

大氣邊界層觀測、模擬技術與資料同化

Atmospheric Boundary Layer Observation, Modeling and Data Assimilation

鄭芳怡、王聖翔、楊舒芝

Fang-Yi Cheng, Sheng-Hsiang Wang, Shu-Chih Yang

大氣邊界層位於地表與自由大氣層之間，是受地表作用力影響而形成的區域，平均厚度約為一公里。邊界層內的氣象條件對於短期天氣系統的變化、長期氣候變遷以及空氣污染物的傳輸與擴散過程，具有重要影響。現代觀測技術，如探空氣球、無人機和微脈衝光達等，能夠提供邊界層垂直結構及氣象條件的詳細資料。除了觀測外，數值模擬也是解析邊界層演變過程的重要方法。目前，邊界層氣象模擬主要透過邊界層參數化方案或大渦流模擬進行。此外，資料同化技術結合邊界層觀測數據與氣象模擬，能有效提升氣象預報的準確性。本文系統性地介紹觀測技術、數值模擬和資料同化在大氣邊界層應用中的進展，以加深對邊界層的理解並提升其預報能力。

The atmospheric boundary layer, located between the Earth's surface and the free atmosphere, is a region influenced by surface forces, with an average thickness of approximately one kilometer. Meteorological conditions within the boundary layer play a critical role in the evolution of short-term weather systems, long-term climate changes, and the transport and dispersion of air pollutants. Modern observation technologies, such as radiosondes, drones, and micro-pulse lidars, provide detailed data on the vertical structure and meteorological conditions of the boundary layer. In addition to observations, numerical simulations are essential for analyzing the evolution of the boundary layer. Current boundary layer meteorological simulations primarily utilize boundary layer parameterization schemes or large-eddy simulations. Furthermore, data assimilation techniques that integrate boundary layer observational data with meteorological simulations can significantly enhance the accuracy of weather forecasts. This study systematically introduces advancements in observation technologies, numerical simulations, and data assimilation in the study of the atmospheric boundary layer, aiming to deepen our understanding of this region and improve its forecasting capabilities.

一、大氣邊界層

大氣邊界層是大氣中最接近地表的區域層，受到地表作用的影響，例如地表受熱與冷卻、摩擦力、陸氣交互作用等而形成。邊界層的厚度可從數百公尺到幾千公尺不等，也是人

類日常活動的主要範圍。都會地區的熱島效應、海陸風環流結構、農業氣象以及風能與光電能源的開發與評估，都與大氣邊界層的氣象特性密切相關。邊界層的氣象特徵直接影響天氣系統的發展以及大氣污染物的傳輸與擴散過程，因此準確掌握邊界層中的氣象變化，對於天氣預報和大氣環境監測具有重要意義。

大氣與地表間的動量、熱量、水氣交換過程，影響著邊界層內的熱力與動力特性。白天時，由於熱力作用主導，大氣呈現對流邊界層的特性，此時大氣污染物可隨著混合層 (mixing layer) 的發展，而被攜帶至混和層頂部。然而到了夜間，邊界層轉為穩定邊界層 (stable boundary layer)，污染物較難擴散，累積於近地表，常造成嚴重的空氣污染 (見圖1)。

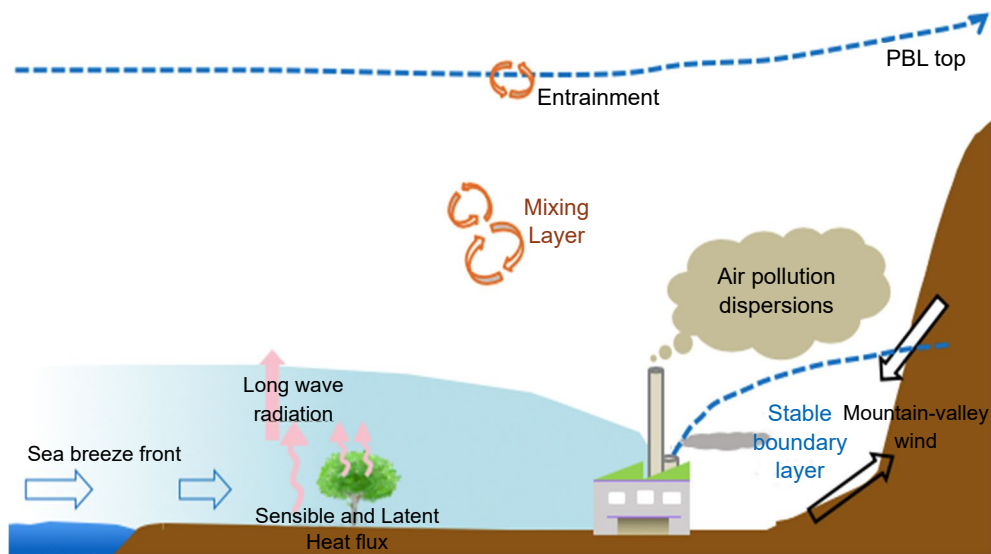


圖 1. 大氣邊界層地表—大氣交互作用與大氣混合過程示意圖。

過去，大氣垂直剖面的觀測主要依賴氣象署探空觀測資料，但由於測站分布稀疏，北臺灣僅有新店探空站，且時間解析度為一天早晚兩筆資料，無法解析邊界層日夜變化特徵。此外，每次探空所需經費不含人力即高達一萬塊臺幣，因此除了特殊觀測實驗計畫，政府及學界難以負擔如此龐大開銷。近年來，受惠於大氣邊界層觀測技術的提升，如無人機的發展以及迷你探空系統的開發，大大增進了對邊界層發展過程的理解。Ke et al. (2018) 利用無人機觀測夏季邊界層高度，飛行高度高達 3 公里，研究證明無人機應用於邊界層觀測的可靠度。作者群等人在 2020—2023 年春季期間，進行臺灣大氣邊界層觀測、模擬與資料同化實驗 (Taiwan Atmospheric Planetary boundary Layer Observation, Model and Data Assimilation, T-POMDA)，在中部、雲嘉南地區進行觀測與模擬實驗，以探討邊界層演變過程對空氣污染物的傳輸與擴散過程的影響。

