

# ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP 4DVAR ĐỒNG HÓA DỮ LIỆU AOD TỪ VỆ TINH MODIS PHỤC VỤ DỰ BÁO NỒNG ĐỘ $PM_{2.5}$ KHU VỰC HÀ NỘI

Nguyễn Hải Đông<sup>(1)</sup>, Doãn Hà Phong<sup>(2)</sup>, Lê Ngọc Cầu<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Cục Viễn thám quốc gia

<sup>(2)</sup>Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi Khí hậu

Ngày nhận bài: 24/8/2020; ngày chuyển phản biện: 25/8/2020; ngày chấp nhận đăng: 10/9/2020

**Tóm tắt:** Kỹ thuật đồng hóa số liệu 4D-Var trong module đồng hóa số liệu WRFDA của hệ thống mô hình Nghiên cứu và dự báo thời tiết WRF đã được ứng dụng tại nhiều Trung tâm nghiên cứu trên thế giới trong nghiên cứu, dự báo nồng độ  $PM_{2.5}$  trong không khí.

Bài báo này ứng dụng thuật toán 4D-Var trong WRF đồng hóa số liệu AOD từ dữ liệu vệ tinh MODIS làm đầu vào cho mô hình chất lượng không khí CMAQ để ước tính nồng độ bụi  $PM_{2.5}$  cho khu vực Hà Nội.

Kết quả của thực nghiệm cho thấy nồng độ  $PM_{2.5}$  sau khi đồng hóa dữ liệu AOD cho hệ thống mô hình WRF-CMAQ có tương quan  $R^2 = 0,669$  với dữ liệu nồng độ  $PM_{2.5}$  được quan trắc tại trạm cố định Trung Yên, kết quả bước đầu có thể ứng dụng dự báo nồng độ  $PM_{2.5}$  khu vực Hà Nội.

**Từ khóa:** Độ sâu quang học sol khí (AOD), Ô nhiễm không khí,  $PM_{2.5}$ , Viễn thám.

## 1. Giới thiệu

Kỹ thuật đồng hóa số liệu biến phân bốn chiều 4D-Var trong hệ thống mô hình WRF cho thấy kết quả của hoạt động dự báo được cải thiện đáng kể so với hệ thống 3D-Var [13].

Phương pháp 4D-Var có một số ưu điểm so với 3D-Var:

- Khả năng sử dụng dữ liệu quan trắc tại thời điểm đo đạc hoặc trong khoảng thời gian xác định trước trong bước thời gian đồng hóa phù hợp với hầu hết các loại dữ liệu quan trắc được;

- Xác định rõ các phương sai dự báo thông qua việc tối ưu các quan sát trong sự biến đổi của thời tiết;

- Khả năng sử dụng mô hình dự báo để gia tăng cân bằng động của phân tích cuối cùng.

Với một số cải tiến này, kỹ thuật 4D-Var

giúp cho việc thiết lập đầu vào mô hình được cải thiện đáng kể. Đối với quan trắc và dự báo ô nhiễm không khí việc áp dụng kỹ thuật đồng hóa biến phân 4D-Var để đồng hóa số liệu độ sâu quang học sol khí (AOD) từ dữ liệu vệ tinh MODIS cho hệ thống mô hình WRF-CMAQ sẽ đem lại kết quả khả quan trong tăng cường các kết quả từ mô hình trong việc gắn kết kết quả từ các trạm đo mặt đất với hệ thống dự báo giám sát từ mô hình [12].

## 2. Thuật toán WRF 4D-Var

Thuật toán WRF 4D-Var được sử dụng trong các hệ thống dự báo [4], [12], [15], [16] theo cách tiếp cận xác định các gia số phân tích nhằm giảm thiểu hàm chi phí, được định nghĩa là hàm của gia số phân tích.

Hàm chi phí 4DVAR là hàm phi tuyến tính theo công thức:

$$J(x_0) = \frac{1}{2}(x_0 - x_0^b)^T B^{-1}(x_0 - x_0^b) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [H_i(x_i) - y_i]^T R_i^{-1} [H_i(x_i) - y_i] \quad (1)$$

Trong đó chỉ số "0" là thời điểm bắt đầu của

khoảng thời gian phân tích 4DVAR. Hàm chi phí sau khi biến đổi theo mô hình tiếp tuyến thành hàm chi phí gia tăng (2):

Liên hệ tác giả: Nguyễn Hải Đông  
Email: nguyendong.rsc@gmail.com

$$J(x_0) = \frac{1}{2} (x_0 - x_0^b)^T B^{-1} (x_0 - x_0^b) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [H_i(M_i(x_0)) - y_i]^T R_i^{-1} [H_i(M_i(x_0)) - y_i] \quad (2)$$

