

MÔ PHỎNG ĐƠN GIẢN HÓA QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI CO₂ BIỂN-KHÍ DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA SẮT

Bùi Thị Ngọc Oanh, Nguyễn Thị Bích Lại
Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia TP. HCM

Tóm tắt Sắt là một trong các nguyên tố vi lượng giới hạn năng suất sơ cấp ở các vùng giàu dinh dưỡng. Nguồn sắt sẵn có đối với thực vật phù du trong nước biển có liên quan đến sự hấp thụ cacbon đioxit (CO₂) vào đại dương và sự nhả khí CO₂ ra khỏi đại dương đi vào khí quyển. Trong giới hạn bài báo này, mô phỏng quá trình trao đổi CO₂ đi ngang qua mặt phân cách biển-khí khi có sự hiện diện của thông lượng sắt do gió bằng phần mềm STELLA (phiên bản 9.0.2). Kết quả chủ yếu phân tích áp suất riêng pCO₂ trong khí quyển và bề mặt đại dương khi thay đổi thông lượng sắt do gió đi vào bề mặt đại dương. Từ sự chênh lệch áp suất riêng pCO₂, đánh giá thông lượng đi ngang qua mặt phân cách CO₂ biển-khí.

SIMPLIFIED SIMULATION OF CO₂ ACROSS AIR-SEA EXCHANGE WITH THE PRESENCE OF IRON

Bui Thi Ngoc Oanh, Nguyen Thi Bich Lai
University of Science, Vietnam National University – Ho Chi Minh City

Abstract Iron is one of trace elements causing the limit of the primary productivity in eutrophic waters. The available iron for phytoplankton is related to the uptake of carbon dioxide into the ocean and the release of carbon dioxide back into the atmosphere. In term of this paper, the exchanged processes of CO₂ across air-sea interface with the presence of aeolian flux of iron by using STELLA software (version 9.0.2) was simulated. pCO₂ in atmosphere and ocean surface when changing the aeolian iron flux put into the ocean surface was analyzed. Consequently, the CO₂ flux across the air-sea interface was calculated from the difference of the partial pressure of CO₂ in the atmosphere and the ocean.

I. MỞ ĐẦU

Sự chuyển động theo phương thẳng đứng ở trong đại dương và khí quyển diễn ra mạnh mẽ khi ở gần bề mặt giao diện biển-khí. Sự trao đổi khí qua mặt phân cách có vai trò rất quan trọng đối với các bể lưu trữ (factory) trong đại dương - khí quyển - vỏ trái đất, riêng sự thay đổi khí hậu có tác động một cách gián tiếp đến các quy luật trao đổi khí ở mặt phân cách trong đại dương. Đại dương như là nguồn tiêu thụ các chất khí

nhà kính như là hấp thụ khí (CO₂, mê tan và ôzôn) từ khí quyển và cũng là nguồn cung cấp khí như quá trình thoát khí (CO₂, DMS) từ đại dương vào khí quyển (Susan, 2009). Bên cạnh đó, đại dương hấp thụ khoảng 30% lượng CO₂ khí thải trong khí quyển có nguồn gốc từ các hoạt động của con người như đốt cháy nhiên liệu hóa thạch, sản xuất xi măng, sử dụng đất. Đại dương hấp thụ nguồn khí CO₂ này vào nước làm ảnh hưởng đến cân bằng hóa học trong nước, cụ thể làm suy giảm pH nước biển và trạng

thái bão hòa đối với khoáng cacbonat canxi trong giai đoạn axit hóa đại dương. Qua thời gian hàng chục năm, tốc độ hấp thụ CO₂ trong đại dương thay đổi, điều này dẫn đến sự thay đổi bề chứa CO₂ trong đại dương và sự tác động của axit hóa đại dương có vai trò quan trọng đối với dự báo thay đổi khí hậu và sự đáp ứng hệ sinh thái biển (Bates và cs., 2012). Nhưng hiện nay và trong thời gian tới nồng độ CO₂ khí quyển vẫn tiếp tục gia tăng nhanh so với sự đáp ứng của đại dương. Điều này làm cho khả năng hấp thụ của đại dương giảm, dẫn đến pH đại dương giảm. Do đó, đại dương cần được gia tăng lượng sắt để kích thích quá trình quang hợp của tảo và vi sinh vật ở gần bề mặt nước để tăng khả năng hấp thụ CO₂ của đại dương từ khí quyển đối với các vùng dinh dưỡng cao chlorophyll thấp (HNLC) như phần lớn đại dương phía nam, vùng phía đông Thái Bình Dương xích đạo và một phần ở Bắc Thái Bình Dương (Cao Long và Caldeira Ken, 2010). Trong phạm vi bài báo, nhóm tác giả chỉ đề cập đến một số kết quả về áp suất riêng phần CO₂ ở khí

quyển, bề mặt đại dương và thông lượng trao đổi CO₂ tại mặt phân cách biển-khí khi thay đổi thông lượng sắt do gió ở vùng có chất dinh dưỡng cao, chlorophyll thấp (HNLC).


