

ĐƯA BÀI TOÁN LAN TRUYỀN CHẤT Ô NHIỄM VÀO MÔ HÌNH HOTMAC CHO LỚP BIÊN KHÍ QUYỂN

ThS. Nguyễn Minh Trường - Phòng Thí nghiệm Dự báo Thời tiết và Khí hậu
ThS. Vũ Thanh Hằng - Bộ môn Khí tượng Khoa Khí tượng Thủy văn Hải dương học
Đại Học Khoa Học Tự Nhiên

*T*rong bài báo trước đây của cùng tác giả, mô hình số khép kín rối bậc 1,5 cho lớp biên khí quyển (HOTMAC) được áp dụng để mô phỏng các quá trình vật lý diễn ra trong lớp biên nơi có sự tồn tại của một hồ lớn lý tưởng hoá. Qua đó mô hình cho thấy khả năng của nó trong việc mô phỏng các hiện tượng khác trong lớp biên khí quyển. Tuy nhiên, HOTMAC chưa được phát triển để mô phỏng lan truyền chất ô nhiễm. Trong nghiên cứu này, phương trình lan truyền chất ô nhiễm được đưa vào thử nghiệm giải cùng với mô hình sử dụng sơ đồ sai phân ẩn luân hướng. Các kết quả bước đầu cho thấy khả năng mô phỏng tốt bài toán lan truyền chất ô nhiễm trong lớp biên khí quyển gây ra bởi một nguồn điểm. Với các kết quả này, mô hình cải tiến có thể được áp dụng cho việc đánh giá tác động môi trường gây ra bởi các nguồn điểm ở các khu công nghiệp.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây khi mà nền công nghiệp phát triển mạnh mẽ, vấn đề ô nhiễm đã được các nhà khoa học đặt ra cấp thiết. Những ảnh hưởng của ô nhiễm khí quyển đến sức khoẻ và môi trường đã trở thành mối quan tâm chính trong xã hội công nghiệp hiện đại. Dự báo nồng độ chất ô nhiễm trong khí quyển rất khó vì nó phụ thuộc vào các điều kiện khí tượng (gió, nhiệt độ, rối...) và những phản ứng hoá học giữa các chất ô nhiễm. Sự tương tác giữa các chất ô nhiễm và các biến khí quyển làm cho bài toán trở nên rất phức tạp. Ví dụ, cường độ các phản ứng hoá học giữa các chất ô nhiễm có thể phụ thuộc vào cường độ rối, ngược lại các chất ô nhiễm, như CO₂, có thể hấp thụ bức xạ mặt trời và làm thay đổi nhiệt độ bề mặt [2], [4]. Tuy nhiên, với các bài toán hạn ngắn, để đơn giản vấn đề có thể xem các chất khí gây ô nhiễm là trơ và thụ động với môi trường.

Để đánh giá tác động môi trường không

khí của một dự án phát triển công nghiệp, công trình giao thông vận tải, hay đánh giá mức độ ô nhiễm môi trường trong quá khứ hay tương lai đều cần phải dự báo được mức độ lan truyền chất ô nhiễm và tính toán nồng độ cũng như biến thiên theo thời gian của chúng. Việc sử dụng mô hình toán để giải bài toán lan truyền chất ô nhiễm môi trường không khí được phát triển mạnh từ những năm 1970. Các mô hình thường gặp có thể là mô hình thống kê kinh nghiệm dựa trên cơ sở lý thuyết Gauss hoặc các mô hình số có nhiều ưu điểm hơn [3].

Trong những năm gần đây, các nhà khí tượng học Hoa Kỳ đã phát triển một mô hình rối bậc 1,5 cho lớp biên khí quyển (HOTMAC), bao gồm hai phương trình, một phương trình cho động năng rối và một phương trình cho qui mô độ dài xoáy rối. Sau rất nhiều các thử nghiệm số ở Hoa Kỳ, mô hình có thể tái tạo lại các quá trình xảy ra trong lớp biên khí quyển rất tốt nhờ đó mà phép khép kín rối của mô hình này được áp

dụng rộng rãi [1], [5], [8]. Tuy nhiên trong mã nguồn của HOTMAC không có phần mô phỏng quá trình lan truyền chất ô nhiễm. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này các tác giả đã đưa vào phương trình bảo toàn nồng độ chất ô nhiễm và phát triển mã nguồn để giải đồng thời bài toán này cùng với mô hình lớp biên khí quyển, sử dụng sơ đồ sai phân ẩn luân hướng tương tự như cách giải áp dụng cho mô hình lớp biên. Các phương

trình, cấu hình miền tính, các điều kiện ban đầu và điều kiện biên sẽ được trình bày dưới đây.

2. Hệ phương trình

Các phương trình chuyển động viết cho tốc độ gió trung bình và các phương trình bảo toàn đối với nhiệt độ thể vị θ_L và tỉ số xáo trộn của lượng nước tổng cộng QW có thể được viết dưới dạng sau [1], [4], [5].

$$\frac{dU}{dt} = f(V - V_g) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{uw}) \quad (1)$$

$$\frac{dV}{dt} = -f(U - U_g) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{vw}) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_L}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \theta_L}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \theta_L}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (-\overline{\theta_L w}) \quad (3)$$

$$\text{và} \quad \frac{dQ_w}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial Q_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial Q_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \quad (4)$$

Trong đó (x, y, z) là tọa độ Đề các; t là thời gian; U và V là các thành phần gió ngang theo hướng x và y tương ứng; f là thông số Coriolis; và toán tử ở vế trái của các phương trình trên được định nghĩa như sau

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W \frac{\partial}{\partial z} \quad (5)$$

Các thành phần gió địa chuyển U_g và V_g ; và các hệ số khuếch tán ngang K_x , K_y và K_{xy}

được xác định theo Yamada [4], [5], [6], [7].

