

# 考量距離與空氣污染暴露之國小學童通勤路徑規劃

何吉庭<sup>1</sup> 翁佩詒<sup>2</sup> 吳治達<sup>3,4,5\*</sup>

## 摘要

全球約 99%的人口居住地空氣污染高於世界衛生組織標準，而學童因免疫系統尚未成熟，對污染更為敏感。本研究以 2022 年招募之臺南市 62 名學童為對象，污染物資料為前人已發表於期刊的 PM<sub>2.5</sub> 濃度推估，成果具有 94% 的高度解釋力。通勤路徑規劃中，最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑平均可減少 6.84% 的 PM<sub>2.5</sub> 暴露，與 6.13% 的通勤距離。將學童依通勤方式分類，機車接送為大宗 (37 位)，其次為汽車接送 (23 位)、走路 (2 位)，其中走路通勤平均距離雖較近，但暴露於室外的時間較機車長；而機車通勤則更容易接觸到汽機車廢氣，上述皆會導致潛在空氣污染暴露提高，需給予適當的路徑建議改善。

**關鍵詞：**空氣污染、學童、通勤路徑規劃、潛在空氣污染暴露、路徑建議

## 1. 前言

空氣污染是一個全球性的問題，特別是在都市地區，它不僅存在已久，而且日益嚴重，根據世界衛生組織和多項研究的指出，暴露在空氣中的有害污染物無論是短期或長期皆可能提高呼吸道或心血管問題之發病風險 (Landrigan *et al.*, 2019、WHO, 2024)。所有受空氣污染暴露影響的人們中，學童是我們尤為關注的對象，由於他們的免疫系統尚未完全發育，在抵抗外界污染物的能力相比成年人更為脆弱 (Perera, 2017、Salvi, 2007)，這引起了人們對於學童在空氣污染暴露下健康影響程度的關注。

此外我們也注意到，儘管通勤時間只佔一天中的一小部分，但它卻是一天中潛在的空氣污染暴露高峰時段，如前文所述，學童是抵禦外界空氣污染之下的脆弱族群，針對行政院環境部統計，通勤時間的 PM<sub>2.5</sub> 濃度高於非通勤時段，且對於就學的學童，通勤也是主要接觸室外空氣污染的時段，這不但佔了一天當中很大的比例，也遠高於學童待在家中與學校所累積的暴露 (行政院環境部，2024b)。

隨著大眾健康及環保意識的提高，人們面對空氣污染優先思考的是如何從日常減低空氣污染，而透過搭乘交通運輸工具、走路、騎乘自行車等方式都可有效的達到此效果。然而，也因為這樣的通勤方式反而造成了人們在通勤的過程中暴露於多項有害污染物的風險之中。近年來，許多研究針對此一現象認為，將空氣污染因素納入路徑規劃之中為一種解決方案 (Gao *et al.*, 2022)，藉由規劃一條路線降低學童在通勤過程中的暴露，進而減少誘發呼吸道、心血管疾病的風險，不但是一項更為新穎的方式，也能針對人們的空污暴露情形做實質性的改善。

接著，以下針對過往通勤規劃的研究缺口 (Research gap) 下進行探討，包含空氣污染建模方法與路徑規劃成果兩部分。首先是空氣污染建模方法，大多數研究使用了克利金內插 (Kriging)、大氣擴散模型 (Air Dispersion model) 和土地利用迴歸模型 (Land Use Regression) 來模擬空氣污染物之濃度時空分布並估計通勤過程中的暴露情況 (Elford & Adams, 2019、Luo *et al.*, 2020、Shukla *et*

<sup>1</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 碩士生

<sup>2</sup> 國立成功大學工業衛生學科暨環境醫學研究所 博士生

<sup>3</sup> 國立成功大學測量及空間資訊學系 教授

<sup>4</sup> 國家衛生研究院國家環境醫學研究所 兼任副研究員

<sup>5</sup> 國立中興大學永續農業創新發展中心 教授

\* 通訊作者, E-mail: chidawu@mail.ncku.edu.tw

收到日期：民國 112 年 10 月 17 日

修改日期：民國 113 年 03 月 15 日

接受日期：民國 113 年 05 月 22 日

al., 2020), 儘管克利金內插、大氣擴散模型能針對污染物的自相關、擴散條件模擬空氣污染在空間的分布情形, 然而上述方法需要符合特定的假設與設定準確之參數, 再加上需要根據現實世界進行調整, 若資料輸入不穩定, 則無法保證推估的正確性, 因此在產製的成果中並不能保證其精度。

土地利用迴歸模型相較之下並沒有上述問題, 且在空氣污染建模之中更加廣泛地被使用, 其想法是透過周遭土地利用、氣象條件、交通路網、衛星、污染源等因子為自變數, 目標污染物為依變數, 分析兩者的關係。經過相關性分析、共線性分析與逐步迴歸等統計的方式, 可以挑選出其中的重要變數, 對污染物進行解釋。然而, 由於土地利用迴歸的本質是探討變數與污染物之間的線性關係, 因此面對較複雜的情況可能難以解釋完全。為了解決上述情況, 近年來的研究引進機器學習演算法進行訓練, 以求獲得更好的成果, 也造就了隨機森林 (Random Forest)、梯度提升 (Gradient Boosting) 相關之演算法應用於空氣污染建模之中, 經由擬合變數與污染物間的線性、非線性關係, 使預測值更加接近原先的觀測值。部分研究將機器學習運用於  $PM_{2.5}$ 、 $NO_2$  濃度推估 (Wong *et al.*, 2021a、Wong *et al.*, 2021b), 並進行土地利用迴歸與機器學習訓練, 傳統式土地利用迴歸成果的模型決定係數 ( $R^2$ ) 分別為 0.58、0.65, 若將機器學習參與訓練, 最佳成果可分別達 0.94、0.91。依此結果可知, 機器學習顯著地增加了模型的解釋力, 也漸漸成為當前空氣污染建模的主要發展方向。本研究後續也將使用機器學習訓練之污染物推估成果, 以獲得更準確的空氣污染潛在暴露, 在選擇目標污染物的時候, 我們首要以對人體危害最大的污染物為範例, 根據 111 年空氣品質監測年報提及, 在雲嘉南空品區中  $AQI > 100$  的指標污染物站日數比率中, 最多的是  $PM_{2.5}$  不良日數, 總共造成約 6% 的日子數值為空氣品質部不好的日子, 其次是  $O_{3,8hr}$ , 其所造成約 4.5% 的不良日數, 其餘  $NO_2$ 、 $SO_2$  等污染物雖同樣是危害人體健康的

