

## Tổng quan về động thái và các yếu tố ảnh hưởng đến trữ lượng carbon hữu cơ trong đất rừng

Lê Văn Cường<sup>1</sup>, Trần Quang Bảo<sup>2</sup>, Nguyễn Văn Quý<sup>3</sup>, Mai Hải Châu<sup>1</sup>, Đinh Thị Kim Nguyệt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Lâm nghiệp – Phân hiệu Đồng Nai

<sup>2</sup>Cục Lâm nghiệp và Kiểm lâm

<sup>3</sup>Trung tâm nhiệt đới Việt – Nga, chi nhánh phía Nam

### Overview of dynamics and factors influencing organic carbon stocks in forest soils

Le Van Cuong<sup>1</sup>, Tran Quang Bao<sup>2</sup>, Nguyen Van Quy<sup>3</sup>, Mai Hai Chau<sup>1</sup>, Dinh Thi Kim Nguyet<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vietnam National University of Forestry – Dongnai Campus

<sup>2</sup>Department of Forestry and Forest Protection

<sup>3</sup>Russia Tropical Science and Technology Research Center, Southern Branch of Joint Vietnam

\*Corresponding author: lvcuong@vnuf2.edu.vn

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.14.4.2025.038-048>

#### Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 03/03/2025

Ngày phản biện: 07/04/2025

Ngày quyết định đăng: 05/05/2025

#### Từ khóa:

Carbon hữu cơ trong đất,  
chu trình carbon, hệ sinh thái  
rừng, phản hồi khí hậu,  
yếu tố ảnh hưởng.

#### Keywords:

Carbon cycling, climate  
feedbacks, forest ecosystems,  
influencing factors, soil  
organic carbon.

#### TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu toàn cầu, chủ yếu từ hoạt động đốt nhiên liệu hóa thạch và chuyển đổi mục đích sử dụng đất, là một trong những yếu tố ảnh hưởng lớn đến sinh quyển. Carbon hữu cơ trong đất (SOC), kho dự trữ carbon lớn nhất trong sinh quyển lục địa, đóng vai trò trung tâm trong điều hòa phản hồi carbon-khí hậu toàn cầu, nơi những biến động nhỏ trong trữ lượng SOC cũng có thể tác động đáng kể đến nồng độ CO<sub>2</sub> trong khí quyển và xu hướng biến đổi khí hậu. Mặc dù đã có những tiến bộ đáng kể trong việc định lượng động thái SOC trong đất rừng, nhưng vẫn còn tồn tại nhiều bất đồng về cơ chế hình thành, tính không đồng nhất về không gian và đánh giá định lượng ở quy mô hệ sinh thái. Bài báo này tổng hợp một số kiến thức hiện tại về các quá trình chi phối đến sự tích lũy SOC của rừng, các mô hình phân bố và các phương pháp tiếp cận để đánh giá, nhấn mạnh vào việc phân tích sự tương tác giữa các yếu tố tự nhiên và tác động của con người đến động thái của SOC trong đất rừng. Đồng thời, các hạn chế về mặt phương pháp luận, lỗ hổng và định hướng nghiên cứu trong tương lai cũng được phân tích. Ngoài ra, bài báo này cũng nhấn mạnh nhu cầu cấp thiết về các mô hình đa ngành nhằm tối ưu hóa dự đoán động thái của SOC trong đất rừng. Mục đích của bài báo này là cung cấp cơ sở lý thuyết và công cụ thực tiễn cho quản lý tài nguyên rừng bền vững, góp phần nâng cao hiệu quả của các chiến lược ứng phó với biến đổi khí hậu toàn cầu.

