



Original Article

Assessing the Ensemble Assimilation System for Forecasting the Genesis of Tropical Cyclone Sonca (2017) in the Vietnam East Sea using a Lagrangian Approach

Dao Nguyen Quynh Hoa*

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 12 June 2023

Revised 09 August 2023; Accepted 30 August 2023

Abstract: With the aim of evaluating the cyclogenesis predictability of Sonca (2017) using an ensemble prediction system from the local ensemble transform Kalman filter (LETKF) to model WRF, the study proposed a dynamical assessment method with a Lagrangian approach that is stable and independent of time and reference systems. With this approach, the study can clearly distinguish between cases of tropical cyclone (TC) *formation* and *non-formation* in the ensemble forecast members. By evaluating the thermodynamic conditions of the low-level circulation between the forming and non-forming groups, the study found that the ocean-atmosphere interaction and the vortex merger process play important roles in the formation of Sonca. The evaluation of the formation location showed that the detected vortex centers from the forming members tended to concentrate near the monsoon trough axis, indicating that this is a highly favorable region for vortex formation in the Vietnam East Sea.

Keywords: Tropical cyclone, tropical cyclogenesis, data assimilation, LETKF, Lagrangian approach.

* Corresponding author.

E-mail address: hoadao@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4961>

Đánh giá hệ thống đồng hóa tổ hợp dự báo sự hình thành của bão Sonca (2017) trên Biển Đông với tiếp cận Lagrange

Đào Nguyễn Quỳnh Hoa*

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 12 tháng 6 năm 2023

Chỉnh sửa ngày 09 tháng 8 năm 2023; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 8 năm 2023

Tóm tắt: Với mục tiêu đánh giá dự báo sự hình thành của bão Sonca (2017) từ hệ thống đồng hóa tổ hợp sử dụng phương pháp lọc Kalman tổ hợp địa phương WRF-LETKF, nghiên cứu đã đề xuất phương pháp đánh giá động lực với tiếp cận Lagrange có tính ổn định và không phụ thuộc vào thời gian và hệ quy chiếu. Với cách tiếp cận này, nghiên cứu có thể phân tách một cách rõ ràng các trường hợp hình thành và không hình thành xoáy thuận nhiệt đới (XTNĐ) trong các thành phần dự báo tổ hợp. Thông qua đánh giá điều kiện nhiệt động lực của hoàn lưu mực thấp giữa các nhóm hình thành và không hình thành, nghiên cứu nhận thấy rằng tương tác biển – khí quyển và quá trình hội tụ xoáy đóng vai trò quan trọng trong sự hình thành XTNĐ Sonca. Đánh giá vị trí hình thành cho thấy các trung tâm xoáy phát hiện từ các thành phần tổ hợp có xu hướng tập trung gần trục rãnh gió mùa, thể hiện rằng đây là một vùng rất thuận lợi cho sự hình thành xoáy trên Biển Đông.

Từ khóa: XTNĐ, sự hình thành XTNĐ, đồng hóa số liệu, LETKF, phương pháp Lagrange.

1. Mở đầu

XTNĐ là một hệ thống khí áp thấp hình thành và phát triển trên vùng biển nhiệt đới/cận nhiệt đới đi kèm với hoạt động đối lưu có tổ chức. Quá trình hình thành của XTNĐ từ những nhiễu động ban đầu không có tổ chức tới cường độ áp thấp nhiệt đới (*sự hình thành*), và phát triển thành bão nhiệt đới (*sự phát triển*) thường rất khó nhận định do thiếu hụt hệ thống quan trắc đáng tin cậy ngoài đại dương. Dự báo sự hình thành và phát triển của XTNĐ là một bài toán quan trọng trong nghiên cứu khí tượng và hải dương học. Vấn đề khoa học này đề cập đến quá trình hình thành và phát triển của các XTNĐ trên những tương tác đa quy mô, từ xáo trộn rối cho tới hoạt động đối lưu quy mô vừa và các tương

tác với môi trường quy mô synop, từ đó đóng vai trò quan trọng trong việc dự báo và đánh giá rủi ro từ những cơn bão này.

Khu vực nghiên cứu – Biển Đông - thuộc một phần của vùng biển Tây Bắc Thái Bình Dương, là vùng biển nửa kín và là nơi thuận lợi cho sự hình thành và phát triển của XTNĐ. Những nghiên cứu về sự hình thành XTNĐ tập trung trên khu vực trên Biển Đông bắt đầu được phát triển gần đây đã bắt đầu chú ý tới những khác biệt về điều kiện khí hậu và hình thái quy mô lớn so với vùng biển mở Tây Bắc Thái Bình Dương. Tuy nhiên, những XTNĐ hình thành và phát triển trên Biển Đông có những khác biệt rất lớn về mặt cấu trúc so với những cơn bão trên vùng biển mở Tây Bắc Thái Bình Dương [1, 2],

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: hoadao@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4961>

do cấu trúc địa hình khu vực. Mặc dù là một phần của Tây Bắc Thái Bình Dương, Biển Đông có cấu trúc địa hình đáy khác biệt rất lớn so với vùng biển mở, do đó đặc trưng tương tác biển - khí quyển cũng rất khác. Do đó, những XTNĐ hình thành trên Biển Đông có số lượng rất ít, trung bình chỉ khoảng 1,5 (0,5) số xoáy dạng XTNĐ bắt nguồn từ Biển Đông vào mùa hè (mùa đông), so với con số trung bình khoảng 5,3 (3) bắt nguồn từ Tây Bắc Thái Bình Dương ảnh hưởng tới Biển Đông [3]. Là một khu vực đặc biệt với hoạt động XTNĐ phức tạp, dự báo sự hình thành XTNĐ trên Biển Đông gặp nhiều khó khăn. Tuy nhiên, những nghiên cứu tập trung vào quá trình cải thiện dự báo sự hình thành và phát triển của XTNĐ trên Biển Đông với quy mô dự báo thời tiết vẫn còn rất ít. Với một số trường hợp điển hình, Park và cộng sự (cs) [4, 5] sử dụng mô hình số trị WRF đã tìm ra tầm quan trọng của dự báo các hệ thống thời tiết quy mô vừa dao động ngày đêm gắn liền với địa hình khu vực Biển Đông đối với quá trình hình thành xoáy. Với cách tiếp cận tương tự, Chen và cs [6] tìm ra mối tương quan giữa hoạt động gió mùa mùa hè với việc hình thành XTNĐ sinh đôi trên Biển Đông và Biển Philippines trên hạn dự báo 5 ngày. Các tác giả đã nhận định rằng hoạt động dự báo sự hình thành và phát triển của XTNĐ trên Biển Đông có thể thực hiện với hạn từ 3 ngày tới gần hơn. Với bộ số liệu toàn cầu GFS, nhóm tác giả Trần Tân Tiến và cs [7] đã xây dựng các phương trình dự báo sự hình thành của áp thấp nhiệt đới sau 24 giờ và 48 giờ với sự cải thiện độ chính xác đáng kể. Bộ phương trình phân lớp được xây dựng trên tập số liệu gồm 30 trường hợp XTNĐ hình thành trên Biển Đông từ 2011 – 2017 và có thể phục vụ công tác nghiệp vụ. Trong một nghiên cứu khác, các tác giả Trần Tân Tiến và cs [8] sử dụng mô hình phi thủy tĩnh WRF-NMM nghiên cứu sự hình thành của 10 XTNĐ trên Biển Đông với hạn dự báo 2010 – 2016, kết quả cho thấy thời gian hình thành được dự báo sớm hơn 6 đến 12 giờ so với thực tế, sai số vị trí tới 100 – 300 km.

Như vậy, tất cả những kết quả thu được cho thấy tầm quan trọng của mô hình số trị trong việc xác định những biến động trên quy mô thời gian

và không gian đối với sự hình thành XTNĐ trên Biển Đông. Việc thiết lập một mô hình dự báo tổ hợp kết hợp những ưu điểm của mô hình số trị sẽ giúp cải thiện được kết quả dự báo sự hình thành của XTNĐ. Hệ thống dự báo tổ hợp WRF-LETKF đã thành công trong mô tả hoàn lưu quy mô lớn hỗ trợ cho sự hình thành một vài trường hợp điển hình XTNĐ trên Biển Đông [9, 10]. Kế thừa những thành quả nghiên cứu trước đó, bài báo ứng dụng hệ thống dự báo tổ hợp WRF-LETKF dự báo sự hình thành XTNĐ Sonca (2017). Đây là một xoáy thuận hình thành trên Biển Đông dưới điều kiện môi trường khí quyển nhiễu động với những tương tác khác nhau, thách thức khả năng dự báo của mô hình số trị toàn cầu.