污染物, 然而, 在 2022 年無因這些污染物造成不良日的情形, 對人體健康影響較小, 因此, 本研究以  $PM_{2.5}$  作為主要的目標污染物, 作為後續的分析對象。

接著探討路徑規劃所考量的因子, 傳統上人們通常期望以最短距離、時間, 或是更方便的情況通勤至目的地, 除此之外, 人們也傾向於根據個人偏好做好路徑上的選擇。然而, 這可能會導致人們忽略了空氣污染對健康的不良影響, 並危及學童的健康, 因此如何使人們更加重視與考量空氣污染暴露問題, 亦為現階段所面對的挑戰。

有鑑於到上述所提到的問題, 我們期望透過本研究達到以下目的。首先, 本研究使用機器學習模型所訓練之  $PM_{2.5}$  濃度推估圖作為我們的分析材料, 其具有更加精確的時空解釋力; 此外, 在評估學童實際路徑與最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑下的通勤距離與潛在暴露量, 能夠提供學童最佳路徑建議, 並改善現階段的  $PM_{2.5}$  暴露程度, 降低氣喘等呼吸道疾病的發生。

## 2. 材料及方法

### 2.1 研究試區

在研究區域的選擇上, 我們針對臺灣空氣污染嚴重的縣市分析, 臺南市包含了交通、科學園區、機場、寺廟等污染源, 根據 2022 年空氣品質監測年報指出, 臺南市  $PM_{2.5}$  年平均數值依空品區、測站統計空污程度排名第二, 且歷年空氣污染程度同樣名列前三名, 代表臺南市空氣污染為臺灣長期嚴重的城市。面對此區的空氣污染情況, 學童的健康是我們應當關注的課題。此外, 臺南市共分為 37 個區, 截至 2022 年為止人口數約有 185 萬人, 且人口密度同樣是臺灣較高的縣市, 受空氣污染影響的人數不容小覷。本研究所招募之受試者共計 62 位, 下圖 1 為其學校與住家分布所在的區域, 除了東區、永康、中西區、安南區、關廟之外, 向北延伸至學甲區、佳里區, 總計共 15 區。

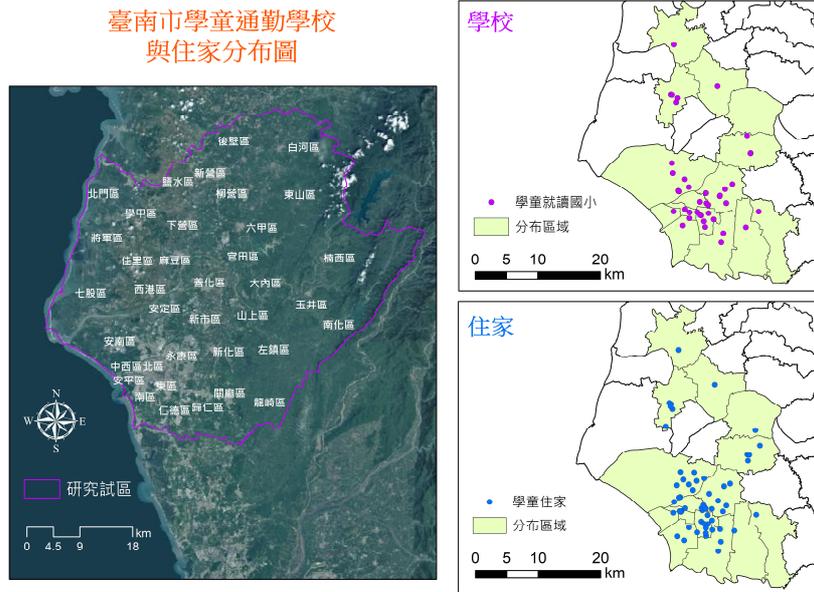


圖 1 臺南市受試者通勤學校與住家分布圖

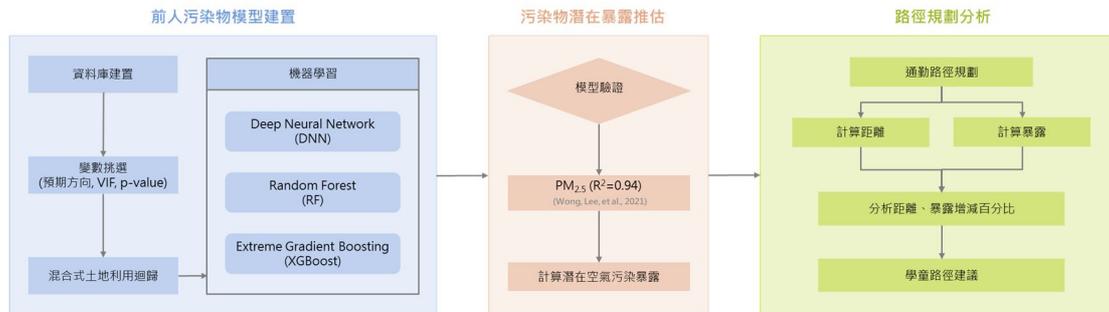


圖 2 研究流程圖

## 2.2 資料庫介紹

### 2.2.1 研究流程圖

圖 2 為本研究之流程圖，第一部分為前人所建置之  $PM_{2.5}$  濃度圖，其利用了混合式土地利用迴歸挑選出重要變數，並使用三種機器學習方法訓練污染物模型；接著將訓練好的模型進行驗證，確認污染物在不同時間與空間上具有良好的擬合，確認模型具有可靠性，本研究將將訓練好的  $PM_{2.5}$  濃度值進行時間加權，以獲得潛在的空氣污染暴露；最後，將距離以及潛在空氣污染數值納入通勤路徑規劃，並分析最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑是否可以良好地改善學童目前實際通勤路徑的空氣污染情形。