#### ABSTRACT

Global climate change, mainly from fossil fuel burning and land use change, is one of the major factors affecting the biosphere. As the largest carbon reservoir in terrestrial biomes, soil organic carbon (SOC) plays a pivotal role in regulating global carbon-climate feedbacks, where marginal fluctuations in SOC stocks can significantly alter atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and climate trajectories. Despite substantial research progress in quantifying forest SOC dynamics, critical uncertainties persist regarding the mechanistic drivers of its formation, spatial heterogeneity, and accurate estimation at ecosystem scales. This paper synthesizes current knowledge on the processes governing forest SOC accumulation, distribution patterns, and SOC estimation methods, focusing on the interactions between natural factors and human impacts in shaping SOC dynamics. At the same time, methodological limitations, gaps,

*and future research directions are analyzed. Additionally, the urgent need for multidisciplinary models to optimize SOC dynamics prediction in forest soils is also emphasized. The purpose of this paper is to provide a theoretical basis and practical tools for sustainable resource management, contributing to improving the effectiveness of global climate change response strategies.*

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đất là bể chứa carbon (C) lớn nhất trên cạn, với trữ lượng C gấp ba lần thảm thực vật và gấp đôi lượng C trong khí quyển [1, 2]. Trong chu trình C toàn cầu, đất rừng đóng vai trò trung tâm của hệ sinh thái Trái đất khi chiếm tới 73% tổng lượng C trong đất toàn cầu, biến nó thành bể chứa chủ yếu ở các hệ sinh thái trên cạn [3]. Carbon trong đất rừng tồn tại dưới hai dạng chính: C hữu cơ (Soil Organic Carbon - SOC) và C vô cơ (Soil Inorganic Carbon - SIC), trong đó SOC là thành phần chủ yếu do nó tham gia trực tiếp vào chu trình trao đổi C giữa đất và khí quyển [4]. SOC không chỉ đóng vai trò trung tâm trong việc duy trì hoạt tính sinh học, cải thiện độ phì của đất, mà còn quyết định cấu trúc và chức năng của hệ sinh thái. Ngược lại, SIC chủ yếu ảnh hưởng đến các đặc tính hóa-lý của đất, bao gồm khả năng đệm pH và quá trình khoáng hóa. Sự khác biệt này cho thấy sự chi phối của SOC đối với tổng lượng C dự trữ trong đất. Tuy vậy, hiện nay vẫn còn thiếu những nghiên cứu sâu về cơ chế tích lũy và chuyển hóa của SOC trong bối cảnh biến đổi khí hậu (BĐKH) [5].

SOC trong đất rừng không chỉ quyết định sự ổn định của các hệ sinh thái rừng mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát thải C vào khí quyển, qua đó điều tiết chu trình C toàn cầu [6]. Bất kỳ biến động nào trong khả năng lưu trữ C của đất rừng đều có thể kích hoạt những thay đổi sâu rộng, đe dọa cân bằng sinh thái toàn cầu [7]. Vì vậy, nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến động thái SOC trong đất rừng là nền tảng quan trọng để dự đoán và ứng phó với BĐKH.

Kể từ cách mạng công nghiệp, các hoạt động như phá rừng, chăn thả gia súc quá mức, chuyển đổi mục đích sử dụng đất và đốt nhiên

liệu hóa thạch đã đẩy nhanh quá trình BĐKH, dẫn đến hiện tượng nóng lên toàn cầu không thể đảo ngược [8]. Theo Báo cáo đánh giá lần thứ 5 của Ủy ban Liên chính phủ về BĐKH, nhiệt độ trung bình bề mặt Trái đất đã tăng  $0,60 \pm 0,2^\circ\text{C}$  trong thế kỷ XX và dự kiến tăng thêm 1,4–5,8 $^\circ\text{C}$  vào cuối thế kỷ XXI tùy theo kịch bản phát thải [9]. Mức tăng này ảnh hưởng lớn đến sự sinh trưởng của thực vật, cấu trúc rừng, cạnh tranh giữa các loài và chức năng của hệ sinh thái rừng, làm suy yếu tính ổn định của các hệ sinh thái toàn cầu [10]. Trước thực trạng này, nghiên cứu về động thái SOC trong đất rừng và các yếu tố ảnh hưởng trở thành chủ đề trọng điểm trong khoa học về rừng.