Đối với dự báo tổ hợp, phương pháp đánh giá dự báo có những tính chất đặc thù. Phương pháp đánh giá dự báo XTNĐ thông thường so sánh trên một thời gian cố định không đủ điều kiện để làm nổi bật ưu điểm của phương pháp dự báo tổ hợp – đánh giá tính bất định. Thay vì vậy, phương pháp đánh giá trong bài báo phân tích kết quả dự báo trên một khoảng thời gian, thay vì chỉ tại một điểm thời gian dự báo tức thời. Phương pháp tiếp cận Lagrange có tác dụng làm nổi bật tín hiệu, tại đó những đặc điểm đặc trưng nhất có thể được đánh dấu khi xem xét tới một khoảng thời gian đủ dài, loại bỏ tính tức thời của phương pháp thông thường. Mục tiêu của nghiên cứu này là tập trung vào những đặc trưng nhiệt động lực tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành của XTNĐ, và xem xét khả năng mô hình dự báo tổ hợp có thể mô tả chính xác sự hình thành XTNĐ nếu đặc trưng đó tồn tại trong trường dự báo hay không, mặc dù có thể thời gian xuất hiện của đặc trưng đó không đồng nhất với trường quan trắc. Điều này đặc biệt hữu ích đối với việc xử lý thông tin từ những dự báo sớm, tại đó chỉ có một vài thành phần tổ hợp có thể dự báo sự tồn tại của XTNĐ và thậm chí còn ít hơn nữa số lượng thành phần có thể dự báo đúng vị trí và đúng thời điểm một cách hoàn hảo. Phương pháp này sẽ được thảo luận trong mục 2.2 của bài báo.

2. Thiết kế mô hình và phương pháp đánh giá

2.1. Thiết kế hệ thống đồng hóa tổ hợp

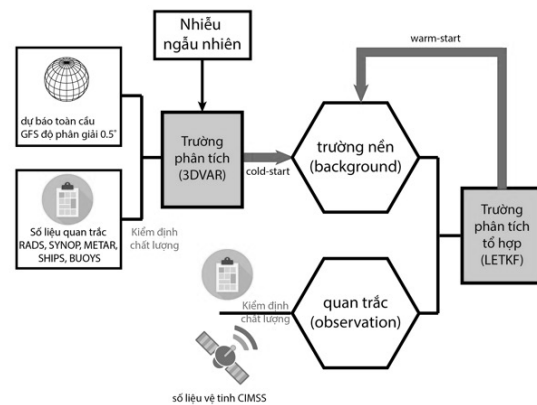
2.1.1. Mô tả hệ thống đồng hóa tổ hợp

Để xem xét khả năng dự báo sự hình thành XTNĐ trên Biển Đông, phiên bản phi thủy tĩnh 3.9.1 của mô hình WRF (WRF-ARW) [11] được áp dụng với phương pháp đồng hóa lọc Kalman tổ hợp địa phương LETKF (WRF-LETKF) có kết hợp phương pháp đồng hóa biến phân 3DVAR (WRF-VAR). Quy trình của phương pháp đồng hóa kết hợp này được thực hiện trong Hình 1. Tất cả số liệu quan trắc được thực hiện bước kiểm soát chất lượng (quality control) bởi thành phần đồng hóa số liệu WRFDA trước khi đưa vào thuật toán đồng hóa. WRFDA còn thực hiện khai triển điều kiện biên cho mỗi thành phần tổ hợp tại mỗi bước cập nhật số liệu phân tích.

Do giới hạn về hệ thống máy tính và lưu trữ, tất cả các thí nghiệm dự báo tổ hợp được thực hiện trong nghiên cứu có một số hữu hạn thành phần tổ hợp là 21, tương ứng với số lượng tổ hợp đa vật lý gồm các sơ đồ tham số vật lý khác nhau trong mô hình WRF. Theo Kieu và cs [12], cách thiết kế các thành phần tổ hợp này tối ưu hóa độ tán tổ hợp mà không nhất thiết phải sử dụng số lượng thành phần tổ hợp lớn hơn. Mặc dù 21 thành phần tổ hợp có thể khá nhỏ, nhưng phù hợp với mục tiêu của là đánh giá khả năng thể hiện của các thành phần tổ hợp kết hợp với số liệu quan trắc. Sự khác biệt tương đối giữa những thành phần tổ hợp vẫn có thể đưa ra những hiệu quả tốt nhờ đồng hóa số liệu.

Để ban đầu hóa, một trường nền dự báo tổ hợp cold-start được thực hiện, với cải tiến là sử dụng sơ đồ đồng hóa biến phân 3DVAR để tạo ra trường phân tích từ số liệu ban đầu trường dự báo toàn cầu GFS. Các nhiễu ngẫu nhiên với độ lệch chuẩn là 1 m/s đối với trường gió, 1 K với trường nhiệt độ, và 1×10^{-3} kg/kg đối với trường độ ẩm riêng tại tất cả các điểm lưới mô hình được thêm vào trường phân tích từ 3DVAR để xác định tổ hợp từ bước cold-start. Tổ hợp cold-start được tích phân tới 12 giờ và đầu ra từ bước tích phân 12 giờ sử dụng thành trường nền cho bước warm-start của sơ đồ đồng hóa tổ hợp LETKF

tiếp theo. Những nhiễu ngẫu nhiên này chỉ được thêm vào tại chu trình cold-start để ban đầu hóa một tổ hợp trường nền. Tất cả các chu trình tiếp theo sử dụng số liệu mô hình WRF-LETKF dự báo 12 giờ để làm trường nền tổ hợp, nên không cần nhiễu ngẫu nhiên. Trường nhiễu phân tích tổ hợp mới tạo ra tại mỗi chu trình 12 giờ được thêm vào trường phân tích số liệu toàn cầu GFS để tạo ra điều kiện ban đầu cho quy trình tổ hợp tiếp theo như được mô tả bởi Du và cs [13].



Hình 1. Hệ thống đồng hóa tổ hợp.

2.1.2. Thiết kế mô hình và miền tính

Để nghiên cứu sự hình thành XTNĐ trên khu vực Biển Đông, thiết lập mô hình WRF được chú ý sao cho miền tính đủ rộng để bao phủ toàn bộ Biển Đông và lân cận vùng biển phía ngoài Tây Bắc Thái Bình Dương có tọa độ [95°Đ – 145°Đ, 0°B – 30°B]. Với một miền tính như vậy, các hoàn lưu xung quanh Biển Đông như tương tác đất liền – đại dương và tương tác vùng biển mở Tây Thái Bình Dương – Biển Đông được bảo toàn và có thể đánh giá sự hình thành XTNĐ thông qua những tương tác đó. Miền tính có độ phân giải 27 km và 31 mực độ cao. Độ phân giải 27 km đối với phương pháp dự báo tổ hợp vừa thỏa mãn khả năng đáp ứng tính toán cho hệ thống dự báo tổ hợp và vừa giữ lại những đặc trưng của XTNĐ với những hệ thống quy mô meso- α và quy mô meso- β trong phương pháp đánh giá dự báo.

Đối với các quá trình vật lý trong mô hình, một tổ hợp các sơ đồ tham số được lựa chọn để

tạo ra các thử nghiệm đồng hóa tổ hợp WRF, xây dựng một tổ hợp đa vật lý theo nghiên cứu của Kieu và cs [14]. Không giống như các hệ thống dự báo tổ hợp xây dựng với một bộ sơ đồ vật lý cố định [15, 16], các nghiên cứu trước đó đã đưa ra nhận định rằng việc xây dựng các dự báo tổ hợp đa sơ đồ vật lý mô hình có thể giúp tăng cường đáng kể độ tán tổ hợp với kỹ năng dự báo liên quan. Trong nghiên cứu này, một bộ các sơ đồ vật lý được sử dụng cho các nghiên cứu dự báo tổ hợp là: i) Hai sơ đồ tham số mây đối lưu bao gồm BMJ và KF; ii) Ba sơ đồ tham số lớp biên khí quyển bao gồm YSU, Mellor-Yamada-Janjic, và sơ đồ MRF, iii) Ba sơ đồ vi vật lý bao gồm WSM 3, Kessler, và Lin và cs, cùng với; và iv) Hai sơ đồ bức xạ bao gồm Dudhia và Goddard cho cả sóng ngắn và sóng dài.

