

建立以都市型態參數為基礎之都市通風潛力預測模型

黃詩涵^{1*} 黎益肇² 陳瑞華³

^{1*} 國立臺灣科技大學營建工程系 碩士

² 國立臺灣科技大學臺灣建築科技中心 助理教授

³ 國立臺灣科技大學營建工程系 副教授

摘要

由於都市熱島效應與霧霾問題日益嚴重，都市風廊規劃成為重要的緩解手段。然而，現有方法多以地表粗糙度為判斷依據，僅基於簡化建築配置的經驗公式推估，未能考慮零風位移面於邊界層中的抬升效應，易造成通風潛力評估偏差。為更準確反映都市風場，本研究以中尺度氣象資料為基礎進行降尺度之都市區域 CFD 模擬，以獲得 30 公尺解析度單位寬度流量，進一步結合都市型態參數，建立通風潛力初評之預測模型。

CFD 模擬數據範圍涵蓋大台北地區，分析尺度設定為 50 公頃，流量積分高度為 15 公尺，劃分 49 區作為迴歸資料，另取 22 區作為驗證資料。研究流程包含參數計算、變數正規化與迴歸建模，最終以多變數迴歸建立預測模型。結果顯示，模型於迴歸階段之均方根誤差為 0.024，驗證階段均方根誤差僅 0.003，顯示模型具良好準確性，可作為都市通風潛力快速評估及風廊規劃之有效工具。

關鍵字：都市風廊，變數迴歸，都市型態測定法，通風潛力，計算流體力學

Keywords: urban wind corridors, regression analysis, urban morphology, ventilation potential, Computational Fluid Dynamics.

1.前言

隨著都市化與人口規模快速擴張，建築密度與能源消耗不斷增加，都市熱島效應日益嚴重，且在全球暖化與極端氣候的影響下更趨惡化。如何改善城市微氣候並提升熱環境舒適性，已成為都市規劃的重要課題，其中「都市風廊」被視為有效手段。然而，通風潛力 (Ventilation Potential, VP) 的準確評估，仍是實務與研究上的挑戰。

現有研究多以天空可視因子 (SVF)、地表粗糙度 (z_0) 與建築迎風面面積等指數等作為評估依據，例如 Guo (2023) 與 Ren (2018)。此外，Kent (2017) 中提到的多數研究方法建立於簡化建築形態對數律，難以真實反映複雜都市格局這些方法往往基於簡化假設，難以反映真實都市流況，且普遍忽略零風面位移 (z_d) 在大氣邊界層中垂直抬升的效應，可能導致通風潛力高估。

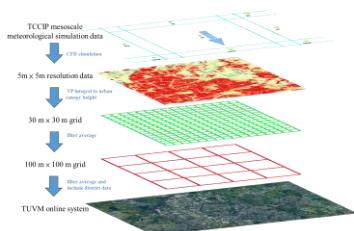
為解決前述問題，本研究結合都市型態參數與 CFD 模擬結果，以單位寬度流量為基礎建立簡化的 VP 預測模型。研究流程包含參數篩選、迴歸建模與驗證，期能發展出兼具效率與精度的都市通風潛力評估方法，進一步作為於都市風廊規劃之基礎數據。

2.研究方法

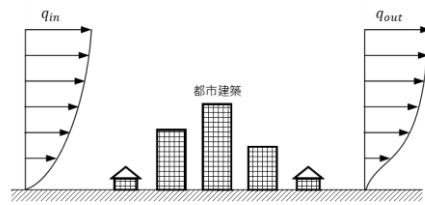
2.1 通風潛力分析

本研究以通風潛力為主要預測目標，並以 CFD 模擬結果作為基準。模擬範圍涵蓋大台北地區，為兼顧精度與效率，將研究區域劃分為 49 個 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 子區塊，並設置 500 m 重疊帶以避免邊界效應。模擬流程包括建構三維都市模型與 CFD 網格、蒐集氣象與台灣氣候變遷推估與資訊平台(TCCIP) 資料以設定盛行風條件，最後輸出地表至 15 m 高度的風速場，並以 30 m 解析度轉換至地理資訊系統 GIS(如見圖一)。

通風潛力的計算可分為兩個階段。第將地表至 15 m 高度的風速場積分以獲得單位寬度流量 q 。第二階段則定義通風潛力 VP 為出流流量(q_{out})與入流流量(q_{in})之比值($VP = q_{out}/q_{in}$)(如圖二)，此比值能夠反映風量在區域中增強或衰減的程度。根據陳希舜等(2024)所建立的分級標準， $VP < 0.5$ 表示為低潛力， $0.5 \sim 0.75$ 為中等潛力， $VP \geq 0.75$ 則為高潛力，數值越高代表區域通風條件越佳。



