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，從此 PM_{2.5} 空氣品質變成國人十分關切且呼籲亟需改善的議題。隨著我國政府及社會各界的努力，我國 PM_{2.5} 的全國年平均濃度自 2013 年至 2019 年間已從 28.3 降至 16.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，更期望在 2023 年能夠達到年平均標準 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的目標。為了達到此目標，即時有效及準確量測 PM_{2.5} 的質量濃度顯得相當重要。目前公認的 PM_{2.5} 之量測方法主要分為「手動採樣」的聯邦參考方法 (Federal Reference Method, FRM) 及「自動監測」的聯邦等似方法 (Federal Equivalent Method (FEM)兩種。雖然這些 FRM/FEM 標準方法所得到的測值較為精確，但因為其成本較高、體積龐大且需裝設在控制溫溼度的固定站房中，和其他儀器構成法規用的空氣品質監測網，因而無法進行廣泛的布點。相較之下，PM_{2.5} 微型感測器成本低廉及尺寸較小，經有效校正後可大量佈置以補充法規監測站在空間及時間上的不足，加上物聯網的即時資訊散佈，能在數分鐘之內即能顯示監測數據的 PM_{2.5} 感測器，確實已影響了台灣及全球大氣環境微粒的測量方式。

PM_{2.5} 感測器的應用很廣，涵蓋了教育與資訊、熱點識別與污染鑑識、補充監測網、個人暴露監測及法規監測等五個層級。不同層級有不同的建議性能目標如表一所示。

表一 USEPA 對感測器在不同應用種類的建議性能目標(US EPA, 2014)

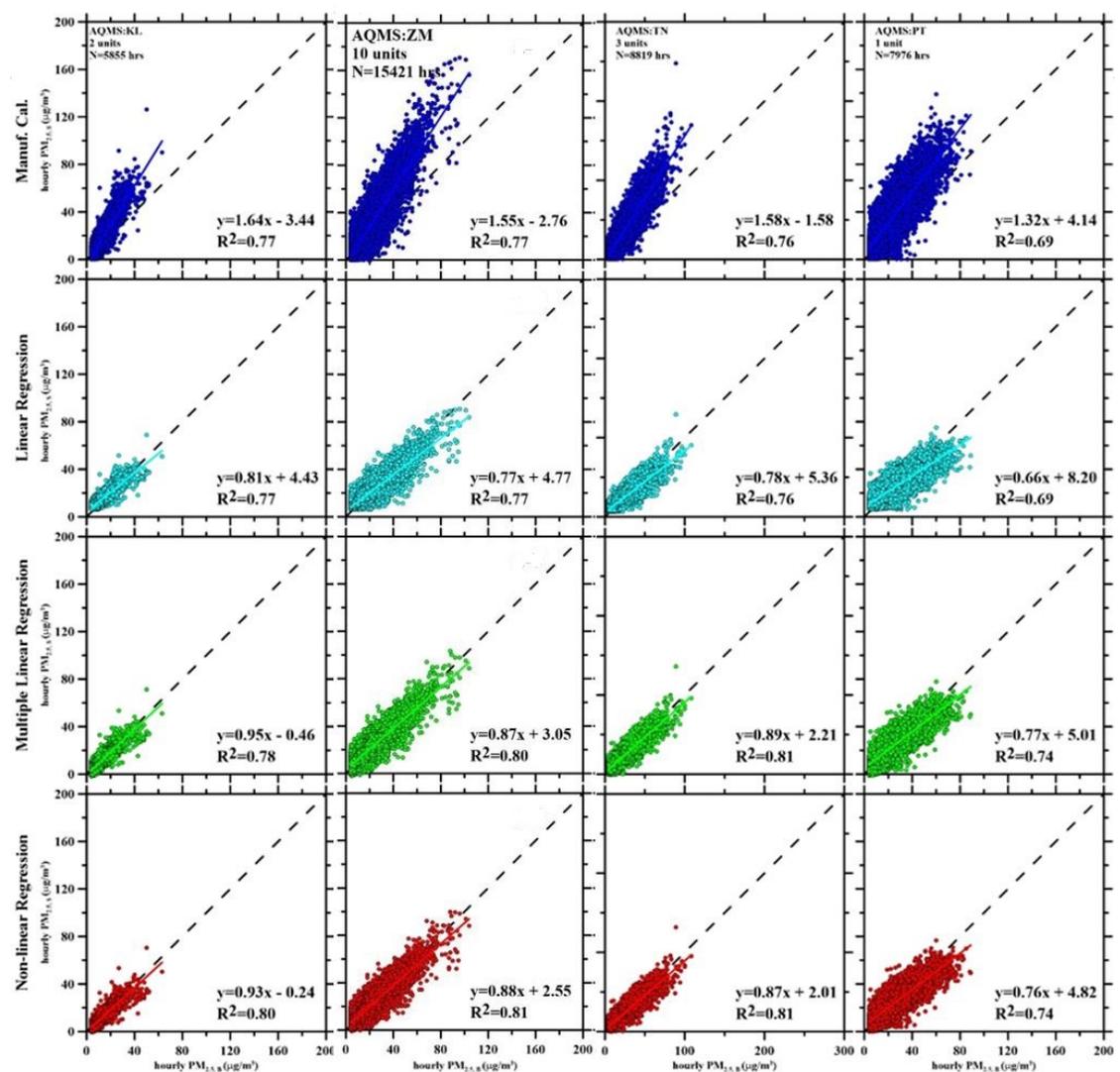
層級	應用種類	目的	污染物種類	誤差	數據完整性	註解
1	教育與資訊	簡單的顯示污染物的存在與否	^a 全	<50%	≥ 50%	測量誤差較不重要，只簡單地呈現出汙染濃度範圍。
2	熱點識別與汙染鑑識	找到一個區域中的汙染源與汙染分布情形	^a 全	<30%	≥75%	較高品質的數據以確定汙染源及其正確的濃度值。
3	補充監測網	補充現有法規監測站數據，形成較完整的監測網	法規空氣汙染物 ^b 、毒性空氣汙染物(含 VOCs)	<20%	≥80%	對數據品質的要求高，使之能補充法規監測站的時空缺口。
4	個人暴露監測	提供個人的空氣汙染暴露風險評估	^a 全	<30%	≥80%	此建議值出自文獻，以反映個人的汙染暴露值。
5	法規監測	提供更完整的空氣品質監測數據	O ₃	<7%	≥75%	必須具有高準確性使高品質的數據能符合法規監測要求。
			CO, SO ₂	<10%		
			NO ₂	<15%		
			PM _{2.5} , PM ₁₀	<10%		

