

MÔ HÌNH DỰ BÁO SỐ PHÂN GIẢI CAO HRM VÀ THỬ NGHIỆM ÁP DỤNG DỰ BÁO THỜI TIẾT KHU VỰC ĐÔNG NAM Á- VIỆT NAM

Kiều Thị Xin, Phan Văn Tân

Trường Đại học Khoa học tự nhiên-Đại học quốc gia Hà Nội

Lê Công Thành, Đỗ Lệ Thủy, Nguyễn Văn Sáng

Trung tâm quốc gia dự báo Khí tượng Thủy văn

1. Mở đầu

Do nhu cầu của con người và xã hội đòi hỏi dự báo thời tiết chi tiết và chính xác ngày càng cao nên các cơ quan khí tượng trên thế giới đang phát triển nhiều mô hình dự báo thời tiết số (NWP) phân giải cao và đã áp dụng ở nhiều nước. Về cơ bản, có ba loại mô hình khác nhau: mô hình toàn cầu có độ phân giải không đổi, mô hình toàn cầu có độ phân giải biến đổi và bộ các mô hình. Loại thứ ba là mô hình khu vực hạn chế lồng ghép vào mô hình toàn cầu. Mỗi loại có những ưu điểm và nhược điểm về bản chất.

Ngày nay, phần lớn các nước ưa thích loại thứ ba - mô hình khu vực lồng vào mô hình toàn cầu, trong đó điều kiện ban đầu và điều kiện biên xung quanh lấy từ sản phẩm dự báo của mô hình toàn cầu có độ phân giải thô hơn. Về lý thuyết thì biên xung quanh của mô hình khu vực thường mang theo những nhược điểm rất cơ bản của loại mô hình này, song kinh nghiệm thực tế hiện nay cho thấy, phương pháp tắt dần ảnh hưởng một chiều cùng với cập nhật thường xuyên giá trị biên trong vùng biên đã khắc phục hiệu quả nhược điểm này. GME-HRM là một bộ mô hình loại này của Tổng cục thời tiết, CHLB Đức (DWD).

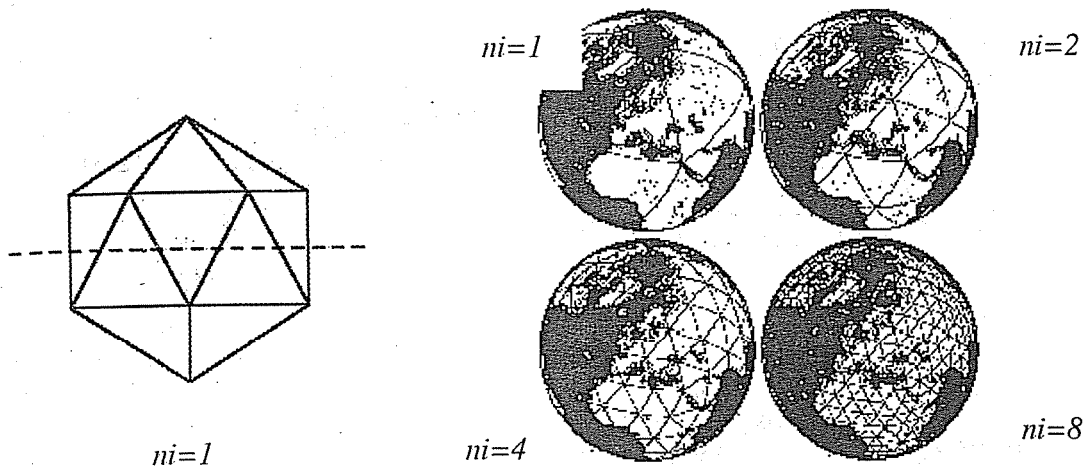
Từ năm 1999 về trước, DWD vẫn chạy nghiệp vụ mô hình toàn cầu, gọi tắt là GM, của ECMWF. Mô hình này được cải tiến để tính trên máy siêu tốc, kết quả dự báo của nó dùng làm điều kiện ban đầu và biên cho mô hình khu vực Trung Âu từ 1995. Mô hình toàn cầu cải tiến này được gọi là GME.