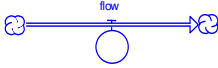


II. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TRAO ĐỔI BIỂN – KHÍ BẰNG PHẦN MỀM STELLA

1. Giới thiệu phần mềm STELLA

STELLA là công cụ phần mềm để xây dựng mô hình động lực hệ thống. Mô hình này được viết trên hai hệ điều hành Windows và Macintosh, là hai giao diện thân thiện với người sử dụng. Mô hình cung cấp cho người sử dụng bốn thành phần cơ bản: bể chứa, quá trình, chuyển hóa và mối liên hệ để xây dựng mô hình động lực hệ thống hoàn chỉnh (Bảng 1). Phần mềm STELLA được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: chu trình vật chất, sinh thái - môi trường, ô nhiễm nguồn nước, biến đổi khí hậu, quản lý nguồn nước,... (Deaton và cs., 2000).

Bảng 1. Các thành phần cơ bản trong phần mềm STELLA (Deaton và cs., 2000)

Table 1. The basic components in the software STELLA (Deaton et al., 2000)

Tên	Mô tả	Biểu tượng
Bể chứa (Reservoirs)	Thành phần của hệ thống nơi quá trình tích lũy lại và lượng chứa này tăng hoặc giảm theo thời gian.	
Quá trình (Processes)	Hoạt động của quá trình này nhằm xác định giá trị bể chứa theo thời gian.	
Chuyển hóa (Converters)	Đưa ra tốc độ thay đổi quá trình và bể chứa.	
Mối quan hệ (Interrelationships)	Xác định nguyên nhân – hệ quả giữa các thành phần của hệ thống.	

2. Mô hình hóa và liên kết các chu trình chính

2.1. Mô hình hóa

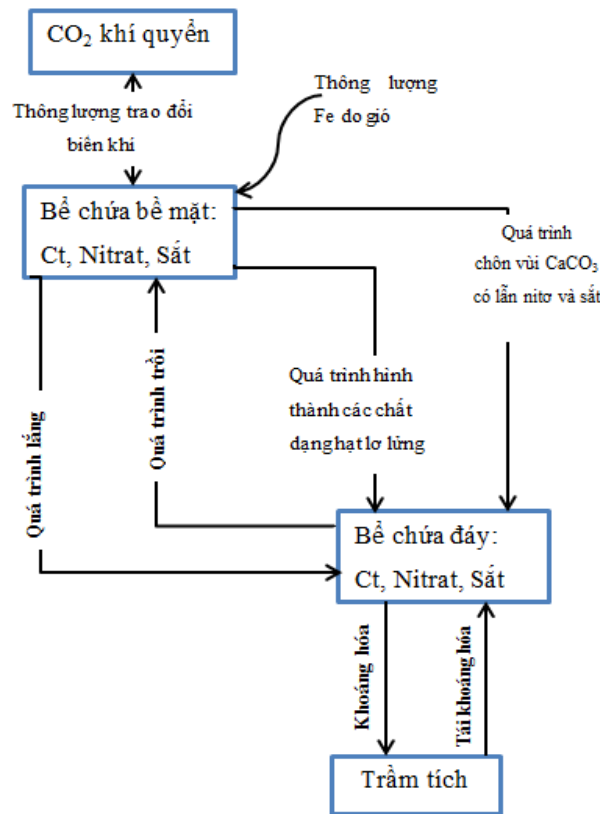
Sử dụng phần mềm STELLA để xây dựng mô hình một chiều theo thời gian, để liên

kết các chu trình đơn giản của cacbon, nitrat (NO_3^-) và sắt lại với nhau. Đối với từng chất riêng biệt, được thiết lập theo sơ đồ trong Hình 1, với mô hình 3 hộp ở tầng mặt, tầng đáy và trầm tích. Đặc biệt đối với

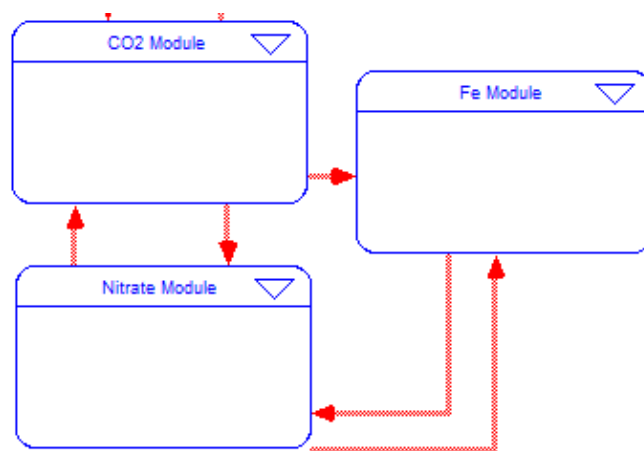
chu trình cacbon, xét thêm một hộp trong khí quyển để mô tả quá trình trao đổi CO₂ tại mặt phân cách biển-khí. Việc bổ sung sắt trực tiếp vào bể chứa sắt bề mặt được thể hiện qua quá trình chuyển tải sắt do gió. Ba chu trình chính cacbon, nitrat và sắt được liên kết, chuyển hóa qua lại với nhau (Hình 2a).

Mô hình tính cơ bản của cacbon (Hình 2b), và tương tự đối với chu trình của nitrat và sắt.