### 2.2.2 受試者資料庫

本研究選用了中華民國國家科學及技術委員

會於 2021~2024 年的三年期計畫 (IRB 編號:A-ER-109-541)作為受試者的資料來源，計畫中蒐集之資訊包含進案日期、住家地址、就學學校、唾液檢體、交通方式等，研究使用的部分並未包含唾液檢體，而是針對受試者收案期間、住家與學校位置，加上空氣污染暴露推估圖作為分析的重點並對不同通勤方式進行探討。

實際收案過程為本研究團隊以 2022 年期間於成大醫院門診所納入之 62 名學童作為研究對象，其中男生、女生人數分別為 28 人(45%)、34 人(55%)，經過初步處理可以發現，臺南市通勤學童住家及學校分布主要為於西半部的 15 個區內，關於通勤採用的交通方式，該計畫案是使用問卷填寫以及人為確認的方式進行，勾選的選項是學童最主要的通勤方式。根據成果顯示，機車、汽車仍是學童通勤方式的大宗，分別佔了其中的 37 位(60%)、23 位(37%)，而走路僅佔了其中的 2 位(3%)，其中最多的機車，

也說明較多學童暴露在室外空氣污染的危害之中。

### 2.2.3 污染物資料

污染物成果為研究室前人已建立的模型，是用來模擬研究期間全臺 PM<sub>2.5</sub> 濃度分布圖，如圖 3 所示。其污染物濃度推估的流程中，使用了混合式土地利用迴歸(Hybrid Land Use Regression)以及機器學習演算法(Machine Learning Algorithm)，研究成果已經正式發表於國際期刊之中 (Wong *et al.*, 2021a)，此研究使用到的變數除了留一克利金法所推估之 PM<sub>2.5</sub> 數值 (PM<sub>2.5</sub> Hybrid Kriging)，還包含 SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 的克利金值 (Kriging)。土地利用變數處理包含搜尋環域範圍 (Buffer) 的平均密度值，以及與土地利用的距離值，後續選到的變數包含：與機場的距離 (Distance)、森林環域 (Buffer) 5000m、農地環域 (Buffer) 4000m 的平均密度，共 3 項土地利用變數。

關於其研究成果，最佳的主模型解釋力 (R<sup>2</sup>) 為 94%，具有相當高的時空解釋力，在內部驗證的部分將資料分割成 80%/20%等分，以及切分成 10 等分用以檢測，外部驗證則是使用 2017 與 2018 年，整體驗證成果之解釋力 (R<sup>2</sup>) 介於 87%~94%之間，也說明了模型具有良好的適應性，同主模型有良好的成果。本研究基於其最佳模型之推估圖進行後續分析的材料，研究年份為 2022 年全年平均之 PM<sub>2.5</sub> 濃度分布圖，如圖 3 所示，可以發現到臺南市 PM<sub>2.5</sub> 主要濃度高的區域位於西南部，而根據行政院環境部所提供的空氣品質監測資料，將臺南市測站 2022 年之 PM<sub>2.5</sub> 濃度進行平均，結果顯示，臺南市 4 個測站之 PM<sub>2.5</sub> 濃度分別為臺南 (18.27µg/m<sup>3</sup>)、安南 (16.75µg/m<sup>3</sup>)、善化 (16.83µg/m<sup>3</sup>)、新營 (15.83µg/m<sup>3</sup>)，最靠近西南部的臺南測站濃度最高，其次是安南及善化，而新營則是較靠近北部區域，PM<sub>2.5</sub> 濃度也隨之降低。而西南部區域與上述大部分受試者通勤的範圍相近，也因此其暴露的環境對健康上的影響更加地顯著 (行政院環境部，2024a)。

### 2.2.4 數值路網資料庫

路網資料係由交通部運研所所提供，包含 2020

年主要、當地、所有道路的資料，此資料是最新交通部所得之臺南 1/5000 路網數值圖進行規劃，依據不同屬性，可以將該資料中全臺道路分為國道、省道、縣道以及鄉道等 12 種道路類型。後續路徑規劃的部分，我們針對臺南市路網資料進行前處理，由於路徑規劃空間尺度必須能夠考量更小的巷弄尺度，因此本研究參照過往研究建議的數值，使用了 10m\*10m 的 fishnet 對研究試區進行 Intersect (Elford & Adams, 2019)，使路段大小更加細緻，後續計算污染物濃度數值加總時能夠更加精確。