Mặc dù phương pháp phổ trong GME là chính xác cao đối với mô hình hoá quy mô hành tinh, song nó bộc lộ những nhược điểm rất cơ bản khi độ phân giải ngang tăng và các quá trình vật lý được tham số hoá chi tiết phức tạp. Ngoài ra, việc sử dụng lưới kinh-vĩ điều hoà trên hình cầu còn đặc biệt bị hạn chế độ chính xác đối với vùng cực do sự hội tụ của kinh tuyến trên cực, và do đó khoảng cách giữa hai nút lưới cạnh nhau thường gọi bước lưới sẽ biến đổi rất nhanh theo vĩ độ.

Vì tất cả những lý do trên, sau nhiều năm nghiên cứu, DWD đã đưa vào áp dụng nghiệp vụ phương pháp lưới điều hoà tam giác trong mô hình toàn cầu GME từ cuối năm 1999. Ưu điểm quyết định của loại lưới tam giác này là bước lưới ít biến đổi, tối đa chỉ khoảng 10%. Chi tiết hơn về GME có thể tham khảo trong các tài liệu (Hình 1.1).

DWD là nơi đầu tiên sử dụng nghiệp vụ lưới tam giác cầu này trong GME với $n_i=128$, độ dài tương ứng trung bình của mỗi đoạn vào khoảng 60 km. Đó chính là độ phân giải ngang của GME. Theo phương đứng, GME được chia thành 31 lớp. Sản

phẩm phân tích và dự báo của GME được dùng làm trường ban đầu và điều kiện biên cho HRM.



Hình 1.1: Lưới tam giác trong GME được tạo ra bằng chia đôi liên tiếp cạnh để tạo thành những tam giác mới. n_i là số đoạn được chia trên một cạnh của tam giác lớn nhất ($n_i=1$ khi bề mặt trái đất được chia thành 20 tam giác lớn nhất đầu tiên có cạnh dài cỡ 7054 km).

2. Mô tả lý thuyết mô hình phân giải cao HRM

Mô hình khu vực của Trung tâm châu Âu dự báo thời tiết hạn vừa (ECMWF), gọi tắt là EM, từ lâu đã được áp dụng nghiệp vụ ở nhiều nước trên thế giới, và là mô hình dự báo thời tiết chính của hệ thống dự báo thời tiết số áp dụng nghiệp vụ ở DWD cho quy mô synopt và quy mô vừa - α từ năm 1991. DWD đã cải tiến EM thành mô hình khu vực phân giải cao quy mô vừa - β từ năm 1993. Mô hình kết quả kết hợp này được gọi là mô hình khu vực phân giải cao, gọi tắt là HRM. Như vậy HRM là một mô hình số, thủy tĩnh, cho dự báo thời tiết khu vực hạn chế quy mô vừa - α và - β , cung cấp dự báo chi tiết hơn các tham số thời tiết gần mặt đất, và mô phỏng tốt hơn mây và mưa. Nhờ vậy, các trường khí tượng là sản phẩm của HRM có khả năng áp dụng vào các bài toán môi trường như mô hình hoá ô nhiễm khí hay mô phỏng trạng thái biểnHRM còn là một công cụ nghiên cứu khoa học rất nhạy.

a. Hệ các phương trình cơ bản và điều kiện biên

Hệ các phương trình dự báo trong HRM dựa vào các phương trình nguyên thủy trong hệ tọa độ lai theo địa hình (xem [9]). Đó là sáu phương trình dự báo với sáu biến tương ứng p_s, u, v, T, q_v, q_c :

1) Cửa xu thế khí áp mặt đất:

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = -\frac{1}{a \cos \varphi} \int_0^1 \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(u \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(v \cos \varphi \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) \right\} d\eta - \mu_b (p_s - p_{slb}), \quad (2.1)$$

2) Cửa các thành phần gió ngang:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\cos \varphi} Q \frac{\partial p}{\partial \eta} v \cos \varphi + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\Phi + K) + \frac{R T_v}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} [\ln(p)] + \eta^* \frac{\partial u}{\partial \eta} =$$

$$F_H^u - g \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right)^{-1} \frac{\partial \tau_\lambda}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_s - \mu_{lb} (u - u_{lb}),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + Q \frac{\partial p}{\partial \eta} u + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\Phi + K) + \frac{R T_v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} [\ln(p)] + \eta^* \frac{\partial v}{\partial \eta} =$$

$$F_H^v - g \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right)^{-1} \frac{\partial \tau_\varphi}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)_s - \mu_{lb} (v - v_{lb}),$$