2.2. Phương pháp xác định tâm xoáy

Việc xác định tâm nhiễu động nhiệt đới và XTNĐ sử dụng phương pháp hình học tính tới đặc trưng cấu trúc Lagrange của XTNĐ, vừa để đảm bảo tính tối ưu, vừa hạn chế tính tức thời (theo thời gian và hệ quy chiếu) của trường vận tốc.

Thuật toán xác định tâm xoáy được xây dựng dựa trên nền tảng nghiên cứu của Rutherford và cs [17-19]. Thay vì xác định một điểm cực đại độ xoáy hoặc thông thường, tâm xoáy trong nghiên cứu thực tế là một vùng được đặc trưng bởi tính chất độ xoáy nhất quán. Nghiên cứu sử dụng trường độ xoáy Lagrange để đánh giá toàn diện hơn theo không gian ba chiều và theo thời gian. Hình 2 biểu diễn trực quan sơ đồ dò tâm xoáy và phân diễn giải chi tiết được giới thiệu sau đây.

Giả sử $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ là trường vận tốc hai chiều, \mathbf{x} là tọa độ vị trí và thời gian t . Quỹ đạo của phần tử chất lỏng là nghiệm của phương trình vi phân:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

Phương pháp Lagrange được thực hiện bằng tích phân phương trình (1) theo thời gian để xác định quãng đường di chuyển của phần tử. XTNĐ được hình thành là tổng hợp của nhiều hệ thống thời tiết quy mô khác nhau, do đó nếu tồn tại các cấu trúc đối lưu cung cấp nhân xoáy bên trong

xoáy quy mô lớn có thể gây nhiễu cho việc tìm kiếm vùng có độ xoáy lớn và ổn định – xoáy chính của XTNĐ. Những nhân xoáy này sẽ đóng góp vào quá trình hợp xoáy để tăng cường hoàn lưu của xoáy chính. Do vậy, để đánh giá tính ổn định Lagrange của hệ thống xoáy XTNĐ, tích phân thời gian được thực hiện trong khoảng 24 giờ, kéo dài từ $t - 12$ giờ tới $t + 12$ giờ. Bằng cách này, những cấu trúc tan rã trong khoảng dưới 24 giờ không thể phân giải được. Đầu ra của các thành phần tổ hợp sử dụng sơ đồ dò xoáy được thực hiện mỗi 60 phút một lần, để đảm bảo tính ổn định, bước thời gian trong sơ đồ Runge-Kutta bậc 4 là 5 phút. Kết quả của phương pháp tính được thực hiện 6 giờ một lần, tương ứng với các phiên dự báo chính.

Xoáy chính được xác định thông qua tích phân độ xoáy dọc theo quỹ đạo của phần tử khí, trường độ xoáy này được gọi là độ xoáy Lagrange:

$$\zeta_{Lag} = \int_I \zeta(\mathbf{x}(t), t) dt \quad (2)$$

Khu vực tiềm năng cho tâm xoáy của XTNĐ chính là những vùng có đường đẳng trị khép kín của giá trị độ xoáy Lagrange. Khu vực này chính là nơi tập trung độ xoáy lớn, là một môi trường rất tốt để hình thành XTNĐ và đánh giá XTNĐ. Đây là một phương pháp xác định độ xoáy nhất quán, không phụ thuộc vào hệ quy chiếu và thời gian [19].

Tuy nhiên, một vùng giàu độ xoáy không có nghĩa nơi đó chắc chắn hình thành xoáy có tổ chức nếu độ biến dạng/độ đứt môi trường lớn hơn giá trị độ xoáy. Hơn nữa, XTNĐ khi tới một giai đoạn phát triển nhất định có thể trở thành một vật chất xoáy (solid-body rotation) tách biệt với môi trường thông qua một “lớp vỏ độ đứt” (shear-sheath) bao bọc quanh xoáy chính. Theo các nghiên cứu về XTNĐ gần đây [18-21], lớp vỏ độ đứt cô lập tâm xoáy chính bên trong, ngăn cản dòng đi vào và đi ra từ môi trường gây phân tán động năng. Lớp vỏ độ đứt bao bọc quanh tâm xoáy càng kín, khả năng cô lập với môi trường càng tốt, và bên trong tâm xoáy XTNĐ có thể tích lũy động năng từ hoạt động đối lưu và ẩn nhiệt giải phóng càng tốt hơn. Nghiên cứu của Tory [22] cho phép xác định lớp vỏ độ đứt này

thông qua tham số Okubo-Weiss [23, 24]. Tham số Okubo-Weiss (OW) có thể tức thời đánh giá tính elliptic của dòng chảy – đánh giá rất quan trọng xác định chuyển động xoáy độ cong khép kín. Nghiên cứu sử dụng phương pháp tính toán tham số OW tích lũy trên quỹ đạo phần tử (OW_{Lag}) theo đề xuất của Rutherford và cs [17]. Như vậy, chỉ những đường đẳng trị dương đóng kín của ζ_{Lag} thỏa mãn điều kiện $OW_{Lag} > 0$ được quan tâm.

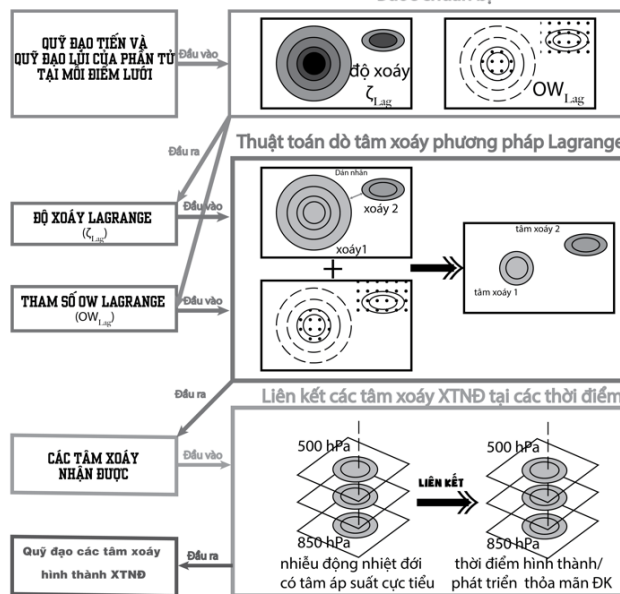
Mặc dù với phương pháp trên, chúng ta hoàn toàn có thể xác định được cường độ độ xoáy và kích thước xoáy của XTND tại tất cả các mực độ cao. Tuy nhiên, giá trị này chưa đủ để phân loại cường độ của XTND theo bảng phân loại quốc

tế. Để xác định một điểm đại diện tâm xoáy, nghiên cứu chỉ sử dụng một phương pháp xác định đơn giản, trong lân cận vùng tâm xoáy, và dựa trên những điều kiện cơ bản nhất về cấu trúc của cơn bão như áp suất mực biển cực tiểu và tốc độ gió cực đại gần tâm:

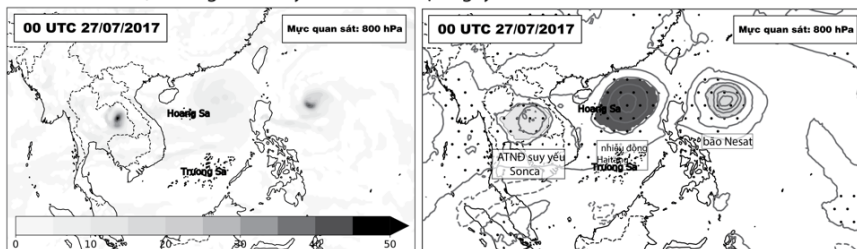
- Áp suất mực biển cực tiểu (P_{min}) xác định trong vùng tâm xoáy tổng hợp mực thấp (mực 850-500 hPa). Mỗi điểm có giá trị $P_{min} < 1004$ hPa được đánh dấu là đại diện cho một vùng xoáy thuận tiềm năng.