除了透過觀測實驗計畫所收集的資料來解析大氣邊界層特徵，氣象數值模擬也是研究邊界層的重要方法。由於邊界層內部的湍流、熱量和氣水通量傳輸過程複雜，傳統數值模式主要透過邊界層參數化方案進行模擬，而這些假設也是氣象模擬不確定性的主要來源之一。邊界層的動力與熱力過程包含湍流、熱傳輸、輻射、摩擦力以及大氣穩定度變化等物理過程的交互作用，使得邊界層的演變過程難以單靠傳統模式準確模擬。隨著邊界層觀測技術的進步以及數值模式技術的進步，資料同化技術結合觀測資料與數值模式，提升了邊界層氣象與複雜環流結構的模擬成效 (Yang et al. 2022)。

本文從觀測技術、數值模擬及資料同化在大氣邊界層中的應用及進展，探討這些技術如何增進我們對大氣邊界層的理解及預報能力。

二、邊界層的觀測技術

1. 探空氣球與無人機

近年來，大氣垂直剖面觀測在大氣科學研究中扮演著關鍵角色。然而，傳統探空設備操作不便且成本高昂。為了解決此問題，在國科會及環境部的支持下，中央大學大氣系王聖翔教授團隊成功開發出一套具備高機動性與準確性的微型探空觀測系統 (圖 2)。該系統包含自行研發的 Aerosond 探空感測器，可同時量測壓力、溫度、相對溼度、經緯度以及 $\text{PM}_{2.5}$ 等重要參數。數據透過特製接收天線即時回傳，並由專用軟體進行資料處理與展示。技術團隊採用 C++ 編寫底層軟體，並以 JAVA 和 VB 開發操作介面，整合出一套完整的觀測解決方案。

此微型探空系統展現了卓越性能，僅進行氣象觀測時系統總重量為 9.8 公克，加裝 $\text{PM}_{2.5}$ 觀測模組後重量為 48.9 公克，具備極佳的攜帶性與操作便利性。通訊性能上，系統可垂直傳輸 10 公里、水平傳輸 100 公里，極大擴展了觀測範圍，為大氣科學研究提供了更完整的立體觀測數據，助於深入了解大氣邊界層的發展過程及空氣污染的形成機制。

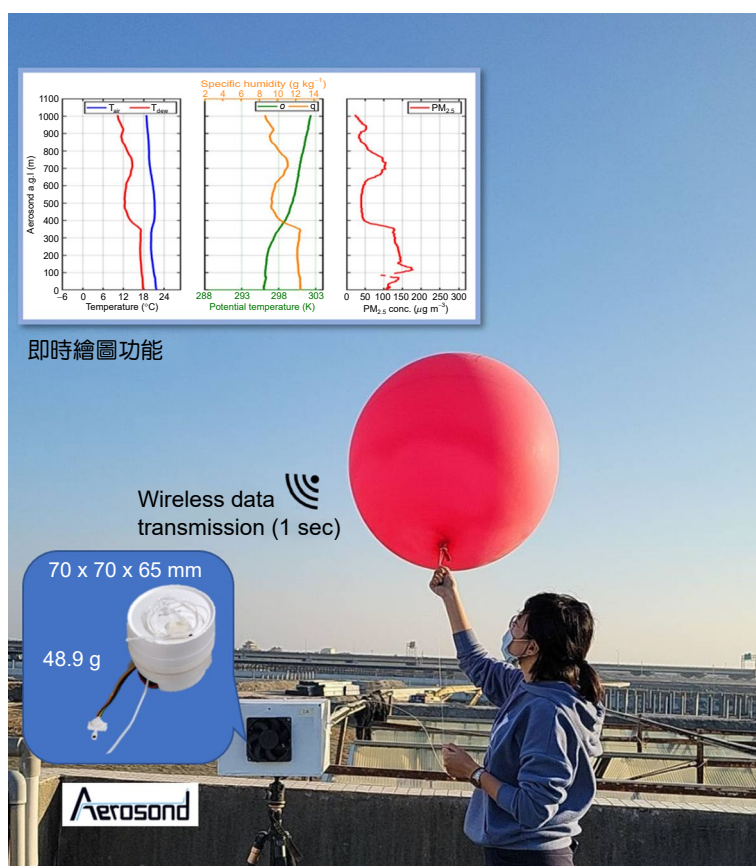


圖 2. T-POMDA 觀測實驗計畫期間，研究人員於臺南縣善化空品站進行探空氣球施放作業。

此外，無人機的應用為大氣邊界層觀測展開了新頁。自 2016 年開始，王聖翔教授團隊便投入了無人機的開發及大氣觀測應用，直至 2020 年更與氣象署成功開發出一套先進的無人機大氣觀測系統 (圖 3)，無人機型號代碼為 360V4，直徑 360 mm 的四軸多旋翼無人機，該系統以碳纖維打造的四軸多旋翼無人機為平台，搭載自行研發的 Aeromount 感測器，可同時量測壓力、溫度、相對溼度、風向風速、PM_{2.5} 等大氣參數，並具備即時資料回傳功能。這套系統採用全非中國製元件，具備優異性能指標：最大起飛總重 2 公斤、額外掛載重量可達 600 克，最高可飛行至 3000 公尺高度，且具備 IP65 防塵防潑水等級。無人機配備先進的飛行控制器，整合 IMU 慣性量測單元與 GPS 全球定位系統，可實現高精度的定位能力，垂直精度達 ± 0.5 公尺，水平精度為 ± 2.5 公尺。