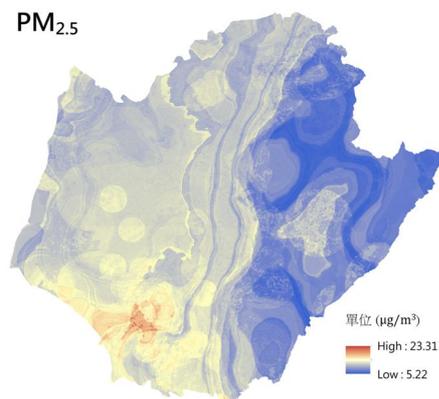


圖 3 2022 年臺南市 PM<sub>2.5</sub> 濃度推估圖

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 潛在空氣污染暴露計算

在實際通勤的過程中，行經不同路段可能會花費不同的時間，這也連帶造成各路段之潛在空氣污染暴露程度的不同。因此，為了準確計算學童的潛在暴露情況，我們需要在每個路段進行時間加權，以獲得更準確的暴露程度。此步驟中我們考慮了每個路段的停留時間。式(1)用於計算空氣污染的暴露情況，並根據單一污染物濃度數值進行時間加權 (Gao *et al.*, 2022)。

$$E = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \times dt = \sum_{i=1}^n C_i \times \frac{L_i}{V_i} \dots \dots \dots (1)$$

在上式(1)當中， $E$  (微克\*秒/立方米，µg\*s/m<sup>3</sup>) 代表通勤過程中之總體潛在 PM<sub>2.5</sub> 暴露量， $C_i$  (微克/立方米，µg/m<sup>3</sup>)、 $L_i$  (公尺，m)、 $V_i$  (公尺/秒，m/s) 代表第  $i$  個道路段之污染物平均濃度、路段長、速率，

經過  $n$  個道路段後可以從住家抵達學校。關於學童通勤速率，本研究參考了 112 年臺南市政府警察局所提供之固定式交通違規照相路段表進行計算（臺南市政府警察局，2018），並依汽車、機車等通勤方式進行計算，汽車使用之速限係根據汽車可通行之一般道路、快車道、高速公路等路段之測速照相機速限平均而得，機車則是依據一般道路、慢車道等機車可行駛之道路測速照相速限平均而得，汽車、機車平均速率約為 16.7m/s 與 16.3m/s。而關於學童步行速率則是參考國立成功大學交通管理系針對通學環境的研究（黃國平及陳佩君，2007），文中提及到一般成人的步行平均速率為 1.5m/s，然而學童行走的速率較一般成人慢，約為 1.2m/s，本研究後續採用此速率，並將其代入式(1) 完成時間的加權。圖 4 所呈現的是污染物在時間加權前後的變化示意圖，後續也將以加權後的潛在暴露進行計算。

### 2.3.2 路徑規劃與建議

路網規劃係使用 ArcMap 10.8 中 Network Analyst Tools 模組建立，其內建之演算法為 Dijkstra 演算法，用以解決最短路徑問題。此演算法最早由荷蘭計算機科學家 Edsger W. Dijkstra 於 1959 年提出 (Dantzig & Ramser, 1959)，它能夠找到由起點到目標節點的最短路徑，並計算出最短路徑過程中所累積的數值，基本原理是以起點為中心，逐步擴展到其他節點，過程中運用了貪婪演算的概念，在面對路段選擇時，會根據當下最短距離的節點作為下一個擴展的地方，並進一步更新與該節點相鄰的節點為最短距離，下面是 Dijkstra 演算法的基本步驟 (ESRI, 2021)：

- (1) 初始化：設定起點到起點的最短距離為 0，而在最初階段與其他節點的最短距離為無窮大（或者一個極大的數字）。
- (2) 選擇當前最短距離的節點，作為擴展的下一個節點。
- (3) 更新與該節點相鄰的節點的最短距離，如果通過該節點到達其他節點的距離比當前最短距離小，則更新最短距離。
- (4) 標記該節點為“已訪問”。

- (5) 重複前 3 個步驟，直到所有節點都被訪問過或是已找到目標的節點。
- (6) 從起點到目標節點的最短路徑即為所有“已訪問”節點中的最短距離。

在實際應用到路徑規劃中，除了路段距離之外，我們還考量了潛在  $PM_{2.5}$  暴露數值，因此我們將各路網段所萃取出之污染物濃度值加到原先路網圖層的屬性表。後續進行規劃時，可以選擇要考慮的屬性是道路長度，抑或是潛在  $PM_{2.5}$  暴露值。本研究後續以學童實際路徑為對照組，而最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑為實驗組，透過情境上的比較，提供學童最佳路徑建議。圖 5 是幫助我們了解路徑規劃差異的示意圖，上面汽車為學童就學的接送汽車，如果學童行走原先的實際路徑，通勤路線便是沿著橘色的路徑行走；若學童是選擇最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑行走，則是會沿著藍色的路徑抵達學校，而根據此兩條路徑的不同，通勤距離及暴露也可能會產生差異。

完成路線規劃後，為了評估兩條路徑對於學童通勤過程中的影響，同步加總了通勤距離、 $PM_{2.5}$  潛在暴露值，並計算以下 4 項指標與最短路徑進行比較，作為路徑建議的參考。

- (1) 潛在空氣污染暴露
- (2) 學童就學通勤距離
- (3) 距離增減百分比
- (4) 暴露增減百分比

## 3. 結果

本研究以實際路徑為控制組，最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑為實驗組，比較 62 名學童在通勤距離與空氣暴露上的改善程度，下表 1 為路徑規劃的整體結果表，從表中可以發現，實際路徑的平均  $PM_{2.5}$  暴露為  $2248.31 \mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，平均距離為 2471.10 m；而最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑中  $PM_{2.5}$  暴露量降低至  $2042.31 \mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，減少了約 6.84%；平均距離則降低至 2262.68 m，減少約 6.13%。從此項成果可以發現，透過最低空氣污染暴露路徑，學童不但能夠降低通勤過程中的總體空氣污染暴露，還能在減低平均路途中的距離。