圖一：CFD 資料統合示意圖



圖二：通風潛力示意圖

2.2 建築型態參數

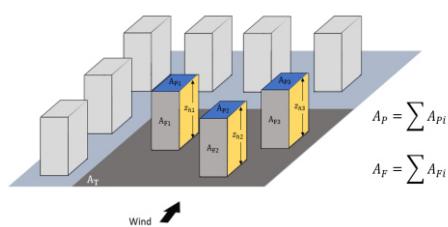
為使模型能夠透過都市形態推估通風潛力，本研究選取六項都市型態參數作為輸入，包括 λ_P 、 λ_F 、 H_{ave} 、 σ_H 、 H_{max} 及 SVF 等基本變數(如圖三)，並透過經驗公式推估 z_d 。以下說明個基本變數定義：

1. 建築平面面積指數(λ_P)： λ_P 表示建築物總平面面積與地塊總面積之比值，用以反映地塊內建築密度。計算式為 $\lambda_P = A_P/A_T$ 。 A_P 為地塊內所有建築物的總平面面積， A_T 為地塊總面積。
2. 建築迎風面面積指數(λ_F)： λ_F 為沿著主入流風向方向的建築物迎風投影面積與地塊總面積之比值。其計算公式為 $\lambda_F = A_F/A_T$ 。其中， A_F 為沿主風向之建築迎風面積。
3. 平均建築高度(H_{ave})：指地塊內所有建築物的平均高度。
4. 建築高度標準差 (σ_H)：反應地塊內建築高度的離散程度。當 σ_H 較大時，表示建築物高低落差較顯著。
5. 建築最高高度 (H_{max})：指地塊內建築物的最高高度。
6. 天空可視因子 (SVF)：SVF 為無單位指標，數值範圍介於 0 至 1，用以表示從地面觀測點向上所能見之天空比例。SVF 計算方式參考 Ren(2018)所建議的方法，如圖四所示。
7. 零風面位移 (z_d)：指考量地表障礙造成對數律風剖面抬升的修正高度，本研究採用 Kent(2017)所歸納的迴歸公式進行估算。

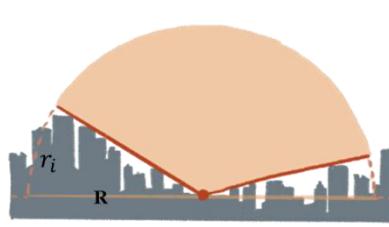
2.3 資料篩選與分析

本研究的分析流程可分為區域選取、參數計算與正規化、模型建構、模型驗證等四個部分。研究區域以街廓(圖五)為基本單元，目標面積設定為 50 公頃，並依據都市更新與重劃區之規劃標準進行人工框選，允許 $\pm 50\%$ 彈性調整。最終共取得 49 個樣區作為迴歸樣本，以建立迴歸模型。

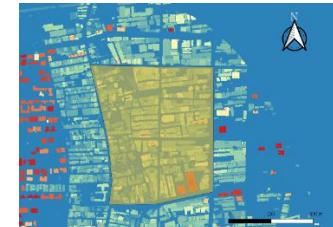
於此先針對各都市型態參數與通風潛力之關聯性做初步觀察，圖六顯示了各參數與通風潛力之間的關係。可以發現除 λ_P 外，其餘參數皆與通風潛力呈現一定的相關趨勢。整體看來， λ_F 、 H_{ave} 、 σ_H 與 H_{max} 均與通風潛力呈現負相關，而 SVF 與通風潛力則呈現高度正相關。不過大部分變數與 VP 的相關性偏低，後續應進行正規化與變數轉換來提升相關性。