$M_i$  là mô hình dự báo và  $H_i$  là toán tử quan trắc theo thời gian dự tính được chia theo khoảng phù hợp  $i$ . Trong bài toán đồng hóa dữ liệu AOD từ vệ tinh MODIS, giá trị AOD chính là toán tử quan trắc  $H_i$ .  $B$  ma trận sai số hiệp phương sai của trường nền là một ước lượng khí tượng, trường nền vector  $x^b$  là dự báo ngắn hạn được tạo ra bởi một phân tích trước đó.  $x_i$  là vectơ biểu thị phân tích không liên tục sau vòng lặp ngoài thứ  $i$  với  $i = 1, \dots, n$  với  $n$  là số lần lặp.  $x^n$  vector giá trị thu được sau vòng lặp bên ngoài cuối cùng (thứ  $n$ ) được ký hiệu là. Việc tối ưu hóa vòng lặp bên trong bắt đầu từ một trạng thái dự báo  $x^{n-1}$  là trạng thái phân tích từ vòng lặp bên ngoài gần nhất. Trong vòng lặp ngoài đầu tiên, trường nền  $x^b$  thường được lấy làm trạng thái dự báo  $x^0$  đầu tiên.

Theo lý thuyết, trạng thái phân tích nhận được khi hàm chi phí (2) được tối thiểu hóa hoặc khi gradient của nó bằng không, việc tối thiểu hóa diễn ra trong vòng lặp bên trong của thuật toán WRF 4DVar. Với trạng thái trường nền  $x^b$ , các điều kiện biên hợp lệ trong cửa sổ thời gian phân tích, ma trận hiệp phương sai trường nền và sai số quan trắc tương ứng  $B$  và  $R$ , được nhóm thành cửa sổ thời gian  $K$ , WRF

4DVar sẽ tạo ra giá trị phân tích cuối cùng  $x^n$  [4].

### 3. Kết quả nghiên cứu

#### 3.1. Dữ liệu và Phần mềm

+ Thời gian mô phỏng: từ 00h đến 24h ngày 21 tháng 01 năm 2019.

+ Phạm vi không gian: Khu vực Hà Nội và lân cận

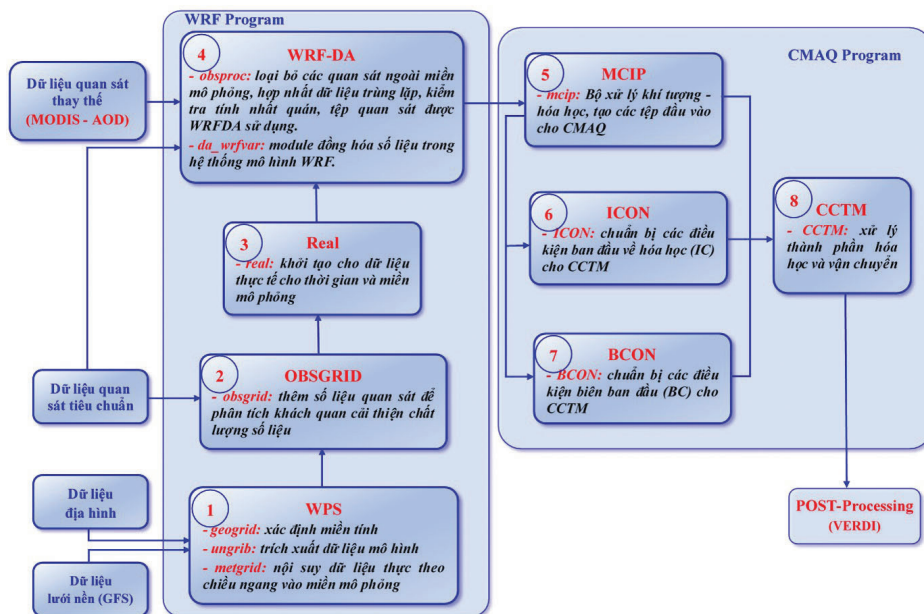
+ Số liệu thực đo: Trạm đo chất lượng Không khí cố định, Trung Yên, Hà nội (Sở Tài nguyên Môi trường Hà Nội)

+ Hệ thống mô hình: Hệ thống mô hình WRF-CMAQ với mã nguồn mở được cài đặt với nền hệ điều hành Ubuntu 16.04 64 bit trên máy PC core i7, 2,4 GHz, 24GB RAM, 02TB SSD.

+ Dữ liệu khí tượng đầu vào: Nguồn số liệu khí tượng Global Forecast System (GFS) bao phủ từ toàn cầu tới độ phân giải ngang là 28 km.

+ Dữ liệu vệ tinh: Các sản phẩm tiêu chuẩn từ vệ tinh MODIS MOD04\_3K - MODIS/Terra Aerosol 5-Min L2 Swath 3km và MYD04\_3K - MODIS/Aqua Aerosol 5-Min L2 Swath 3 km <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/> với định dạng HDF (Hierarchical Data Format).