Trong nhiều thập kỷ, các nhà khoa học đã tập trung phân tích thành phần, phân bố không gian và cơ chế duy trì SOC trong đất rừng, đồng thời làm rõ mối tương quan giữa chúng với các yếu tố môi trường [2]. Những công trình này không chỉ tiết lộ quá trình tích lũy, chuyển hóa và giải phóng C trong đất mà còn xác định các yếu tố then chốt điều khiển động thái C. Trong bài báo này, bốn trọng tâm chính sẽ được phân tích: (i) Tiến bộ trong nghiên cứu SOC của đất rừng, (ii) Cơ chế hình thành và đặc điểm phân bố không gian của SOC trong đất rừng, (iii) Phương pháp ước tính trữ lượng SOC trong đất rừng, (iv) Tác động của yếu tố môi trường lên động thái SOC trong đất rừng. Bài báo này hướng đến mục tiêu cung cấp cơ sở khoa học cho việc tăng cường sự hiểu biết về chu trình C trong đất rừng, từ đó hỗ trợ hoạch định chính sách quản lý tài nguyên rừng bền vững trong bối cảnh BĐKH.

## 2. TIẾN BỘ TRONG NGHIÊN CỨU CARBON HỮU CƠ TRONG ĐẤT RỪNG

Trong vài thập kỷ qua, một số lượng lớn các nghiên cứu đã được thực hiện để định lượng

trữ lượng SOC trong các hệ sinh thái rừng trên quy mô toàn cầu [11-14], quốc gia [15-19], khu vực [20-24] và ở quy mô địa phương [25]. Ví dụ, theo thống kê về nguồn dự trữ SOC toàn cầu, trữ lượng SOC trong độ sâu 1 m của đất trên toàn cầu dao động từ 504 đến 3000 Pg C [26], và Trung Quốc chứa tới 70,3 đến 185,7 Pg C [27]. Đặc biệt, đất rừng được xác định là bể chứa SOC chủ yếu, lưu giữ khoảng 300 Gt C trên toàn cầu [14], với 20 Gt C phân bố trong các hệ sinh thái rừng của Trung Quốc [18]. Tuy nhiên, những đánh giá này về SOC dựa trên các mẫu thực địa cho thấy sự khác biệt lớn về các giá trị SOC. Do đó, định lượng chính xác SOC ở quy mô địa phương để cải thiện việc đánh giá ngân sách của SOC vẫn cần phải được đặt ra. Tuy nhiên, sự chênh lệch đáng kể giữa các kết quả nghiên cứu thực địa phản ánh rõ nét hạn chế về phương pháp luận và tính không đồng nhất về không gian. Điều này nhấn mạnh yêu cầu cấp thiết về định lượng SOC chính xác ở quy mô địa phương nhằm tối ưu hóa mô hình cân bằng C và hỗ trợ chính sách ứng phó BĐKH.

Tại Việt Nam, nghiên cứu trữ lượng SOC trong các hệ sinh thái rừng tuy khởi phát muộn nhưng đã ghi nhận bước tiến đáng kể. Nhiều nghiên cứu tập trung vào ước tính SOC thông qua phương pháp lấy mẫu thực địa kết hợp phân tích không gian [28-31]. Ví dụ, tại huyện Mang Yang (Gia Lai - Tây Nguyên), trữ lượng SOC dưới tán rừng tự nhiên dao động từ 39,62–110,21 tấn/ha, với giá trị cao nhất ở rừng giàu (110,21 tấn/ha), tiếp theo là rừng trung bình (94,5 tấn/ha) và rừng nghèo kiệt (73,57 tấn/ha) [30]. Trong khi đó, rừng trồng như Thông (45,93 tấn/ha) và Bạch đàn (39,8–48,82 tấn/ha) có trữ lượng SOC thấp hơn đáng kể. Tương tự, nghiên cứu tại Vườn Quốc gia Ba Vì ghi nhận trữ lượng SOC trung bình 171,59 tấn/ha; trong đó sinh khối vật rơi rụng là yếu tố chính điều tiết quá trình tích lũy SOC thông qua phương pháp phân tích hệ số đường ảnh hưởng [32].