3) Cửa nhiệt độ :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right] + \eta^* \frac{\partial T}{\partial \eta} =$$

$$\frac{R}{c_p} T_v \left(\frac{\omega}{p} \right) + F_H^T - g \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right)^{-1} \frac{\partial \eta_T}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_s + \frac{L_c}{c_p} c_{vc} - \mu_{lb} (T - T_{lb}),$$

4) Cửa lượng hơi nước :

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[u \frac{\partial q_v}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q_v}{\partial \varphi} \right] + \eta^* \frac{\partial q_v}{\partial \eta} =$$

$$F_H^q - g \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right)^{-1} \frac{\partial \eta_{q_v}}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial q_v}{\partial t} \right)_s - c_{vc} - \mu_{lb} (q_v - q_{v lb}),$$

5) Và cửa lượng nước lỏng trong mây :

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[u \frac{\partial q_c}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q_c}{\partial \varphi} \right] + \eta^* \frac{\partial q_c}{\partial \eta} =$$

$$- g \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} \right)^{-1} \frac{\partial \eta_{q_c}}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial q_c}{\partial t} \right)_s - c_{vc} - \mu_{lb} (q_c - q_{c lb}),$$

cùng với 9 phương trình cảnh báo để xác định tốc độ thăng đúng ω , độ cao địa thế vị ϕ , độ phủ mây clc , các hệ số khuếch tán và một số tham số trên mặt đất và trong đất. Số hạng cuối cùng trong các vế phải của (2.1)-(2.6) là những số hạng lỏng dẫn biên, trong đó μ_{lb} là hệ số lỏng dẫn và rất quan trọng trong vùng biên được xác định.

Điều kiện biên

a) *Biên trên* - Trong các mô hình quy mô vừa, sóng trọng trường nội trở nên quan trọng hơn. Nếu không có những cơ chế làm tiêu tan sóng trọng trường, chúng sẽ phản xạ lại trên đỉnh mô hình và do đó sẽ đưa đến phát triển sóng đứng. Loại sóng này sau

đó sẽ làm sai lệch trường tốc độ thẳng đứng. Để khử loại sóng này, trong HRM đã sử dụng *điều kiện biên trên bức xạ (RUBC)*, do Klemp, Durran và Bougeaul (1983) phát triển và do đó trong mô hình viết tắt là KDB-UBC. Sơ đồ KDB-UBC đầu tiên được phát triển cho hệ toạ độ x,z và được Herzog (1994) chuyển sang hệ toạ ba chiều có trục đứng là trục toạ độ lai và được áp dụng nghiệp vụ trong HRM.

b) *Biên xung quanh* - Biên xung quanh của HRM biến đổi theo thời gian lấy từ mô hình điều khiển GME, có làm trơn ít nhiều (theo Davies, 1976 và Kalberg, 1977) để cho các hệ thống quy mô nhỏ và sóng trọng trường có thể rời khu vực mô hình mà không phản xạ nhiều trên biên xung quanh.

b. Cấu trúc không gian của HRM

Theo phương đứng khí quyển mô hình của HRM có thể chia thành 20 đến 35 lớp, song do hạn chế về khả năng máy tính trong thử nghiệm này đã chọn 20 lớp với độ phân giải giảm dần theo độ cao trong hệ toạ độ lai. Lớp khí quyển mô hình thấp nhất có độ dày khoảng 2 km được chia thành 8 lớp mô hình để phản ánh đủ tốt cấu trúc của lớp biên khí quyển, trong lúc tầng khí quyển bình lưu thể hiện chủ yếu qua các quá trình quy mô lớn nên trong HRM được mô tả chỉ bằng bốn lớp.