系統設計特別注重實用性與可靠性，採用三層結構配置：頂層安裝 Aeromount 感測器、GPS 系統與通訊天線；中層設置飛行控制器；底層配置動力系統與電池。值得注意的是，系統重心特意配置於感測器位置，以確保風向風速反演數據的準確性。地面控制系統採用軍規等級筆記型電腦，搭配專業的無人載具系統軟體，具備自動航線規劃、即時數據回傳等功能。通訊系統採用 2.4G 藍芽技術進行起飛前檢查與航線規劃，實際飛行則完全依靠衛星導航，突破傳統遙控通訊的距離限制。本系統已累積超過千次垂直剖面觀測經驗，在 6—7 級強風條件下仍能穩定運作，單次觀測可持續 30 分鐘以上，為大氣科學研究提供了可靠的觀測平台。

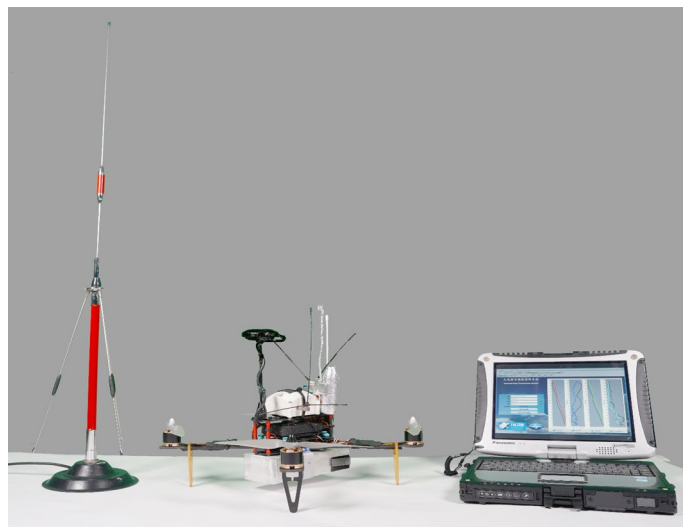


圖 3. 大氣無人機探空觀測系統設備圖。從左至右分別為通訊天線、四軸多旋翼無人機和地面站電腦 (軍規筆電)。

2. 微脈衝光達

為掌握大氣邊界層的連續變化，光達技術發揮了重要作用。自 2006 年起，我國環境部與美國 NASA 展開重要合作，在臺灣主要都會區和高污染熱區建置微脈衝光達 (micro-pulse lidar, MPL) 觀測網，目前分別架設於中央大學、臺中西屯、雲林斗六、高雄左營等四地，提供懸浮微粒垂直剖面的即時監測。值得一提的是，這套光達系統為 NASA 的技術移轉，採用波長 532 奈米的綠光雷射，具備人眼安全的特性。簡述雷射光學路徑傳送方式，

一開始由固體晶體 (ND:YLF, 摻釹氟化鈮鋰晶體) 激發 1064 奈米、經過倍頻產生 532 奈米雷射光。以發射頻率 2500 Hz 的雷射光源，通過直徑 20 公分光學鏡片之卡塞格林式望遠鏡 (Cassegrain-type) 進行同軸發射接收，雪崩式光電二極體 (avalanche photodiode) 半導體光電倍增管接收回來光子數目 (photon count)，最後通過觸發器 (trigger) 記錄每秒所得之光子數後收集至電腦。MPL 觀測原理為，當發射出的雷射光碰到懸浮微粒時，會在微粒周圍產生散射作用，而返回正對光達方向的散射我們稱為背向散射，此散射光可被微脈衝雷射雷達系統接收，並紀錄為光子數訊號，又此光達有偏振功能，可將背向散射訊號分為相對於發射波的垂直偏振方向 (垂直偏振，cross-polarization)，及平行偏振方向 (平行偏振，co-polarization)，意即微脈衝光達可提供標準化相對背向散射 (normalized relative backscatter, NRB) 以及消偏振比 (depolarization ratio, δ) 數值，不僅能表現氣膠相對濃度的觀測，更因具有氣膠消偏振率的觀測，提供氣膠形態判斷依據，容易區分沙塵氣膠及燃燒產生的細顆粒氣膠。光達的資料解析度為每分鐘一筆，垂直解析度達 75 公尺，最高觀測高度為 30 公里。結合資料演算與分析，可準確估算大氣邊界層高度，長期觀測資料更揭示了臺灣各地區邊界層特性的差異，如冬春季中部內陸地區因風速微弱，邊界層高度變化對地面空氣品質影響顯著；而沿海地區如左營則呈現較為穩定的海洋型邊界層特徵。圖 5 展示了微脈衝光達與無人機觀測的整合觀測成果，清晰呈現一整天邊界層的發展過程及高層氣膠伴隨海陸風傳送的特徵。