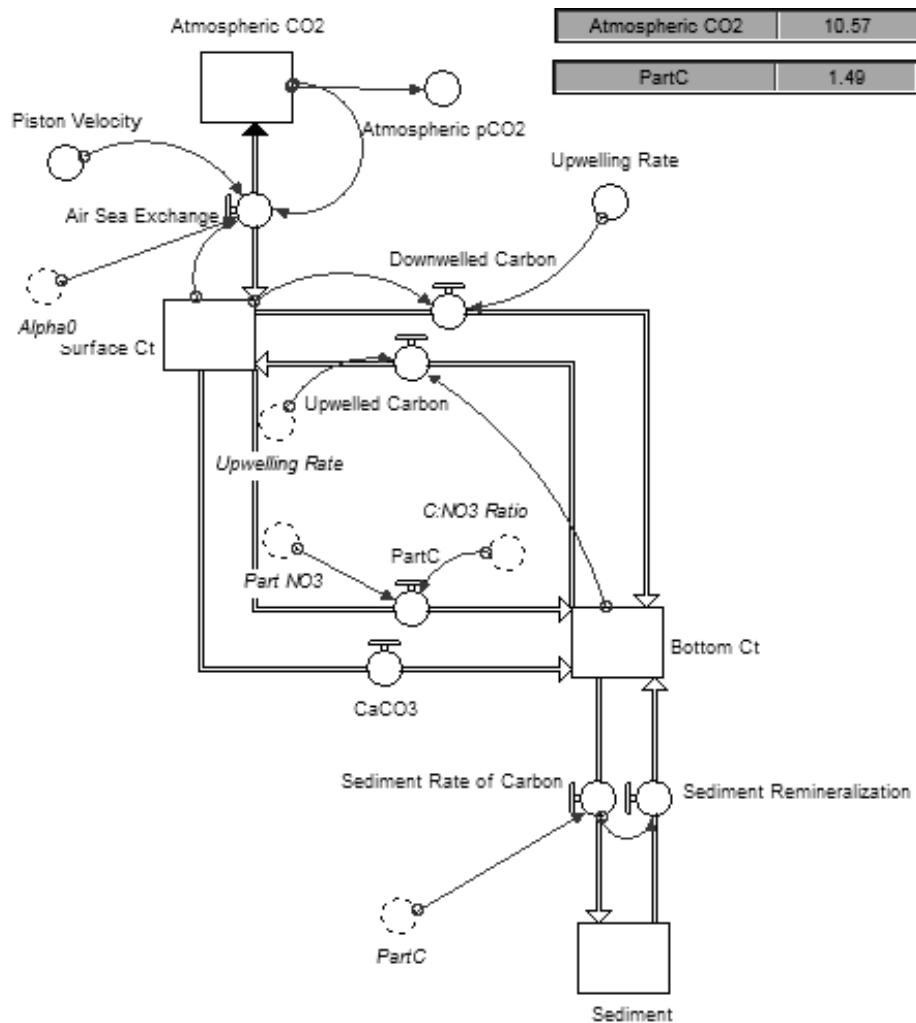
Trong bài báo này chỉ xét quá trình liên kết giữa các module của cacbon, nitrat và sắt là các quá trình lắng đọng vật chất hữu cơ dạng hạt từ bề mặt đại dương xuống đáy.



Hình 1. Sơ đồ tổng quát mô hình chu trình cacbon, nitrat và sắt
Figure 1. The general diagram of cycle model of carbon, nitrate and iron



Hình 2a. Mối liên hệ giữa các mô hình bằng phần mềm STELLA
Figure 2a. The relationship between the models by software STELLA



Hình 2b. Module chu trình cacbon bằng phần mềm STELLA
Figure 2b. Module of carbon cycle by software STELLA

2.2. Các công thức chính trong mô hình

a. Công thức chung cho các bể chứa

Phương trình mô tả công thức chung cho các bể chứa trong toàn mô hình:

$$\frac{dA}{dt} = A_0 + \sum \text{Dòng vào} - \sum \text{Dòng ra}$$

với:

A: bể chứa của vật chất theo thời gian;

A₀: bể chứa của vật chất tại thời điểm ban đầu t = 0;

b. Thông lượng trao đổi khí qua mặt phân cách biên-khí

Thông lượng trao đổi CO₂ qua mặt phân cách được tính:

$$F = \tau (pCO_{2 \text{ atm}} - pCO_{2 \text{ ocean}})$$

với:

pCO_{2 atm}: áp suất riêng phần CO₂ khí quyển (atm); pCO_{2 ocean}: Áp suất riêng phần CO₂ bề mặt biển; τ : vận tốc chuyển tải hay hệ số trao đổi khí (m/s); F: thông lượng chuyển tải CO₂ ngang qua mặt phân cách (mol/(m².s)).

- Nếu (pCO_{2 atm} - pCO_{2 ocean}) tăng lên, thì dòng tăng, tức lượng CO₂ từ bề mặt đại dương thoát ra chiếm ưu thế.

- Nếu (pCO_{2 atm} - pCO_{2 ocean}) giảm thì dòng giảm, tức quá trình hấp thụ CO₂ từ khí quyển vào đại dương chiếm ưu thế.

- Nếu (pCO_{2 atm} - pCO_{2 ocean}) đảo chiều thì dòng cũng sẽ đảo chiều. Giữa hấp thụ và thoát khí CO₂ luôn xảy ra song song với nhau nhưng tùy vào môi trường xung quanh sẽ cho quá trình nào chiếm ưu thế hơn.

c. Các quá trình lắng đọng hóa học, sinh học, vật lý

- Lắng đọng hóa học (CaCO₃): là hằng số cố định trong suốt thời gian xem xét.