Các biến dự báo như u, v, T, q_v, q_c cùng với biến cảnh báo như tốc độ thẳng đứng trong hệ toạ độ khí áp ω được xác định tại mực tâm của lớp - gọi là mực nguyên, trong khi đó, độ cao địa thế vị ϕ và tốc độ thẳng đứng trong toạ độ lai η cùng với các thông lượng khuếch tán lại được tính trên mực phân chia giữa các lớp - gọi là mực phân. HRM được cấu trúc ngang theo lưới điều hoà hoặc lưới kinh - vĩ quay, với độ phân giải có thể từ 0.25° đến 0.05° (tương đương 28 km đến 6 km), các biến được sai phân theo lưới xen kẽ cả phương ngang và phương đứng.

c. Địa hình và đặc điểm vật lý bề mặt trong HRM thử nghiệm

Trên từng ô lưới có kích thước $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ cần xác định các tham số: độ cao trung bình trên mực biển và vị trí của ô trên đất được xác định từ tập số liệu ($10' \times 10'$) của Mỹ, loại đất chủ yếu trong ô lưới xác định theo các bản đồ của FAO/ UNESCO. Độ phủ thực vật được chọn bằng 0,75 đối với đất không có băng hay cát; và độ cao gỗ ghe trên đất phụ thuộc vào đất sử dụng cũng như sự biến đổi quy mô dưới lưới của địa hình. Albedo phụ thuộc vào loại đất, độ phủ tuyết và độ ẩm đất.

d. Điều kiện ban đầu, điều kiện biên và các sơ đồ tính

Trường ban đầu cho HRM được nội suy từ trường phân tích trên lưới tam giác của GME. Trên đỉnh ($\eta = 0$) và trên đáy ($\eta = 1$) của khí quyển mô hình tốc độ thẳng đứng $\left(\eta^* \right)$ bằng không vì không có thông lượng khối đi qua hai biên này.

Giá trị của các biến dự báo trên vùng biên xung quanh biến đổi theo thời gian từng 3h, cập nhật từ sản phẩm dự báo của GME. Ở đây cần thận trọng khi chuyển từ các trường lưới tam giác của GME sang lưới điều hoà HRM và tương thích với địa hình của HRM. Biên của HRM là một vùng tạo thành bởi 8 nút lưới xung quanh ngoài cùng. Đối với vùng này trong HRM sử dụng sơ đồ lồng dần của Davies (1976) để điều chỉnh các biến dự báo trên vùng biên của HRM tiến dần từ giá trị của HRM trên điểm biên trong cùng đến giá trị tương ứng của GME trên điểm biên ngoài cùng.

Các phương trình dự báo viết dưới dạng bình lưu theo lưới C - Arakawa, và dùng sai phân trung tâm bậc hai theo không gian. Việc thiết lập sai phân hữu hạn thẳng đứng nhằm bảo toàn năng lượng và động lượng góc. Mô hình sử dụng sơ đồ bậc thang Leap-frog với hiệu chỉnh nửa ẩn và lọc Asselin với bước thời gian thỏa mãn tiêu chuẩn CFL: ví dụ, trong những điều kiện thời tiết nhất định là 150s tương ứng với độ phân giải ngang 28 km, 75s tương ứng 14 km phân giải ngang. Thực tế thử nghiệm cho thấy, trong điều kiện thời tiết phức tạp, nghĩa là phát triển bất ổn định mạnh thì giá trị của CFL cần được điều chỉnh, nghĩa là khi bước lưới cố định cần biến đổi bước thời gian.... Bình lưu thẳng đứng và các dòng rối thẳng đứng thể hiện đầy đủ để tránh bất ổn định số.

d. Tham số hoá vật lý trong HRM

Các quá trình quy mô dưới lưới như bức xạ, đối lưu khô và ẩm, khuếch tán rối ngang và đứng hay vật lý đất có tác động hoàn ngược đến biến mô hình được tham số hoá và biểu diễn tổng cộng qua các số hạng có chỉ số "s" trong các phương trình (2.2)-(2.6).

Bức xạ: Bức xạ là nhân tố đặc biệt quan trọng đối với sự phát triển thời tiết và được tham số hóa theo hai sơ đồ riêng biệt đối với bức xạ sóng dài và sóng ngắn tương ứng trong khí quyển và trên mặt đất. Hiệu ứng hồi tiếp của bức xạ và mây được tính đầy đủ. Mây quy mô lưới kết hợp tham số hoá vật lý mây vi mô tính theo sơ đồ Doms và Schaettler (1997).