#### 3.2. Các bước mô phỏng

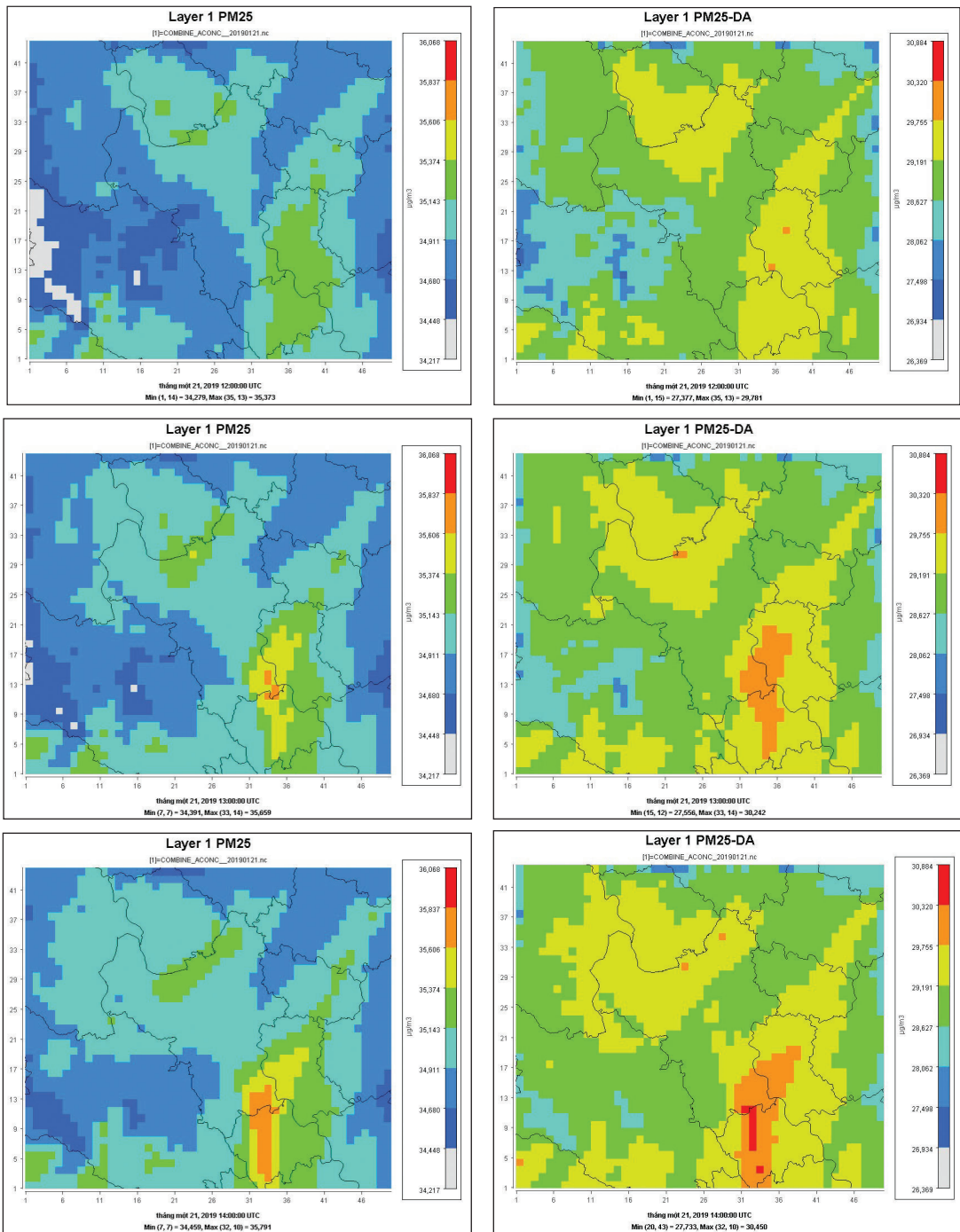


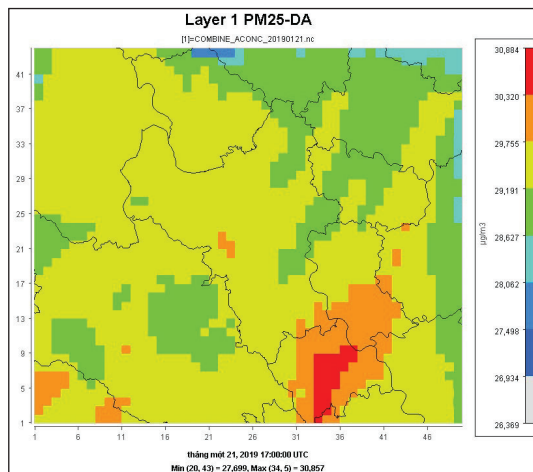
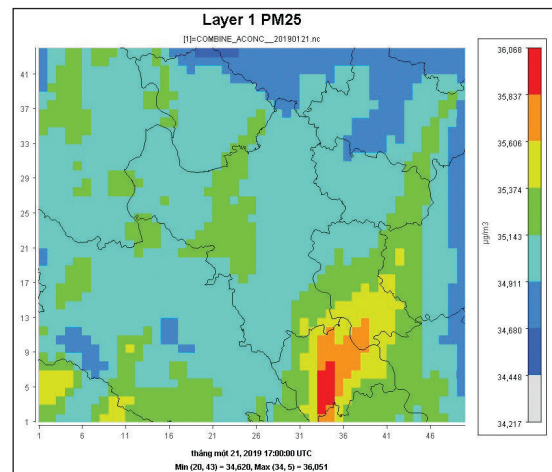
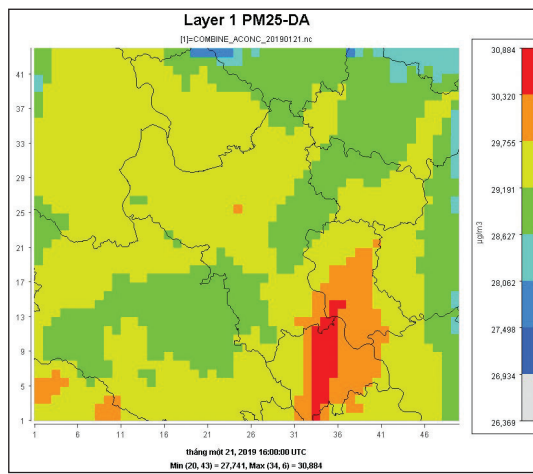