圖 4. 位於中央大學的微脈衝光達，此光達系統於 2006 年便持續觀測，提供北臺灣的空氣品質垂直分布即時資料。

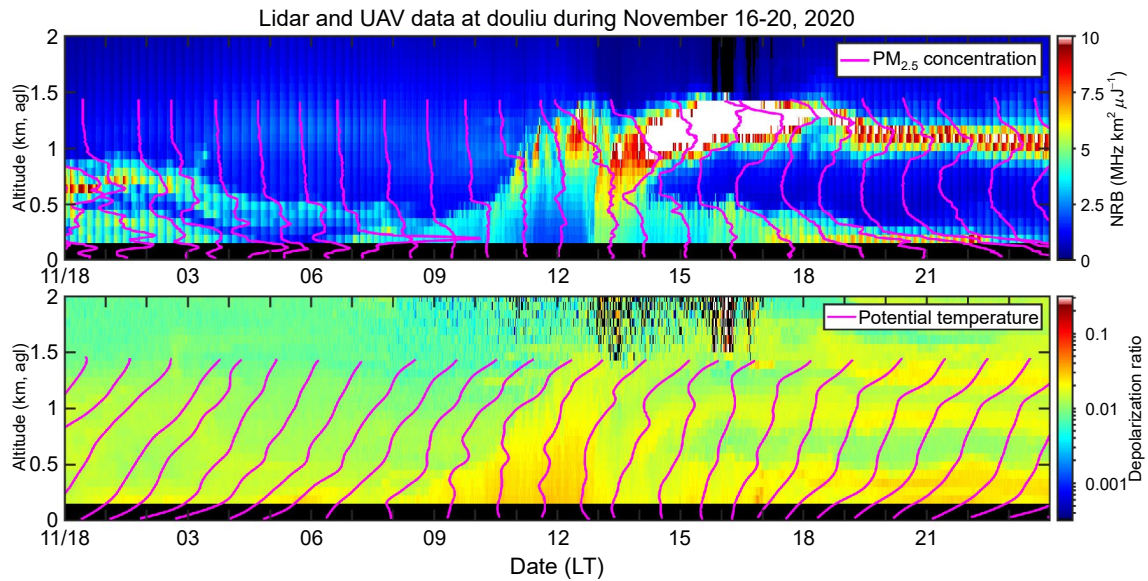


圖 5. 2020 年 11 月 18 日斗六光達之 NRB 訊號、消偏振比疊加無人機觀測之 $PM_{2.5}$ 濃度與位溫垂直剖面。背景高解析度色階為光達觀測結果，圖中桃紅色線為無人機觀測結果。

三、大氣邊界層的模擬技術

大氣邊界層中的湍流運動橫跨多個時間與空間尺度，傳統數值氣象模式透過求解大氣動力和物理方程式，以模擬邊界層的動力和熱力過程。近地面層（約佔邊界層厚度的 10%）受到地表大氣能量交互作用的影響，其特徵與上方邊界層有所差異。數值氣象模擬通常應用莫寧-奧步霍夫地面層相似理論 (Monin-Obukhov surface layer similarity theory)，模擬地表與近地層大氣之間的通量交換過程。地面層以上至邊界層頂的範圍，主要透過邊界層參數化假設，模擬紊流的傳輸與運動過程，這一限制也導致模擬的不確定性。

Weather Research Forecasting (WRF) 氣象模式 (Skamarock et al., 2008)，為全球氣象學家廣泛使用的數值模式，該模式提供多種邊界層參數化方案，使用者可根據需求，選取適合的方案來進行模擬。邊界層參數化方法，可區分為局地 (local) 與非局地 (nonlocal) 方法。局地方法依據鄰近點的變數進行模擬，而非局地方法則使用跨層的變數進行模擬。Yonsei University (YSU) 參數化方法為 Hong 等人於 2006 年所發表的邊界層參數化方案 (Hong et al., 2006)，其以 K-theory (Troen and Mahrt, 1986; Holtslag and Boville, 1993) 梯度傳遞的概念為基本架構，假設紊流通量與變數梯度成正比關係，使用已知的變數梯度 $\partial(\)/\partial z$ 來參數化未知的紊流通量項，再透過渦流擴散係數 (K) 連結兩者之間的關係。然而，K-theory 所提出的垂直梯度傳遞概念為局地的傳遞方式，即混合傳遞作用只發生在相鄰兩層之間，而這樣的觀念不適用於模擬白天對流邊界層的發展，因其無法正確描述因地表加熱所產生的跨層傳遞 (Nonlocal Transport)。為改善此問題，在 YSU 參數化方法中，加入一逆梯度作用項，以考量非局地跨層傳遞過程。

K-theory 屬於一階亂流閉合 (first-order turbulence closure) 方法，其他像是 1.5 階或更高階的亂流閉合方法，也是常見的邊界層參數化方案，其主要在大氣運動控制方程式裡加入湍流強度 (turbulence kinetic energy, TKE) 或紊流通量的預報方程式。Mellor-Yamada Nakanishi-Niino Level 2.5 (MYNN 2.5) 邊界層參數化方案 (Nakanishi 和 Niino, 2006)，基於湍流動能 (TKE) 方程，採用了二階閉合的湍流模式，計算湍流動能的產生、消耗和傳輸過

程，這也使得 MYNN2.5 方法能更加準確描述邊界層內湍流強度的變化。MYNN2.5 方案也針對白天對流邊界層發展過程強度不足的問題，使用大渦流模擬 (large-eddy simulation, LES) 資料，以提升大氣邊界層發展的模擬成效。此參數方案也調整了判定邊界層高度的臨界湍流動能數值，以提升模擬的邊界層高度的準確性，進而改進大氣垂直方向上的傳輸擴散過程。

為瞭解邊界層參數化對氣象模擬以及空品模擬的影響，針對 2023 年 2 月 28 日一高污染事件，挑選 YSU 以及 MYNN2.5 邊界層參數化，分別進行 WRF 氣象模式以及 CMAQ 空品模式模擬。圖 6 呈現在近地層模擬之流場以及 $PM_{2.5}$ 濃度分佈 (上圖) 以及邊界層高度分佈 (下圖)。兩組模擬結果在地面的 $PM_{2.5}$ 濃度有明顯差異，其差異一部分來自於邊界層高度的模擬差異，如 YSU 邊界層參數化模擬之邊界層高度低於使用 MYNN2.5 之模擬結果，因此也導致較高的 $PM_{2.5}$ 模擬結果。另一方面，可看到使用 MYNN2.5 邊界層參數化，在中部外海模擬出一背風渦旋結構，其可將污染物稍微帶離陸地。但使用 YSU 邊界層參數化，在中部外海處無渦旋結構。此分析也說明邊界層參數化，除了影響大氣邊界層的發展演變過程之外，對於背風渦旋這樣的複雜天氣系統，也有著顯著影響。