- Thuật toán dò tìm giá trị tốc độ gió 10-m (V_{max}) ở xung quanh điểm đại diện với bán kính 4° được coi là XTND hình thành khi thỏa mãn điều kiện $V_{max} \geq 10,8$ m/s (cường độ Áp thấp nhiệt đới).

a) Quy trình dò xoáy XTND trong giai đoạn hình thành và phát triển
Bước chuẩn bị

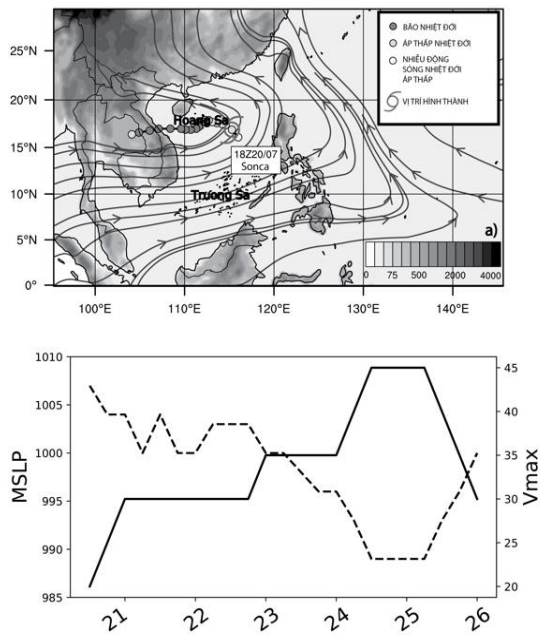


b) Những tâm xoáy XTND thu được ngày 00 UTC 27/07/2017



Hình 2. a) Mô tả trực quan thuật toán dò tâm xoáy gồm 3 bước được sử dụng trong bài báo; b) Ví dụ một trường hợp dò xoáy điển hình trong cùng thời điểm, trong đó hình bên trái thể hiện giá trị độ xoáy tương đối tức thời, và hình bên phải thể hiện 3 tâm xoáy thu được từ thuật toán dò xoáy Lagrange. 3 tâm xoáy được đánh dấu bởi các màu khác nhau.

2.3. Tổng quan về Sonca



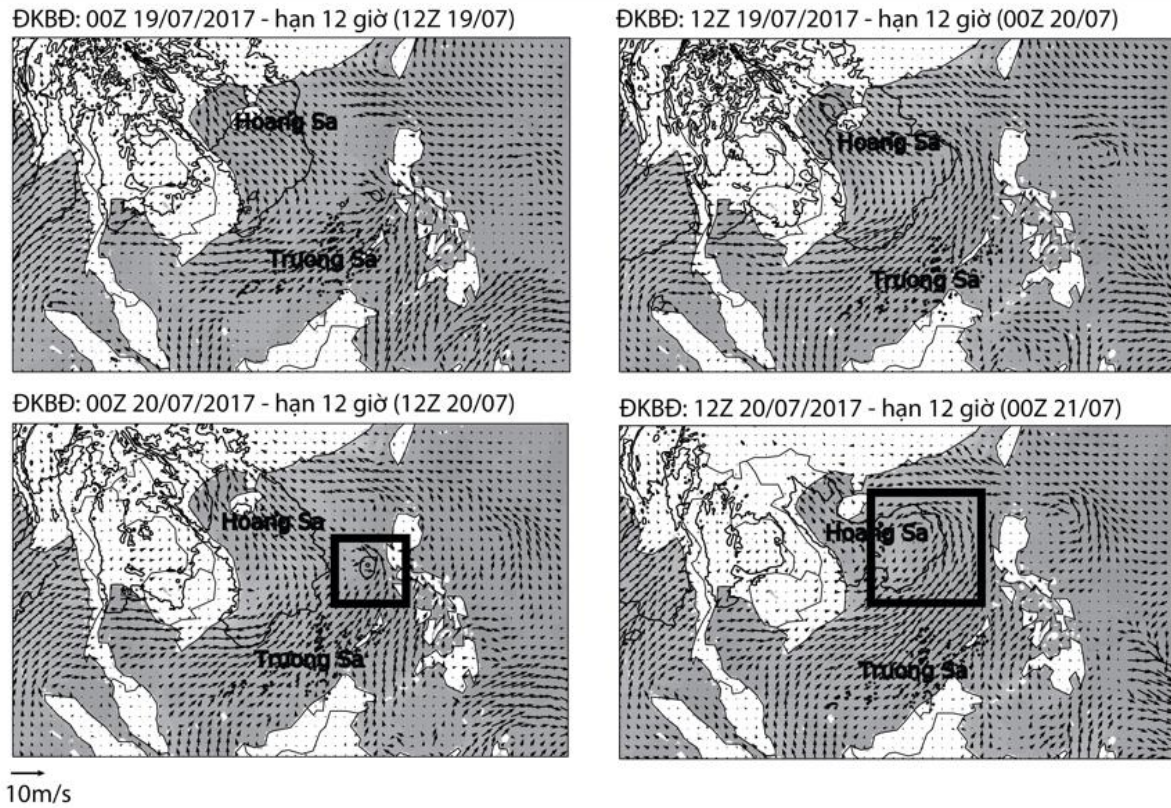
Hình 3. (a) Quỹ đạo thực của Sonca; đường dòng mực 850 hPa trung bình trong thời gian từ ngày 15 tháng 7 tới 31 tháng 7 năm 2017; (b) Biểu đồ cường độ của Sonca (áp suất mực biển cực tiêu – MSLP (đường nét liền) và tốc độ gió cực đại (đường nét đứt) (JTWC best track).

Trong tổng số 34 XTNĐ hình thành và phát triển ở khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương trong năm 2017, Sonca được đánh dấu là cơn bão thứ 10. Môi trường quy mô lớn với sự ảnh hưởng của rãnh gió mùa hoạt động mở rộng sang phía tây là điều kiện thuận lợi điển hình cho sự hình thành phát triển của các cơn bão trên Biển Đông nói riêng và Tây Bắc Thái Bình Dương nói chung [25]. Sonca là một trong số 5 XTNĐ liên tiếp hình thành ở Biển Đông và khu vực lân cận Biển Philippines trong giai đoạn nửa cuối tháng 7 năm 2017 – một giai đoạn hoạt động của rãnh gió mùa với sự tồn tại của nhiều nhiễu động đi thường có hoàn lưu xoáy thuận, chuyển động thẳng, do đó đóng vai trò là một môi trường rất thuận lợi để hình thành bão. Từ trường nền trung bình trong giai đoạn này có thể thấy rãnh gió mùa mở rộng sang phía tây nam (Hình 3a). Sự khơi sâu của rãnh gió mùa có tác động làm tăng cường tiến

trình xâm nhập sang phía đông của dòng gió tây lên tới kinh tuyến 140°E, vượt qua khu vực Biển Philippines. Khu vực với độ đứt xoáy thuận phát triển trên diện rộng, từ miền Trung Việt Nam cho tới ngoài khơi Tây Bắc Thái Bình Dương, đây là một môi trường rất thuận lợi cho sự hình thành XTNĐ trên lân cận hai phía đông-tây Philippines.

Sonca chính thức hình thành và đạt cường độ áp thấp nhiệt đới vào 18 UTC ngày 20/07/2017 theo phát báo của JTWC. Tuy nhiên, vào giai đoạn này áp thấp nhiệt đới vẫn rất yếu và không có dấu hiệu rõ ràng trên bản đồ bề mặt, cho tới 00 UTC ngày 21/07/2017. Hoàn lưu của XTNĐ trong giai đoạn hình thành của Sonca chịu ảnh hưởng của bão Talas hình thành trước đó 5 ngày và đang đổ bộ trên đất liền. Cũng trong giai đoạn hình thành của Sonca trên Biển Đông, bờ phía đông Philippines hình thành một XTNĐ khác từ nhiễu động gió đông, là Roke. Lục địa Philippines trở thành địa hình ngăn cản hai nhiễu động kết hợp lại với nhau, tạo điều kiện cho Sonca có thể độc lập phát triển thuận lợi trên Biển Đông với nguồn cung cấp năng lượng cho hoàn lưu quy mô lớn từ dòng gió tây – tây nam với lượng ẩm lớn. So sánh các hạn dự báo 12 giờ trong một số phiên dự báo gần thời điểm hình thành (Hình 4) từ mô hình toàn cầu với độ phân giải cao ($0,08^\circ \times 0,08^\circ$), có thể nhận thấy rằng, mô hình toàn cầu gần như không nắm bắt được hoàn lưu của Sonca cho tới 18 giờ trước thời điểm hình thành. Đây là một trường hợp dự báo khó, thách thức khả năng dự báo của cả mô hình số trị.