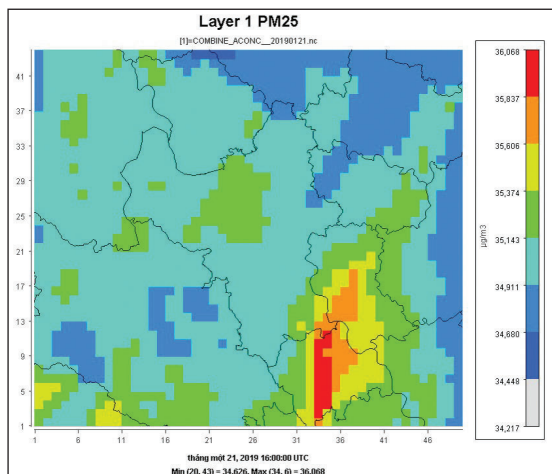
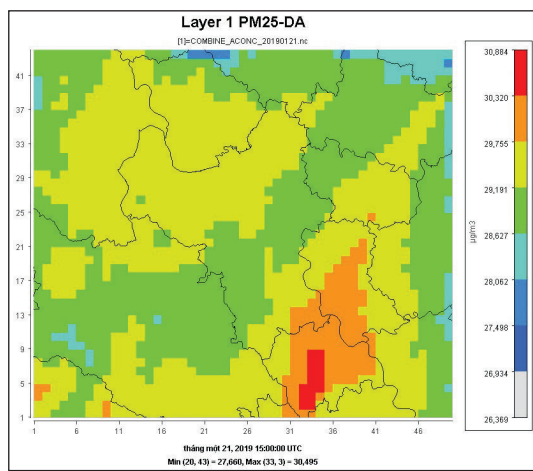
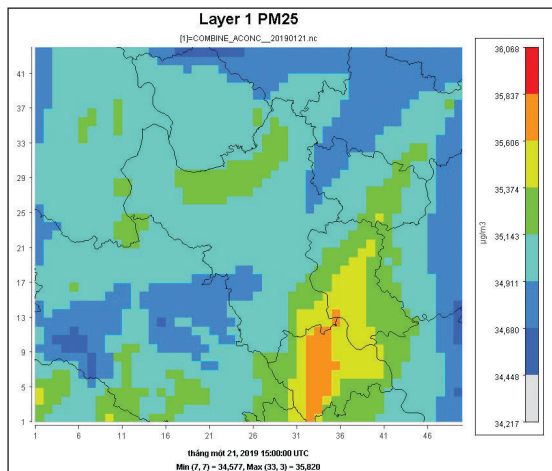
Hình 1. Sơ đồ các bước thực hiện mô phỏng thử nghiệm