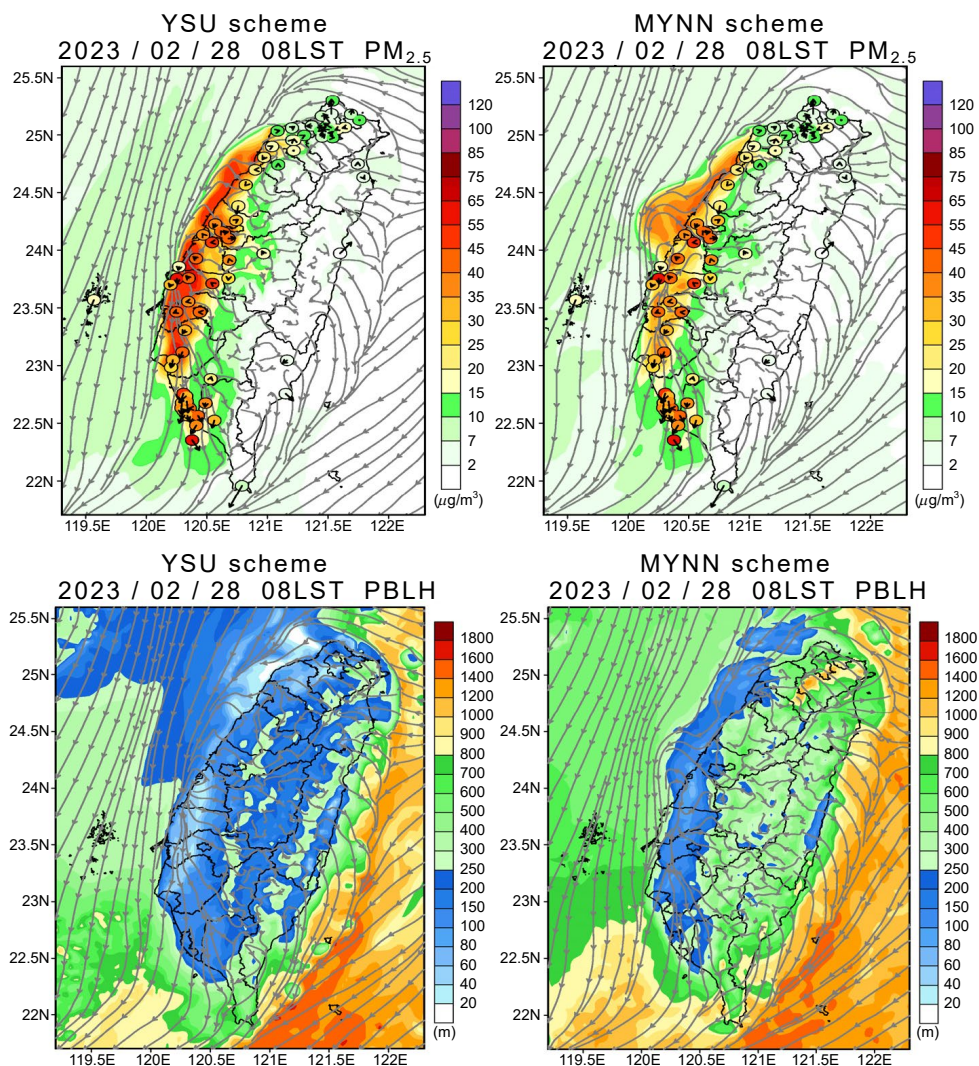


圖 6. 近地層模擬之流場以及 $PM_{2.5}$ 濃度分佈 (上圖) 以及邊界層高度分佈 (下圖)。上圖圓圈打點為觀測之 $PM_{2.5}$ 濃度。左圖使用 YSU 邊界層參數方法，右圖使用 MYNN2.5 邊界層參數方法。

隨著計算資源的提升，高解析度模擬廣泛應用於氣象與空氣品質模擬。然而，當網格水平解析度提升至小於 1 公里時，許多傳統的邊界層參數化方法難以正確描述湍流運動過程 (Honnert et al. 2020)。在高解析氣象模擬中，由於模式網格間距接近對流邊界層內的紊流尺度，大於網格解析度的紊流運動可以由數值模式直接解析，而小於網格尺度的紊流運動則需透過邊界層參數化方案進行描述。這種情況導致造成部分紊流運動被數值模式解析，而部分仍需參數化處理，形成所謂的湍流灰區 (gray zone)，其模式網格解析度範圍約為 100 公尺至 1 公里之間 (Hong and Dudhia, 2012; Wyngaard, 2004)。如何在此解析度範圍內進行準確的氣象模擬，是當前氣象預報的一大挑戰。為解決此問題，部分邊界層參數化方案已針對模式網格大小，調整紊流參數化過程。Shin-Hong (SH) scale aware scheme 是由 Shin 與 Hong 在 2015 年開發的邊界層參數化方案 (Shin and Hong, 2015)，以 YSU 邊界層方案為基礎，採用 K-theory 梯度傳遞方法。同時，該方案利用 WRF-LES 模式的大渦流模擬資料 (Shin and Hong, 2013)，建立 grid-size dependency function，量化不同網格解析度 (25 公尺至 2 公里) 下次網格紊流通量相對於整體紊流通量的比例，從而提高紊流運動的模擬過程。

此外，傳統上大渦流模擬因計算資源需求高，僅能應用於理想化個案或小範圍模擬。然而，隨著電腦計算資源的提升，大渦流模擬逐漸應用於都市甚至區域尺度的真實大氣模擬。高解析度的大渦流模擬能夠捕捉更細緻的渦流結構與邊界層內動力特徵，例如邊界層湍流機制與雲層發展的交互作用，以及複雜地形與非均勻地表對大氣的影響，進一步增強對大氣邊界層發展過程的理解與描述。

