VNUHCM Journal of Environment and Earth Sciences 2026, 10(1):1247-1255

Open Access Full Text Article

Bài nghiên cứu

Phân bố không gian - thời gian $PM_{2.5}$ tại TP. Hồ Chí Minh: So sánh mô hình - quan trắc và vai trò của đốt sinh khối cùng vận chuyển liên vùng

Đỗ Thị Thùy Linh[1,2,*], Nguyễn Thoại Tâm[1,2], Nguyễn Ngọc Thảo Nguyên[1,2], Nguyễn Thị Cẩm Nhàng[1]

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Nghiên cứu đặc trưng phân bố và ảnh hưởng khu vực của bụi mịn $PM_{2.5}$ có ý nghĩa quan trọng trong quản lý chất lượng không khí tại các đô thị đang phát triển nhanh. Để làm rõ vấn đề này, nhóm tác giả đã đánh giá phân bố không – thời gian của $PM_{2.5}$ tại TP. Hồ Chí Minh năm 2022 thông qua tích hợp dữ liệu quan trắc đa điểm với mô phỏng khí tượng–hóa học. Kết quả cho thấy nồng độ cao tập trung tại khu vực trung tâm và các nút giao thông - công nghiệp, giảm dần về phía ngoại ô và ven biển. Biến thiên theo mùa thể hiện rõ rệt, với giá trị cao trong mùa khô (tháng 1 và 12) và thấp trong mùa mưa (tháng 9), phù hợp với quan trắc. Một đợt ô nhiễm điển hình được ghi nhận trong tháng 01/2022, khi $PM_{2.5}$ tăng lên 31 - 46 $\mu g\ m^{-3}$ cùng sự gia tăng của O_3 và CO. Phân tích HYSPLIT, MERRA - 2 và FIRMS cho thấy các khối không khí từ hướng đông bắc kết hợp với hoạt động đốt sinh khối khu vực có thể là nguyên nhân chính của đợt ô nhiễm này. Mô hình WRF - CMAQ mô phỏng tốt xu thế tổng thể nhưng có xu hướng làm trơn cực trị và giảm độ tương phản không gian. Nghiên cứu khẳng định tầm quan trọng của việc tinh chỉnh phát thải, cải thiện tham số hóa khí tượng và tăng cường phối hợp kiểm soát nguồn ô nhiễm ở cả quy mô địa phương và khu vực.

Từ khoá: Chất lượng không khí đô thị, Đốt sinh khối, Vận chuyển liên vùng, PM2.5, WRF - CMAQ

[1]*Viện Môi trường và Tài nguyên (IER), Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

[2]*Ban Khoa học và Công nghệ, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam*

Liên hệ

Đỗ Thị Thùy Linh, Viện Môi trường và Tài nguyên (IER), Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Ban Khoa học và Công nghệ, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: dothuylinh21@gmail.com

Lịch sử

- Ngày nhận: 20-10-2025
- Ngày sửa đổi: 15-12-2025
- Ngày chấp nhận: 26-12-2025
- Ngày đăng: 22-06-2026

DOI : https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-ees.v10i1.851

Check for updates

Bản quyền

© Tạp chí ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

GIỚI THIỆU CHUNG

Ô nhiễm không khí đô thị là thách thức môi trường-sức khỏe trọng yếu, với các chất ô nhiễm chính (O_3, NO_2, SO_2, CO...) và hạt mịn $PM_{2.5}$ chịu chi phối đồng thời bởi phát thải tại chỗ (giao thông, công nghiệp, xây dựng/đốt sinh khối quy mô nhỏ) và các quá trình thứ cấp/quy mô khu vực. Bên cạnh nguồn địa phương, các dòng vận chuyển xa theo mùa có thể điều biến đáng kể tải ô nhiễm bề mặt, làm phức tạp nỗ lực quy kết và kiểm soát nguồn trong bối cảnh đô thị mật độ cao [1,2].

Tại Thành phố Hồ Chí Minh (TP.HCM), chất lượng không khí suy giảm rõ rệt do tốc độ cơ giới hóa và công nghiệp hóa nhanh trong những thập kỷ qua [1]. Quan trắc một số vị trí tại giai đoạn trung tâm TP.HCM giai đoạn 2017–2018 ghi nhận $PM_{2.5}$ trung bình năm 36,3 ± 13,7 $\mu g\ m^{-3}$, vượt hướng dẫn của WHO và thường vượt chuẩn quốc gia; biến thiên không gian-thời gian chịu chi phối bởi giao thông (đặc biệt xe máy), công nghiệp-xây dựng và điều kiện khí tượng địa phương [1]. Kiểm kê phát thải cho thấy giao thông đường bộ là nguồn đóng góp chính (~3,34 Gg $năm^{-1}$ đối với $PM_{2.5}$), kèm theo đóng góp từ công nghiệp và xây dựng [1,3]. Những nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào đặc trưng ô nhiễm và cấu trúc nguồn phát thải địa phương.

Ở quy mô khu vực, một số nghiên cứu khác lại nhấn mạnh vai trò của vận chuyển xa. TP.HCM chịu ảnh hưởng của hai hướng vận chuyển ô nhiễm chính. Thứ nhất là khói từ hoạt động đốt sinh khối trong mùa khô, bắt nguồn từ khu vực Sumatra và Borneo, đạt cực đại trong giai đoạn tháng 7–10 [4]. Thứ hai là dòng chảy khí quyển mùa đông trong hoàn lưu gió mùa Đông Á, có khả năng mang theo các chất ô nhiễm nhân tạo từ phía bắc xuống vùng hạ lưu [5]. Sự kết hợp giữa các nguồn phát thải tại chỗ và quá trình vận chuyển từ xa này tạo nên phân bố ô nhiễm không đồng đều, với các điểm nóng tập trung dọc theo các trục giao thông và khu công nghiệp, nổi bật trên nền biến thiên theo mùa và ảnh hưởng của các đợt vận chuyển khu vực. Tổng hợp lại, có thể phân loại các nghiên cứu trước đây thành ba nhóm chính: (i) nghiên cứu về nguồn và ô nhiễm địa phương, (ii) nghiên cứu về vận chuyển khu vực/xa, và (iii) nghiên cứu về mô hình hóa trường khí tượng-hóa học, song vẫn còn thiếu các nghiên cứu liên kết chặt chẽ ba nhóm này trong cùng một khung phân tích cho TP.HCM.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ô nhiễm không khí tại TP.HCM, các dữ liệu hiện có vẫn rời rạc và thiếu

Trích dẫn bài báo này: Linh D T T, Tâm N T, Nguyên N N T, Nhàng N T C. **Phân bố không gian - thời gian $PM_{2.5}$ tại TP. Hồ Chí Minh: So sánh mô hình - quan trắc và vai trò của đốt sinh khối cùng vận chuyển liên vùng**. *VNUHCM J. Environ. Earth Sci.* 2026; 10(1):1247-1255.