Mục tiêu trong việc nghiên cứu Sonca bằng phương pháp tổ hợp WRF-LETKF là phân tích sự hình thành của một XTNĐ từ một nhiễu động khởi đầu không rõ ràng, bị chi phối bởi nhiều yếu tố động lực với môi trường phức tạp và từ đó xác định những đặc trưng giới hạn của quá trình dự báo bằng phương pháp số thông qua: i) Sự hình thành của nhiễu động ban đầu; và ii) Sự phát triển cấu trúc của nhiễu động từ các thành phần tổ hợp. Các chu trình dự báo được thực hiện liên tiếp từ 12Z ngày 15/07 (5 ngày trước hình thành) tới 12Z ngày 23/07 (3 ngày sau hình thành) với hạn dự báo 120 giờ.



Hình 4. Trường dự báo toàn cầu ECMWF IFS tại các hạn dự báo 12 giờ kể từ thời điểm ban đầu 00Z ngày 19/07/2017 (42 giờ trước thời điểm hình thành) đến 12Z ngày 20/07/2017 (6 giờ trước thời điểm hình thành). Các đường đẳng trị màu đen thể hiện trường áp suất mực biển và vectơ gió mực 10 m. Vùng ô vuông màu đen thể hiện vị trí được nhận định là XTNĐ Sonca.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá khả năng dự báo sự xuất hiện

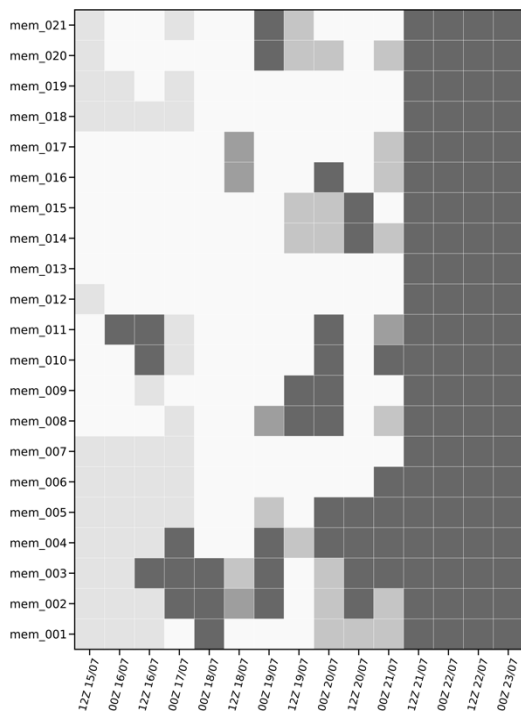
Trong một giai đoạn nhiễu động gió mùa hoạt động như tại thời điểm hình thành Sonca, một loạt những điều kiện động lực khá nhau có thể tạo ra những kịch bản khác nhau.

Trạng thái dự báo sự xuất hiện của XTNĐ Sonca được phân loại thành năm dạng chủ yếu: không hình thành; xoáy yếu, không ổn định, dễ dàng sát nhập với xoáy khác; XTNĐ hình thành ngoài Biển Đông và XTNĐ hình thành trong Biển Đông (dự báo đúng). Bảng trạng thái dự báo sự xuất hiện của Sonca được thể hiện trong Hình 5. Tiêu chí phân loại XTNĐ được liệt kê như sau:

- Không hình thành: không có dấu hiệu hình thành xoáy.
- Có dấu hiệu hình thành nhưng quá muộn: XTNĐ thỏa mãn điều kiện có một tâm xoáy thuận thu được từ thuật toán dò xoáy Lagrange, có $P_{min} < 1004$ hPa nhưng $V_{max} < 10,8$ m/s trong suốt thời gian tồn tại, có dấu hiệu khơi sâu nhưng không hình thành trong hạn 120 giờ dự báo.
- Xoáy yếu, hợp nhất xoáy khác: XTNĐ có tâm xoáy thuận thu được từ thuật toán dò tâm xoáy Lagrange, $P_{min} < 1004$ hPa nhưng $V_{max} < 10,8$ m/s. Xoáy yếu bị hợp xoáy với một XTNĐ có tồn tại ngoài Biển Đông.
- Hình thành ngoài Biển Đông: XTNĐ có tâm xoáy Lagrange, $P_{min} < 1004$ hPa và $V_{max} > 10,8$ m/s ở ngoài Biển Đông.

- Hình thành: XTNĐ hình thành trong khu vực Biển Đông, có tâm xoáy Lagrange, Pmin < 1004 hPa và Vmax > 10,8 m/s trong thời gian dự báo.

Nhìn chung, với các thử nghiệm dự báo từ 12 UTC ngày 15 tháng 7 (126 giờ trước thời gian hình thành thực tế) tới 00 UTC ngày 21 tháng 7 (6 giờ sau thời gian hình thành thực tế), dự báo tổ hợp cho thấy khả năng hình thành xoáy trên Biển Đông không cao, trung bình chỉ có khoảng 13,89% xác suất xuất hiện XTNĐ trên Biển Đông trong tất cả các hạn dự báo trên. Trong hạn dự báo từ -126 giờ (12Z 15/07) tới -78 giờ (12Z 17/07) so với thời điểm hình thành thực tế, đa phần các xoáy được hình thành nhưng có xu hướng hình thành ngoài Biển Đông. Số lượng thành phần tổ hợp mô tả đúng sự hình thành bên trong Biển Đông rất ít, không đáng kể, tuy nhiên đã tăng về số lượng hơn trong giai đoạn tiếp theo, từ 00Z 18/07 tới 00Z 21/07.



Hình 5. Bảng trạng thái sự hình thành XTNĐ Sonca của các thành phần tổ hợp tại mỗi hạn dự báo.

Trong giai đoạn hai, một số trường động lực có thể mô tả tốt hơn tại các thành phần dự báo tổ

hợp nhờ sự cập nhật thông tin quan trắc đối với trường dự báo. Tuy nhiên, số lượng thành phần tổ hợp không dự báo được trong ba hạn dự báo liền kề (00Z 18/07 tới 00Z 19/07) tăng hơn so với giai đoạn trước đó (xác suất trung bình 73,8%). Tuy rằng số lượng thành phần tổ hợp dự báo đúng sự hình thành XTNĐ trên Biển Đông không cải thiện đáng kể so với giai đoạn trước, nhưng một số thành phần tổ hợp có khả năng dự báo đúng sự xuất hiện những nhiễu động có khả năng phát triển thành XTNĐ, mặc dù cường độ xoáy không lớn hoặc dự báo quá trễ không phù hợp với thời gian hình thành thực tế của Sonca. Tới giai đoạn từ hạn dự báo +18 giờ tới +54 giờ sau khi hình thành xoáy, do trường động lực của mô hình đã nắm bắt tốt cường độ của xoáy trên Biển Đông, tất cả xoáy đều hình thành và phát triển tới cường độ bão nhiệt đới.

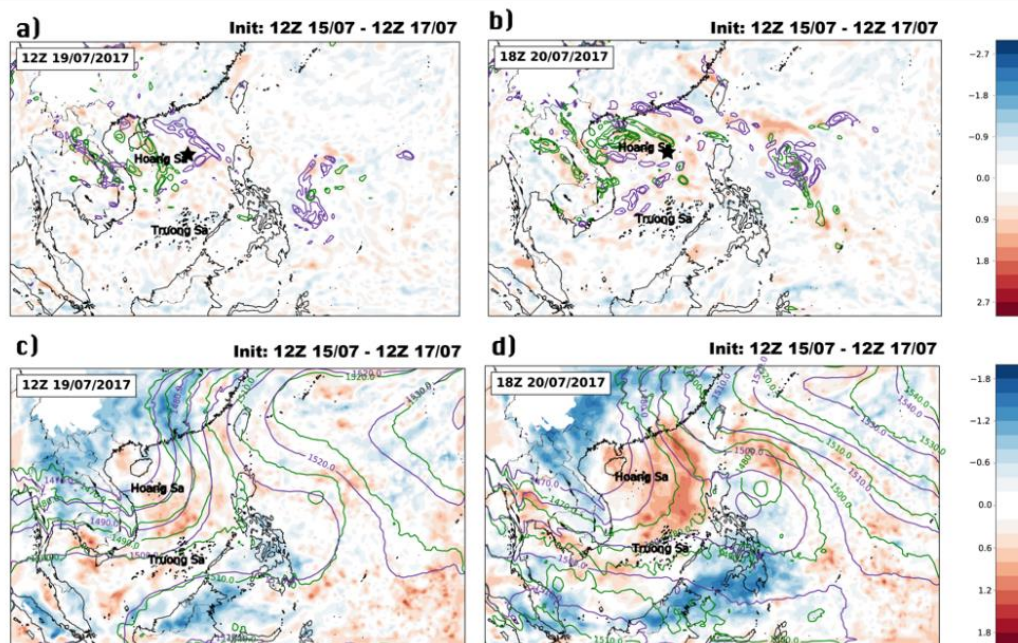
3.2. Đánh giá dự báo cấu trúc động lực mực thấp