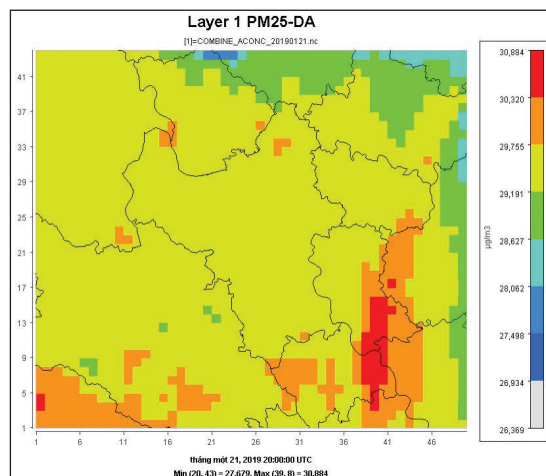
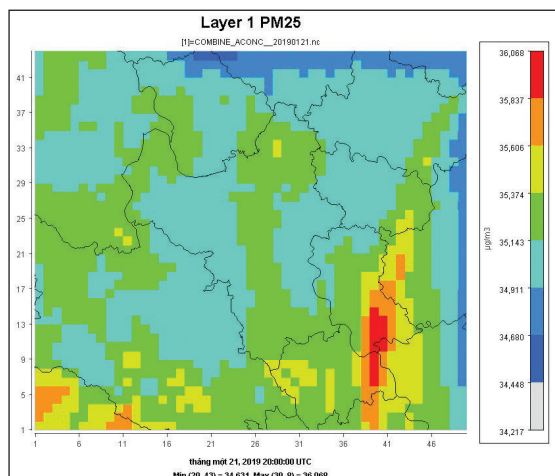
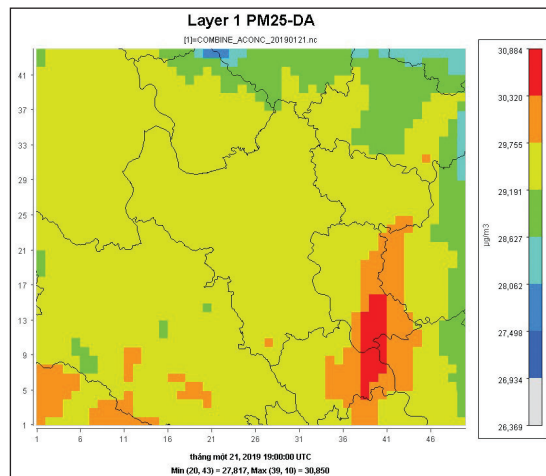
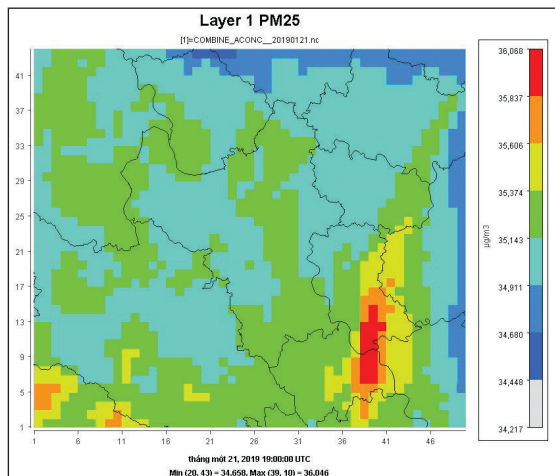
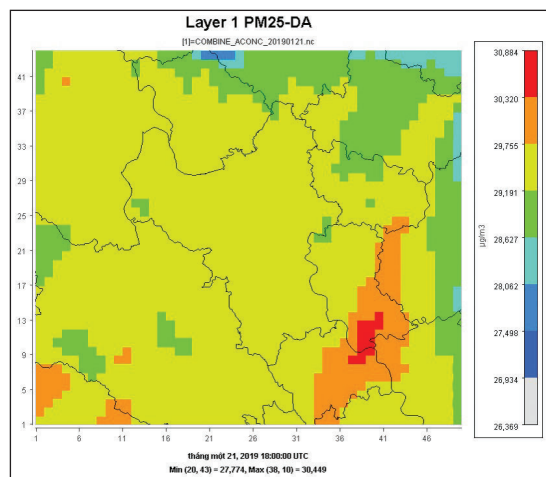
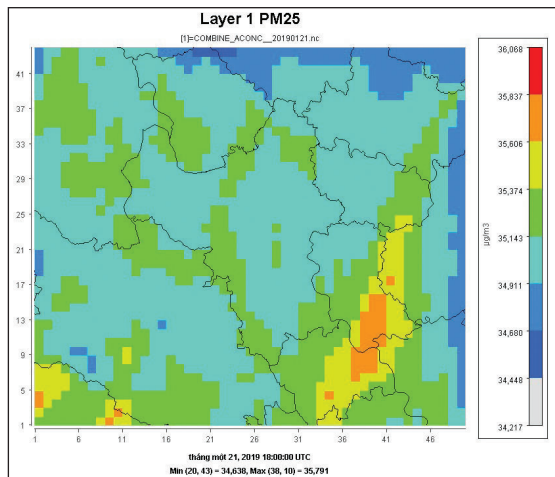
Hình 1 là hệ thống mô hình WRF-CMAQ thông qua tiện ích chuyển đổi MCIP (kèm theo gói mã nguồn của CMAQ).