đồng bộ về mặt không-thời gian. Điều này khiến bức tranh tổng thể về phân bố ô nhiễm và đóng góp nguồn chưa được thể hiện rõ ràng, làm hạn chế cơ sở khoa học cho công tác hoạch định và kiểm soát chất lượng không khí. Cụ thể, vẫn tồn tại một số khoảng trống đáng kể trong dữ liệu: (i) mạng lưới quan trắc quy chuẩn còn thưa và phân bố không đồng đều giữa các quận, huyện; (ii) chuỗi thời gian quan trắc chưa đủ dài để phản ánh đầy đủ các đặc trưng theo mùa và giá trị cực trị; (iii) độ bất định lớn trong hoạt động và nhịp phát thải theo thời gian, đặc biệt đối với phương tiện giao thông và xây dựng; và (iv) thiếu thông tin về thành phần hóa học cũng như phân giải nguồn ở quy mô khu vực lân cận. Do đó, dù đã nhận diện được tầm quan trọng của phát thải tại chỗ và vận chuyển xa, các nghiên cứu hiện nay vẫn chưa làm rõ được vai trò tương đối giữa hai nhóm nguồn này trong việc chi phối $PM_{2.5}$ bề mặt tại TP.HCM. Những hạn chế này gây khó khăn trong việc xác định vai trò tương đối giữa nguồn phát thải địa phương và vận chuyển khu vực, đồng thời làm suy giảm hiệu quả thiết kế chính sách kiểm soát ô nhiễm. Trong bối cảnh đó, việc ứng dụng mô hình số trị được hiệu chỉnh và ràng buộc bởi dữ liệu quan trắc là công cụ thiết yếu nhằm bù đắp khoảng trống không gian, kiểm định cơ chế hình thành – vận chuyển ô nhiễm, và cung cấp thông tin chẩn đoán hữu ích phục vụ quản lý chất lượng không khí đô thị.

Mô hình số trị là công cụ quan trọng nhằm khắc phục hạn chế về độ phủ không gian – thời gian của hệ thống quan trắc, đồng thời tái phân bố khí tượng – hóa học ba chiều, qua đó đánh giá các cơ chế hình thành, chuyển hóa, vận chuyển và lắng đọng của chất ô nhiễm[6]. Trong đó, các mô hình khí tượng – hóa học tích hợp như WRF–CMAQ (Community Multi-scale Air Quality model - CMAQ) cho phép mô phỏng đồng thời động lực học khí quyển (trường gió, nhiệt, mưa, ranh giới PBL) và hóa học khí quyển – khí động học hạt trên lưới lồng đa tỉ lệ cùng chuỗi phát thải theo giờ[7]. Nhờ vậy, mô hình có khả năng mô tả phân bố theo không gian – thời gian, chu kỳ ngày – mùa, đóng góp nguồn và độ nhạy theo kịch bản phát thải; cấu hình trực tuyến ghép chặt còn giúp giảm sai lệch lan truyền giữa hai khối mô hình khí tượng và hóa học[8]. Tuy nhiên, độ tin cậy của mô phỏng vẫn phụ thuộc đáng kể vào chất lượng dữ liệu đầu vào (phát thải, điều kiện biên – ban đầu, tham số vật lý) và cần được hiệu chỉnh, kiểm định nghiêm ngặt bằng dữ liệu quan trắc thông qua các chỉ tiêu và khung đánh giá chuẩn trong cộng đồng mô hình hóa[9].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu ứng dụng WRF hoặc WRF–CMAQ gần đây chủ yếu tập trung cho khu vực Hà Nội và miền Bắc, nhằm phân tích vai trò khí tượng hoặc đánh giá kịch bản phát thải quy mô vùng[10–12]. Riêng đối với TP. Hồ Chí Minh, các nghiên cứu mô hình hóa mới dừng ở việc sử dụng WRF đơn lẻ để mô phỏng trường khí tượng hoặc trường ô nhiễm, chưa có cấu hình WRF–CMAQ tích hợp với kiểm kê phát thải địa phương và mạng lưới quan trắc đa điểm[13]. Khoảng trống này đặt ra yêu cầu cấp thiết về các nghiên cứu mô hình hóa chi tiết hơn nhằm định lượng vai trò tương đối giữa nguồn phát thải nội vùng và vận chuyển xuyên vùng đối với $PM_{2.5}$ tại khu vực đô thị trọng điểm phía Nam.

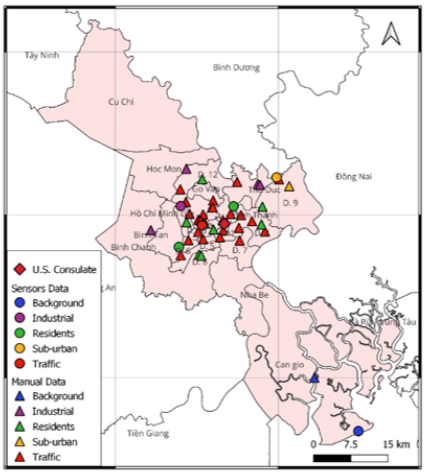
Vì vậy, nghiên cứu này hướng tới bổ xung những thông tin thiếu hụt kể trên bằng cách tiếp cận tích hợp mô hình–quan trắc–dữ liệu khu vực, cho phép đánh giá một cách hệ thống cả nguồn phát thải nội vùng lẫn vận chuyển xa. Cụ thể, nghiên cứu được triển khai với hai mục tiêu: (i) đánh giá đặc trưng phân bố không – thời gian của $PM_{2.5}$ tại TP.HCM trong năm 2022 bằng cách kết hợp dữ liệu quan trắc đa điểm với mô phỏng WRF–CMAQ, tập trung làm rõ biến thiên theo mùa và sự khác biệt theo loại hình sử dụng đất trong đô thị; và (ii) khai thác đồng thời kết quả mô hình cùng phân tích quỹ đạo ngược (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model HYSPLIT) 120 giờ, dữ liệu MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) cung cấp AOD, SO_2, CO, và điểm cháy (Fire Information for Resource Management System - FIRMS) để cung cấp bằng chứng về tác động của vận chuyển xa và đốt sinh khối đối với các đợt ô nhiễm nặng, với trọng tâm là sự kiện tháng 01/2022. Đóng góp mới của nghiên cứu là xây dựng một bức tranh tích hợp mô hình–quan trắc về $PM_{2.5}$ cho TP.HCM, qua đó định lượng rõ hơn vai trò tương đối giữa nguồn địa phương và vận chuyển khu vực, đồng thời đề xuất các hướng cải thiện cấu hình mô hình và ưu tiên kiểm soát nguồn phát thải phục vụ quản lý chất lượng không khí đô thị.