Hình 6 miêu tả trường độ lệch chuẩn hóa của xoáy thế PV trung bình mực 850 hPa từ các dự báo 12Z ngày 15/07 tới 12Z ngày 17/07 giữa hai nhóm hình thành và nhóm không hình thành trung bình tổ hợp tại 2 thời điểm: 12Z 15/07 và 18Z 20/07 (thời điểm hình thành thực tế). Nhìn chung, trường địa thế vị thể hiện tính tương đồng khá tốt giữa hai nhóm với sự hiện diện của rãnh gió mùa. Tuy có hình thế quy mô lớn tương đồng nhưng cường độ và quy mô trong hai nhóm cũng có sự khác biệt. Trong trường hợp *hình thành*, rãnh gió mùa có xu hướng mở rộng sang phía tây bắc so với nhóm *không hình thành*. Ngày 19/07, trên Biển Đông, cả hai nhóm *hình thành* và *không hình thành* đều dự báo được sự xuất hiện của những khu vực nhiễu động có xoáy thế dương. Tuy nhiên, vùng xoáy thế trung bình trong nhóm *hình thành* có xu hướng xuất hiện gần bờ biển Việt Nam, trong khi khu vực nhiễu động xoáy thuận gắn với nhóm *không hình thành* lại phát triển lệch về phía đông. Điều đáng chú ý là những khu vực cực đại địa phương nhiễu động xoáy thế trên Biển Đông trong cả hai nhóm đều không có tổ chức, mà có xu hướng bị kéo dẫn. Sự kéo dẫn này phù hợp với thực tế đây là một môi trường gió mùa hoạt động ổn định, những khu vực xoáy thế tương ứng với vùng độ đứt gió

ngang lớn. Đặc biệt, vùng nhiều động xoáy trong nhóm *không hình thành* nằm ngay tại khu vực thịnh hành gió đông nam tương ứng với rìa phía bắc của rãnh gió mùa (Hình 3), còn vùng nhiều động trong nhóm *hình thành* khá tập trung tại vị trí rãnh gió mùa. Điều này cho thấy khả năng hình thành tốt hơn của XTNĐ trong nhóm *hình thành* do được nuôi dưỡng trong môi trường hội tụ xoáy tốt hơn là những xoáy bị phân tán trong môi trường biến dạng độ đứt của nhóm *không hình thành*.

Vào 18Z 20/07, một khu vực dị thường xoáy thể dương đáng kể bao phủ toàn bộ Bắc Biển Đông đối với nhóm *hình thành*. Trong khi đó, những khu vực xoáy thể dương tương ứng với nhóm *không hình thành* tập trung ngoài Biển Philippines, nơi một vùng xoáy trung bình hình thành với những điều kiện thuận lợi. Cấu trúc của vùng xoáy này mô phỏng hình dạng hội tụ xoáy của một XTNĐ điển hình. Tương ứng tại nhóm *hình thành*, vùng xoáy thể dương có xu hướng

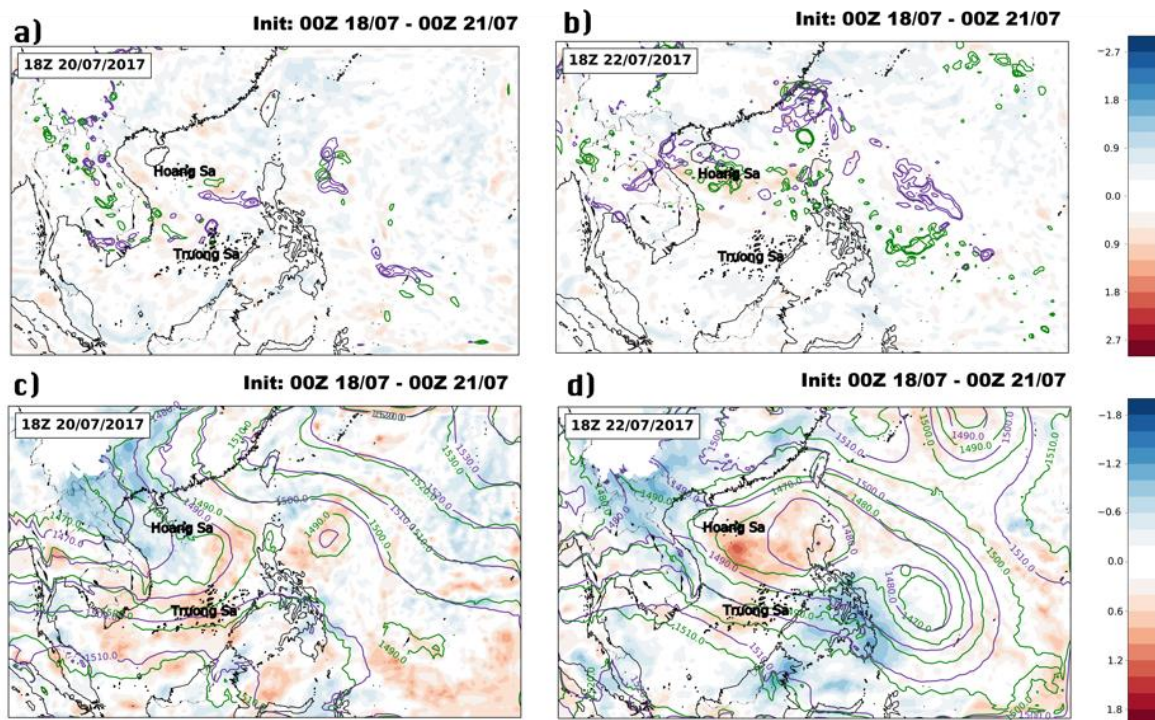
kéo dài, không có cấu trúc của XTNĐ, trải qua quá trình sợi hóa ống xoáy (vortex filamentation) trong điều kiện bất thuận lợi hình thành xoáy thuận – như đã được mô phỏng lý tưởng hóa bởi Griffits và Hopfinger [26]. Ngược lại, trong Biển Đông thời điểm này, những vùng cực đại xoáy thể dương tương ứng với nhóm *hình thành* hội tụ tại phần phía bắc Biển Đông, còn trong nhóm *không hình thành* những vùng cực đại xoáy thể trung bình nằm rải rác, không có xu hướng cho thấy sự kết hợp. Trường nhiệt độ thể vị tương đương θ_e , đại diện cho năng lượng ẩn nhiệt, cũng cho thấy sự tăng cường đáng kể trên Biển Đông kể từ 30 giờ trước đó, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hình thành và phát triển xoáy thuận. Điểm đáng chú ý là kể cả nhóm *không hình thành* và nhóm *hình thành* đều cho thấy những vùng dị thường xoáy thể dương không phát triển lân cận xung quanh vị trí hình thành trong thực tế (dấu sao).