Đối lưu và đối lưu ẩm: Đối lưu và đối lưu ẩm trong HRM được tham số hoá theo sơ đồ đối lưu thông lượng khối của Tiedtke (1989), trong đó phân biệt giữa đối lưu sâu, đối lưu nông và đối lưu mực giữa.

Khuếch tán rối khí quyển thẳng đứng: trong mô hình tính theo sơ đồ hai mực của lý thuyết thẳng đứng trên mặt đất (Louis, 1979).

Khuếch tán ngang: Khuếch tán ngang của động lượng, tổng nhiệt và tổng nước là bậc hai cả trong tầng bình lưu, với hệ số khuếch tán phụ thuộc không gian và tỷ lệ với biến dạng của trường gió ngang. Hệ số khuếch tán biến đổi trong khoảng 10^{-4} - 10^{-6} m²/s. Các số hạng hiệu chỉnh được bổ sung vào phương trình nhiệt và phương trình ẩm để tính độ nghiêng của các lớp mô hình.

Thông lượng rối thẳng đứng: Trong lớp Prandtl mô hình sử dụng các quan hệ của lý thuyết tương tự để tính thông lượng rối thẳng đứng trong lúc trong lớp Ekman và khí quyển tự do lại phát triển sơ đồ khép kín bậc hai (Louis, 1979). Các hệ số trao đổi phụ thuộc độ ổn định, độ đứt gió và hệ số khuếch tán ngang. Độ cao gồ ghề trên nước tính theo Charnock. Toàn bộ sơ đồ rối được mô tả chi tiết trong Mueller (1981).

Mô hình đất: Đối với bề mặt là đất, mô hình đất phải tính được nhiệt độ mặt đất và tốc độ bốc hơi. Nhiệt độ mặt đất là điều kiện biên để xác định thông lượng bức xạ và thông lượng ẩn nhiệt. Nhiệt độ này tính được bằng một mô hình hai lớp tối ưu theo phương pháp tái ép buộc (JACOBSEN, HEISE, 1982). Nếu phần diện tích ô lưới được bao phủ đất nhỏ hơn 50% thì nút lưới này được coi là điểm biển và nhiệt độ của nó không biến đổi trong suốt quá trình dự báo. Nhiệt độ này được cung cấp bởi phân tích nhiệt độ biển (SST).

e. Mưa quy mô lưới

Tham số hoá vật lý vi mô của mây quy mô lưới làm nổi bật vai trò của pha băng đối với sự hình thành mây nhờ nhấn mạnh quá trình Bergeron-Findeisen. Sơ đồ

tham số hoá cho phép tính những tương tác giữa hơi nước, nước mây, mưa và băng kể cả tự động chuyển từ nước mây sang mưa và sang băng, sự lớn lên, sự rơi, tan, lắng đọng và bốc hơi của những giọt mưa. Tốc độ mưa và tuyết rơi được điều khiển cảnh báo nhờ thừa nhận tính dừng và bỏ qua bình lưu. Mưa quy mô lưới tính theo sơ đồ của Doms và Schaettler (1997).