CÁC PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

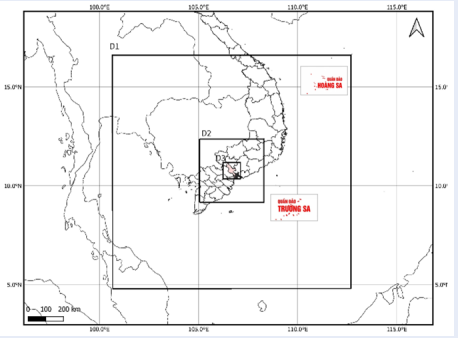
Phương pháp đo đạc tại chỗ

Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu quan trắc chất lượng không khí từ nhiều vị trí đại diện cho các khu vực giao thông, dân cư, công nghiệp, vùng ngoại ô và nền để đảm bảo độ bao phủ không gian toàn diện. Dữ liệu $PM_{2.5}$ liên tục trong năm 2022 được thu thập từ trạm quan trắc của Lãnh sự quán Hoa Kỳ, được ký hiệu bằng biểu tượng hình thoi trong Hình 1. Trạm này cung cấp số liệu $PM_{2.5}$ theo giờ ổn định, đóng vai trò như một mốc tham chiếu quan trọng để đánh giá xu hướng chất lượng không khí.

Bên cạnh đó, dữ liệu theo giờ của $PM_{2.5}$, NO_2, SO_2 và CO được thu thập từ năm trạm cảm biến do Đại



Hình 1: Bản đồ các vị trí quan trắc ô nhiễm không khí tại khu vực nghiên cứu (nguồn: nhóm tác giả)



Hình 2: Khu vực nghiên cứu WRF-CMAQ cho khu vực TP. Hồ Chí Minh (nguồn: nhóm tác giả)

học Quốc gia TP.HCM và Đại học Dublin thiết lập. Các trạm này, được biểu thị bằng biểu tượng hình tròn trong Hình 1, lắp đặt từ năm 2021 và vận hành liên tục đến hết 2023, góp phần vào cung cấp dữ liệu mô tả sự biến động theo thời gian của các chất ô nhiễm không khí. Ngoài ra, dữ liệu $PM_{2.5}$ và CO trong giai đoạn từ tháng 5/2022 đến tháng 5/2023 được thu thập tại huyện Cần Giờ trong khuôn khổ dự án PM2.5@Asia, cung cấp cái nhìn sâu hơn về đặc điểm ô nhiễm ở khu vực ven biển và ngoại ô.

Ngoài ra, để đánh giá phân bố không gian của các chất ô nhiễm không khí trên toàn thành phố, dữ liệu quan trắc thủ công được cung cấp bởi Trung tâm Quan trắc Môi trường TP.HCM. Bộ dữ liệu này bao gồm các phép đo nồng độ $PM_{2.5}$, NO_2, và SO_2 tại 38 vị trí khác nhau, được ký hiệu bằng biểu tượng hình tam giác trong Hình 1. Các quan trắc thủ công được thực hiện trong giai đoạn từ tháng 12/2022 đến tháng 12/2023, ngoại trừ thời kỳ gió mùa tây nam (từ tháng 6 đến tháng 10/2023)

Phương pháp mô hình hóa WRF - CMAQ

Trong nghiên cứu này, chúng tôi triển khai mô phỏng chất lượng không khí bằng mô hình kết hợp WRF-CMAQ cho khu vực TP.HCM trong năm 2022.

Mô hình khí tượng sử dụng WRF v4.2 (lõi Advanced Research WRF - ARW) mô phỏng cho năm 2022 với cấu hình ba miền lồng nhau: D1 (74×74; 18×18 km), D2 (60×60; 6×6 km) và D3 (48×48; 2×2 km) (Hình 2), kết hợp địa hình và lớp phủ bề mặt làm đầu vào, nhằm cung cấp dữ liệu theo giờ các thông số gió, nhiệt độ, ẩm, mưa và tham số lớp biên khí quyển (Planetary Boundary Layer - PBL), làm đầu vào cho mô hình chất lượng không khí. Dữ liệu WRF sau đó được chuyển đổi sang định dạng Models-3 I/O API (Models-3 Input/Output Applications Programming Interface) thông qua MCIP (Meteorology–Chemistry Interface Processor), bảo toàn hệ chiếu, cấu trúc thẳng đứng và các biến khí tượng bắt buộc cho khuếch tán-lắng đọng. Module hóa học-khí/aerosol sử dụng mô hình CMAQ v5.4 [14], với cơ chế hóa học CB6 (Carbon Bond6) và mô-đun aerosol AE/AERO (Aerosol module trong CMAQ) tương ứng; điều kiện ban đầu (Initial Conditions - ICON) và điều kiện biên (Boundary Conditions - BCON) được thiết lập nhất quán theo phương thẳng đứng và theo thời gian.

Song song với đó, kiểm kê phát thải năm 2022 cho khu vực TP.HCM được xây dựng bởi nhóm nghiên cứu trong khuôn khổ đề tài KC-4.0-25/19-25, trên cơ sở ước tính phát thải từ các nhóm nguồn chính (giao thông đường bộ, công nghiệp, dân sinh, sinh khối) dựa vào số liệu hoạt động và hệ số phát thải phù hợp. Dữ liệu kiểm kê này sau đó được chuẩn bị đầu vào cho mô hình vận chuyển – hóa học CMAQ bằng bộ công cụ emPY (phát triển bởi viện nghiên cứu khí tượng thủy văn Slovak), bao gồm các bước: đặc tả thành phần hóa học (speciation) các chất phát thải theo cơ chế trong CMAQ, phân bố phát thải lên lưới mô hình, gán hồ sơ biến thiên theo giờ/ngày/tuần cho từng nhóm nguồn, xuất các trường phát thải ở định dạng NetCDF tương thích với CMAQ.