- Lắng đọng cacbon dạng hạt = Part_NO3*C:NO3_Ratio

với:

part_NO3: lượng nitrat lắng đọng dạng hạt; C:NO3_ratio: theo tỉ lệ Redfielf (C:N=106:16). Tương tự với quá trình lắng đọng dạng hạt của sắt và nitrat.

- Tốc độ hấp thụ nitrat khi có ảnh hưởng của sắt (V_{NO3}) (theo định luật Michaelis - Menten)

$$V_{NO3} = V_{max_N} * Conc_of_Surface_Fe / (Ks_Fe + Conc_of_Surface_Fe)$$

với:

V_{max_N}: tốc độ hấp thụ cực đại, Conc_of_Surface_Fe: nồng độ của sắt trong đại dương bề mặt, ks_Fe: tốc độ hấp thụ bán bão hòa khi V_{NO3}=1/2 V_{max}.

- Quá trình trôi và chìm có cùng tốc độ, ở đây giả sử thông lượng vật chất trôi lên bằng với thông lượng chìm xuống dưới sâu.

Các công thức này dùng chung cho cả 3 module.

$$Upwelled_Carbon = (Bottom_Ct/3400) * Upwelling_Rate$$

$$Downwelled_Carbon = (Surface_Ct/100) * Upwelling_Rate$$

với:

upwelling_rate: tốc độ trôi lên của vật chất = tốc độ chìm xuống của vật chất

Còn một số quá trình khác như tái khoáng hóa, chôn vùi vào trầm tích được giả sử với tốc độ cố định theo thời gian.

3. Số liệu đầu vào cho các bể chứa và các giả định cho mô hình

Đối với mô hình mô phỏng này, các giá trị ban đầu được đưa vào như trong Bảng 2. Với các giả định: tỷ lệ trôi lắng, độ tan, vận tốc hấp thụ τ ($\tau = 3e3$), tỷ lệ C:N:Fe và thống kê chất dinh dưỡng trong đại dương là hằng số; quá trình chôn vùi vật chất bằng 1% thông lượng vật chất đến đại dương sâu. Các số liệu ban đầu cho các bể chứa được lấy theo công trình của Broecker và Peng (Ruth, 2002).

Bảng 2. Số liệu đầu vào cho các bể chứa trong mô hình

Table 2. The input data for reservoirs in the model

	Module cacbon	Module nitơ	Module sắt
Khí quyển	[CO ₂]: 10,9 μ M/m ³ pCO ₂ : 344,94 (ppm)		
Bề mặt	219 (mol/100 m ³)	1,2 (mol/100 m ³)	2,6E-6 (mol/100 m ³)
Đáy	7.854 (mol/3.400 m ³)	102 mol/3.400 m ³	4,08E-6 (mol/3.400 m ³)
Trầm tích	0.44 (mol/m ³)	0,07 (mol/m ³)	0 (mol/m ³)

III. KẾT QUẢ VÀ NHẬN XÉT

Trong giới hạn bài báo xét sự thay đổi của thông lượng sắt do gió ban đầu đi vào mô hình có ảnh hưởng như thế nào đến sự trao đổi khí ở mặt phân cách, áp suất riêng pCO₂ trong khí quyển và bề mặt đại dương có xu hướng như thế nào khi thay đổi các trường hợp sau:

- Trường hợp 1: chạy mô phỏng khi không có ảnh hưởng của thông lượng sắt do gió vào mô hình.

- Trường hợp 2: chạy mô phỏng với số liệu đầu vào, có thông lượng sắt do gió là 2.048835e-7 mol/100 m³.

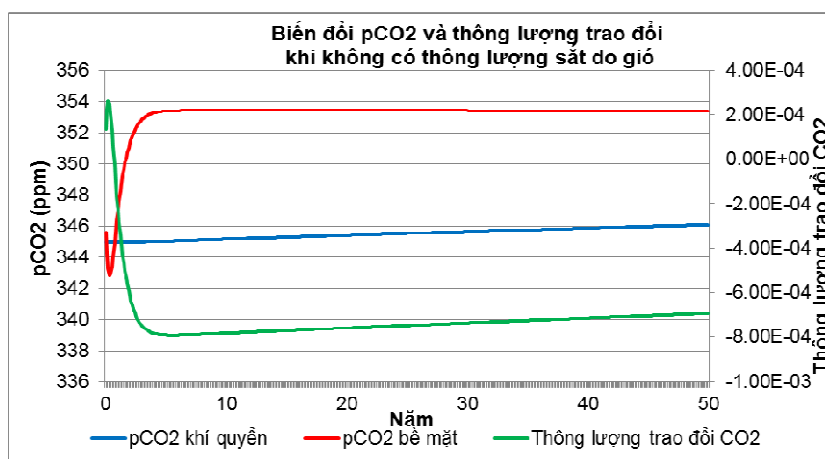
- Trường hợp 3: chạy mô phỏng khi tăng thông lượng sắt do gió lên 2 lần, 4 lần, 8 lần và 16 lần so với thông lượng sắt ban đầu.

Thời gian mô phỏng là 3.000 năm để xét sự biến đổi của CO₂ có đạt trạng thái cân bằng mới hay vẫn tiếp tục thay đổi với điều kiện đang xét.