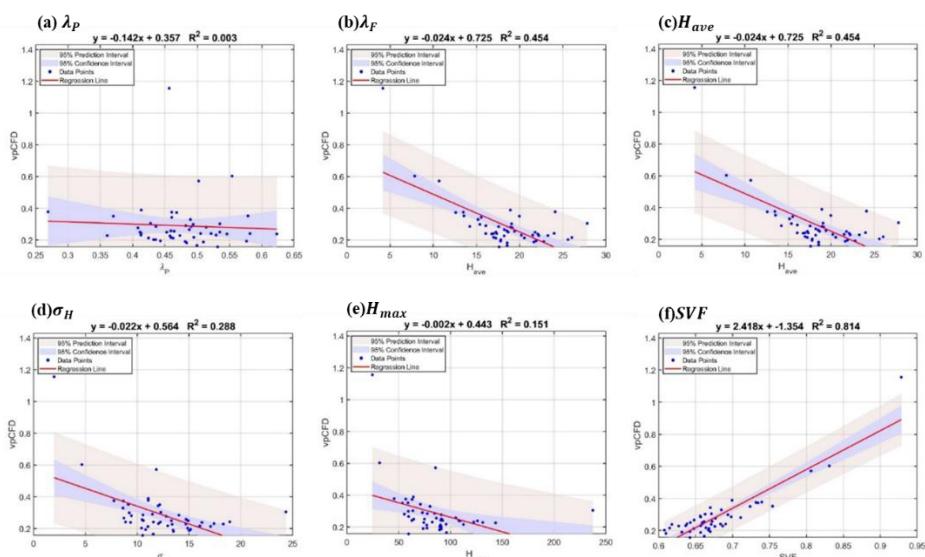
圖三：地塊計算示意圖



圖四：SVF 計算示意圖



圖五：街廓切割示意圖



圖六 參數與 VP 趨勢圖

在都市型態正規化部分，參考 Kent(2017)的建議型式，將參數整合為無因次組合變數 $X(= [\sigma_H + H_{ave}] / H_{max})$ 與 $Y(=\lambda_P \sigma_H / H_{ave})$ 。另將針對單位出流流量建立正規化參考風速參數(Q)，並以 Q 取代原通風潛力建立模型，其定義如見 No.1(表一)。其中， $U_{ref,out}$ 為 CFD 模擬地塊中參考高度處之平面平均風速，亦會隨著建築型態參數而改變。因此另外建立正規化參考風速 U_{ref}^* ，定義如見 No.2(表一)，其中 $U_{ref,in}$ 為 CFD 模擬之入流邊界設定的風速。最終模型將迴

歸出 Q 與 U_{ref}^* 公式，並整合為可由都市型態參數直接推估 VP 的模型公式。此外，模型準確性以決定係數 (R^2) 與均方根誤差 (RMSE) 檢驗。為驗證模型在不同場域的適用性，本研究於大台北地區另選 22 區作為驗證集，並參考 Gousseau(2013)的方法，採用相關係數 (R)、RMSE、平均偏差 (FB) 及誤差落於二倍範圍內比例 (FAC2) 作為評估指標。

表一：參數 Q 與 U_{ref}^* 參數之定義

No.	Model	Definition
1	Q	$Q = \frac{q_{out}}{U_{ref,out}H_{max}}$
2	U_{ref}^*	$U_{ref}^* = \frac{U_{ref,out}}{U_{ref,in}}$

3.結果討論

3.1 單變數正規化模型分析結果

於此以單位出流寬度流量轉換的 Q 為應變數，分別與多項都市型態參數進行迴歸。表二結果顯示出 Q 與 X 和 Y 相關性最佳，而原先與 VP 高度相關的 SVF 在正規化框架下相關性顯著下降。為改善此問題，本研究基於幾何原理提出修正參數 $S (= SVF\sqrt{A}/H_{max})$ ，其結果顯著優於原始 SVF，因此後續多變數模型將採用 X 、 Y 與 S 作為自變數。

在建立正規化通風流量模型後，本研究進一步針對正規化參考風速 U_{ref}^* 進行建立模型。首先與多項都市型態參數進行單變數迴歸。觀察出平均建築高度 H_{ave} 、 U_{ref}^* 以及 SVF 三項參數與 U_{ref}^* 之間的關聯性最為顯著。接著將 H_{ave} 與 z_d 進行與參考高度 z_{ref} 進行無因次化處理為 $H_{ave}^* (= H_{ave}/z_{ref})$ 與 $z_d^* (= z_d/z_{ref})$ 。最後將 H_{ave}^* 、 z_d^* 與 SVF 作為自變數，與 U_{ref}^* 進行單變數迴歸，並依據結果挑選適合的迴歸函數形式(表三)，作為下階段多變數迴歸分析之基礎。

表二：參數與 Q 單變數迴歸結果

Input	λ_p	λ_F	H_{ave}	H_{max}	σ_H	SVF	X	Y	S
Equations									
RMSE	0.055	0.054	0.054	0.044	0.049	0.043	0.052	0.048	0.027
R^2	0.073	0.113	0.122	0.397	0.274	0.440	0.169	0.303	0.784

表三：參數與 U_{ref}^* 單變數迴歸結果

Input	z_d^*	H_{ave}^*	SVF
Equations	Exponential : $y=ae^{-bx}$	Exponential : $y=ae^{-bx}$	Linear : $y=ax+b$
RMSE	0.055	0.054	0.054
R^2	0.073	0.113	0.122

3.2 多變數正規化模型分析結果

關於正規化通風流量模型，在單變數迴歸的基礎上，本研究進一步將 X、Y 以及 S 進行多變數迴歸分析。由表四可以看出，採用 3 個參數組合的模型表現最佳，故後續採用 No.3(表四)作為通風潛力預測公式。此外，在正規化參考風速模型方面(表五)，在整合 z_d^* 、 H_{ave}^* 與 SVF 三項變數進行多變數迴歸以及測試不同函數形式後發現，該多變數模型能同時反映建築高度分布與天空開闊度對風速的影響，其相關性與誤差比較均優於單變數模型。