Đồng thời, kết quả mô hình được đánh giá tuân theo hướng dẫn của U.S. EPA, 2007, sử dụng các chỉ số MB, NMB, NME, RMSE, hệ số tương quan Pearson (R) và chỉ số đồng thuận IOA; trong đó MB phản ánh độ lệch trung bình, NMB/NME chuẩn hóa sai lệch theo tổng quan trắc, còn RMSE tổng hợp sai số bình phương trung bình; IOA $\in [-1,1]$ đo mức độ đồng biến thiên giữa mô phỏng và quan trắc. Áp dụng khung đánh giá

Bảng 1: Bảng kết quả kiểm định mô hình (nguồn: nhóm tác giả)

Thông số	PM2.5		O3		NO2	
	Giá trị	Benchmark*	Giá trị	Benchmark	Giá trị	Benchmark
MB	-2,0		-1,25		-8,23	
NMB	-26,9%	$\leq \pm$ 30%	2,3%	$\leq \pm$ 30%	-23,81 %	$\leq \pm$ 30%
NME	29,2%	$\leq$ 70%	14,4%	$\leq$ 75%	36,06 %	$\leq$ 75%
IOA	0,61	0,7	0,53	0,7	0,50	0,7
R	0,73	$\geq$ 0,4	0,53	$\geq$ 0,5	0,72	$\geq$ 0,5

*Tiêu chuẩn U.S. EPA, 2007

này, mô hình CMAQ tại TP.HCM cho năm 2022 cho thấy năng lực mô phỏng $PM_{2.5}$ tốt (R = 0,76; IOA = 0,61; NMB = −27%; NME = 29%), đáp ứng tiêu chí hiệu suất khuyến nghị, và có chất lượng chấp nhận được đối với O_3/NO_2 ở mức trạm tham chiếu. Chi tiết về kết quả kiểm định mô hình được thể hiện trong Bảng 1.

Phân tích quỹ đạo ngược

Mô hình HYSPLIT được phát triển bởi Phòng Thí nghiệm Tài nguyên Không khí thuộc Cục Quản lý Đại dương và Khí quyển Quốc gia Hoa Kỳ (NOAA) đã được sử dụng để tính toán quỹ đạo ngược của các khối không khí (https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php). Các trường khí tượng được sử dụng trong việc tính toán dữ liệu quỹ đạo ngược 120 giờ được điều khiển bởi Hệ thống Đồng hóa Dữ liệu Toàn cầu (GDAS) của Trung tâm Dự báo Môi trường Quốc gia (NCEP) với độ phân giải 1° x 1°. Vận chuyển theo chiều thẳng đứng được mô hình hóa bằng tùy chọn đẳng áp của HYSPLIT. Quỹ đạo ngược được tính toán mỗi 6 giờ khi đến TP.HCM ở độ cao 200 m. Trong nghiên cứu này, dữ liệu

Dữ liệu đếm cháy FIRMS

Hệ thống Thông tin Cháy rừng cho Quản lý Tài nguyên (Fire Information for Resource Management System - FIRMS) cung cấp quyền truy cập, với độ trễ tối thiểu, vào hình ảnh vệ tinh, các điểm cháy/nóng hiện tại, và các sản phẩm liên quan để xác định vị trí, phạm vi và cường độ của hoạt động cháy rừng. Các công cụ và ứng dụng của FIRMS cung cấp dữ liệu địa không gian, sản phẩm và dịch vụ để hỗ trợ cộng đồng quản lý cháy rừng rộng lớn hơn và thông tin cho công chúng. Dữ liệu toàn cầu có sẵn trong vòng 3 giờ sau khi quan sát vệ tinh; các phát hiện cháy hoạt động ở Hoa Kỳ và Canada có sẵn trong thời gian thực. Trong nghiên cứu này, dữ liệu FIRMS được thu thập tại https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/firms.

Dữ liệu MERRA-2

MERRA-2 (Modern - Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) là một phân tích hồi quy toàn cầu về aerosols, nhằm nghiên cứu sự tương tác với các quá trình vật lý khác nhau trong hệ thống khí hậu [15,16]. Độ phân giải không gian của nó là 0,5° × 0,625° với 72 mức eta - hybrid từ bề mặt đến 0,01 hPa. Dữ liệu phân tích hồi tưởng MERRA - 2 đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu gần đây để chứng minh sự phân tán của các luồng ô nhiễm không khí, cho thấy mối tương quan chặt chẽ với dữ liệu quan sát [17,18]. Nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu độ dày quang học aerosol (AOD), SO_2, và CO thu được từ tập dữ liệu MERRA-2 để kiểm tra sự di chuyển của ô nhiễm có nguồn gốc từ Đông Á và tác động của nó lên khu vực nghiên cứu. Thông tin về dữ liệu MERRA-2 có thể tham khảo tại https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao-products/merra-2/.

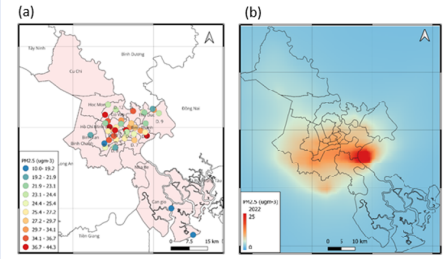
KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phân bố theo không gian của $PM_{2.5}$ tại TP.HCM năm 2022

Dựa trên bộ dữ liệu quan trắc và mô phỏng bằng CMAQ, Hình 3.a,b biểu diễn phân bố không gian của $PM_{2.5}$ tại TP. HCM năm 2022. Cả hai nguồn dữ liệu đều cho thấy nồng độ cao tập trung ở vùng trung tâm đô thị và các nút giao thông-công nghiệp, trong khi khu vực ngoại ô và ven biển duy trì mức thấp hơn. Cụ thể, số liệu quan trắc báo cáo chi tiết sự tương phản rõ rệt nồng độ $PM_{2.5}$ theo loại hình sử dụng đất, với nồng độ trung bình tại khu vực giao thông cao nhất (24,57 $\mu g\, m^{-3}$), tiếp đến công nghiệp (23,19 $\mu g\, m^{-3}$) và khu dân cư (22,53 $\mu g\, m^{-3}$), trong khi khu vực ngoại ô (21,79 $\mu g\, m^{-3}$) và trạm nền (15,16 $\mu g\, m^{-3}$) thấp hơn, phù hợp với bằng chứng từ các đô thị khu vực như Bangkok và Jakarta, nơi giao thông và công nghiệp là nguồn đóng góp chính cho $PM_{2.5}$ [19,20].
Nồng độ $PM_{2.5}$ trung bình năm từ CMAQ mô tả một dải ô nhiễm liên tục bao quanh trung tâm đô thị và