四、邊界層資料同化技術

數值氣象模式可提供風速、溫度及濕度等大氣變數的三維分佈及時間演變，從而模擬大氣邊界層的動熱力結構。然而，模式在預報中依賴初始場和模式動熱力過程，難免存在不確定性。氣象觀測如地面站、探空儀等能提供部分邊界層的真實狀態，而資料同化技術透過數學方法最佳結合觀測及模式資訊，以獲得更接近真實大氣的最佳分析場 (Kalnay 2002)。模式預報提供的最佳估計稱為背景場或初始猜測場，透過同化觀測所獲得的修正量來更新背景場。在此過程中，利用模式預報與觀測的誤差特性來決定修正量。例如，依據誤差大小調整不同資料的權重，以及透過誤差相關性決定修正量的結構。

資料同化方法中利用「背景誤差相關性」將觀測資訊傳遞至其他位置。傳統同化方法中，背景誤差相關性為長期資料統計而得，無法反應短期大氣狀態變化。而當代電腦計算能力大幅提升，利用系集預報的進階資料同化系統，可進一步使用與當下流場相關的背景誤差相關性，使分析修正場反應背景場動熱力特性，讓觀測效益更得以發揮。系集預報的概念為利用多個模式預報場，並以與平均場的差異代表預報的不確定性，並能以此表現出誤差在時空上的流場相依特性。因臺灣具有複雜地形、海陸交界等地理特性，背景誤差相關性的流場相依性質為觀測發揮影響之關鍵。例如，圖 7 為利用高解析度系集預報並選取桃園岸邊單點位置建立模式十米風誤差相關性。相關性高的區域代表所選位置背景風場誤差與此區域背景風場誤差變化特性一致。因此若所選位置有風場觀測，可透過誤差相關性修正該區域風場。圖 7 分析結果，可看到背景誤差相關性有明顯的海陸交界，若在此位置風場觀測提供西風修正量，此西風修正量可延伸至桃園其他區域甚至到新竹岸邊，因此可增強岸邊海風。除了同變數修正外，利用背景誤差相關性也可進行跨變數修正，例如板橋站的探空資料風場觀測，可修正模式場的溫度及濕度等變數。

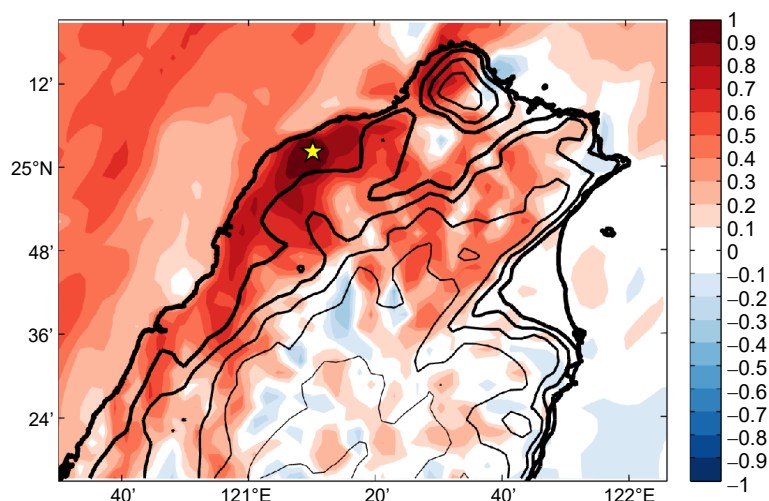


圖 7. 利用系集建立單點十米風 (U10) 之背景誤差相關性。

常見的資料同化方法包含三維／四維變分分析法、系集卡爾曼濾波器及結合兩種的混成法，並以預報分析循環進行。例如，利用 0000 UTC 的六小時模式預報，結合觀測進行同化獲得分析場。再以此分析場為模式初始場進行下一個六小時預報到 0600 UTC。此重複進行的預報分析循環可於空間及時間上傳遞並累積觀測影響。以空品預報為例，邊界層資料同化 (圖 8) 結合氣象模式預報及大氣邊界層觀測，更新模式氣象初始場與預報，再結合大氣化學模式改善空品預報。

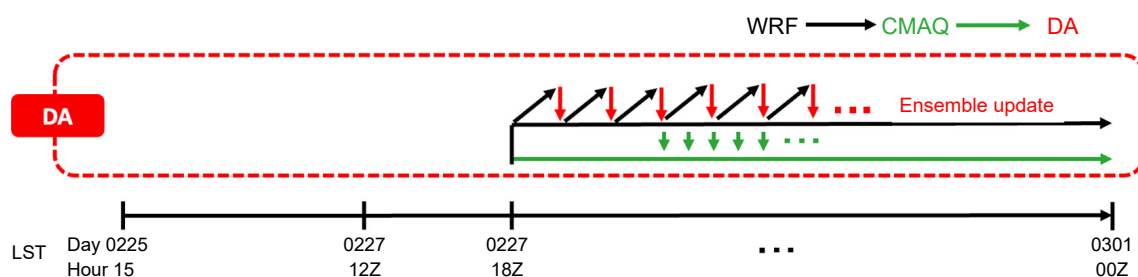


圖 8. 大氣化學模式架構下之資料同化分析預報循環：黑色箭頭代表氣象模式短期預報、紅色箭頭代表資料同化及綠色箭頭代表氣象場輸入大氣化學模式。

在以往傳統氣象觀測中，邊界層觀測資料主要以地面觀測為主。但修正量集中近地面，對於邊界層上半部及邊界層頂的修正量小，不利掌握邊界層內動力或熱力結構隨時間變動，進而無法正確描述污染物在地形上或較高高度上的傳輸或累積。此外，模式近地面風速或溫度仍有一定程度的偏差增加同化修正的困難度。隨著新型態邊界層觀測像是剖風儀、無人機、微型探空及光達等的快速發展，我們可獲得高垂直解析度的觀測資料，解析大氣垂直結構於邊界層的變化。例如，圖 9 為 2022 年 3 月 16 日觀測及不同實驗所得彰化二林站風及溫度垂直分布時間變化。原本的模式模擬 (CTRL 實驗分析風場) 局地環流特性較無法表現出低層西風分量受中央山脈阻擋而在較高處轉為弱東風的特性。同化此處微型探空風觀測，可增強此處一公里高度上的西風風速，並修正 1.5 公里高度上為弱東風，有效加強地形上環流特性 (Wind 實驗)。除此之外，1 公里以上的南風分量也大幅增強。進一步加入同化無人機溫度觀測，可提高模式邊界層內日間溫度，改善邊界層內溫度變化 (Wind+T 實驗分析溫度場)。