1. Trường hợp 1: Không có ảnh hưởng của thông lượng sắt do gió

Khi không có thông lượng sắt do gió kết quả cho thấy, nồng độ CO₂ trong đại dương bề mặt (353.39 ppm) cao hơn so với nồng độ CO₂ trong khí quyển (349 ppm) tại t = 3

năm. Và sau hơn 1.000 năm, thì áp suất riêng CO₂ giữa bề mặt và khí quyển đạt cân bằng (353.28 ppm). Thông lượng trao đổi khí (*Air-sea Exchange*) ở trong khoảng thời gian t = 3 năm, thông lượng trao đổi khí giảm hay đại dương hấp thụ CO₂ và sau đó thông lượng này có xu hướng tăng (Hình 3) tức là đại dương thoát khí giảm từ từ và đạt trạng thái cân bằng.



Hình 3. Biến đổi thông lượng trao đổi và áp suất riêng phần CO₂ bề mặt và khí quyển khi không có thông lượng sắt do gió

Figure 3. The change of exchanged flux and pCO₂ at ocean surface and atmosphere without presence of the aeolian iron flux

2. Trường hợp 2: Thông lượng sắt do gió theo số liệu đầu vào

Với thông lượng sắt do gió ban đầu là 2.048835e-7 mol/100 m³, kết quả cho thấy áp suất riêng phần CO₂ (pCO₂) khí quyển và bề mặt đều tăng. Tại t = 3.000 năm, cả pCO₂ khí quyển và bề mặt đều đạt 349.36 ppm, giá trị này thấp hơn khoảng 4 ppm so với trong trường hợp 1 và đạt trạng thái cân bằng động giữa bề mặt và khí quyển. Thông lượng trao đổi CO₂ trong khoảng thời gian chạy mô hình tăng, tức là đại dương có xu hướng thoát khí CO₂ ra khí quyển để đạt trạng thái cân bằng động mới (Hình 4). Trong trường hợp 2, rõ ràng ta thấy sau khi có sự hiện diện của sắt tại thời điểm ban đầu, đã góp phần làm giảm nồng độ CO₂ ở bề mặt và trong khí quyển. Do khi có sự hiện diện của sắt đã kích thích gia tăng quá

trình quang hợp của sinh vật trong đại dương nên nồng độ CO₂ trong đại dương giảm, làm tăng thông lượng khí được đại dương hấp thụ, giúp làm giảm nồng độ CO₂ khí quyển.

3. Trường hợp 3: Tăng thông lượng sắt do gió

3.1. Áp suất riêng phần CO₂ trong khí quyển

Khi tăng thông lượng sắt do gió, kết quả được biểu hiện trong Hình 5, cho thấy:

- Tăng thông lượng Fe do gió gấp 2 lần (đường 2) so với ban đầu, áp suất riêng pCO₂ khí quyển tăng chậm. Tại thời điểm t = 3.000 năm, pCO₂ khí quyển giảm 1,54 ppm so với trường hợp giữ nguyên Fe ban đầu (đường 1).

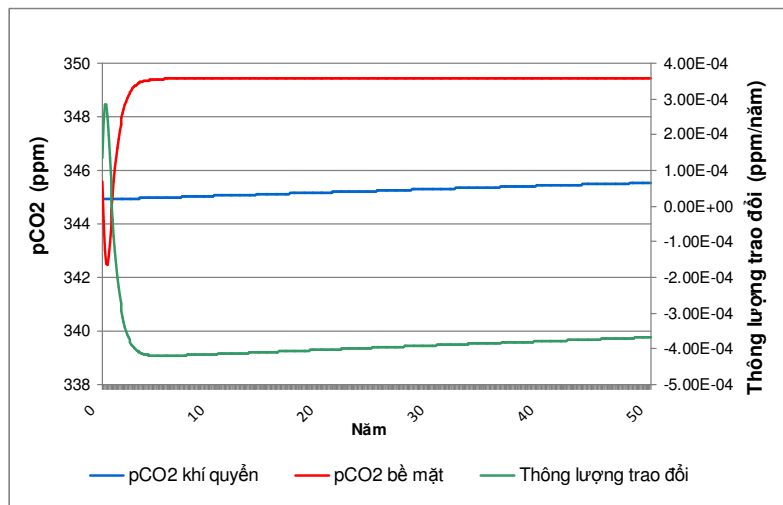
- Tăng thông lượng sắt lên 4 lần (đường 3) thì $p\text{CO}_2$ khí quyển biến đổi rất nhỏ. Nhưng nếu so với đường 1 thì $p\text{CO}_2$ giảm đáng kể, giảm 4,25 ppm tại $t = 3.000$ năm.

- Khi tăng Fe lên 8 lần (đường 4) và 16 lần (đường 5) so với ban đầu: $p\text{CO}_2$ khí quyển giảm.