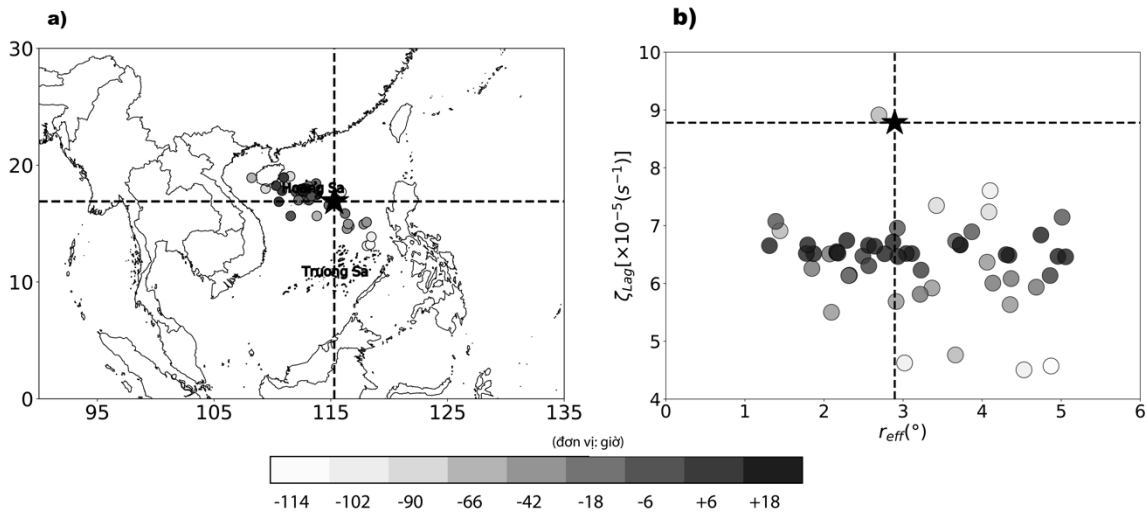
Hình 6. Độ lệch chuẩn hóa (shaded, đơn vị: không thứ nguyên) giữa nhóm *hình thành* và *không hình thành* trong dự báo tổ hợp các hạn dự báo 12Z 15/07 đến 12Z 17/07 tại (a-c) 12Z 19/07 và (b-d) 18Z 20/07. Hình a-b là độ lệch chuẩn hóa xoáy thể, c-d là độ lệch chuẩn hóa nhiệt độ thể vị tương đương. Các đường đẳng trị xoáy thể trung bình (0,8,1,2 và 2PVU) màu xanh tương ứng với nhóm *hình thành* (a) và nhóm *không hình thành* (b). Tương ứng đường đẳng trị độ cao địa thế vị trung bình (mđtv) của nhóm hình thành (màu xanh lá) và không hình thành (màu tím). Vị trí hình thành được đánh dấu sao.

Điều tương tự cũng được thực hiện cho các dự báo từ 00Z 18/07 tới 00Z 21/07 cho các nhóm *hình thành* và *không hình thành*. Thời điểm khảo sát là vào 12Z 19/07 và 18Z 22/07 (Hình 7). Nhìn chung, những XTNĐ tương đương với Sonca hình thành trong các thành phần tổ hợp muộn hơn so với thực tế. Bằng chứng là vào 18Z 20/07 – ngày hình thành thực – trường xoáy thế trung bình giữa hai nhóm *hình thành* và *không hình thành* không khác nhau quá rõ rệt. Những vùng dị thường xoáy thế nằm rải rác trên Biển Đông và Biển Philippines với cấu trúc các vùng này có dạng xoáy kéo căng, không có cấu trúc điển hình của hệ thống thời tiết liên quan tới XTNĐ. Trường địa thế vị giữa hai nhóm cũng không có sự khác biệt quá nhiều, khu vực rìa phía đông của Biển Đông có nhiệt độ thế tương đương θ_e lớn hơn cả ở nhóm *hình thành*. Với điều kiện như vậy, XTNĐ trong nhóm *hình thành* có xu hướng phát triển ở mạn phía đông của Biển Đông – nơi có lượng ẩm dồi dào.

Tới thời điểm 18Z 22/07, khi hầu hết các trường hợp có XTNĐ hình thành đều đã có hoàn lưu rõ ràng trên Biển Đông, sự khác biệt giữa hai nhóm trở nên đáng kể. So với giai đoạn trước, trên trường địa thế vị ở hai nhóm xuất hiện hai vùng nhiễu động áp thấp (Hình 5d). Vùng nhiễu động áp thấp nằm trên Biển Đông ở nhóm hình thành mở rộng hơn sang phía tây. Lượng ẩm ở vùng nhiễu động này trong nhóm hình thành tăng cường với một cực đại gần khu vực quần đảo Hoàng Sa. Gần như toàn bộ Biển Đông, nhiệt độ thế vị tương đương ở nhóm hình thành có xu hướng cao hơn đáng kể so với nhóm không hình thành. So sánh với trường xoáy thế (Hình 5b), những khu vực dị thường độ xoáy thế dương ở nhóm *hình thành* nằm trên biển, nhưng đối với nhóm *không hình thành* có xu hướng xuất hiện ở gần đất liền. Đây là một điều kiện quan trọng để XTNĐ hình thành được trong nhóm *hình thành*, với dải dị thường xoáy thế dương lớn hơn ở nhóm hình thành là một khu vực nhiễu động thuận lợi cho sự phát triển.



Hình 7. Tương tự Hình 6 đối với các hạn dự báo từ 00Z 18/7 tới 00Z ngày 21/7.



Hình 8. Vị trí hình thành (a) và cấu trúc động lực (b) của nhiễu động khởi đầu đối với các trường hợp dự báo hình thành trong toàn bộ giai đoạn. Vị trí thực tế đánh dấu sao và độ đậm nhạt của các điểm tương ứng với hạn dự báo.

3.3. Đánh giá dự báo vị trí hình thành và cấu trúc xoáy của xoáy thuận nhiệt đới Sonca

Hình 8a thể hiện vị trí hình thành của XTNĐ tương ứng với các hạn dự báo. Nhìn chung, với những trường hợp hình thành, hạn dự báo càng xa so với thời điểm thực thì XTNĐ có xu hướng hình thành ở vị trí lệch về phía đông hơn so với vị trí hình thành thực tế. Phân bố của vị trí hình thành tại tất cả các hạn dự báo dọc theo trục rãnh gió mùa hướng tây bắc – đông nam, cá biệt có một số thời điểm XTNĐ hình thành ở rất gần đất liền khu vực lân cận đảo Hải Nam ở các hạn dự báo 90 giờ và 66 giờ. Hạn dự báo càng tăng thì XTNĐ càng phát triển lệch về phía tây hơn. Một số XTNĐ hình thành ở hạn 114 giờ tương ứng với đường quỹ đạo của nhiễu động phát triển từ ngoài Tây Bắc Thái Bình Dương vượt qua Philippines. Vị trí hình thành của những XTNĐ này rất gần Philippines, hoàn lưu dễ dàng bị ảnh hưởng bởi địa hình và được tăng cường nhờ kết hợp xoáy đối lưu quy mô vừa trên Philippines [5]. Đây là một hình thể quy mô vừa thuận lợi điển hình sinh ra do đốt nóng bề mặt, và là lý do phổ biến cho sự tăng cường xoáy trong quá trình hình thành XTNĐ gần quần đảo Philippines.

Hầu hết các XTNĐ hình thành trong dự báo tổ hợp có cường độ độ xoáy Lagrange nhỏ hơn so với giá trị độ xoáy trung bình thực tế là $8,72 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (Hình 8b). Tương ứng với vị trí hình thành (Hình 8a) có thể nhận thấy rằng đa phần các xoáy có hạn dự báo gần thời gian hình thành thực tế đều có vị trí khá gần đảo Hải Nam, hoàn lưu dễ bị ảnh hưởng bởi đất liền. Một số XTNĐ hình thành với hạn dự báo xa (khoảng hơn 100 giờ) cho thấy xoáy có cường độ rất yếu, khoảng $4-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, bán kính tương đương cũng là $4-5^\circ$, cho thấy vùng tâm xoáy có kích thước rất rộng và giá trị nhỏ. Càng gần hạn dự báo, cấu trúc vùng tâm xoáy càng thu hẹp và có sự tập trung độ xoáy với tính nhất quán, thể hiện sự phát triển của cường độ xoáy trong những trường hợp này.

4. Kết luận

Ứng dụng phương pháp đồng hóa tổ hợp trên mô hình WRF với số liệu quan trắc mở rộng, tác giả nghiên cứu trường hợp hình thành XTNĐ Sonca (2017) trong giai đoạn bị ảnh hưởng bởi các quá trình đa dạng quy mô và rất phức tạp.