Vận tốc thẳng đứng W nhận được bằng cách tích phân phương trình liên tục cho chất lỏng không nén được

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Mô hình đòi hỏi các nghiệm dự báo đối với các phương trình năng lượng rối và qui mô độ dài xoáy rối, gồm:

$$\frac{d}{dt} (q^2/2) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial (q^2/2)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial (q^2/2)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(q l S_q \frac{\partial (q^2/2)}{\partial z} \right) - \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta g w \overline{\theta_v} - \frac{q^3}{B_l l} \quad (7)$$

$$\text{và} \quad \frac{d}{dt} (q^2 l) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial (q^2 l)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial (q^2 l)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(q l S_l \frac{\partial (q^2 l)}{\partial z} \right) + l E_1 \left[-\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z} + \beta g w \overline{\theta_v} \right] - \frac{q^3}{B_l} \left(1 + E_2 \left(\frac{l}{kz} \right)^2 \right) \quad (8)$$

Trong đó: $q^2 = \overline{u_i u_i}$; l: là qui mô độ dài xoáy rối; B_l , E_1 , E_2 , S_q và S_l các hằng số thực nghiệm được xác định từ các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm. Các phương trình trên cũng bao gồm các thông lượng rối khác nhau như $\overline{uw}$, $\overline{vw}$, $q_w w$ và $\overline{\theta_v w}$. Các đại lượng

này có thể được biểu diễn qua các số hạng của U, V, Q_w và L; với các phương trình khác và các mô tả chi tiết hơn được trình bày trong [4], [5], [6], [7].

Phương trình bảo toàn nồng độ chất ô

nhiệm được viết:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-w_c \right) + S \quad (9)$$

Trong đó thành phần rối ngang được bỏ qua, C là nồng độ chất ô nhiễm; S là nguồn phát thải. Thành phần thông lượng được $-w_c$ xử lý tương tự như thông lượng nhiệt rối [4], [8].

3. Miền tính, điều kiện biên và điều kiện ban đầu

Như đã nói ở trên, vấn đề lan truyền chất ô nhiễm trong lớp biên khí quyển ảnh hưởng rất lớn đến điều kiện sống của con người. Chất ô nhiễm có thể làm tổn hại nghiêm trọng hệ sinh thái, bao gồm cả động vật và thực vật. Vì vậy việc dự báo/mô phỏng lan truyền chất ô nhiễm trong các lớp dưới cùng của bầu khí quyển là rất quan trọng nhưng ở Việt Nam chưa có nhiều các nghiên cứu về vấn đề này, mặc dù có tính thực tiễn cao. Do vậy trong nghiên cứu lý tưởng hoá bước đầu này chúng tôi sử dụng một miền tính toán bao gồm $30 \times 21 \times 21$ điểm lưới theo hướng x , y và z tương ứng. Tâm miền tính được giả thiết đặt tại $21^{\circ}5'N-105^{\circ}7'E$. Bước lưới ngang là 0.020 kinh vĩ (2.22 km). Cấu hình lưới thẳng đứng có dạng logarith tuyến tính và mực trên cùng có độ cao khoảng 3 km so với mặt đất. Lưới thẳng đứng hướng xuống dưới đối với đất bao gồm 11 mực, độ sâu cực đại là $1m$, bảo đảm mô phỏng tốt các quá trình bề mặt.

Điều kiện ban đầu được giả thiết là đồng nhất theo phương ngang đối với tất cả các trường, trong đó trường gió có dạng loga và các trường khác được thiết lập tương tự như trong các nghiên cứu [1] và [6]. Trường gió tại mực trên cùng được cho là có tốc độ $10m/s$ với hướng tây - tây nam và được gán bằng không tại mặt đất. Nhiệt độ bề mặt đất

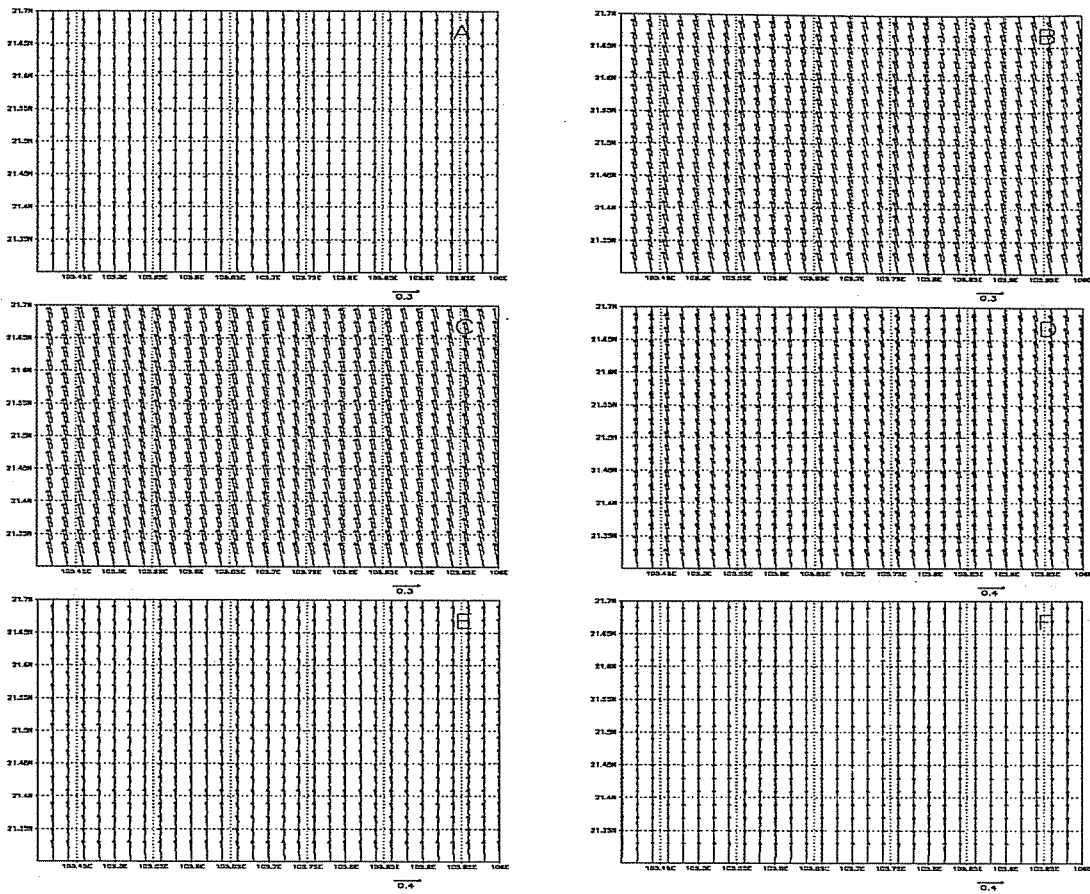
ban đầu là $250C$ và tăng xuống phía dưới tới $260C$ tại mực sâu nhất và được giữ không đổi theo thời gian. Các điều kiện biên xung quanh thực hiện trong mô hình là điều kiện biên phát xạ, giúp tránh được sự phản xạ của các nhiễu tính toán từ các khu vực biên bên vào trong tâm của miền tính [4]. Nồng độ chất ô nhiễm lúc đầu được cho bằng 0 . Nguồn điểm lý tưởng hoá được giả thiết đặt tại điểm có tọa độ trên lưới ngang tại điểm $(9, 5)$, độ cao $38,5$ m. Các giá trị nồng độ trên biên xung quanh được ngoại suy theo công thức, trong đó chỉ số 0 chỉ điểm biên, chỉ số $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$ -1 và -2 chỉ điểm cách biên 1 và 2 nút lưới. Tại đỉnh mô hình nồng độ được cho bằng 0 . Tại mặt đất, chất ô nhiễm không thấm nên [4].