註:^a全: 氣體汙染物含 SO₂、NO_x、O₃、CO、CO₂、CH₄、VOCs 和苯；粒狀汙染物含 PM_{2.5}、PM₁₀、鉛和碳黑。^b法規空氣汙染物: O₃、PM(PM_{2.5}、PM₁₀)、SO₂、CO、NO₂ 和鉛。

因低成本 PM_{2.5} 感測器主要由發光原件(發光二極體 LED 或雷射光)及感光原件組成。除了光源的強度及感測粒徑範圍影像 PM_{2.5} 量測結果，如微粒特性、環境的溫濕度、微粒的濃度，加上感測元件的污損及老化現象也會影響其測值，其中以環境濃度及相對濕度為最主要造成不準確的原因。本研究依前述主要兩個影響因子發展多變數線性迴歸 (Multiple Linear Regression, MLR) 以及非線性迴歸 (Non Linear Regression, NLR) 校正方法，有效提升 PM_{2.5} 感測器測值準確度，也容易在實場使用。

本研究以基隆、桃園、忠明、台南及屏東等空品測站作為比對地點，在測站上方設置數台 Plantower PMS5003 PM_{2.5} 感測器進行實場的長期比對(九個月至兩

年)，並以測站內設置的 FEM BAM-1020 作為標準的參考儀器。結果顯示利用相對濕度以及感測器 PM_{2.5} 小時平均濃度作校正的 MLR 以及 NLR 校正方法皆能提升感測器測值的準確性，NLR 的校正結果最佳。透過 NLR 公式校正後，基隆、忠明、台南及屏東測站感測器的 R² 可分別提昇至 0.80、0.81、0.81 及 0.74，且平均正規化偏差(MNB)可大幅降低至±11% (原為 +25.01%~+54.54%)，MNE 可大幅降至 37%內(原為 45.91%~66.64%)，如圖一所示。



圖一 Plantower PM5003 感測器與參考儀器在不同空品測站的不同校正方法比較，小時平均

表二顯示 PM_{2.5} 的 24 小時平均濃度方面，Plantower PM5003 感測器的原廠數據在經過 NLR 校正後，MNB 與 MNE 可分別降至±13%與 18%內，因此未來經有效校正後的 PM_{2.5} 感測器，可作為空品測站的補充監測之用。