Nghiên cứu đã chỉ ra những hạn chế chính trong phương pháp dự báo trong quá trình hình thành của nhiễu động khởi đầu và cấu trúc động lực của XTNĐ theo góc nhìn dự báo tổ hợp và đề xuất sử dụng phương pháp Lagrange đánh giá động lực đối với kết quả dự báo. Kết quả cho thấy, quá trình dự báo sự hình thành Sonca phụ thuộc chủ yếu vào khả năng phân tích vùng độ đứt gió trong rãnh gió mùa và quá trình di chuyển của một nhiễu động xuất phát từ Biển Philippines trở thành nhiễu động khởi đầu của Sonca từ hệ thống dự báo tổ hợp. So sánh giữa nhóm *hình thành* và nhóm *không hình thành* trong các hạn dự báo khác nhau của Sonca cho thấy những nhiễu động xoáy thế và trường phân bố nhiệt độ thế vị tương đương rất quan trọng trong động lực học của quá trình hình thành XTNĐ trên Biển Đông. Sự tồn tại của nhiễu động xoáy thế rải rác trên Biển Đông với lượng ẩm dồi dào rất quan trọng trong quá trình tổng hợp xoáy hình thành XTNĐ. Nghiên cứu cũng cho thấy vị trí hình thành XTNĐ Sonca trong các thành phần tổ hợp có xu hướng hội tụ về trục rãnh gió mùa, và giá trị độ xoáy Lagrange nhìn chung nhỏ hơn so với thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Yuan, D. Wang, C. Liu, H. Han, H. Huang, The Characteristic Differences of Tropical Cyclones Forming Over the Western North Pacific and the South China Sea, 2007.
- [2] Y. Du, L. Yang, S. P. Xie, Tropical Indian Ocean Influence on Northwest Pacific Tropical Cyclones in Summer Following Strong El Niño, Journal of Climate, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 315-322.
- [3] Z. Ling, G. Wang, C. Wang, Z. Fan, Different Effects of Tropical Cyclones Generated in the South China Sea and the Northwest Pacific on the Summer South China Sea Circulation, Journal of Oceanography - J Oceanogr, Vol. 67, 2011, pp. 347-355, <https://doi.org/10.1007/s10872-011-0044-1>.
- [4] M. S. Park, M. I. Lee, D. Kim, M. M. Bell, D. H. Cha, R. L. Elsberry, Land-Based Convection Effects on Formation of Tropical Cyclone Mekkhala (2008), Monthly Weather Review, Vol. 145, No. 4, 2017, pp. 1315-1337, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-16-0167.1>.
- [5] M. S. Park, H. S. Kim, C. H. Ho, R. L. Elsberry, M. I. Lee, Tropical Cyclone Mekkhala's (2008) Formation Over the South China Sea: Mesoscale, Synoptic-Scale, and Large-Scale Contributions, Monthly Weather Review, Vol. 143, No. 1, 2015, pp. 88-110, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-14-00119.1>.
- [6] T. C. Chen, J. D. Tsay, J. Matsumoto, J. Alpert, Impact of the Summer Monsoon Westerlies on the South China Sea Tropical Cyclone Genesis in May, Weather and Forecasting, Vol. 32, No. 3, 2017, pp. 925-947, <https://doi.org/10.1175/waf-d-16-0189.1>.
- [7] T. T. Tien, C. Thanh, N. D. Dung, N. T. Nga, Forecasting the Occurrence of Tropical Depressions in the Bien Dong Sea Using the Classification Method, Journal of Climate Change Science, Vol. 14, No. 6, 2020, pp. 76-83 (in Vietnamese).
- [8] T. T. Tien, H. T. Ha, N. T. K. Anh, Forecasting the Formation of Tropical Depression in the Bien Dong Sea Using the WRF-NMM Model, VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, Vol. 34, No. 1S, 2018, <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.4337> (in Vietnamese).
- [9] T. T. Tien, D. N. Q. Hoa, C. Thanh, C. Kieu, Assessing the Impacts of Augmented Observations on the Forecast of Typhoon Wutip (2013)'s Formation using the Ensemble Kalman Filter, Weather and Forecasting, Vol. 27, 2020, <https://doi.org/10.1175/waf-d-20-0001.1>.
- [10] T. Tien, H. Dao, Experiments on Using WRF Model data Assimilation of Coupled 3DVAR – LETKF in Predicting the Geneses of Tropical Cyclones in the Vietnamese East Sea, VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, Vol. 34, 2018, <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.4338> (in Vietnamese).
- [11] W. C. Skamarock, J. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, W. Wang, J. G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, Vol. 27, No. 2008, pp. 3-27.
- [12] C. Q. Kieu, M. T. Nguyen, T. M. Hoang, T. N. Duc, Sensitivity of the Track and Intensity Forecasts of Typhoon Megi (2010) to Satellite-derived Atmospheric Motion Vectors with the Ensemble Kalman Filter, J. Atmos. Oceanic Technol, Vol. 29, No. 2012, pp. 1794-1810, <https://doi.org/10.1175/jtech-d-12-00020.1>.
- [13] T. D. Du, T. N. Duc, C. Kieu, Initializing the WRF Model with Tropical Cyclone Real-time Reports Using the Ensemble Kalman Filter Algorithm, Pure

- Appl. Geophys, Vol. 174, 2017, pp. 2803-2825, <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1568-0>.
- [14] C. Q. Kieu, P. T. Minh, H. T. Mai, An Application of the Multi-physics Ensemble Kalman Filter to Typhoon Forecast, *Pure Appl. Geophys*, Vol. 171, 2014, pp. 1473-1497, <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0681-y>.
- [15] M. Tong, Impact of Assimilating Aircraft Reconnaissance Observations on Tropical Cyclone Initialization and Prediction using Operational HWRF and GSI Ensemble-Variational Hybrid Data Assimilation, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 146, 2018, pp. 4155-4177, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0380.1>.
- [16] Z. Zhang, V. Tallapragada, C. Kieu, S. Trahan, W. Wang, HWRF Based Ensemble Prediction System using Perturbations from GEFS and Stochastic Convective Trigger Function, *Trop. Cyclone Res. Rev.*, Vol. 3, No. 2015, pp. 145-161,
- [17] B. Rutherford, T. J. Dunkerton, M. T. Montgomery, Lagrangian Vortices in Developing Tropical Cyclones, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 141, No. 693, 2015, pp. 3344-3354, <https://doi.org/10.1002/qj.2616>.
- [18] B. Rutherford, T. Dunkerton, M. Montgomery, S. Braun, The Genesis of Hurricane Nate and its Interaction with A Nearby Environment of Very Dry Air, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 17, No. 17, 2017, pp. 10349-10366, <https://doi.org/10.5194/acp-17-10349-2017>.
- [19] B. Rutherford, M. A. Boothe, T. J. Dunkerton, M. T. Montgomery, Dynamical Properties of Developing Tropical Cyclones Using Lagrangian Flow Topology, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 144, No. 710, 2018, pp. 218-230, <https://doi.org/10.1002/qj.3196>.
- [20] K. J. Tory, H. Ye, R. A. Dare, Understanding the Geographic Distribution of Tropical Cyclone Formation for Applications in Climate Models, *Climate Dynamics*, Vol. 50, No. 7, 2018, pp. 2489-2512, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3752-4>.
- [21] K. J. Tory, R. A. Dare, N. E. Davidson, J. L. McBride, S. S. Chand, The importance of Low-Deformation Vorticity in Tropical Cyclone Formation, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 13, No. 4, 2013, pp. 2115-2132, <https://doi.org/10.5194/acp-13-2115-2013>.
- [22] K. J. Tory, R. A. Dare, Sea Surface Temperature Thresholds for Tropical Cyclone Formation, *Journal of Climate*, Vol. 28, No. 20, 2015, pp. 8171-8183, <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00637.1>.
- [23] A. Okubo, Horizontal Dispersion of Floatable Particles in the Vicinity of Velocity Singularities Such as Convergences, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, Vol. 17, No. 3, 1970, pp. 445-454, [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90059-8](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90059-8).
- [24] J. Weiss, The Dynamics of Enstrophy Transfer in Two-dimensional Hydrodynamics, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 48, No. 2, 1991, pp. 273-294, [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(91\)90088-Q](https://doi.org/10.1016/0167-2789(91)90088-Q).
- [25] G. R. M. Gregor, The Tropical Cyclone Hazard Over the South China Sea 1970-1989: Annual Spatial and Temporal Characteristics, *Applied Geography*, Vol. 15, No. 1, 1995, pp. 35-52, [https://doi.org/10.1016/0143-6228\(95\)91061-2](https://doi.org/10.1016/0143-6228(95)91061-2).
- [26] R. W. Griffiths, E. J. Hopfinger, Experiments with Baroclinic Vortex Pairs in A Rotating Fluid, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 173, No. 1986, pp. 501-518, <https://doi.org/10.1017/S0022112086001246>.