Trong nghiên cứu này, sơ đồ sai phân hữu hạn là sơ đồ ẩn luân hướng (Alternative Direction Implicit - ADI), với sai phân tiến theo thời gian và sai phân trung tâm theo không gian. Mô hình bắt đầu tích phân lúc 7h theo giờ địa phương, ngày 20/8, và kết thúc sau 24 h tích phân. Như vậy thời gian tích phân là một ngày, với mục đích chủ yếu là nắm bắt các biến đổi có chu kỳ ngày đêm. Các kết quả thu được trong nghiên cứu này được thực hiện trên cơ sở phần mềm sẵn có dưới dạng mã nguồn bằng ngôn ngữ FORTRAN, tình huống mô phỏng và bài toán lan truyền chất ô nhiễm do các tác giả xây dựng.

4. Kết quả và nhận xét

a. Trường gió

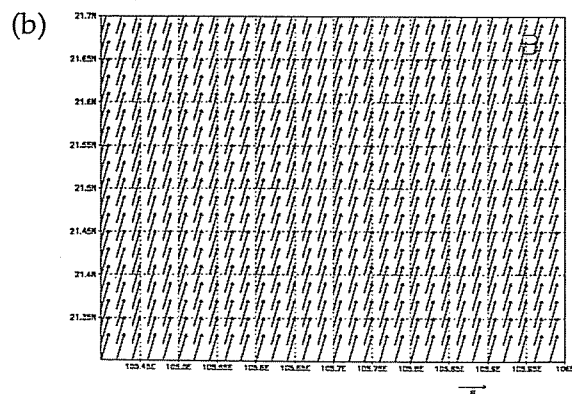
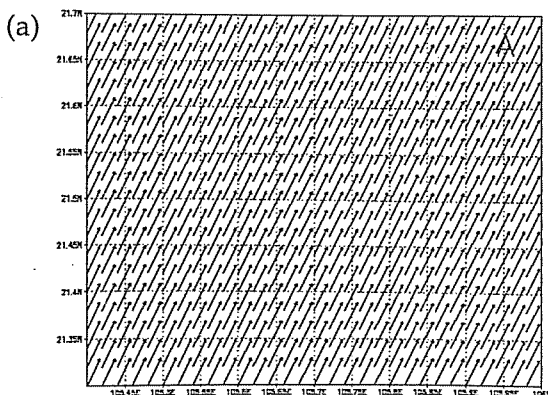
Như đã đề cập ở trên, tại thời điểm ban đầu, lúc 7h sáng giờ địa phương, trường gió được cho là tây-tây nam với vận tốc 10 m/s tại đỉnh mô hình. Sau 4, 8, 12, 16, 20 và 24 giờ tích phân, trường gió tại các độ cao $0,2$ m, $38,5$ m, và 102 m (tương ứng với các mực mô hình thứ 2, 10 và 11) được đưa ra trong Hình 1-3. Lưu ý rằng $38,5$ m là độ cao của nguồn điểm thải chất khí gây ô nhiễm.