f. Sơ đồ tích phân thời gian

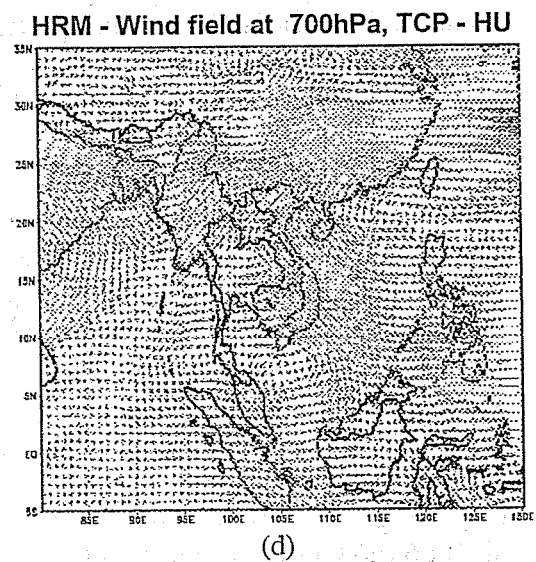
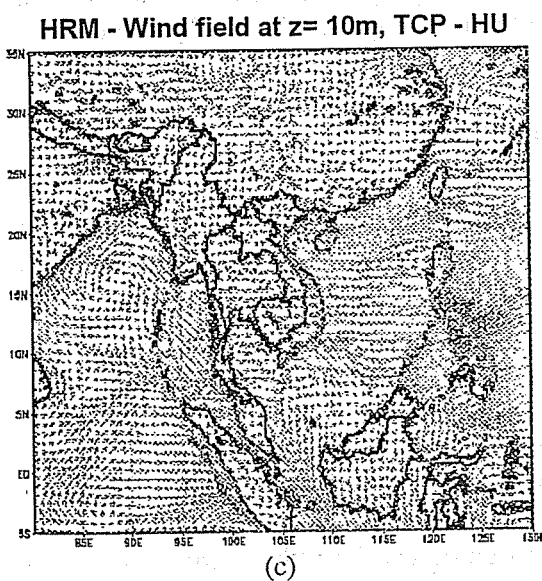
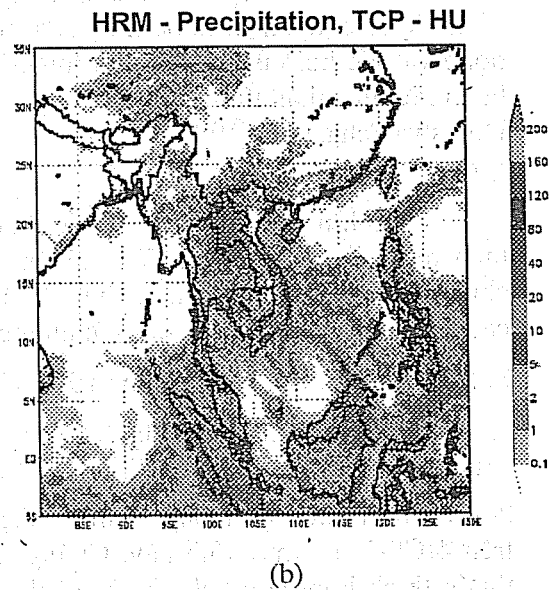
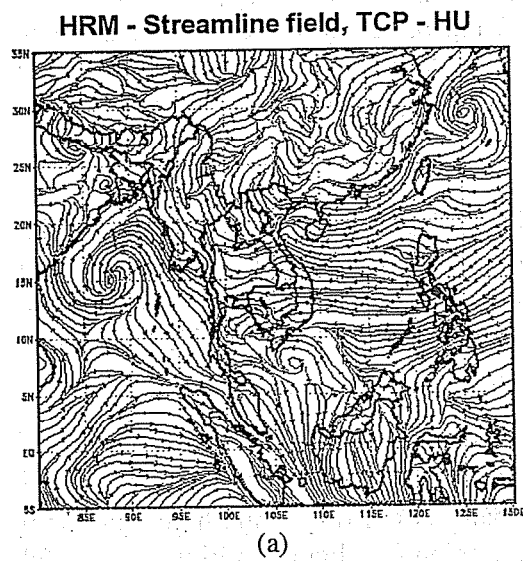
Mô hình sử dụng sơ đồ bậc thang thời gian kiểu Leapfrog với bước thời gian thoả mãn điều kiện CFL. Tuy nhiên, bước thời gian kiểu Leapfrog thoả mãn tiêu chuẩn CFL là quá nhỏ nên sử dụng không kinh tế. Vì vậy, trong mô hình còn áp dụng cả sơ đồ thời gian nửa- ẩn đối với những số hạng mô tả lan truyền sóng trọng trường.