Kết quả từ mô hình cho thấy, việc tăng thông lượng Fe do gió làm giảm áp suất riêng phần CO_2 khí quyển thông qua quá trình hấp thụ CO_2 vào đại dương. Trong mô

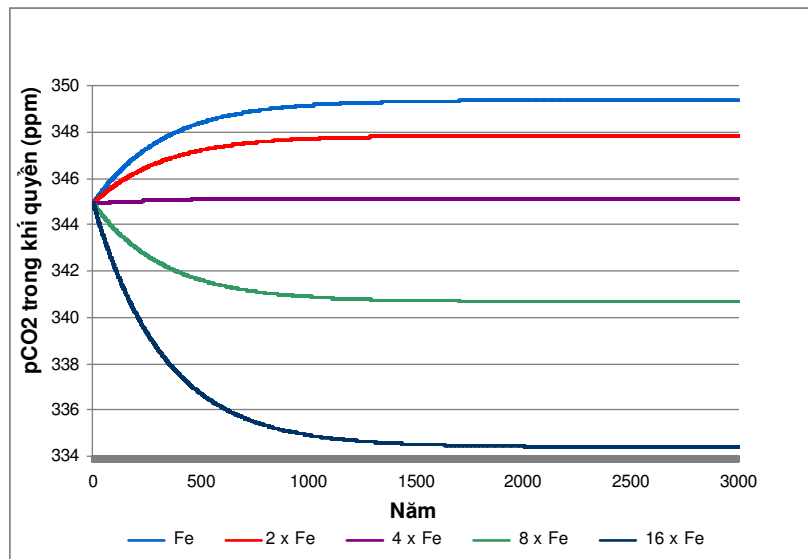
hình, quá trình hấp thụ này chủ yếu dựa vào quá trình quang hợp của sinh vật tự dưỡng trong đại dương. Áp suất riêng phần $p\text{CO}_2$ khí quyển tại $t = 3.000$ năm lần lượt là: 349,38 ppm, 347,84 ppm, 345,13 ppm, 340,68 ppm, và 334,41 ppm.

Sự chênh lệch áp suất riêng CO_2 khí quyển tại 750 năm và 3.000 năm với thời điểm $t=0$ là không nhiều. Do $p\text{CO}_2$ khí quyển đã dần đạt trạng thái cân bằng với $p\text{CO}_2$ bề mặt.



Hình 4. Biến đổi thông lượng trao đổi và áp suất riêng phần CO_2 bề mặt với thông lượng sắt do gió ban đầu trong 50 năm đầu

Figure 4. The change of exchanged flux and $p\text{CO}_2$ at ocean surface with presence of the aeolian iron flux in the first 50 years



Hình 5. Sự biến đổi áp suất riêng phần CO_2 khí quyển khi thay đổi thông lượng Fe do gió tác động

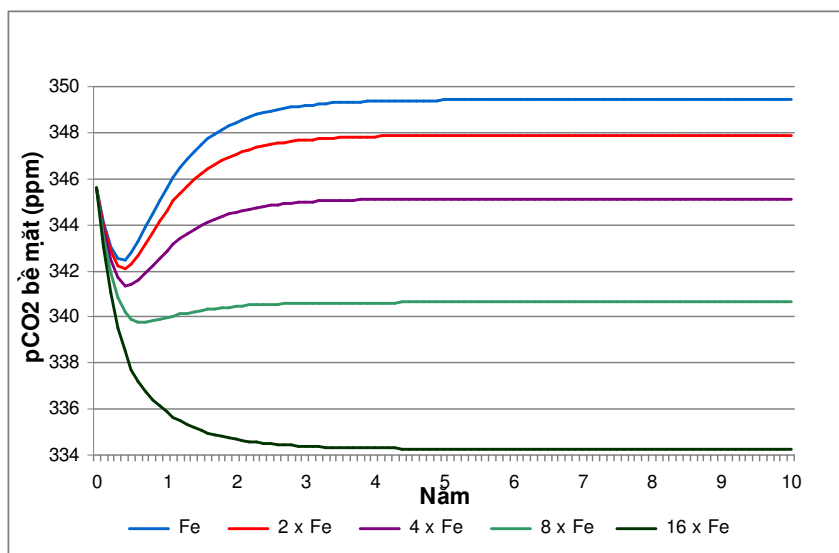
Figure 5. The change of $p\text{CO}_2$ at atmosphere when changing the aeolian iron flux

3.2. Áp suất riêng phần CO₂ bề mặt

Nhìn chung, khi tăng thông lượng sắt do gió đã làm giảm pCO₂ bề mặt (Hình 6) và nhanh chóng đạt trạng thái cân bằng động trong khoảng 10 năm. Do pCO₂ bề mặt phụ thuộc vào nồng độ cacbon vô cơ bề mặt (nồng độ của từng tiểu phần ($\text{CO}_2(\text{aq}), \text{H}_2\text{CO}_3, \text{HCO}_3^-, \text{CO}_3^{2-}$)) và với nhiều yếu tố khác như nhiệt độ, độ muối, độ tan... và môi trường tác qua lại giữa bề mặt biển và khí quyển.

Khi tăng thông lượng sắt do gió lên làm tăng khả năng quang hợp của thực vật nổi, tức là cacbon vô cơ bề mặt giảm và dẫn đến một lượng CO₂ từ khí quyển được đại dương hấp thụ và tạo ra dạng hợp chất dạng hạt lơ lửng. Lúc này, khi lượng CO₂ đại

dương giảm dẫn đến trường hợp: khí CO₂ từ khí quyển được hấp thụ vào đại dương, hay là sự đổi chiều phản ứng trong phản ứng thuận nghịch của các axit yếu, theo chiều làm tăng nồng độ CO₂ (định luật Le Chatelier's). Do đó, pCO₂ bề mặt đã giảm nhanh trong thời gian đầu khi mà vận tốc hấp thụ NO₃ lớn nhất (tức quá trình quang hợp mạnh), nồng độ CO₂ giảm nhanh và chưa kịp trở lại trạng thái cân bằng. Đây chính là lý do làm pCO₂ có nhiều biến đổi trong khoảng thời gian đầu chạy mô hình (Hình 6). Áp suất riêng phần pCO₂ bề mặt tại t = 3.000 năm lần lượt là: 347,84 ppm, 345,13 ppm, 345,13 ppm, 340,68 ppm, 334,41 ppm.