表二 Plantower PM5003 感測器與參考儀器在不同空品測站的不同校正方法比較，24 小時平均

Station	Method	R ²	Slope	Intercept (µg/m ³)	MNB (%)	MNE (%)	RMSE (µg/m ³)
KL	Manuf. Cal.	0.85	1.59	-3.37	22.75±42.17	39.57±27.03	6.61
	LR	0.85	0.79	4.46	26.50±32.31	29.23±29.86	3.08
	MLR	0.87	0.89	0.45	-7.31±21.92	16.89±15.77	2.34
	NLR	0.88	0.94	-0.51	-12.65±20.43	18.18±15.71	2.48
ZM	Manuf. Cal.	0.91	1.68	-5.39	32.67±37.61	42.14±26.57	12.16
	LR	0.91	0.84	3.44	6.77±21.21	15.73±15.76	3.22
	MLR	0.92	0.88	2.29	2.54±18.85	13.99±12.89	3.07
	NLR	0.92	0.97	0.66	0.95±19.02	14.25±12.64	3.10
TN	Manuf. Cal.	0.94	1.72	-5.16	39.88±33.90	45.80±25.33	15.19
	LR	0.94	0.86	3.56	6.58±16.20	12.88±11.82	3.12
	MLR	0.94	0.91	0.82	-6.23±14.31	11.83±10.18	3.23
	NLR	0.94	0.97	-0.40	-6.91±16.02	13.04±11.60	3.13
PT	Manuf. Cal.	0.94	1.71	-3.76	40.85±33.43	46.79±24.44	13.17
	LR	0.94	0.85	4.26	20.97±37.62	24.71±35.28	2.94
	MLR	0.95	0.88	3.02	12.85±30.16	18.98±26.73	2.54
	NLR	0.95	0.96	1.61	9.29±22.30	15.47±18.56	2.47

由前述研究可知，環境相對濕度是影響 PM_{2.5} 感測器測值最主要的因素之一，在相對濕度高的環境下感測器測值有高估的趨勢。在基隆、忠明、台南及屏東測

站分別比對數台的 Plantower PMS5003 PM_{2.5} 感測器的長期測值，時間長達 9~24 個月，並以 FEM BAM-1020 作為等似標準參考儀器。小時測值比對結果顯示，PM_{2.5} 感測器原廠數據濃度高估很多，偏差值 MNB 的平均值為+25.01%~+54.54%、誤差值 MNE 的平均值為 45.91%~66.64%。以 NLR 校正可明顯改善 Plantower PMS5003 感測器在不同 PM_{2.5} 濃度及不同濕度範圍下 PM_{2.5} 小時平均濃度的準確性，R² 由原本的 0.69~0.77 上升至 0.74~0.81，MNB 及 MNE 也分別下降至-10.85~+0.51%及 24.03~36.35%，數據品質大為提升，另用 NLR 校正後 PM_{2.5} 的 24 小時平均濃度之 MNB 與 MNE 分別改善至±12%與 19%之內。設置完善的空品測站不易，透過價格低廉、量測時間短的 PM_{2.5} 微型感測器能夠補足空品監測時間及空間上的不足，雖然未經校正的 Plantower PMS5003 感測器測值高估且容易受環境因素影響，但經有效的 NLR 校正後能夠大幅提升準確性，也符合第三層級補充監測網規範，可作為我國補充空氣品質監測網之用。

參考文獻

1. Kelly, K. E., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., Sleeth, D., & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental Pollution*, 221, 491-500
2. Zikova, N., Masiol, M., Chalupa, D. C., Rich, D. Q., Ferro, A. R., & Hopke, P. K. (2017). Estimating hourly concentrations of PM_{2.5} across a metropolitan area using low-cost particle monitors. *Sensors*, 17(8), 1922.
3. Magi, B. I., Cupini, C., Francis, J., Green, M., & Hauser, C. (2020). Evaluation of PM_{2.5} measured in an urban setting using a low-cost optical particle counter and a Federal Equivalent Method Beta Attenuation Monitor. *Aerosol Science and Technology*, 54(2), 147-159.
4. Sayahi, T., Butterfield, A., & Kelly, K. E. (2019). Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*, 245,

932-940.

5. Johnson, K. K., Bergin, M. H., Russell, A. G., & Hagler, G. S. (2018). Field test of several low-cost particulate matter sensors in high and low concentration urban environments. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(3), 565.
6. 行政院環保署，108 年度「108 年度空污感測器比對校正及巡檢計畫」，期末報告，民國 108 年。
7. 行政院環保署，109 年度「109 年度空污感測器巡檢及數據比對校正分析計畫」，期末報告，民國 109 年。