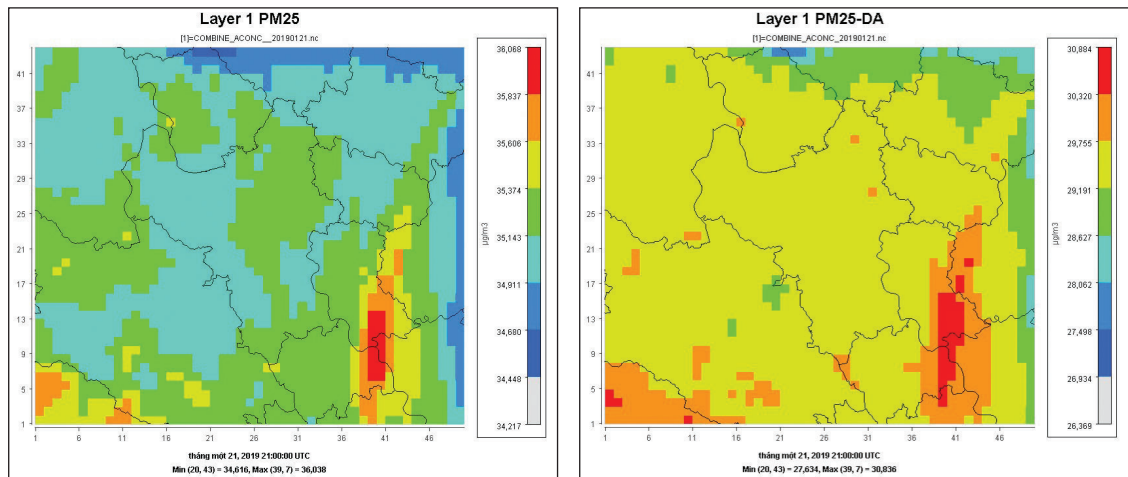
Quá trình đồng hóa dữ liệu AOD từ vệ tinh MODIS sử dụng phương pháp 4DVAR trong giám sát nồng độ  $PM_{2.5}$  được thực hiện tại bước (4) trong sơ đồ tại Hình 1 (module WRF-DA). Sau

khi tiến hành mô phỏng thực nghiệm với các điều kiện và quy trình như đã trình bày ở phần trên, kết quả thu được là các file bản đồ thể hiện nồng độ vật chất hạt  $PM_{2.5}$ . Các kết quả  $PM_{2.5}$  chưa đồng hóa (bên trái) và sau khi đồng hóa (bên phải), tầng thấp nhất (100 m) từ mô hình như hình dưới đây (Hình 2).









Hình 2. Kết quả ước tình nồng độ  $PM_{2.5}$  trước khi đồng hóa (ảnh trái) và sau khi đồng hóa (ảnh phải) tại tầng thấp nhất 100m từ 12 giờ đến 21 giờ ngày 21/01/2019

Sự chênh lệch giữa giá trị nồng độ  $PM_{2.5}$  tại trạm quan trắc (ở độ cao khoảng 10 m) và giá trị nồng độ từ kết quả của mô hình sau khi đồng hóa dữ liệu vệ tinh AOD tại bề

mặt 100 m (áp suất 750 mb), do sự chênh lệch về độ cao của thiết bị tại trạm quan trắc cố định và độ cao lớp đầu tiên của mô hình.

Bảng 1. Số liệu nồng độ  $PM_{2.5}$  tại trạm Trung Yên ( $PM_{2.5}$ -QT) và sau đồng hóa ( $PM_{2.5}$ -DA) từ 12 giờ 00 đến 21 giờ 00 ngày 21 tháng 01 năm 2019

Thời gian	$PM_{2.5}$ -QT ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$PM_{2.5}$ -NoDA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$PM_{2.5}$ -DA ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Chênh lệch (DA-QT)
21/01/2019 12:00	17,92	59,610	27,52	9,60
21/01/2019 13:00	18,07	59,521	28,37	10,30
21/01/2019 14:00	18,12	59,564	26,49	8,37
21/01/2019 15:00	18,17	59,494	26,40	8,23
21/01/2019 16:00	18,23	59,670	26,63	8,40
21/01/2019 17:00	19,54	59,880	28,88	9,34
21/01/2019 18:00	20,85	59,978	27,98	7,13
21/01/2019 19:00	22,14	60,248	30,25	8,11
21/01/2019 20:00	21,99	60,018	29,02	7,03
21/01/2019 21:00	22,47	60,274	30,27	7,80

Do ảnh hưởng của các yếu tố khí tượng như độ ẩm, nhiệt độ, tốc độ và hướng gió: Nhiệt độ thu được tại trạm quan trắc trung bình ngày 21/01/2019 khoảng 15,6°C, độ ẩm khoảng 70%, tốc độ gió khoảng 2,6 m/s, do vậy, các vật chất hạt đã được đẩy lên cao và giá trị nồng độ cao hơn giá trị thu được tại độ cao của trạm quan trắc.