giảm dần về ngoại ô, tái hiện khá tốt xu thế quy mô lớn. Tuy nhiên, mô hình xuất hiện hai sai khác có hệ thống: (i) làm trơn trường nồng độ, hạ biên độ các đỉnh cục bộ tại nút giao thông/cụm công nghiệp; (ii) đánh giá cao nền tại một số ô lưới ngoại biên. Nguyên nhân có thể đến từ cấu hình kiểm kê phát thải và điều kiện biên, hiện chủ yếu bao phủ nguồn trong địa giới TP.HCM, chưa đại diện đầy đủ cho lan truyền/đóng góp từ các cụm công nghiệp lân cận (Bình Dương, Đồng Nai, Bà Rịa - Vũng Tàu, Tây Ninh), cùng với khuếch tán số và tham số vật lý - hóa học.

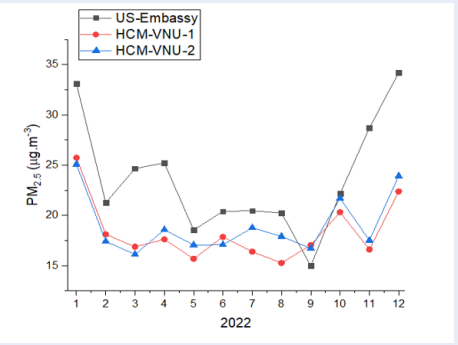
Tổng thể, mô hình CMAQ tái hiện tốt cấu trúc không gian của $PM_{2.5}$ tại TP.HCM, với đặc trưng "cao ở trung tâm, thấp ở ngoại ô", nhưng có xu hướng giảm biên độ cực trị và thu hẹp độ tương phản không gian. Điều này gợi ý cần tinh chỉnh kiểm kê phát thải theo không gian - thời gian (đặc biệt nguồn giao thông và công nghiệp) và tăng độ phân giải mô phỏng để cải thiện khả năng tái hiện các điểm nóng ô nhiễm cục bộ trong bối cảnh đô thị phức tạp của thành phố.



Hình 3: Phân bố theo không gian của $PM_{2.5}$ năm 2022: (a) đo đạc, (b) mô phỏng (nguồn: nhóm tác giả)

Phân bố theo thời gian của $PM_{2.5}$ trong không khí tại TP.HCM năm 2022

Để đánh giá phân bố theo thời gian của $PM_{2.5}$ tại TP. HCM, chúng tôi phân tích dữ liệu quan trắc liên tục năm 2022 tại ba trạm: lãnh sự quán Mỹ (US Embassy), ĐHQG-HCM (HCM-VNU1) và Bình Tân (HCM-VNU2). Kết quả cho thấy $PM_{2.5}$ biến thiên theo mùa rõ rệt (Hình 4), với nồng độ cao trong mùa khô, đặc biệt tháng 1 và 12, và giảm mạnh vào mùa mưa, đạt cực tiểu vào tháng 9. Sau đáy tháng 9, nồng độ tăng nhanh từ tháng 10, phản ánh sự chuyển pha khí tượng sang điều kiện mùa khô (nghịch nhiệt thường xuyên hơn, mưa giảm, gió yếu). Ba trạm đồng pha theo mùa nhưng khác biên độ: lãnh sự quán Mỹ luôn cao hơn hai trạm còn lại, phù hợp với đặc điểm giao thông dày đặc và mật độ xây dựng lớn quanh khu vực đặt trạm.

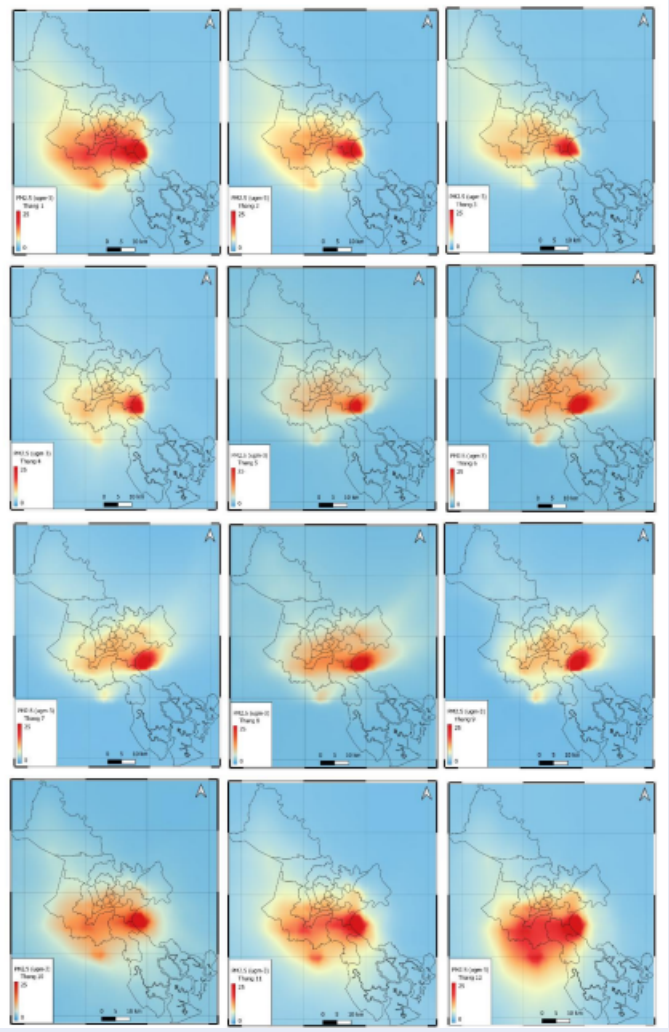


Hình 4: Trung bình hàng tháng $PM_{2.5}$ tại lãnh sự quán Mỹ (US embassy), ĐHQGHCM (HCM-VNU1), Bình Tân (HCM-VNU2) (nguồn: nhóm tác giả)

Bên cạnh đó, mô hình CMAQ cũng tái hiện được chu kỳ mùa của $PM_{2.5}$ tương đối tốt (Hình 5). Trong các tháng mùa khô (1 - 2 và 11 - 12), kết quả mô phỏng vùng nồng độ cao mở rộng quanh trung tâm thành phố, trong khi vào mùa mưa (5 - 9), nồng độ $PM_{2.5}$ giảm rõ rệt và vùng ô nhiễm thu hẹp, với cực tiểu vào tháng 9. Giai đoạn chuyển mùa tháng 10 thể hiện sự gia tăng nhanh của nồng độ, phù hợp với quan trắc. Sự dịch pha giữa mô phỏng và thực đo là nhỏ, cho thấy mô hình có khả năng mô phỏng đúng nhịp biến thiên theo mùa.