3. Một số kết quả nhận được từ HRM và phân tích sơ bộ

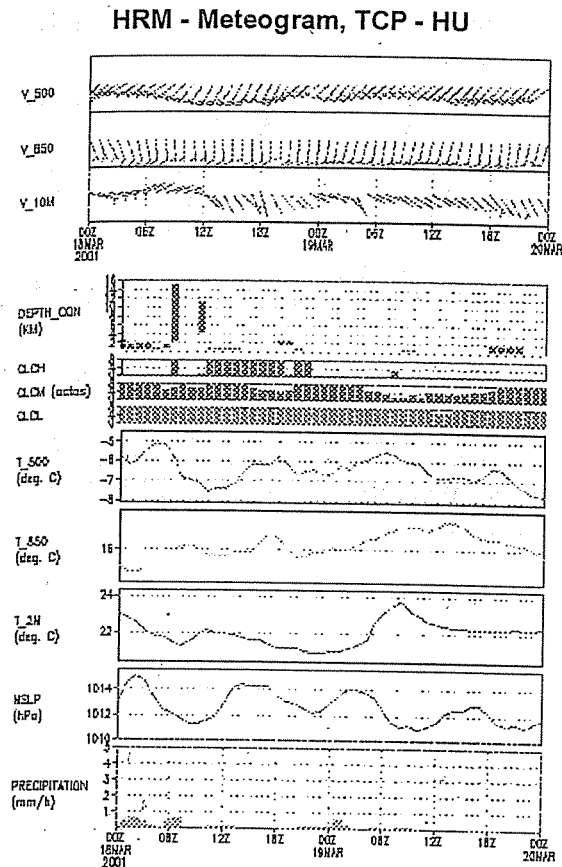
HRM đã được cài đặt và chạy ổn định trên máy tính trạm SUN Ultra80 ở Trường ĐHKHTN, ĐHQG Hà Nội. Từ tháng XII - 2000 tính toán dự báo thời tiết hạn 24-48h trên khu vực Đông Nam Á-Việt Nam bằng HRM được thực hiện song song trên 4 CPU của máy tính này. Chúng tôi đang nghiên cứu lựa chọn khu vực có kích thước thích hợp về cơ chế hình thành thời tiết khu vực này trong khuôn khổ có thể chạy nghiệp vụ trên những máy trạm có thể có ở Việt Nam trong thời gian tới. Sản phẩm dự báo của HRM vô cùng phong phú. Đó là: trường của 5 biến dự báo trên tất cả các mực đẳng áp chuẩn, gió trên độ cao 10m, nhiệt độ trên độ cao 2m, các biến cảnh báo... trong khí quyển và trong lớp đất trên cùng cũng như Meteogram cho một điểm bất kỳ có toạ độ kinh vĩ xác định..... Chi tiết hơn có thể tìm hiểu trực tiếp ở tập thể tác giả.

Trong khuôn khổ của một bài báo chỉ giới thiệu một số bức tranh biểu diễn sản phẩm dự báo của HRM. Trên hình 3.1 là sản phẩm dự báo +24h, bắt đầu 00Z, 18-III- 2001, của một số biến như trường đường dòng mực 1000hPa, phân bố mưa tích lũy 12h, hay gió trên độ cao 10 mét và trên mực 700hPa.

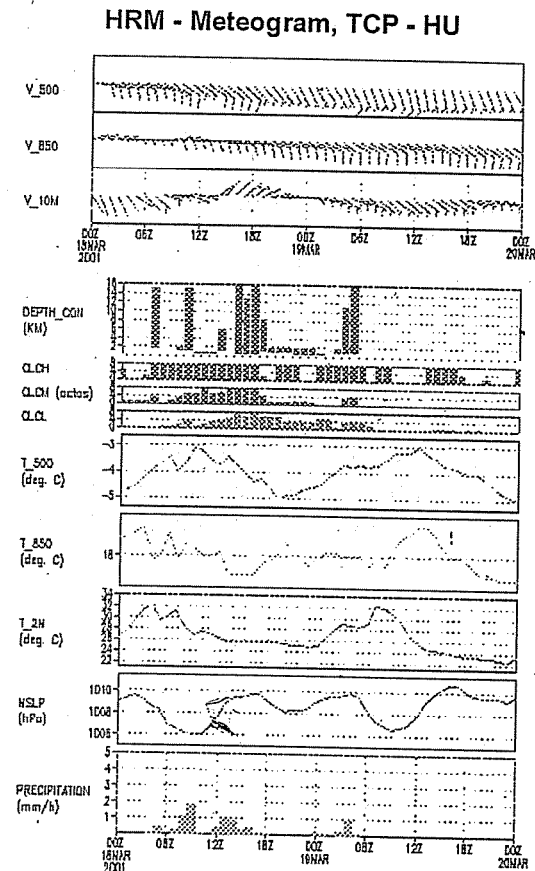
Trên hình 3.2. biểu diễn Meteogram của hai Trạm Hà Nội và TP. HCM. Trên Meteogram là diễn biến trong 48h dự báo của các yếu tố: gió trên các mực 10m, 850- và 500hPa (phần trên của hình 3.2.). Trong phần dưới của hình 3.2. lần lượt từ trên xuống: độ sâu của đối lưu sâu (km); độ phủ mây cao- CLCH (lớp 0-400 hPa); độ phủ mây trung-CLCM (lớp 400-800 hPa); độ phủ mây thấp-CLCL (lớp 800hPa - mặt đất); nhiệt độ (độ C) trên các mực 500-, 850hPa và trên độ cao 2m; khí áp mực biển trung bình- MSLP (hPa), và lượng mưa tích lũy từng giờ (mm/h).