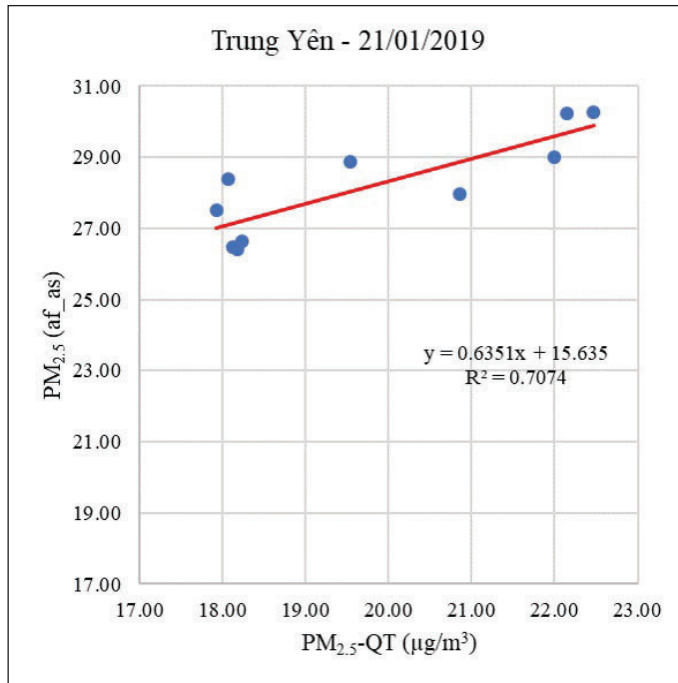
Việc so sánh hai giá trị này chỉ có ý nghĩa tham khảo mặc dù hai giá trị đều cùng thời điểm

(cùng giờ) vì giá trị nồng độ sau khi đồng hóa dữ liệu vệ tinh AOD là giá trị mang tính chất tổng cột tại thời điểm phân tích trong khi giá trị tại trạm quan trắc là giá trị tức thời tại vị trí quan trắc và tại bề mặt độ cao đặt thiết bị.

Biểu đồ tương quan tuyến tính giữa nồng độ  $PM_{2.5}$  của mô hình sau khi đồng hóa dữ liệu AOD từ vệ tinh MODIS và nồng độ  $PM_{2.5}$  được quan trắc tại trạm cố định Trung Yên (Hình 3) cho thấy có mối tương quan nhất định. Kết quả tại Bảng

1 cũng cho thấy, dữ liệu AOD đã được đồng hóa trong kết quả của mô hình và có thể sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình chất lượng không

khí tại những khu vực thiếu số liệu quan trắc phục vụ công tác giám sát chất lượng không khí trên khu vực.



Hình 3. Kết quả hồi quy nồng độ PM<sub>2.5</sub> từ trạm quan trắc và mô hình CMAQ ngày 21/01/2019

#### 4. Kết luận

Bài báo này là tổng quan ngắn gọn về khả năng 4D-Var trong hệ thống WRF được xây dựng dựa trên công thức gia tăng của WRF-Var. Cấu trúc hàm của 4D-Var được nghiên cứu bằng thử nghiệm đồng hóa AOD cho chất lượng không khí được trình bày trong bài báo này chứng minh rõ ràng sự tuyến tính hóa được thực hiện trong mô hình tuyến tính tiếp tuyến và bản chất phụ thuộc của các bước phân tích trong thời gian đồng hóa.

Kết quả nồng độ PM<sub>2.5</sub> sau khi thực hiện đồng

hóa dữ liệu AOD cho mô hình chất lượng không khí có tương quan tích cực ( $R^2 = 0,669$ ) với dữ liệu nồng độ PM<sub>2.5</sub> được quan trắc tại trạm cố định Trung Yên, có nghĩa là phương pháp đồng hóa số liệu AOD có thể ứng dụng trong ước tính, giám sát nồng độ bụi PM<sub>2.5</sub>.

Bổ sung các dữ liệu tại các trạm quan trắc cố định và các trạm quan trắc tức thời trong đồng hóa với các số liệu toàn cầu có chiều hướng tốt trong nâng cao độ chính xác dự báo nồng độ PM<sub>2.5</sub> phục vụ mục đích giám sát chất lượng không khí trong khu vực.