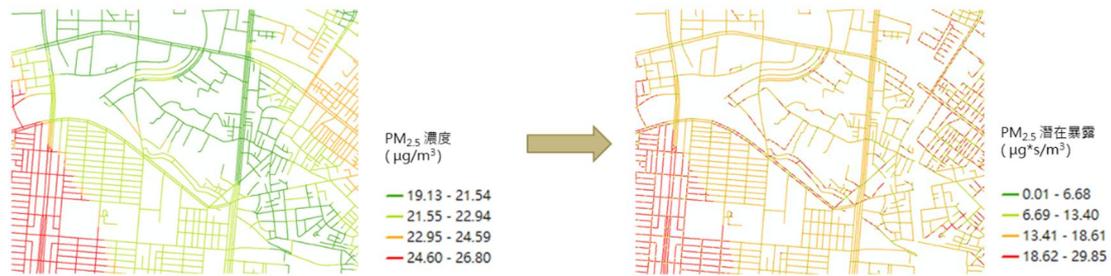


圖 4 污染物潛在暴露加權示意圖



圖 5 學童通勤路徑示意圖

表 1 路徑規劃成果表

規劃情境	平均暴露 ( $\mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ )	暴露增減百分比	平均距離 (m)	距離增減百分比
實際路徑	2248.31		2471.10 m	
最低 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露路徑	2042.31	-6.84 %	2262.68 m	-6.13 %

表 2 不同交通方式之路徑規劃成果

交通方式	規劃情境	平均暴露 ( $\mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ )	暴露增減百分比	平均距離 (m)	距離增減百分比
走路 (2 位)	實際路徑	2382.00	0%	198.80	0%
	最低 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露路徑	2382.00		198.80	
機車 (37 位)	實際路徑	1611.76	-5.73%	1439.29	-6.79%
	最低 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露路徑	1483.22		1300.35	
汽車 (23 位)	實際路徑	4051.11	-7.31%	3538.16	-7.53 %
	最低 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露路徑	3696.07		3206.37	

表 2 是將 62 位學童依照交通方式進行分類，並統計其實際路徑與最低  $\text{PM}_{2.5}$  暴露路徑的差異，其中走路、家長機車、汽車接送分別佔了 2、37、23 位，由此可知，大部分家長以機車接送學童為主，汽車接送為輔，走路通勤的學童比例甚少。在走路通勤的學童中可以發現，實際路徑中通勤距離約為

198.80 m、 $\text{PM}_{2.5}$  暴露總量為  $2382.00 \mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，由於行走路線較近，可以選擇其他替代道路的方式較少，因此學童實際通勤路徑即為最低  $\text{PM}_{2.5}$  暴露路徑；至於家長以機車接送的學童，實際路徑中通勤距離約為 1439.29 m、 $\text{PM}_{2.5}$  暴露總量為  $1611.76 \mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，若改走最低  $\text{PM}_{2.5}$  暴露路徑，不但能夠降低 5.73%

的空氣污染暴露，還能減少 6.79% 的通勤距離；最後是家長以汽車接送的學童，實際路徑中通勤距離約為 3538.16 m、PM<sub>2.5</sub> 暴露總量為 4051.11  $\mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，若改走最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑，不但能夠降低 7.31% 的空氣污染暴露，還能減少 7.53% 的通勤距離。

接著我們從個案的狀況進行探討，此處分別從三種通勤方式中選擇一位學童進行分析，首先是走路通勤的學童，如圖 6 所示，圖中紅色路徑為實際路徑，綠色路徑為最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑，在此學童的情形中，其通勤路徑即為最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑。此外，在兩位走路通勤的學童中，其住家距離學校較近，分別為 217.10 m、114.24 m，若以 1.2 m/s 計

算行走的速率，其通勤僅約 3 分 37 秒及 1 分 54 秒。

接著是機車接送的學童，如圖 7 所示，圖中紅色路徑為實際路徑，綠色路徑為最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑，此學童實際路徑之通勤距離為 4412.09 m，暴露量為 3942.69  $\mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑相較於實際路徑，通勤距離下降 21.2%，空氣污染暴露下降 20.7%，且由於此個案是較長距離通勤者，若假設以前文所提到的機車通勤速率 16.3m/s 進行計算，實際路徑需要 4 分 30 秒抵達學校，最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑不僅可縮短時間至 3 分 33 秒，且大量減少過程中的空氣污染暴露。



圖 6 個案分析(走路通勤學童)



圖 7 個案分析 (機車通勤學童)



圖 8 個案分析 (汽車通勤學童)

若以汽車接送的學童，如圖 8 所示，此學童實際路徑之通勤距離為 3468.03 m，暴露量為 3648.75  $\mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，最低  $\text{PM}_{2.5}$  暴露路徑相較於實際路徑，通勤距離下降 20.0%，空氣污染暴露下降 15.7%，若假設以速率 16.7m/s 進行計算，最低  $\text{PM}_{2.5}$  暴露路徑可將通勤時間從 3 分 28 秒縮短至 2 分 47 秒，且同樣大幅減少過程中的空氣污染暴露。

## 4. 討論

### 4.1 空氣污染模型

本研究使用之污染物為前人所訓練之機器學習模型，並利用其推估之 2022 年臺南市  $\text{PM}_{2.5}$  濃度推估圖進行分析，從其結果可以發現  $\text{PM}_{2.5}$  模型的解釋力 ( $R^2$ ) 高達 94%，具有高度的解釋能力。除此之外，此研究在時間與空間驗證成果之  $R^2$  同樣達到 87%~93%之間，代表模型成果也能夠良好地適應不同時間、空間上的變化，在後續小範圍尺度之通勤路徑規劃十分適合。此外，根據圖 3 的濃度圖中，臺南市  $\text{PM}_{2.5}$  濃度高的區域在西南部，與受試者就學區域相近，因此，此區域空氣對學童健康上的影響是我們應當重視的。

### 4.2 路徑規劃成果

從表 1 的路徑規劃的總表中，最低  $\text{PM}_{2.5}$  暴露路徑中可使  $\text{PM}_{2.5}$  暴露量減少了約 6.84%，平均距