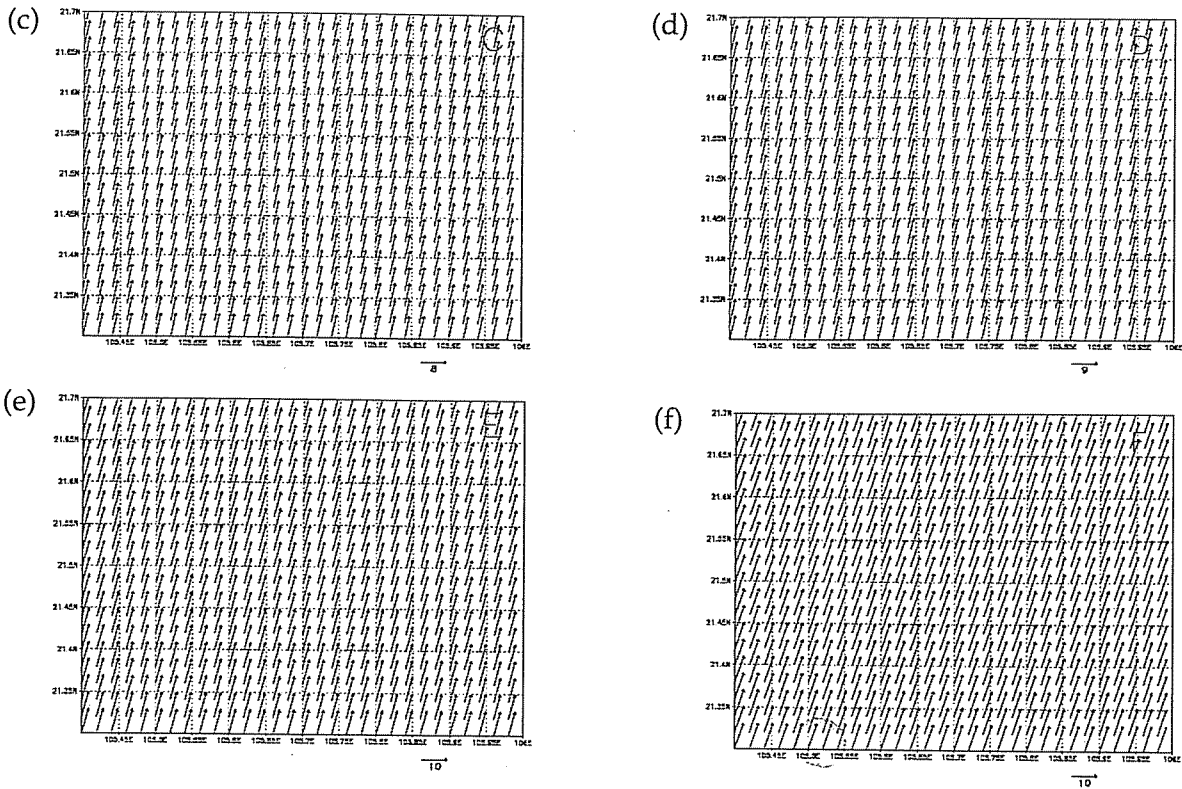


Hình 1. Trường gió tại độ cao 0,2 m sau 4 (a), 8 (b), 12 (c), 16 (d), 20 (e), và 24 (f) giờ tích phân.

Một nhận xét chung là gió tại các mực có tính đồng nhất rất cao theo phương ngang vì trong mô phỏng lý tưởng này các trường khí tượng được ban đầu hoá đồng nhất ngang trên khu vực có địa hình bằng phẳng. So sánh các hình 1, 2, 3 có thể thấy rằng theo độ cao gió trong lớp biên khí quyển quay

sang phải. Điều này phù hợp với các nghiên cứu lý thuyết cũng như các kết quả mô phỏng trường gió trong lớp biên của các tác giả khác trên thế giới. Cụ thể là, ở mặt đất gió gần như thịnh hành hướng nam (hình 1), nhưng đến độ cao 102 m gió đã có hướng tây nam (hình 3).

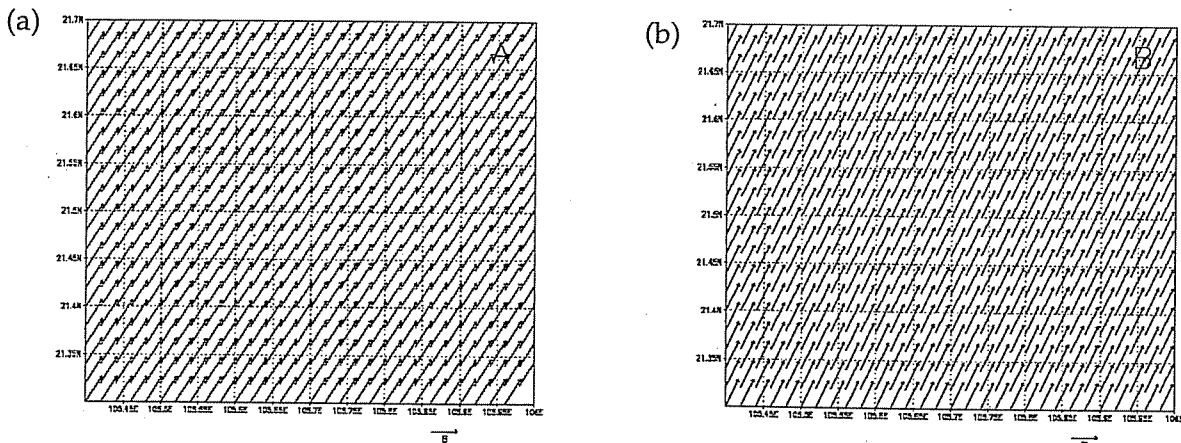


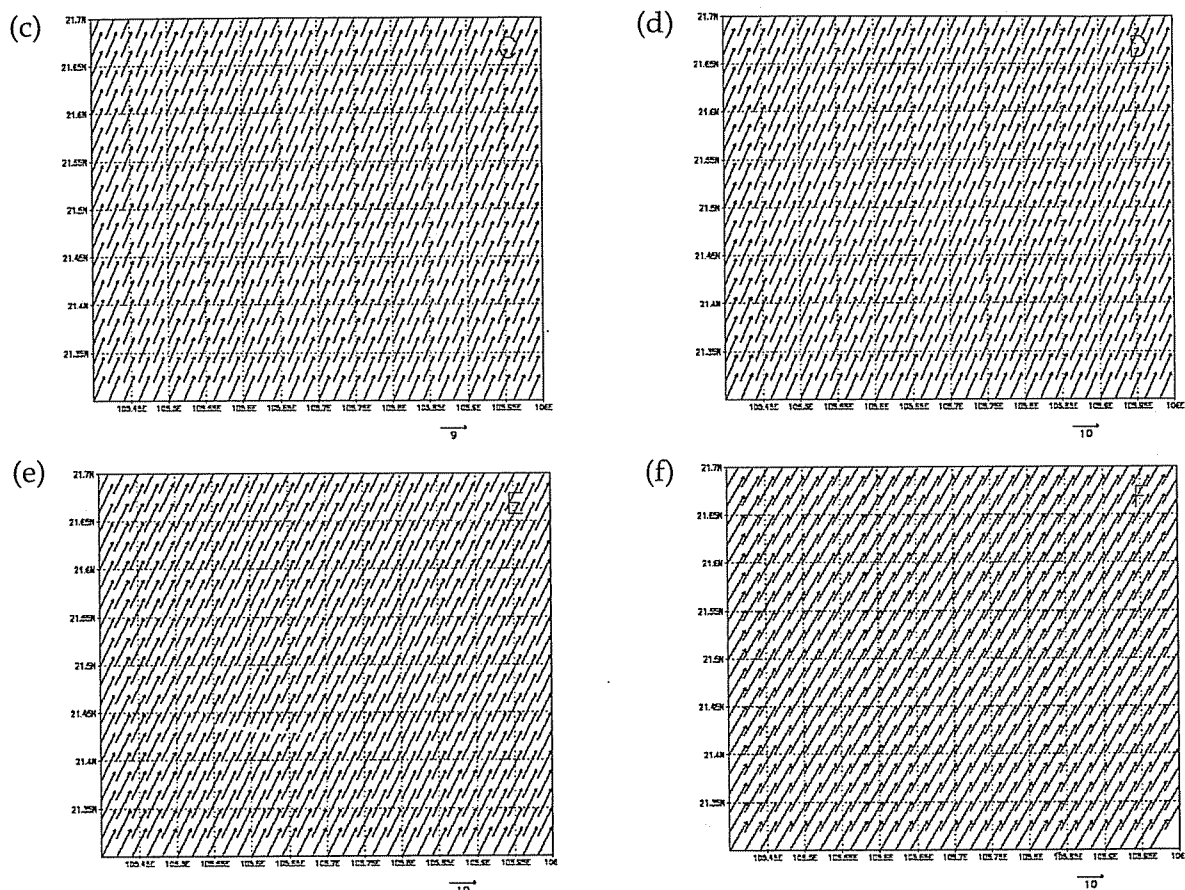


Hình 2. Giống Hình 1, ngoại trừ tại độ cao 38,5 m.