Các nghiên cứu về rừng trồng tại khu vực phía Nam Việt Nam cũng làm sáng tỏ động thái

SOC theo tuổi rừng. Ví dụ, khi nghiên cứu về dự trữ carbon của rừng Keo lai (*Acacia hybrid*) tại khu vực Xuân Lộc thuộc tỉnh Đồng Nai, Lê Văn Cường và cộng sự (2024) đã chỉ ra ba xu hướng chính: (1) Hàm lượng SOC tăng theo tuổi của rừng Keo lai và tập trung chủ yếu ở tầng đất mặt (0–30 cm), chiếm > 60% tổng trữ lượng; (2) Trữ lượng SOC tăng từ 57,86 lên 100,57 tấn/ha trong quá trình phát triển của rừng; (3) Hàm lượng đạm tổng số, sinh khối vật rơi rụng và pH đất là các yếu tố chủ đạo ảnh hưởng đến biến động SOC [33]. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu ở rừng Trang (*Kandelia obovata*) trồng tại miền Trung nước ta, nơi trữ lượng SOC tăng từ 160,40 tấn/ha (16 năm tuổi) lên 184,30 tấn/ha (18 năm tuổi), phản ánh mối tương quan thuận giữa tuổi rừng, sinh khối và khả năng tích lũy C trong đất [34]. Bên cạnh đó, nghiên cứu tại Vườn Quốc gia Mũi Cà Mau trên ba trạng thái rừng ngập mặn (thường xuyên, không thường xuyên, có kiểm soát) khẳng định xu hướng suy giảm SOC theo độ sâu đất [35]. Phân tích tương quan đa biến chỉ ra mối liên hệ chặt chẽ giữa dung trọng đất và chất hữu cơ với sự tích lũy SOC, trong khi pH và độ dẫn điện thể hiện tương quan yếu.

Những phát hiện trên không chỉ làm rõ cơ chế tích lũy SOC trong các hệ sinh thái rừng đặc thù mà còn cung cấp cơ sở dữ liệu định lượng cho việc hoạch định chính sách quản lý rừng bền vững ở các khu vực khác nhau. Đặc biệt, chúng đóng vai trò then chốt trong việc thực thi các cam kết quốc tế như REDD+ và giảm phát thải khí nhà kính, qua đó góp phần hiện thực hóa mục tiêu trung hòa C toàn cầu.

### 3. CƠ CHẾ HÌNH THÀNH VÀ PHÂN BỐ KHÔNG GIAN CỦA CARBON HỮU CƠ TRONG ĐẤT RỪNG

#### 3.1. Cơ chế hình thành carbon hữu cơ của đất rừng

Quá trình hình thành SOC được lý giải qua hai khung lý thuyết: lý thuyết mùn hóa cổ điển và lý thuyết điều tiết vi sinh vật [36]. Theo quan điểm cổ điển, SOC trong đất rừng bắt nguồn từ ba nguồn chính: đồng hóa CO<sub>2</sub> khí quyển qua

quang hợp, phân hủy vật liệu thực vật (lá rụng, cành chết) và bổ sung ngoại sinh từ xác động vật và sinh khối vi sinh. Dựa trên tốc độ chuyển hóa, SOC được phân loại thành ba nhóm chức năng: carbon hoạt động (labile C), carbon trung gian (slow C), và carbon bền vững (recalcitrant C).

Lý thuyết mùn hóa nhấn mạnh vai trò của vật liệu thực vật khó phân hủy (ví dụ: lignin, cellulose) trong việc hình thành SOC [37]. Tuy nhiên, các bằng chứng thực nghiệm gần đây phản bác lý thuyết này khi chỉ ra rằng tính ổn định hóa học của SOC không tỷ lệ thuận với độ kháng phân hủy cơ học của mùn thực vật [36]. Thay vào đó, các nghiên cứu sử dụng chỉ thị đồng vị  $^{13}\text{C}$  và biomarker cho thấy nguồn carbon vi sinh (microbial-derived C), đặc biệt từ chất tiết vi sinh (EPS) và phế liệu tế bào, đóng góp tới 40-60% SOC trong tầng đất mặt [38].