離則降低約 6.13%，代表在 62 位受試者中實際路徑並無法同時考量空氣污染的負面影響，造成通勤圖中的空氣污染總暴露上升，此外，實際路徑之通勤距離較長，代表學童也需要花更久的時間才能抵達學校。如上述所提到的情形，若學童改走最低空氣污染暴露路徑，學童不但能降低通勤過程中的總體空氣污染暴露，還能在減少通勤的時間，而以較短的時間抵達學校，也是減少通勤過程中的空氣污染暴露的方式之一。

關於暴露總量的部分可根據行政院環境部所做之研究討論，其蒐集了 2017 年 4、5 間於大臺北地區通勤期間空氣污染物暴露量，透過微型感測器的配戴來模擬人們在不同通勤方式下的暴露情形 (賴溫狼, 2018)，研究範圍東西向從南港展覽館到亞東醫院，南北向從捷運新店站到捷運北投站，使用交通工具為汽車、捷運、公車及機車等的空氣污染暴露與排放程度。根據結果，各通勤方式的  $\text{PM}_{2.5}$  暴露平均濃度分別為汽車 7.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、捷運 21.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、公車 23.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  及機車 32.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，由此可知，機車在通勤過程中的平均濃度最高，而這主要是因為機車比起其餘通勤方式更加接近空氣污染源，如道路廢氣。在排放程度的部分，雖然汽車的  $\text{PM}_{2.5}$  暴露量是最低的，但若以一臺車二名乘客換算，單位產生的污染程度卻是最高，約為 0.31g，其餘捷運、公車及機車則為 0.01、0.08 及 0.23g，因此仍建議通勤

學生可以多搭乘大眾交通運輸工具，減少環境整體的空氣污染程度。相較之下，本研究建議機車通勤的學童能夠多以最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑就學，降低過程中的空氣污染暴露以及實際對環境的污染。另外，以汽車通勤為主的學童其潛在  $PM_{2.5}$  暴露與本研究之數值相比會有顯著的下降，不過其一是要建立在車子在行駛過程中緊閉無通風，且只使用汽車當作唯一交通工具。倘若有改以行駛機車、走路等其他通勤方式通勤時便可以參考最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑以降低潛在暴露。此外，若汽車駕駛過程中有可能開啟車窗也建議行駛最低暴露路徑，以免暴露在更高的空氣污染風險。

從通勤方式的不同也可以觀察到一個現象，走路的學童雖然通勤距離是所有學童當中平均最短的，然而其在過程中所累積的空氣污染暴露總量並不一定是最低的，反而可能因為花更多時間在室外，使得暴露量較高，若我們參考表 2 將步行、機車接送與汽車接送的學童通勤時間進行平均，則分別需要花 2 分 46 秒、1 分 39 秒、4 分 03 秒，可以發現，儘管走路距離是最短的，但平均花費在戶外的時間比機車通勤的學童還長。此外，若我們以平均  $PM_{2.5}$  暴露數值來觀察，走路的總暴露是高於機車的，因此若在行走時能適當遠離道路上的汽機車，將有助於減少路途中的空氣污染暴露。

### 4.3 應用建議

關於此項路徑規劃的分析，後續可進一步應用於通勤的上班族，由於本研究針對的對象是學童，多半會是住在離學校較近的區域，因此暴露改善效果並不一定顯著，但若以大臺北都會區的通勤族為例，由於通勤過程中常常需要耗費約半小時以上才能抵達工作地點，暴露改善效率預期會比學童改善效率更加明顯，在後續估計不同路徑中的距離、空氣污染暴露會更加有參考價值，且能改善空氣污染對人體的影響。路徑建議可提供政府用於未來行人、自行車專用道的設置參考，透過良好且安全的專用道設置，不但可以降低學童直接暴露在汽機車排放的風險，還能確保通勤過程的安全，獲得通勤改道所帶來的群體改善效益。最後是從群眾的角度來看，

若能將空氣污染暴露結合至 APP 並持續更新，能使民眾獲得更即時的最佳路徑建議，減低在室外空氣污染的暴露。

## 5. 結論與建議

空氣污染是全球各地普遍存在的問題，然而，在平日中通勤卻常使人們無可避免暴露於空氣污染，因此如何改善過程中的暴露是我們所關注的議題，本研究的對象選擇了國小學童，主因是考量到其免疫力相比成年人更為脆弱。在污染物濃度分布圖中，透過機器學習訓練，獲得了高時空解析度之  $PM_{2.5}$  污染物濃度，讓我們能更仔細地探討污染物對學童的健康影響。在  $PM_{2.5}$  數值的推估中，我們發現臺南市西南方是濃度相對偏高的區域，此區域恰好也是人口數較多、密度較高的區域，也代表較多臺南市學童暴露於較高風險的空氣污染危害之中。路徑規劃的部分，我們針對了距離、暴露等 4 項指標量化實際路徑與最低  $PM_{2.5}$  暴露路徑的情形，並針對 62 位學童以及 3 種交通方式的個案進行分析，提供通勤路徑的建議。就整體成果來說，絕大多數學童皆可以找到較低空氣污染暴露的路徑，抑或是本身的通勤路徑便已經是最低空氣污染暴露，透過路徑建議可以更視覺化的方式提供替代道路的建議，讓學童得以更有效率地降低學童通勤過程中之暴露，還能進一步減少其誘發呼吸道疾病之風險。本研究的優勢是使用機器學習算法獲得高時空解析度之污染物圖，並提供替代路徑做為通勤上的建議，讓學童們可以在稍微增加通勤距離的同時，減少通勤空氣污染暴露。此外，在量化兩條路徑的通勤距離與空氣污染暴露的增減，可提供替代路徑的建議，而視覺化的方式可以讓學童以及家長在未來通勤時容易參考可改走的路段。