Tuy nhiên, một số khác biệt có tính hệ thống được ghi nhận giữa mô hình và quan trắc. Thứ nhất, biên độ biến thiên trong mô hình thấp hơn đáng kể, đặc biệt ở các tháng cực trị đầu và cuối năm. Mô hình có xu hướng đánh giá thấp các đỉnh $PM_{2.5}$ và đánh giá cao nhẹ nền nồng độ thấp trong mùa mưa. Điều này phản ánh đặc trưng làm mượt không gian - thời gian vốn có của mô hình lưới, cùng ảnh hưởng của các sơ đồ PBL, đối lưu và tham số rửa trôi, vốn quyết định mạnh đến khả năng giữ hoặc loại bỏ bụi mịn. Thứ hai, mô hình thể hiện tính đồng nhất không gian cao hơn thực tế: các bản đồ mô phỏng theo tháng cho thấy nền nồng độ tương đối đều, trong khi chuỗi đo điểm cho thấy sự khác biệt vi mô đáng kể giữa các khu vực gần trục giao thông, cụm xây dựng hoặc ven đô. Nguyên nhân có thể đến từ phân bổ phát thải theo biến đại diện chưa đủ chi tiết để phản ánh cấu trúc đô thị dày đặc.

Nhìn chung, CMAQ mô phỏng tốt sự biến thiên theo mùa của $PM_{2.5}$ tại TP.HCM nhưng làm giảm cực trị và thu hẹp độ tương phản không gian. Điều này gợi ý cần: (i) tinh chỉnh đặc tính phát thải theo mùa/giờ, đặc biệt trong mùa khô; (ii) kiểm tra và hiệu chỉnh các tham số hóa rửa trôi (ướt/khô) và trộn trong lớp biên khí quyển; và (iii) tăng độ phân giải hoặc cải thiện



Hình 5: Biến thiên trung bình tháng $PM_{2.5}$ năm 2022 từ CMAQ (nguồn: nhóm tác giả)

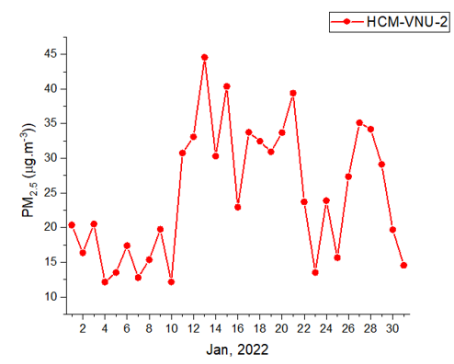
biểu diễn nguồn giao thông theo không gian để tái hiện chính xác hơn các "điểm nóng" ô nhiễm trong bối cảnh đô thị đặc thù của thành phố.

Sự kiện ô nhiễm tháng 1 năm 2022

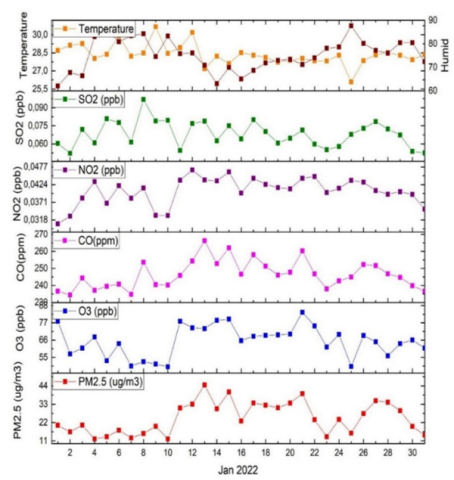
Kết quả phân tích biến thiên $PM_{2.5}$ theo mùa dựa trên quan trắc và mô phỏng cho thấy sự nhất quán về một đợt gia tăng bất thường trong tháng 01/2022 tại nhiều vị trí. Trong các phần tiếp theo, chúng tôi phân tích chi tiết đợt tăng đột ngột tháng 01/2022 nhằm làm rõ nguyên nhân và cơ chế chi phối.

Tại Bình Tân, trong giai đoạn 11–20/01/2022, $PM_{2.5}$ trung bình ngày tăng lên 31–46 $\mu g/m^3$ (Hình 6). Đồng thời, O_3 và CO cũng tăng, trong khi NO_2 và SO_2 ít biến động (Hình 7). Nhiệt độ và độ ẩm giảm trong cùng thời đoạn, cho thấy điều kiện khí tượng khô lạnh có thể góp phần giữ ô nhiễm ở mức cao. Phân tích quỹ đạo ngược (08–21/01; Hình 8) chỉ ra các khối không khí chủ đạo từ đông bắc, phần lớn đi qua Biển Đông và một phần xuất phát từ Myanmar – Lào – Campuchia – Bắc Việt Nam. Các khối không khí này thường có độ ẩm thấp, nhiệt độ thấp và có khả năng mang theo chất ô nhiễm, đồng thời giảm hiệu quả khuếch tán gần mặt đất.

Quan sát quy mô khu vực qua MERRA-2 (Hình 9) cũng cho thấy tín hiệu ô nhiễm rõ rệt trong cùng thời kỳ: AOD đạt ~0.2–0.28, tăng mạnh tại Đông Nam Bộ – Campuchia; SO_2 dao động ~0.6–1.1 $\times 10^{-10}$ kg/m^2 và CO đạt ~10–15 $\times 10^{-2}$ kg/m^2, đều tập trung cao trên Campuchia. Các giá trị này cho thấy sự tăng đồng thời của aerosol và khí ô nhiễm, phù hợp với đặc trưng của đốt sinh khối. Điểm cháy FIRMS (Hình 10) ghi nhận nhiều vụ cháy trong ngày 12–13/01/2022 tại Campuchia và một phần Đồng bằng sông Cửu Long,

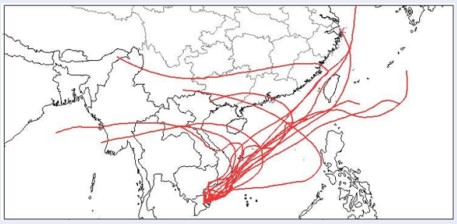


Hình 6: Nồng độ trung bình ngày $PM_{2.5}$ tại Bình Tân, tháng 1/2022 (nguồn: nhóm tác giả)

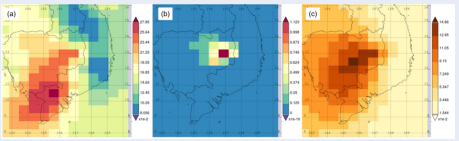


Hình 7: Sự biến thiên chất lượng không khí và khí tượng tại Bình Tân, tháng 1/2022 (nguồn: nhóm tác giả)

củng cố giả thuyết có nguồn đóng góp từ phía tây.