Hình 6. Sự biến đổi áp suất riêng phần CO₂ bề mặt khi thay đổi thông lượng Fe do gió tác động
Figure 6. The change of pCO₂ at ocean surface when changing the aeolian iron flux

4. Thông lượng trao đổi biển khí

Sự trao đổi dòng CO₂ giữa biển - khí hay dòng khuếch tán phụ thuộc vào vận tốc hấp thụ τ , áp suất riêng phần CO₂ khí quyển và biển (Đoàn Bộ, 2001). Sự biến đổi áp suất riêng phần CO₂ biển khí trong trường hợp này xét đến sự thay đổi thông lượng sắt do gió ở bề mặt đại dương.

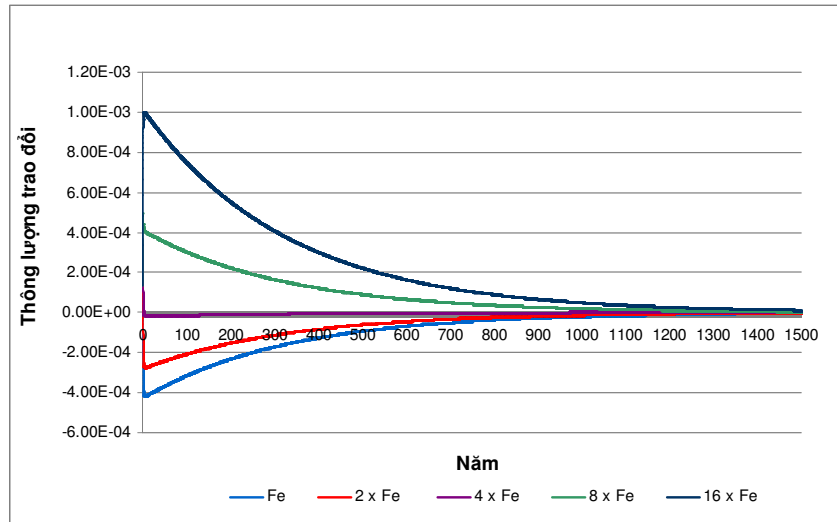
Trong khoảng t = 0,4 năm, thông lượng trao đổi biển khí đều tăng, tức quá trình thoát khí chiếm ưu thế, cho tất cả trường

hợp tăng thông lượng sắt do gió được xét trong mô hình. Kết quả cụ thể được trình bày trong Bảng 3, Hình 7 với thời gian mô phỏng dài để thấy xu hướng diễn biến (t=1.500 năm) và hình 8 với thời gian mô phỏng ngắn để xét sự biến động thông lượng CO₂ tại thời điểm sau khi tăng thông lượng sắt (t=10 năm).

Về xu thế biến đổi thông lượng CO₂, ta thấy đều có quá trình hấp thụ và nhả khí CO₂ trong 5 trường hợp thay đổi thông lượng sắt do gió. Nhìn chung, sau gần 3.000

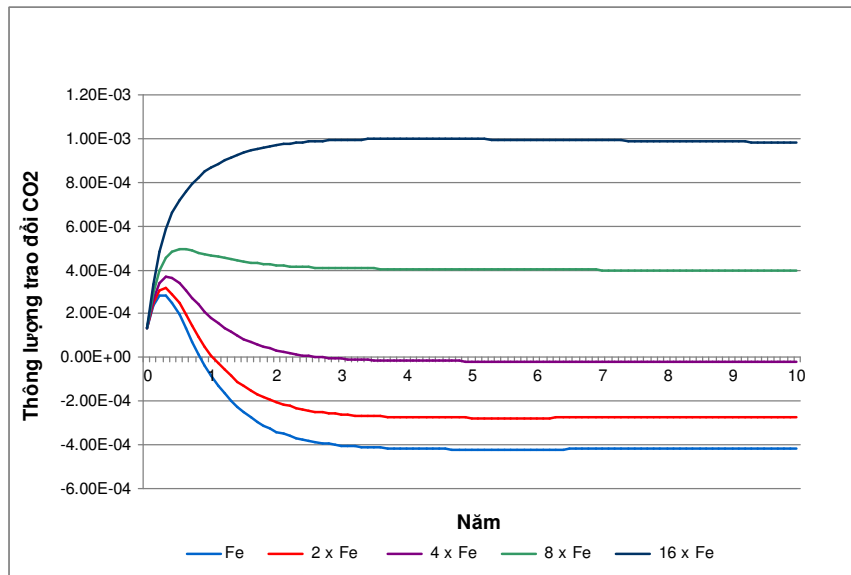
năm thông lượng CO₂ hội tụ, lúc này thông lượng hấp thụ CO₂ vào đại dương bằng với

thông lượng CO₂ thoát ra khỏi đại dương đi vào khí quyển (Hình 7).