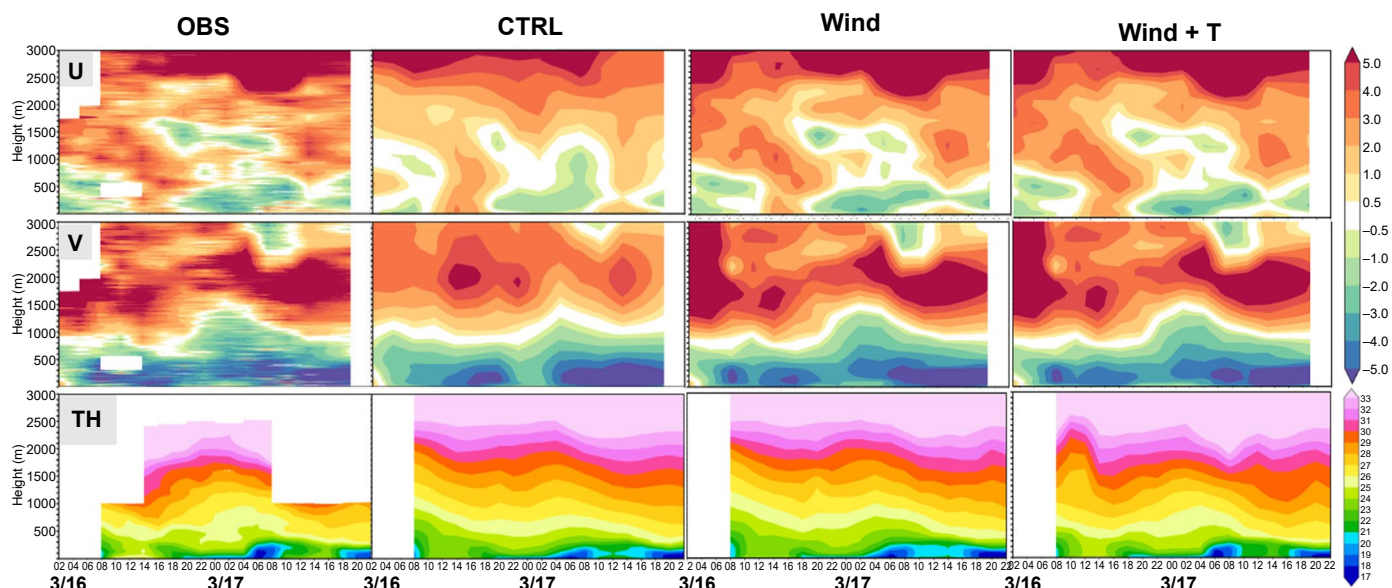


圖 9. 2022 年 3 月 16 日觀測 (第一欄) 及不同實驗所得彰化二林站 U (上排)、V (中排) 風及溫度 (下排) 垂直分布隨時間變化。風場觀測為微型探空資料，溫度則為無人機資料。第二欄為無進行同化實驗 CTRL 模式模擬、第三及第四為實驗 Wind 及 Wind + T 的分析場。

除了直接觀測大氣變數，空氣污染物濃度也可作為邊界層觀測，因污染物的分布與邊界層的動熱力特性高度相關。如南風增強將使污染物北移，而低風速、夜間邊界層頂降低等情況會加強近地面污染累積。若取得污染物濃度剖線觀測，可利用濃度觀測和氣象變數的背景誤差相關性，調整模式邊界層內的垂直結構。在大氣及化學耦合模式預報架構下，透過調整氣象場特性有助於改善空氣品質預報。

圖 10 為利用中央大學及台中西屯兩台微型脈衝光達 (micropulse lidar) 資料反演的 2018 年 12 月 19 日 $PM_{2.5}$ 剖線觀測，透過資料同化進行邊界層氣象場修正的例子 (Yang et al. 2022)。模式第一層風場 (圖 10 下排) 顯示，相較於一般常使用的納近法 (nudging) 法 (圖中 BASE 實驗)，考慮風場不確定性的系集預報平均場可有效調整背風渦旋位置，減弱西半部近岸風速 (圖中 CNTL 實驗)。同化 $PM_{2.5}$ 資料進一步加強中部至桃園一帶西南風，增加了該區域近地面 $PM_{2.5}$ 濃度 (圖中 LDA 實驗)。

五、結論

本文說明了現代觀測技術，包括儀器設備及相關測量方法的發展，並結合模擬技術的最新進展，解析大氣邊界層的結構和演變過程。此外，資料同化技術的應用不僅能整合觀測與模式數據，亦能有效更新氣象數據，提升預報的準確性。這些技術的綜合應用，除了提升氣象預報、空氣品質預報的準確度，還有助於環境監測，並為科學家提供更完善的數據基礎，以支持進一步的研究與政策制定。

然而，臺灣的大氣邊界層研究依然面臨諸多挑戰，包含剖面觀測資料不足、模式邊界層顯著誤差 (如地表風速和邊界層高度的系統性偏差) 等問題。未來，隨著無人機、風光達等新興觀測技術以及機器學習方法的引入，預期將能突破這些限制，進一步提升大氣邊界層的資料同化與預報能力。