Tuy nhiên, nếu so sánh kỹ hơn có thể thấy từ mặt đất lên đến độ cao 38,5 m hướng gió thay đổi không nhiều so với lớp từ 38,5 m đến 102 m. Điều này cho thấy tính phân lớp khá rõ trong lớp biên khí quyển. Mức độ quay hướng gió theo độ cao cho thấy sự phụ thuộc vào thời gian và chu kỳ ngày đêm rõ ràng. Trong khi tại độ cao 0,2 m, gió được duy trì có hướng nam hầu như ổn định trong suốt thời gian tích phân (hình 1) thì tại độ

cao 38,5 m, sau 4 giờ tích phân (11 h giờ địa phương) trường gió lệch với gió mặt đất nhiều nhất (hình 2 A). Bắt đầu từ 15 đến 23 h giờ địa phương gió dần quay sang trái và trở lại gần như trùng với gió nam trên mặt đất (hình 2 B, C, D). Sang ngày hôm sau, gió bắt đầu quay sang phải một lần nữa và có dạng như trên hình 2 E, F. Kết quả tương tự cũng sẽ thấy cho độ cao 102 m (hình 3).

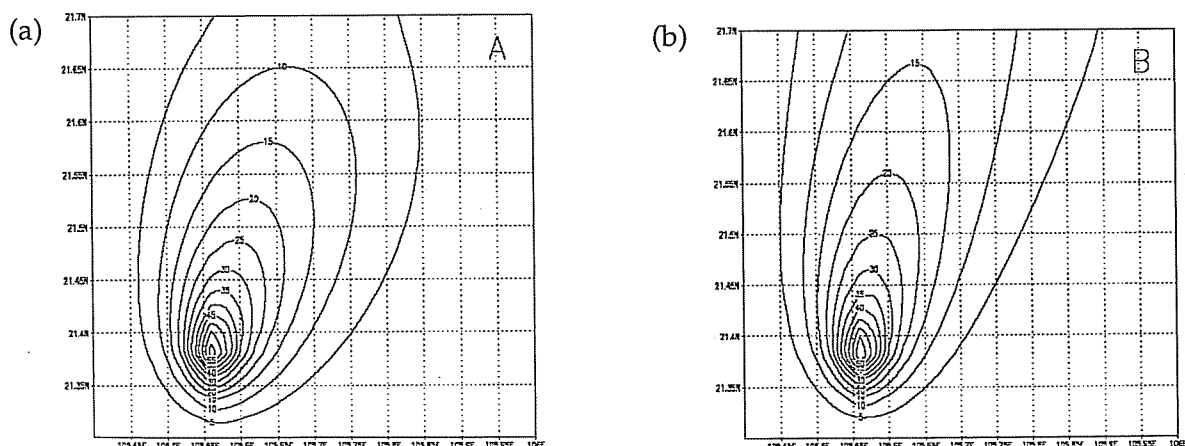


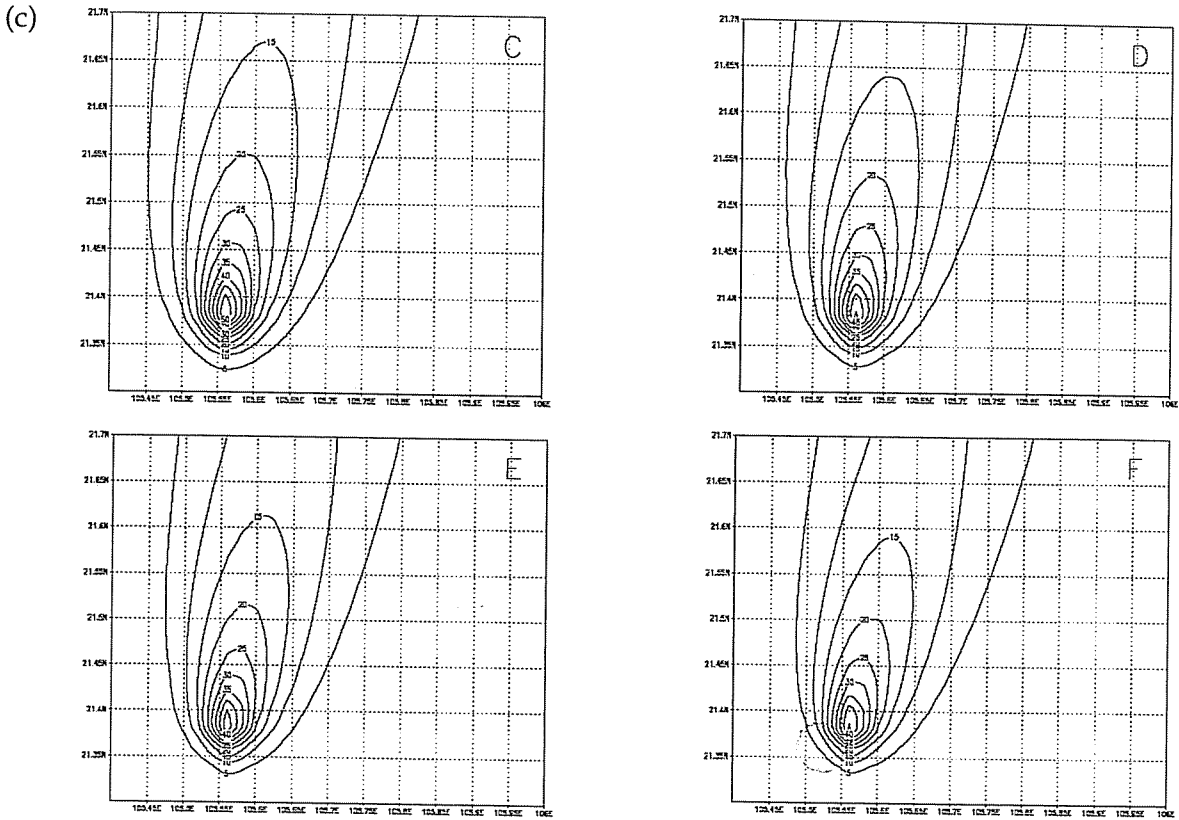


Hình 3. Giống Hình 1, ngoại trừ tại độ cao 102 m.