Hình 8: Dữ liệu phân tích quỹ đạo ngược BWT tại Bình Tân giai đoạn 8 - 21/01/2022 (nguồn: nhóm tác giả)



Hình 9: Dữ liệu MERRA- 2 trung bình tháng 1/2022: (a) AOD, (b) SO_2, (c) CO (nguồn: nhóm tác giả)



Hình 10: Dữ liệu đếm điểm cháy từ FIRMS (a) 12 - (b) 13 /1/2022 (nguồn: nhóm tác giả)

Tổng hợp các bằng chứng cho thấy đợt $PM_{2.5}$ tăng cao ở TP.HCM đầu tháng 01/2022 nhiều khả năng xuất phát từ sự kết hợp giữa vận chuyển tầm xa và điều kiện khí tượng bất lợi, trong đó đốt sinh khối là một tác nhân quan trọng, bên cạnh các nguồn địa phương.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã mô tả đặc trưng phân bố không gian – thời gian của $PM_{2.5}$ tại TP.HCM năm 2022 thông qua tích hợp dữ liệu quan trắc đa nguồn với mô phỏng khí tượng – hóa học. Về không gian, nồng độ cao tập trung ở trung tâm và các nút giao thông-công nghiệp, giảm dần về phía ngoại ô và ven biển. Về thời gian, $PM_{2.5}$ thể hiện tính mùa rõ rệt: cao trong mùa khô (đặc biệt tháng 1 và 12) và thấp trong mùa mưa, đáy vào tháng 9. Mô hình WRF - CMAQ tái hiện tốt cấu trúc không gian và thời gian; nhưng có xu hướng làm trơn cực trị, đánh giá thấp các đỉnh đầu/cuối năm và nâng nhẹ nền mùa mưa, đồng thời thể hiện tính đồng nhất không gian cao hơn thực đo. Phân tích sự kiện tháng 01/2022 cho thấy đợt ô nhiễm kéo dài đi kèm sự gia tăng đồng thời của O_3 và CO dưới điều kiện khí tượng bất lợi; quỹ đạo ngược HYSPLIT cùng bằng chứng MERRA-2 và FIRMS cho thấy tác động phối hợp của vận chuyển từ hướng đông bắc và đốt sinh khối khu vực. Các phát hiện này nhấn mạnh nhu cầu kiểm soát song song nguồn phát thải tại chỗ và tác nhân vận chuyển xa trong các giai đoạn bất lợi khí tượng, đồng thời ưu tiên can thiệp tại các hành lang giao thông và cụm công nghiệp – nơi đóng vai trò "điểm nóng" ô nhiễm.

Tuy nhiên, việc diễn giải kết quả cần tính đến một số giới hạn: (i) kiểm kê phát thải địa phương vẫn tiềm ẩn bất định theo thời gian và theo loại hình nguồn; (ii)

sai lệch khí tượng về mưa, gió bề mặt và đặc tính lớp biên có thể ảnh hưởng đến khuếch tán – lắng đọng hạt; và (iii) độ phủ dữ liệu bổ trợ còn hạn chế, thiếu thông tin về thành phần hóa học $PM_{2.5}$; (iv) các phân tích vận chuyển xa chủ yếu mang tính định tính, chưa lượng hóa được tỷ lệ đóng góp nguồn.

Trong tương lai, nghiên cứu sẽ tập trung hoàn thiện kiểm kê phát thải theo giờ/ngày, thử nghiệm các sơ đồ tham số hóa PBL và vi mô mây, đồng hóa dữ liệu quan trắc để hiệu chỉnh trực tuyến, và ứng dụng các phương pháp tách nguồn định lượng nhằm nâng cao độ tin cậy của đánh giá và hỗ trợ hoạch định chính sách giảm phát thải hiệu quả hơn cho TP.HCM.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (VNU-HCM) theo đề tài mã số C2024-24-07/HĐ-KHCN.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Các tác giả tuyên bố rằng không có xung đột lợi ích nào liên quan đến nghiên cứu này