關於後續研究的方向，本研究目前採用的是  $PM_{2.5}$  日平均濃度圖透過 ArcMap 10.8 平均融合成一個新的  $PM_{2.5}$  年平均濃度圖 (Mosaic to new raster)，這可能會無法完整地代表通勤時段的空氣污染情形，可考慮使用上午或下午通勤時段、特定都市通勤區域進行污染物模型建立，便能更針對性地依照

當下狀況微調以及提供建議。此外，學童通勤方式、暴露濃度的確有可能受到不同季節之影響，例如：夏天、冬天可能因為氣候過於炎熱或是寒冷，使得汽車通勤的學童增加，PM<sub>2.5</sub> 暴露濃度也可能因為不同季節而改變，使得學童的最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑有些微的改變。未來若能針對學童不同季節探討其就學路徑的差異，將能更好地了解學童的通勤行為模式，並降低其通勤過程中的暴露。在速率的計算上，由於沒有學童實際通勤的速率資訊，因此我們只能先假設汽車、機車、走路之行駛速率恆定，由於污染物潛在暴露可能取決於學童實際停留在各路段的時間，因此若能使用穿戴式裝置配合空氣污染濃度圖成果，將能更加提升成果的精確性。

在通勤方式的部分，根據 111 年交通部電訪之國小學童的通勤方式分析，私人機動運具（自用小客車、機車、其他私人機動運具等）佔總體比例的 83.7%，其中機車佔比為 63.5%（交通部，2023）。與本研究結果相似，國小學童多半以家長親自接送為主，而其中又以機車佔據大宗，因此，未來研究可針對機車接送的學童，探討其潛在空氣污染暴露量，若其距離學校較遠，則需注意長期待在室外是否會影響學童的健康。

在獲知受試者的實際路徑後，便能以圖 6 至圖 8 的方式呈現兩條路徑，也可以更清楚了解如何進行通勤路徑之改道，達到空氣暴露減量的目的。在分析完路徑規劃成果後，根據污染物平均濃度的增減還可進一步換算學童疾病相對風險的增減，例如：長期暴露在不同污染物之下，平均濃度之增減可以換算學童氣喘發生風險的比例。根據一項臺灣孩童氣喘與周邊空氣污染之研究（Chen *et al.*, 2019），選擇了環保局監測站周邊 44 間國小與國中學童作為研究對象，成果中可以發現，在 2016~2017 年之氣喘風險比例為 PM<sub>2.5</sub> 每增加 7.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，氣喘勝算比 (OR) 為 1.24 (1.04, 1.48)，代表暴露在高 7.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  濃度之環境可能造成氣喘風險相較於其他孩童增加 24%。以本研究受試者之 PM<sub>2.5</sub> 暴露為例，若將平均 62 位受試者進行換算，長期行走最低 PM<sub>2.5</sub> 暴露路徑約可以使氣喘整體風險下降約 0.4%，因此透過每日行走較低空氣污染暴露的路徑，長遠來看勢

必可以對健康有不少的實質幫助。

## 參考文獻

- 行政院環境部，2024a。111 年空氣品質監測年報，  
<https://www.moenv.gov.tw/Page/686030BBD5DFC8DD>，引用 2023/3/27。[Ministry of Environment, 2024a. Air Quality Annual Report of R.O.C. (Taiwan), 2022, Available at: <https://www.moenv.gov.tw/Page/686030BBD5DFC8DD>, Accessed March 27, 2023. (in Chinese)]
- 行政院環境部，2024b。細懸浮微粒一日變化特徵，  
[https://airtw.moenv.gov.tw/CHT/Encyclopedia/pedia09/pedia9\\_3.aspx](https://airtw.moenv.gov.tw/CHT/Encyclopedia/pedia09/pedia9_3.aspx)，引用 2023/3/27。[Ministry of Environment, 2024b. Shi shiuan fu wei li yi r bian hua te jeng, Available at: [https://airtw.moenv.gov.tw/CHT/Encyclopedia/pedia09/pedia9\\_3.aspx](https://airtw.moenv.gov.tw/CHT/Encyclopedia/pedia09/pedia9_3.aspx), Accessed March 27, 2023. (in Chinese)]
- 交通部，2023。111 年民眾日常使用運具狀況調查統計表，  
<https://www.motc.gov.tw/ch/app/data/view?module=survey&id=56&serno=202304280010>，引用 2023/5/31。[Ministry of Transportation and Communications, 2023. 2022 Nian min jung r chang shr yung yun jiu juang kuang diau cha tung ji biao, Available at: <https://www.motc.gov.tw/ch/app/data/view?module=survey&id=56&serno=202304280010>, Accessed May 31, 2023. (in Chinese)]
- 黃國平、陳佩君，2007。社區安全通學環境之規劃設計與檢討-以東明里為例，健康城市學刊(五)：70-78。[Hwang, K.P, and Chen, P.C., 2007. Planning and review of safe commuting environment for community students- A case of Dong-ming division, Journal of Healthy Cities, Taiwan (5): 70-78. (in Chinese)]