Về cường độ gió, gió có tốc độ yếu nhất vào buổi trưa (hình 1A, 2A, 3A) sau đó tăng dần cho đến 7 h sáng hôm sau. Như vậy, theo thời gian bức xạ mặt trời tiếp tục đốt nóng bề mặt đất dẫn đến nhiệt độ mặt đất tăng lên nhanh chóng và làm cho cường độ trao đổi rối trong các lớp không khí gần bề

mặt trở nên mạnh mẽ (hay nói cách khác là làm tăng tính bất ổn định do đốt nóng bề mặt). Điều này chính là nguyên nhân dẫn đến việc gió quay mạnh sang phải theo độ cao vào buổi trưa và có cường độ yếu nhất như đã thấy trên các hình 1, hình 2 và hình 3.



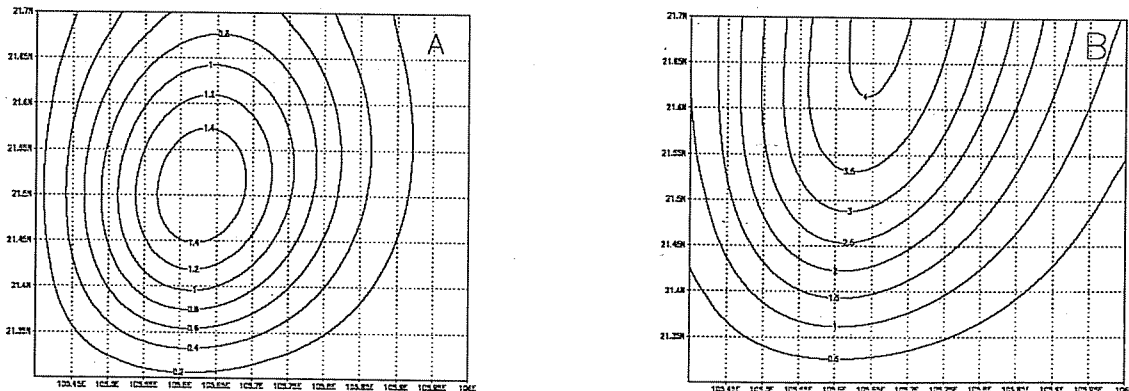


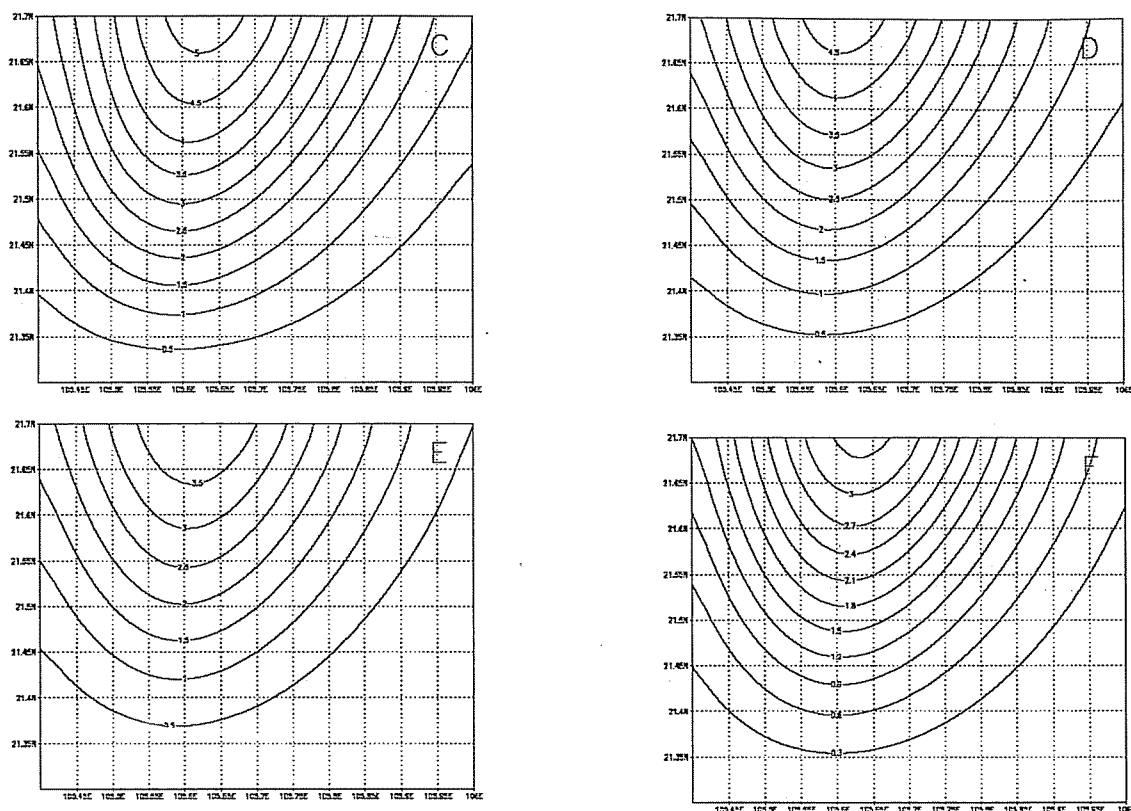
Hình 4. Trường nồng độ chất ô nhiễm tại độ cao 38,5 m sau 4 (a), 8 (b), 12 (c), 16 (d), 20 (e), và 24 (f) giờ tích phân.

b. Trường nồng độ

Trong nghiên cứu này nguồn phát thải S trong phương trình (8) được cho bằng 1 đơn vị nồng độ trong thời gian một giây, tương tự như trong [8]. Lưu ý rằng S không phải là tốc độ phát thải mà là tốc độ phát thải sao cho nồng độ chất ô nhiễm tại nguồn điểm tăng một đơn vị trong thời gian 1 s. Điều này có thể đồng nghĩa với giả thiết tốc độ phát thải tăng liên tục theo thời gian, trong thực tế

nguồn thường là hàm của thời gian, lúc tăng, lúc giảm. Tuy nhiên, vì khí gây ô nhiễm là nhẹ, hoàn toàn thụ động với môi trường khí, do vậy trong nghiên cứu lý tưởng hoá này các tác giả cho $S = 1$, tương tự trong [4], với mục tiêu lớn nhất là nghiên cứu khả năng mô phỏng lan truyền chất ô nhiễm trong lớp biên khí quyển sử dụng mô hình HOTMAC với phương trình bảo toàn nồng độ do tác giả đưa vào làm tăng tính ứng dụng của mô hình.