Hình 3.1. Sản phẩm dự báo của HRM: Dự báo +24h của một số yếu tố khí tượng, bắt đầu 00Z 18-III-2001. (a) Trường đường dòng mực 1000 hPa; (b) Tổng lượng mưa tích lũy 12h: từ 12h đến 24h dự báo, (mm); (c) Trường gió trên độ cao 10m (m/s), (d) Trường gió mực 700hPa (m/s), HRM-1.7, GME2HRM-1.4.



a) Hà Nội



b) Thành phố Hồ Chí Minh

Hình 3.2. Meteogram :HRM-dự báo của một số yếu tố khí tượng tại hai trạm trong 48h, bắt đầu 00Z 18-III-2001: a) Hà Nội ($105,8^{\circ}\text{E}$ - $21,02^{\circ}\text{N}$), b) TP. Hồ Chí Minh ($106,67^{\circ}\text{E}$ - $10,82^{\circ}\text{N}$), HRM-1.7, GME2HRM-1.4.

Phân tích kết quả sơ bộ cho thấy có thể thử nghiệm sử dụng HRM cho dự báo thời tiết khu vực Đông Nam Á-Việt Nam cho mục đích nghiệp vụ cũng như nghiên cứu khoa học. Vấn đề quan trọng là cần thử nghiệm mô hình trên tập hợp số liệu nhiều ngày, kiểm tra đánh giá để đưa ra những kết luận về độ tin cậy của mô hình. Tuy nhiên, từ góc độ lý thuyết, chúng tôi đã có thể có những nhận xét nguyên tắc rằng, một số phần vật lý của mô hình cũng như một số tham số động lực học trong đó cần được nghiên cứu khu vực hoá nhờ thám sát địa phương có ở khu vực áp dụng HRM nhằm làm cho mô hình thích hợp hơn và nhờ đó có thể nâng cao chất lượng dự báo. Ngoài ra, từ tập kết quả dự báo mô hình đầu tiên có thể nhận xét định tính là chất lượng dự báo từ + 36 đến + 48h giảm rõ rệt.

Tài liệu tham khảo

1. Bougeault, Ph., 1983: A non-reflective upper boundary condition for limited-height hydrostatic models, Mon. Wea. Rev., 111, 420-429.
2. Davies, H.C., 1976: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models, Quart. J. R. Meteor. Soc. 102, 405-418.

3. Haltiner, G.J. and R.T. Williams, 1980: Numerical Prediction and Dynamical Meteorology, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
4. Herzog, H.J., 1994: Testing radiative upper boundary condition in a nonlinear model with hybrid vertical coordinate; Meteorol. Atmos. Phys. 55, 185-204.
5. Jacobsen, I. and E. Heise, 1982: A new Economic Method for the Computation of the surface Temperature in Numerical Models, Beitr. Phys. Atmos. Vol. 55, 128-141.
6. Klemp, J. B. and D.R. Durran 1983 : An upper boundary condition permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models. Mon. Wea. Rev., 111, 430-444.
7. Louis, J. F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary-Layer Meteorol., 17, 187-202.
8. Tiedtke, M. , 1989: A comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale models, Mon. Wea. Rev., Vol. 117, 1779-1799.
9. Documentation of the EM/DM-System, June 1995.