- 臺南市政府警察局，2018。固定式交通違規照相路段，  
<https://www.tnpsd.gov.tw/waypoint/Index/4bec9ef-f-47c9-84ac-196e-72d68e3135b6>，引用 2023/5/31。[Tainan City Police Department, 2018. Gu ding shr jiau tung wei guci jiau shiang lu duan, Available at: <https://www.tnpsd.gov.tw/waypoint/Index/4bec9ef-f-47c9-84ac-196e-72d68e3135b6>, Accessed May 31, 2023. (in Chinese)]
- 賴溫狼，2018。環署實測大台北通勤空品 機車污染物暴露最高、排放第二，  
<https://csrone.com/news/4880>，引用 2023/9/27。  
 [Lai, W.H, 2018. Huan shu shr tse da tai bei tung chin kung pin ji che ran wu pu lu tzuei gau, pai fang di er, Available at: <https://csrone.com/news/4880>, Accessed September 27, 2023. (in Chinese)]
- Chen, B.Y., Chen, C.H., Chuang, Y.C., Wu, Y.H., Pan, S.C., and Guo, Y.L., 2019. Changes in the relationship between childhood asthma and ambient air pollution in Taiwan: Results from a nationwide survey repeated 5 years apart, *Pediatric Allergy and Immunology*, 30(2): 188-194, DOI: 10.1111/pai.12999.
- Dantzig, G.B., and Ramser, J.H., 1959. The truck dispatching problem, *Management Science*, 6(1): 80-91, DOI: 10.1287/mnsc.6.1.80.
- Elford, S., and Adams, M.D., 2019. Exposure to ultrafine particulate air pollution in the school commute: Examining low-dose route optimization with terrain-enforced dosage modelling, *Environmental Research*, 178: 108674, DOI: 10.1016/j.envres.2019.108674.
- ESRI, 2021. Algorithms used by the ArcGIS Network Analyst extension, Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/exten-sions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>, Accessed August 17, 2023.
- Gao, L.-N., Tao, F., Ma, P.-L., Wang, C.-Y., Kong, W., Chen, W.-K., and Zhou, T., 2022. A short-distance healthy route planning approach, *Journal of Transport & Health*, 24: 101314, DOI: 10.1016/j.jth.2021.101314.
- Landrigan, P.J., Fuller, R., Fisher, S., Suk, W.A., Sly, P., Chiles, T.C., and Bose-O'Reilly, S., 2019. Pollution and children's health, *Science of the Total Environment*, 650: 2389-2394, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.375.
- Luo, J., Boriboonsomsin, K., and Barth, M., 2020. Consideration of exposure to traffic-related air pollution in bicycle route planning, *Journal of Transport & Health*, 16: 100792, DOI: 10.1016/j.jth.2019.100792.
- Perera, F.P., 2017. Multiple threats to child health from fossil fuel combustion: impacts of air pollution and climate change, *Environmental Health Perspectives*, 125(2): 141-148, DOI: 10.1289/EHP299.
- Salvi, S., 2007. Health effects of ambient air pollution in children, *Paediatric Respiratory Reviews*, 8(4): 275-280, DOI: 10.1016/j.prrv.2007.08.008.
- Shukla, K., Kumar, P., Mann, G.S., and Khare, M., 2020. Mapping spatial distribution of particulate matter using Kriging and Inverse Distance Weighting at supersites of megacity Delhi, *Sustainable Cities and Society*, 54: 101997, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101997.
- WHO, 2024. Ambient outdoor air pollution, Available at: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), Accessed June 26, 2023.

- Wong, P.-Y., Lee, H.-Y., Chen, Y.-C., Zeng, Y.-T., Chern, Y.-R., Chen, N.-T., Lung, S.-C. C., Su, H.-J., and Wu, C.-D., 2021a. Using a land use regression model with machine learning to estimate ground level PM<sub>2.5</sub>, *Environmental Pollution*, 277: 116846, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116846.
- Wong, P.-Y., Su, H.-J., Lee, H.-Y., Chen, Y.-C., Hsiao, Y.-P., Huang, J.-W., Teo, T.-A., Wu, C.-D., and Spengler, J.D., 2021b. Using land-use machine learning models to estimate daily NO<sub>2</sub> concentration variations in Taiwan, *Journal of Cleaner Production*, 317: 128411, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128411.

# Commuter Route Planning for Elementary School Children Considering Multiple Air Pollution Exposures

Ji-Ting Ho <sup>1</sup>    Pei-Yi Wong <sup>2</sup>    Chih-Da Wu <sup>3,4,5\*</sup>

## Abstract

Approximately 99% of the global population resides in areas with air pollution higher than World Health Organization (WHO) guidelines. Among these, school children are particularly vulnerable due to their immature immune systems. This study focused on 62 school children recruited in 2022 from Tainan city. For air pollutant data, it was based on the estimated concentrations of PM<sub>2.5</sub> model. from previous study. It had been published to the journal and its R<sup>2</sup> is about 94%, which demonstrated high explanatory power. In commuter route planning, the least PM<sub>2.5</sub> exposure routes can not only reduce average PM<sub>2.5</sub> exposure by 6.84% but also 6.13% decrease in commuting distance. If we divide school children into 3 categories with different commute modes, we found that 37 school students go to school by motorcycle, which is the predominant way, followed by car and walking those 23 and 2 students travel by these ways. Among these commute modes, walking commute featured its shorter distances, however, it also has longer outdoor exposure time, while motorcycle commute is more directly exposed to vehicular emissions. These factors mentioned above collectively contribute to increasing potential air pollution exposure. Thus, we need to give school children proper route suggestion to improve this situation.

**Keywords: Air Pollution, School Children, Commuter Route Planning, Potential Air Pollution Exposure, Route Suggestion**

---

<sup>1</sup> Master Student, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

<sup>2</sup> Doctoral Student, Department of Environmental and Occupational Health,  
College of Medicine, National Cheng Kung University

<sup>3</sup> Professor, Department of Geomatics, National Cheng Kung University

<sup>4</sup> Adjunct Associate Research Fellow, National Institute of Environmental Health Sciences, National Health Research Institutes

<sup>5</sup> Professor, Innovation and Development Center of Sustainable Agriculture, National Chung Hsing University

\* Corresponding Author, E-mail: chidawu@mail.ncku.edu.tw

Received Date: Oct. 17, 2023

Revised Date: Mar. 15, 2024

Accepted Date: May. 22, 2024