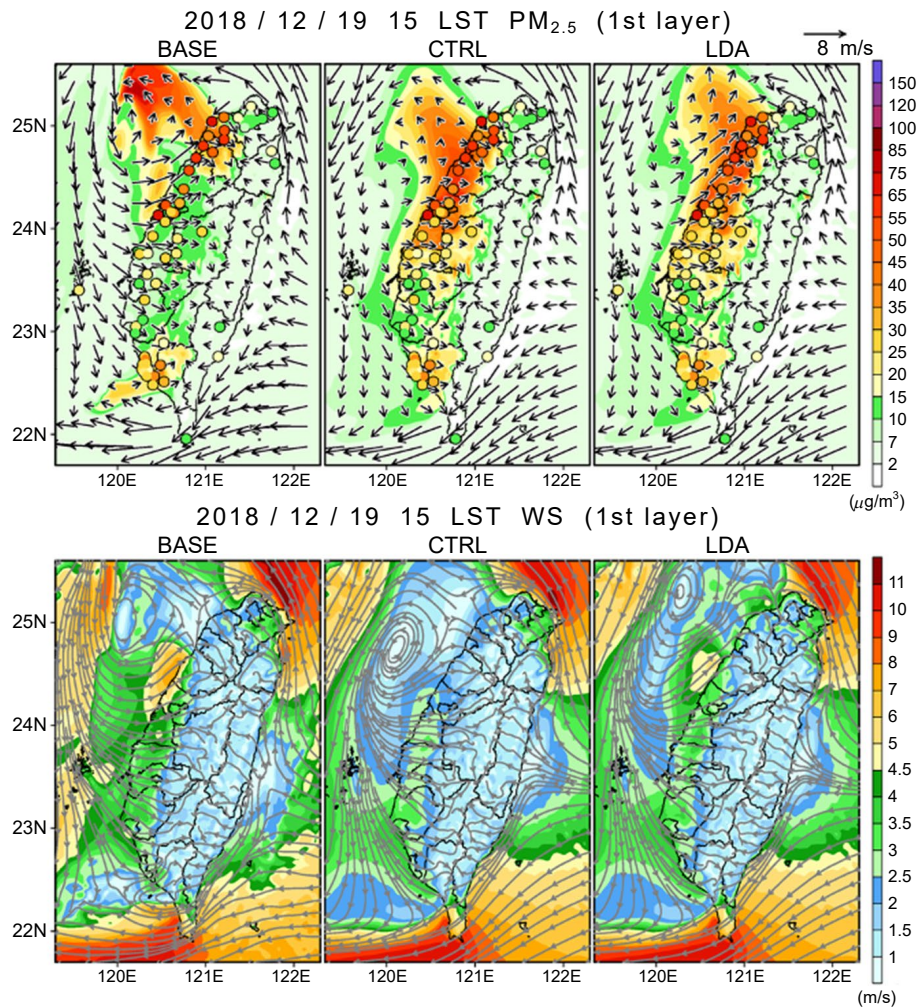


圖 10. 2018 年 12 月 19 日 1500 LST 模式 $PM_{2.5}$ (上排) 及模式第一層風場 (下排)。
第一至第三欄為 BASE、CNTL、及同化光達 $PM_{2.5}$ 剖線之 LDA 實驗。

參考文獻

1. Holtslag, A. A. M. and B. A. Boville, *Journal of Climate*, **6** (10), 1825 (1993).
2. Hong, S.-Y., Y. Noh and J. Dudhia, *Monthly Weather Review*, **134** (9), 2318 (2006).
3. Hong, S.-Y. and J. Dudhia, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93** (1), ES6 (2012).
4. Honnert, R., and Coauthors, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**, e2019JD030317 (2020).
5. Kalnay, E., *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*, Cambridge: Cambridge University Press (2002).
6. Ke, L.-J., Wang, S.-H., Huang, H.-Y., Wang, Y.-C., Chuang, H.-F., Hung, R.-Y., You, Z.-C., Chang, S.-C., *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **23**, 103 (2018).
7. Nakanishi, M., Niino, H., *Boundary-Layer Meteorology*, **119**, 397 (2006).
8. Shin, H. H. and S.-Y. Hong, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70** (10), 3248 (2013).
9. Shin, H. H. and S.-Y. Hong, *Monthly Weather Review*, **143** (1), 250 (2015).
10. Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Huang, X.Y., A Description of the Advanced Research WRF Model Version 3. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO., (2008)
11. Troen, I. and L. Mahrt, *Boundary-Layer Meteorology*, **37** (1-2), 129 (1986).
12. Wyngaard, J. C., *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**(14), 1816 (2004).
13. Yang, S.-C., F.-Y. Cheng, L.-J. Wang, S.-H. Wang, C.-H Hsu, *Atmospheric Environment*, **77**, (2022).

作者簡介

鄭芳怡小姐為美國休士頓大學地球與大氣科學博士，現為國立中央大學大氣科學學系教授。

Fang-Yi Cheng received her Ph.D. in the Department of Earth and Atmospheric Sciences from University of Houston. She is currently a Professor in the Department of Atmospheric Sciences, College of Earth Sciences at National Central University.

王聖翔先生為國立中央大學大氣物理博士，現為國立中央大學大氣科學學系特聘教授。

Sheng-Hsiang Wang received his Ph.D. in Atmospheric Physics from National Central University. He is currently a Distinguished Professor in the Department of Atmospheric Sciences, College of Earth Sciences at National Central University.

楊舒芝小姐為美國馬里蘭大學大氣和海洋科學博士，現為國立中央大學大氣科學學系特聘教授。

Shu-Chih Yang received her Ph.D. in the Department of Atmospheric and Oceanic Science from University of Maryland. She is currently a Distinguished Professor in the Department of Atmospheric Sciences, College of Earth Sciences at National Central University.