Hình 7. Quá trình trao đổi biển- khí khi thông lượng sắt do gió thay đổi trong thời gian t=1.500 năm

Figure 7. The process of air-sea exchange when the aeolian iron flux is changed in 1,500 years



Hình 8. Quá trình trao đổi biển - khí khi thông lượng sắt do gió thay đổi trong thời gian t = 10 năm
Figure 8. The process of air-sea exchange when the aeolian iron flux is changed in 10 years

Bảng 3. Những khoảng thời gian biến động của thông lượng trao đổi biển-khí
Table 3. Duration of variation of air-sea exchange flux

Thông lượng Fe do gió so với ban đầu	Khoảng thời gian biến động (năm)	Xu hướng biến đổi thông lượng CO ₂	Đại dương hấp thụ hay thoát khí
Tăng 1 lần	t = (0,4; 5,5)	Giảm	Hấp thụ chiếm ưu thế
	t = (5,5; 3.000)	Tăng	Thoát khí chiếm ưu thế
Tăng 2 lần	t = (0,4; 5,7)	Giảm	Hấp thụ chiếm ưu thế

	t = (5,7; 3.000)	Tăng	Thoát khí chiếm ưu thế
Tăng 4 lần	t = (0,4; 7,4)	Giảm	Hấp thụ chiếm ưu thế
	t = (7,4; 3.000)	Tăng	Thoát khí chiếm ưu thế
Tăng 8 lần	t = (0; 0,6)	Tăng	Thoát khí chiếm ưu thế
	t = (0,6; 3.000)	Giảm	Hấp thụ chiếm ưu thế
Tăng 16 lần	t = (0; 4,8)	Tăng	Thoát khí chiếm ưu thế
	t = (4,8; 3.000)	Giảm	Hấp thụ chiếm ưu thế

Mối liên hệ giữa các hợp chất C, N và Fe vào hạt vật chất được thể hiện bởi quá trình chuyển cacbon từ khí quyển và bề mặt đại dương đi vào vùng đại dương sâu. Bên cạnh đó, mối liên hệ này được thể hiện bởi hàm của nồng độ của các chất dinh dưỡng chính trong thực vật là N và Fe. Khi có sự thay đổi trong tỷ lệ C:N:Fe trong vật liệu dạng hạt hay hấp thụ hoàn toàn nitrat thì hàm số trong mô hình không thay đổi, nó chỉ thay đổi sự tích lũy CO₂ trong khí quyển và bề mặt đại dương (Ruth, 2002). Trong vùng HNLC với nồng độ sắt bề mặt không đủ so với chất dinh dưỡng có trong vùng, kết quả cho áp suất riêng phần pCO₂ bề mặt và khí quyển đều tăng. Khi tăng nguồn cung cấp sắt vào vùng HNLC để tăng khả năng tổng hợp chất dinh dưỡng ở sinh vật quang tự dưỡng.

Kết quả mô phỏng cho thấy, pCO₂ của cả khí quyển và bề mặt đều giảm. Kết quả pCO₂ khí quyển và bề mặt có chênh lệch và thông lượng trao đổi giữa bề mặt và khí quyển diễn ra mạnh hơn. Nhìn chung, khi tăng thông lượng Fe do gió thì kéo theo quá trình hấp thụ CO₂ cũng tăng và làm giảm thiếu khí CO₂ tồn tại trong khí quyển.

Kết quả mô hình chỉ mang tính định tính, nhằm mô phỏng quá trình trao đổi khí ở mặt phân cách biển-khí. Bên cạnh đó, xem xét quá trình hấp thụ và nhả khí của đại dương có phụ thuộc như thế nào khi có sự hiện diện và tăng cường thông lượng sắt do gió. Trong thời gian tiếp theo, nhóm tác giả sẽ thu thập thêm dữ liệu thông lượng CO₂ dựa vào pCO₂ khí quyển và pCO₂ đại dương để so sánh một cách tương đối về độ lớn của thông lượng trao đổi này.

Lời cảm ơn: Tập thể tác giả xin chân thành cảm ơn tác giả Wallace S. Broecker và Tsung-Hung Peng đã cung cấp dữ liệu cho bài báo này. Bên cạnh đó, xin chân thành cảm ơn bộ môn Hải Dương, Khí tượng và Thủy văn, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên đã tạo mọi điều kiện trong quá trình thực hiện cũng như có những đóng góp ý kiến, động viên khích lệ trong quá trình hoàn thiện bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bates N. R., M. H. Best, K. Neely, R. Garley, A. G. Dickson, R. J. Johnson, 2012. Detecting anthropogenic carbon dioxide uptake and ocean acidification in the North Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 9: 2509-2522.
- Cao Long, Caldeira Ken, 2010. Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification? *Climatic change*. Springer Science+Business Media B.V.2010. doi 10.1007/s10584-010-99799-4.
- Đoàn Bộ, 2001. Hóa học biển. Nhà xuất bản Đại học Quốc Gia Hà Nội, trang 56-74.
- Deaton L., J. Michael, J. Winebrake, 2000. Dynamic modeling of environmental systems. Springer – Verlag, New York, Inc., pp. 1-65.
- Ruth M., 2002. Dynamic modeling of marine conservation. Springer – Verlag New York Inc., pp. 125-163.
- Susan M. L., 2009. Introduction to marine biogeochemistry (second edition). Academic Press, pp. 147-170.