表四：參數與 Q 多變數迴歸結果

No.	input	output	Equation	RMSE	R^2
1	X, S	Q	$Q = -0.0220 + 0.1106X + 0.0148S$	0.025	0.820
2	Y, S		$Q = 0.0683 - 0.1918Y + 0.0141S$	0.024	0.830
3	X, Y, S		$Q = 0.0637X - 0.1423Y + 0.0140S + 0.0466$	0.024	0.839

表五： U_{ref}^* 多變數迴歸結果

Model						R	RMSE
$U_{ref}^* = a_0 e^{a_1 z_d^*} + a_2 e^{a_3 H_{ave}^*} + a_4 SVF + a_5$							
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5		
-15.3856	-0.0050	-33.3690	0.0103	2.1673	47.8928	0.8759	0.0645

3.3 模型整合

前述分析已建立正規化通風流量模型與正規化參考風速模型。然而，VP 係以單位流量比值定義，需將兩者結合方能推導出最終可由都市型態參數直接預測的公式。由出流流量定義 ($q_{in} = \int_{z_0}^{z_{ref}} U(z) dz$) 與入流流量定義 ($q_{in} = \int_{z_0}^{z_{ref}} U(z) dz$) 帶入 VP 定義式後得到：

$$VP = C_z Q H_{max}^* U_{ref}^* \quad (1)$$

其中， C_z 表示由 z_{ref} 與 z_0 計算而得的常數項 ($= \ln(\frac{z_{ref}}{z_0}) / (\ln(\frac{z_{ref}}{z_0}) - 1 + \frac{z_0}{z_{ref}})$)； H_{max}^* 表示 H_{max} 的正規化 ($H_{max}^* = H_{max}/H_{ave}$)； Q 與 U_{ref}^* 分別為正規化通風流量模型以及為正規化參考風速模型。

3.4 模型驗證

為檢驗所建模型在不同區域的適用性，本研究於台北市額外選取 22 個未作為迴歸資料集的區域進行驗證。這些區域涵蓋高、中、低三種類型之通風潛力，確保模型能在多樣條件下進行測試。表六彙整了 Q 模型、 U_{ref}^* 模型以及 VP 模型的驗證指標結果，結果顯示 3 種模型者在 RMSE、R、FB 及 FAC2 等評估項目上均具有良好表現，表示 VP 模型在測試區域中具有良好的準確性。

表六：模型驗證結果

Validation Index	Ideal Value	Q Model	U_{ref}^* Model	VP Model
RMSE	0	0.0031	0.0405	0.0657
R	1	0.9891	0.9190	0.8815
FB	0	-0.0294	-0.0184	0.0143
FAC2	1	1.0000	1.0000	1.0000

4. 結論與建議

本研究以中尺度氣象資料為基礎進行降尺度之都市區域 CFD 模擬，以獲得高解析度之單位寬度流量，再由流量推估的通風潛力進一步結合都市型態參數，透過參數篩選、迴歸建模與驗證等程序，發展出兼具效率與精度的通風潛力評估模型。此模型能在不需 CFD 模擬情況下快速應用，降低技術與時間成本，亦能合理反映都市風場環境，可作為都市風廊與重劃區通風規劃的重要工具，以下歸納本研究主要結論與建議：

1. 在建立過程中，確認組合參數 X、Y 與 S 為通風量的重要因子，其中 S 在單變數迴歸中相關性最高，在結合 X 與 Y 後可使模型整體相關性再提升 7%。
2. 建築參差不齊與街道開闊對通風具正面效益，而建築密度與高度增加則會削弱通風效果。
3. 參考風速模型同時受到建築高度與街道開闊的影響，呈現負相關。
4. 通風流量模型與參考風速模型整合後獲得通風潛力的簡化模型，主要採用線性或指數公式。後續研究可納入不同城市與區域資料，並結合機器學習方法，應有助於提升模型的泛用性與準確性。

5. 參考文獻

- [1] Guo, A., "Quantifying the impact of urban ventilation corridors on thermal environment in Chinese megacities," *Ecological Indicators*, 2023, Vol.156, p.111072.
- [2] Ren, C., "Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan – The implementation in Chinese cities," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, Vol.182, pp.170–188.
- [3] Kent, C. W., Grimmond, S. and Gatey, D., "Aerodynamic roughness parameters in cities: Inclusion of vegetation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017, Vol.169, pp.168–176.
- [4] 陳希舜、黎益肇、詹鈞評、蔡明修、許皓香，台灣都市通風地圖系統應用與驗證分析(一)，內政部建築研究所，2024 年。
- [5] Gousseau, P., Blocken, B. and Van Heijst, G.J.F., "Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification," *Computers & Fluids*, 2013, Vol.79, pp.120–133.