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Đỗ Thị Thùy Linh: phân tích số liệu, cấu trúc và viết bản thảo. Nguyễn Thoại Tâm: hỗ trợ chạy mô hình CMAQ-WRF. Nguyễn Ngọc Thảo Nguyên: hỗ trợ chạy mô hình hysplot và dữ liệu vệ tinh, Nguyễn Thị Cẩm Nhàng: hỗ trợ phân tích số liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Hien TT, Chi N, Nguyen NT, Vinh LX, Takenaka N, Huy DH. Current status of fine particulate matter (PM2.5) in Vietnam's most populous city. Ho Chi Minh City Aerosol and Air Quality Research. 2019;19:2239–2251. Available from: https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.12.0471.
2. Nguyen L, Sheu GR, Hsiao TC, Lee CT, S-C C, Lin NH. Relationships between atmospheric mercury and optical properties of spring outflow aerosols from Southeast Asia. Atmospheric Pollution Research. 2021;12(10):101178. Available from: https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101178.
3. Duong HH, Nguyen C, Nguyen L, To HT. Fine particulate matter (PM2.5) in Ho Chi Minh City: Analysis of the status and the temporal variation based on the continuous data from 2013-2017. Science and Technology Development Journal - Natural Sciences. 2018;2(5):130–137. Available from: https://doi.org/10.32508/stdjns.v2i5.788.
4. Permadi DA, Oanh NTK. Assessment of biomass open burning emissions in Indonesia and potential climate forcing impact. Atmospheric Environment. 2013;78:250–258. Available from: https;//doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.016.
5. Linh DTT, Quoc BH, Thoai TN, Thanh DNT, Nguyen TCN. Assessing the characteristics and potential source area of air pollution in Ho Chi Minh City using a backward trajectory model. 2025 IOP Conf Ser: Earth Environ Sci. 2025;p. 012–015. Available from: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1540/1/012015.
6. Seinfeld JH, Pandis SN. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 3rd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2016.
7. Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Liu Z, Berner J, et al. A description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR. Boulder (CO): National Center for Atmospheric Research. 2019;Available from: https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97.
8. Appel KW, Napelenok SL, Foley KM, Pye H, Hogrefe C, Luecken DJ, et al. Description and evaluation of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system version 5.1. . Geoscientific Model Development. 2017;10:1703–1732. Available from: https://doi.org/10.5194/gmd-10-1703-2017.
9. Emery C, Liu Z, Russell AG, Odman MT, Yarwood G, Kumar N. Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance. Journal of the Air & Waste Management Association. 2017;67(5):582–598. Available from: https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027.
10. Nguyen TH, Nagashima T, Doan QV. Air Quality Modeling Study on the Controlling Factors of Fine Particulate Matter (PM2.5) in Hanoi: A Case Study in. Atmosphere. 2010;11(7):733. Available from: https://doi.org/10.3390/atmos11070733.
11. Dam DA, Chu TTH, Phung TTT, Le VL, Nguyen QP, Nguyen HH, et al. Application of the CMAQ Model to Assess the Vertical Distribution of PM2.5 Pollution in the Hanoi Area. Frontiers in Health Informatics. 2024;13(8). Available from: https://doi.org/10.63682/fhi.0981.
12. Ho QB, Vu K, Nguyen HD, Nguyen T, Nguyen H, Do L, et al. Assessment of air quality and health impact in Hanoi (Vietnam) due to traffic emission-Seasonal analysis and traffic emission reduction scenarios. Atmosphere. 2025;16(11):1301. Available from: https://doi.org/10.3390/atmos16111301.
13. Minh VTT, Tin TT, Hien TT. PM2.5 Forecast System by Using Machine Learning and WRF Model, A Case Study: Ho Chi Minh City, Vietnam. Aerosol and Air Quality Research. 2021;21(12):210108. Available from: https://doi.org/10.4209/aaqr.210108.
14. Pye H, Place BK, Murphy BN, Seltzer KM, Ambro D, Allen EL, et al. Linking gas, particulate, and toxic endpoints to air emissions in the Community Regional Atmospheric Chemistry Multiphase Mechanism (CRACMM) version 1.0. Atmos Chem Phys. 2023;23(9):5043–5099. Available from: https://doi.org/10.5194/acp-23-5043-2023.
15. Gelaro R, Mccarty W, Suárez MJ, et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). J Clim. 2017;.
16. Bosilovich M. MERRA-2 Overview ($0.5^\circ \times 0.625^\circ \times 72$ hybrid-eta levels to 0.01 hPa). NASA/CERES Technical Meeting materia.
17. Hung WT, Lu CH, Shrestha B. The impacts of transported wildfire smoke aerosols on surface air quality in New York State: A case study in summer 2018. . Atmos Environ. 2020;227:117415.
18. Nguyen L, Huang HY, Lei TL, et al. Characterizing a landmark biomass-burning event and its implication for aging processes during long-range transport. Atmos Environ. 2020;241:117766.
19. Wetchayont P, Hayasaka T, Khatri P. Air Quality Improvement during COVID-19 Lockdown in Bangkok Metropolitan, Thailand: Effect of the Long-range Transport of Air Pollutants. . Aerosol Air Qual Res. 2021;21:200662. Available from: https://doi.org/10.4209/aaqr.200662.
20. Santoso M, Hopke PK, Permadi DA, Damastuti E, Lestiani DD, Kurniawati S. Multiple Air Quality Monitoring Evidence of the Impacts of Large-scale Social Restrictions during the COVID-19 Pandemic in Jakarta. Indonesia Aerosol Air Qual Res. 2021;21:200645. Available from: https://doi.org/10.4209/aaqr.200645.

VNUHCM Journal of Environment and Earth Sciences 2026, 10(1):1247-1255

Open Access Full Text Article

Research Article

Spatiotemporal distribution of $PM_{2.5}$ in Ho Chi Minh city: Model - Observation comparison and the influence of Biomass Burning and Transboundary Transport

Do Thi Thuy Linh[1,2,*], Nguyen Thoai Tam[1,2], Nguyen Ngoc Thao Nguyen[1,2], Nguyen Thi Cam Nhang[1]

Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

Understanding the spatiotemporal characteristics and regional influences of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) is crucial for effective air quality management in rapidly urbanizing cities. This study evaluates the spatiotemporal distribution of $PM_{2.5}$ in Ho Chi Minh City in 2022 by integrating multi-site observations with a coupled meteorology–chemistry simulation. Results indicate that high $PM_{2.5}$ concentrations are concentrated in the urban center and traffic - industrial hotspots, gradually decreasing toward suburban and coastal areas. Seasonal variability is pronounced, with elevated concentrations during the dry season (January and December) and lower levels during the rainy season (September), consistent with observations. A pollution episode occurred in January 2022, during which $PM_{2.5}$ increased to 31 - 46 $\mu g\ m^{-3}$ alongside rises in O_3 and CO. Analysis of HYSPLIT trajectories, MERRA - 2 data, and FIRMS fire counts suggests that northeast air masses combined with regional biomass burning were likely major contributors to this episode. The WRF - CMAQ model reproduces the overall spatial patterns but tends to smooth extreme values and reduce spatial contrasts. This study highlights the importance of refining emission inventories, improving meteorological parameterizations, and enhancing coordinated pollution control at both local and regional scales.

Key words: Urban air quality, Biomass burning, Transboundary transport, PM2.5, WRF - CMAQ

[1]*Institute for Environment and Resources (IER), Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam*

[2]*Department of Science and Technology, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam*

Correspondence

Do Thi Thuy Linh, Institute for Environment and Resources (IER), Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Department of Science and Technology, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: dothuylinh21@gmail.com

History

- Received: 20-10-2025
- Revised: 15-12-2025
- Accepted: 26-12-2025
- Published Online: 22-06-2026

DOI : https://doi.org/10.32508/vnuhcmjees.v10i1.851

Check for updates

Copyright

© VNUHCM Journal. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Cite this article : Linh D T T, Tam N T, Nguyen N N T, Nhang N T C. **Spatiotemporal distribution of $PM_{2.5}$ in Ho Chi Minh city: Model - Observation comparison and the influence of Biomass Burning and Transboundary Transport** . *VNUHCM J. Environ. Earth Sci.* 2026; 10(1):1247-1255.