#### Tài liệu tham khảo

1. Barker, D. M., W. Huang, Y.-R. Guo, A. J. Bourgeois, and Q. N. Xiao, (2004a), *A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results*. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 897-914.
2. M. S. Lee, Y.-R. Guo, W. Huang, Q.-N. Xiao, and R. Rizvi, (2004b), *WRF variational data assimilation development at NCAR*. Fifth WRF/14<sup>th</sup> MM5 Users' Workshop, Boulder, CO, NCAR, 5 pp.
3. Buehner, M., (2005), "Ensemble-derived stationary and flowdependent background-error covariances: Evaluation in a quasi-operational NWP setting", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 1013-1043.

4. Courtier, P., J.-N. Thépaut, and A. Hollingsworth, (1994), "A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 1367-1387.
5. Gauthier, P., and J.-N. Thépaut, (2001), *Impact of the digital filter as a weak constraint in the preoperational 4DVAR assimilation system of Météo France*, *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2089-2102.
6. Grell, G. A., and D. Devenyi, (2002), *A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques*, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1693, doi:10.1029/2002GL015311.
7. Guo, Y. R., H.-C. Lin, X. X. Ma, X.-Y. Huang, C. T. Terng, and Y.-H. Kuo, (2006), *Impact of WRF-Var (3DVar) background error statistics on typhoon analysis and forecast*, Seventh WRF Users' Workshop, Boulder, CO, NCAR, 7 pp.
8. Gustafsson, N., (1992), *Use of a digital filter as weak constraint in variational data assimilation*, *Proc. Workshop on Variational Assimilation, with Special Emphasis on Three-Dimensional Aspects*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 327–338.
9. Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki, (2005), *A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results*", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 3465–3475.
10. Huang, X.-Y., X. Yang, N. Gustafsson, K. Mogensen, and M. Lindskog, (2002), *Four-dimensional variational data assimilation for a limited area model*, HIRLAM Tech Rep 57, 41 pp.
11. Le Dimet, F., and O. Talagrand, (1986), *Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretic aspects*, *Tellus*, 38A, 97–110.
12. Lorenc, A. C., (2003), "Modelling of error covariances by 4D-Var data assimilation", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 3167–3182.
13. Rabier, F., and Coauthors, (1997), *Recent experimentation on 4Dvar and first results from a simplified Kalman filter*, ECMWF Tech. Memo. 240, Reading, United Kingdom, 42 pp.
14. Rawlins, F., S. P. Ballard, K. J. Bovis, A. M. Clayton, D. Li, G. W. Inverarity, A. C. Lorenc, and T. J. Payne, (2007), "The Met Office global 4-Dimensional data assimilation system", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 347–362.
15. Thépaut, J.-N., and P. Courtier, (1991), "Four dimensional variational data assimilation using the adjoint of a multilevel primitive-equation model", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 117, 1225–1254.
16. Veersé, F., and J.-N. Thépaut, (1998), "Multi-truncation incremental approach for four-dimensional variational data assimilation", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1889–1908.
17. Xu, L., T. Rosmond, and R. Daley, (2005), *Development of NAVDAS-AR: Formulation and initial tests of the linear problem*, *Tellus*, 57A, 546–559.
18. Zupanski, D., D. F. Parrish, E. Rogers, and G. DiMego, (2002), *Four-dimensional variational data assimilation for the blizzard of 2000*, *Mon. Wea. Rev.*, 130, 1967–1988.
19. Zupanski, M., (1993), *Regional four-dimensional variational data assimilation in a quasi-operational forecasting environment*, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2396–2408.

# APPLICATION OF THE 4DVAR METHOD FOR ASSIMILATION AOD DATA FROM MODIS SATELLITE FOR FORECASTING CONCENTRATIONS OF $PM_{2.5}$ IN HA NOI

Nguyen Hai Dong<sup>(1)</sup>, Doan Ha Phong<sup>(2)</sup>, Le Ngoc Cau<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Department of National Remote Sensing (RSC)

<sup>(2)</sup>Viet Nam Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change

Received: 24/8/2020; Accepted: 10/9/2020

**Abstract:** 4D-Var data assimilation technique in the data assimilation module of the Weather Research and Forecasting system (WRFDA) has been applied at several research centers in the world in research and prediction of  $PM_{2.5}$  concentration.

This study applied 4D-Var algorithm in WRF to assimilate AOD data from MODIS satellite data as input to CMAQ air quality model to estimate  $PM_{2.5}$  dust concentration for Ha Noi area.

The results of the experiment show that the concentration of  $PM_{2.5}$  after assimilation of AOD data for the WRF-CMAQ model system is correlated with  $R^2 = 0.669$  with the observed  $PM_{2.5}$  concentration data at the stationary Trung Yen. The initial results can be used to predict concentrations of  $PM_{2.5}$  in Ha Noi.

**Keywords:** Aerosol optical depth (AOD), Air pollution,  $PM_{2.5}$ , Remote sensing.