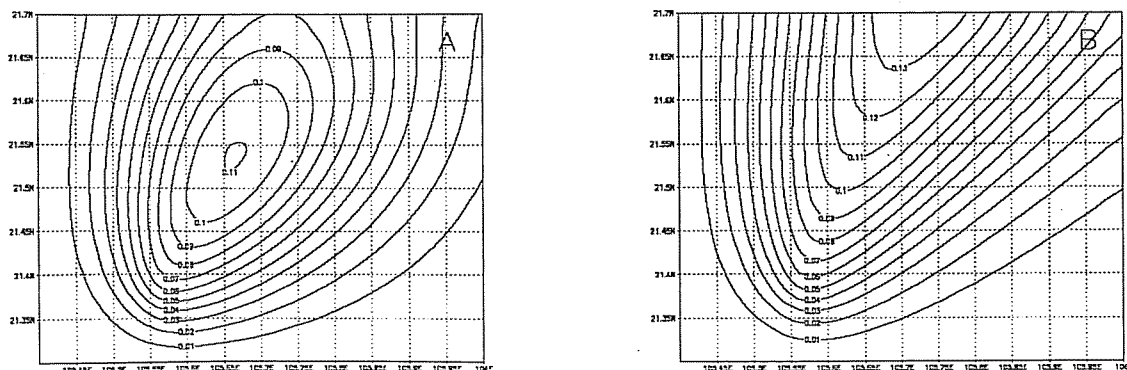


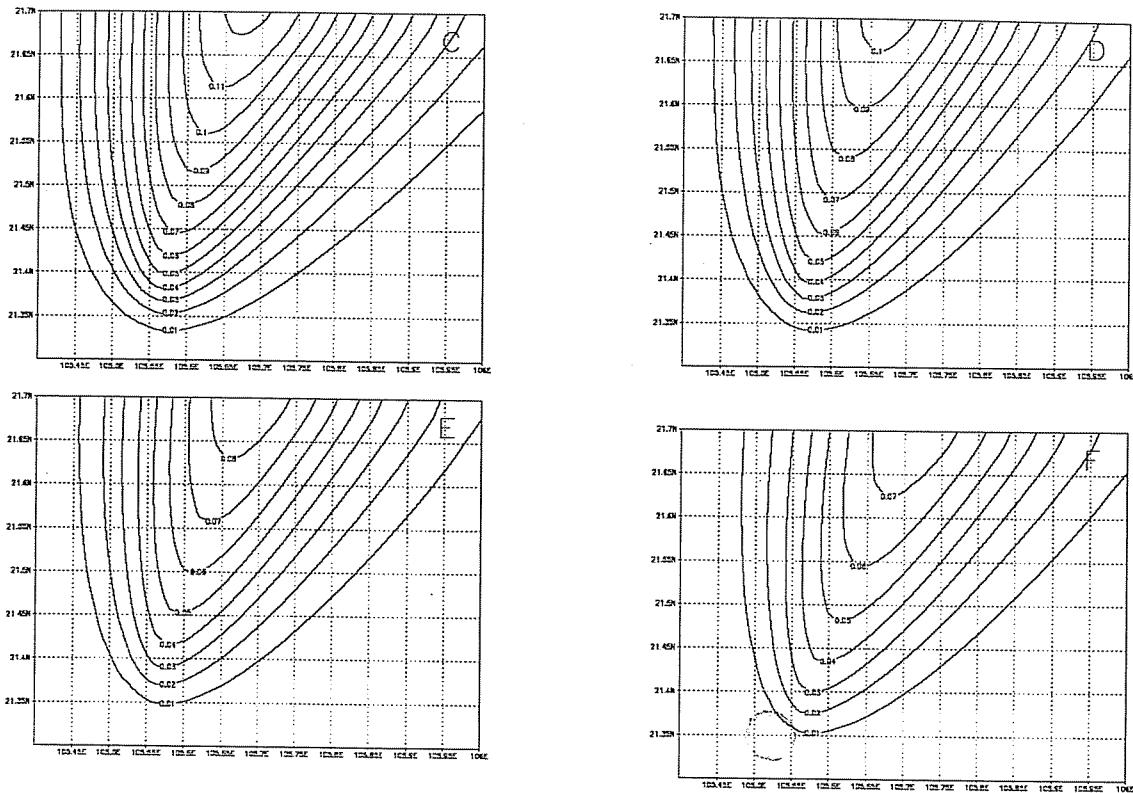


Hình 5. Giống Hình 4, ngoại trừ tại độ cao 0,2 m.

Trước hết hãy xem xét phân bố theo phương ngang của nồng độ chất ô nhiễm tại độ cao nguồn thải 38,5 m (hình 4). Vì thành phần nguồn dương liên tục theo thời gian ($S = 1$) do vậy nồng độ chất ô nhiễm tại đúng vị trí nguồn điểm phát thải có thể lên đến 60 đơn vị, có độ lớn tương đương với các kết quả thu được trong [8]. Theo hình 4, các đường đẳng nồng độ chất ô nhiễm kéo dài xuôi theo hướng gió. So sánh với hình 2 có thể thấy là trục của vùng có nồng độ cực đại trùng với hướng gió tại cùng thời điểm,

nghĩa là có sự dao động về hướng lan truyền chính theo chu kỳ ngày đêm. Điều này là hợp lý vì như đã nói chất ô nhiễm là thụ động so với dòng khí. Ngoài ra, vào buổi trưa khi tốc độ gió nhỏ nhất thì nồng độ tại nguồn là lớn nhất và các đường đẳng trị ít bị kéo dài nhất (hình 4A). Kết quả này là hợp lý vì khi tốc độ gió giảm đi thì vận chuyển chất ô nhiễm do bình lưu cũng phải giảm đi. Nói cách khác, vào ban đêm mức độ gây nguy hiểm do chất ô nhiễm tại các khu vực gần nguồn thải đã giảm đi.





Hình 6. Giống Hình 4, ngoại trừ tại độ cao 102 m.

Hình 5 mô tả phân bố nồng độ theo phương ngang trên mực sát mặt đất. Sự phù hợp với hướng gió dẫn tới hiện tượng trục của các khu vực có nồng độ cực đại nằm gần như theo hướng bắc-nam. Khi xuống đến mặt đất nồng độ giảm đi rất nhiều, cực đại chỉ còn khoảng 4-5 đơn vị. Sau 4 giờ tích phân phát hiện thấy một cực trị nồng độ tại điểm cách xa nguồn khoảng 13 km về phía bắc và lệch khoảng 8 km về phía đông của nguồn thải. Hiện tượng lệch đông này cho thấy vận chuyển thẳng đứng giữ vai trò thống trị trong quá trình lan truyền chất ô nhiễm xuống mặt đất vì như đã nói gió trong lớp sát mặt đất có hướng thịnh hành nam-bắc. Cùng với thời gian, điểm cực trị nồng độ dần di chuyển lên phía bắc và ổn định vị trí ở lân cận biên phía bắc của miền tính.

Lên đến độ cao 102 m, nồng độ chất ô nhiễm giảm đi rất nhiều (hình 6). Tuy nhiên có hai điều rất thú vị xuất hiện ở đây, đó là: 1, mặc dù gió ở độ cao này lớn và có hướng

rất khác so với các lớp sát mặt đất nhưng vị trí các cực đại nồng độ nằm gần trùng với các cực đại nồng độ gần mặt đất. Điều này tái khẳng định vai trò vận chuyển chất ô nhiễm theo chiều thẳng đứng trong lớp dưới độ cao nguồn phát thải. 2, Mặc dù vậy, ở các mực trên độ cao nguồn thải, trục của các khu vực có nồng độ cực đại nằm gần như trùng với hướng gió tại cùng thời điểm, thể hiện tính chu kỳ ngày đêm rõ rệt. Điều này phản ánh vai trò của bình lưu trên các độ cao lớn hơn độ cao nguồn thải.

5. Kết luận

Theo các kết quả mô phỏng số do HOT-MAC đưa ra trong phần 4, mặc dù chỉ là các mô phỏng lý tưởng hoá nhưng có thể kết luận rằng trong nghiên cứu này phương trình ba chiều bảo toàn nồng độ chất ô nhiễm nhẹ đã được đưa vào mô hình chủ và giải thành công đồng thời cùng với các phương trình bảo toàn khác mô tả lớp biên khí quyển, sử

dụng thuật toán ADI.

Về mặt trực giác vật lý cho thấy mô hình được phát triển trong bài báo này có thể mô phỏng tốt quá trình ba chiều vận chuyển chất ô nhiễm nhẹ gây ra bởi một nguồn điểm trong lớp biên khí quyển. Cụ thể, độ cao lớn nhất mà nguồn thải lý tưởng hoá vẫn thể hiện tác động của nó vào khoảng trên 100m, tương đương với độ cao mà các nhà khí tượng học trên thế giới gọi là "lớp bề mặt". Điểm nồng độ cực đại tại các lớp sát mặt đất và đỉnh lớp bề mặt có thể cách xa vị trí nguồn thải hàng chục km xuôi theo chiều gió.

Mặc dù gió ở đỉnh lớp bề mặt lớn và có hướng rất khác so với các lớp sát bề mặt nhưng vị trí các cực đại nồng độ nằm gần

trùng với các cực đại nồng độ gần mặt đất. Kết quả này chỉ giải thích được nhờ vận chuyển chất ô nhiễm theo chiều thẳng đứng trong lớp dưới độ cao nguồn phát thải. Tuy nhiên, ở các mực trên độ cao nguồn thải, trục của các khu vực có nồng độ cực đại nằm gần như trùng với hướng gió tại cùng thời điểm và cho thấy chu kỳ ngày đêm rõ rệt. Điều này phản ánh vai trò của bình lưu trên các độ cao lớn hơn độ cao nguồn thải.

Cuối cùng, các kết quả của mô hình đã thể hiện ý nghĩa thực tiễn đáng kể và hoàn toàn có thể áp dụng cho các nguồn phát thải điểm tại các khu công nghiệp. Khi đó thành phần nguồn S trong phương trình (8), ví dụ đối với một ống khói, sẽ phụ thuộc vào đường kính ống khói, tốc độ phụt và nhiệt độ khí phát thải...

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Minh Trường và Vũ Thanh Hằng, *Nghiên cứu ảnh hưởng của hồ nước lớn đến điều kiện nhiệt động lực học địa phương bằng phương pháp số*. Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 559 (2007) 43- 48.
2. Pielke Roger A.. *Mesoscale Meteorological Modeling*. (2001). Academic Press.
3. Stull Roland B.. *Boundary Layer Meteorology*. (1988). Kluwer Academic Publishers.
4. Yamada T., *A Numerical Experiment on Pollutant Dispersion in a Horizontally-Homogeneous Atmospheric Boundary Layer*. Atmos. Environ., 11 (1977) 1015-1024.
5. Yamada T.. *A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forest Canopy*. J. Meteo. Soc. of Japan, 60 (1982) 439-454.
6. Yamada T., *Simulations of Nocturnal Drainage Flows by a q2l Turbulent Closure Model*. J. Atmos. Sci., 40 (1983) 91-106.
7. Yamada T., and S. Bunker, *A Numerical Model Study of Nocturnal Drainage Flow with Strong Wind and Temperature Gradient*. J. Appl. Meteor., 28 (1989) 545- 554.
8. Yamada T., Chih-Yue J. Kao and S. Bunker, *Airflow and Air Quality Simulation over The Western Mountainous Region with a Four-Dimensional Data Assimilation Technique*. Atmos. Environ., 23 (1989) 539- 554.