Song song đó, lý thuyết điều tiết vi sinh vật làm sáng tỏ cơ chế tương tác giữa quần xã vi sinh và SOC [39]. Các nhóm nấm rễ (mycorrhiza) và vi khuẩn dị dưỡng không chỉ xúc tác phân giải chất hữu cơ mà còn tổng hợp hợp chất cao phân tử (glomalin, melanin) có khả năng kết dính với khoáng sét, tạo phức hệ hữu cơ-khoáng bền vững. Quá trình này không chỉ ức chế khoáng hóa SOC mà còn thúc đẩy tái tổ hợp C thông qua “máy bơm sinh học” (microbial carbon pump). Hơn nữa, sự đa dạng chức năng của vi sinh vật đất đóng vai trò như bộ điều chỉnh động lực, cân bằng giữa tích lũy và giải phóng C trong các hệ sinh thái rừng.

### 3.2. Đặc điểm phân bố không gian của carbon hữu cơ trong đất rừng

Sự phân bố SOC trong các hệ sinh thái rừng chịu sự chi phối mạnh mẽ của các yếu tố khí hậu và đặc tính của đất, dẫn đến biến động không gian đa chiều cả theo phương ngang (phân vùng bề mặt) lẫn phương dọc (phân tầng đất) [10]. Trên phạm vi toàn cầu, mật độ C trong sinh khối thực vật đạt cực đại trong các rừng mưa nhiệt đới xích đạo, giảm dần ở vùng ôn đới và thấp nhất tại vùng cực [40]. Trái ngược với

xu hướng này, hàm lượng SOC trong đất lại thể hiện sự phân hóa nghịch đảo, với giá trị cao hơn đáng kể ở vĩ độ trung và cao so với vùng nhiệt đới [41].

Tại Đông Nam Á và Đông Á, SOC thể hiện tính dị biệt không gian rõ rệt [36]. Phân tích đa quy mô cho thấy SOC tăng theo hàm mũ cùng với sự gia tăng vĩ độ từ Nam lên Bắc, đồng thời giảm theo gradient kinh độ từ Đông sang Tây. Nghiên cứu của Wang và cộng sự (2000) xác nhận rừng ôn đới tích lũy SOC cao gấp 1,8-2,5 lần so với rừng nhiệt đới, trong khi Tang và cộng sự (2017) chỉ ra mối tương quan nghịch giữa SOC và kinh độ ( $R^2 = -0.67$ ,  $p < 0.05$ ) [42, 43]. Cơ chế này được lý giải là do nhiệt độ và độ ẩm không khí cao tại vùng nhiệt đới thúc đẩy hoạt tính phân giải chất hữu cơ của quần xã vi sinh vật (tốc độ khoáng hóa tăng 30-45%) và sự suy giảm sản lượng sơ cấp thuần (Net Primary Production - NPP) theo gradient vĩ độ làm hạn chế nguồn vật liệu hữu cơ đầu vào [44].

Bên cạnh đó, gradient độ cao đóng vai trò điều tiết phi tuyến tính đến phân bố SOC [45]. Kết quả từ mô hình hồi quy đa biến của Wang và cộng sự (2000) cho thấy, SOC đạt cực đại ở độ cao 800 - 1200 m (nhiệt độ trung bình 15-18°C, độ ẩm đất 60 - 70%), sau đó giảm mạnh do hạn chế nhiệt độ và suy thoái chất hữu cơ hòa tan [42]. Sự tương tác giữa các yếu tố vi khí hậu (nhiệt độ đất, độ ẩm dự trữ) và đặc tính keo đất (khả năng hấp phụ, tỷ lệ sét-thịt) tạo ra cơ chế phản hồi kép: vừa kiểm soát tốc độ phân hủy mùn, vừa điều chỉnh quá trình ổn định SOC thông qua tạo phức hữu cơ-khoáng [45].

Như vậy, sự phân bố không gian của SOC trong đất rừng là hệ quả tích hợp của các cơ chế đa thang bậc, bao gồm: cân bằng động giữa đầu vào hữu cơ (NPP, vật rụng) và đầu ra (hô hấp của vi sinh vật, rửa trôi), biến đổi vi khí hậu theo gradient địa hình, và đặc tính bảo tồn carbon của phức hệ keo đất. Những phát hiện này nhấn mạnh sự cần thiết của các mô hình dự báo SOC tích hợp cả yếu tố sinh địa hóa và thông số

vi mô trong bối cảnh BĐKH toàn cầu.

#### **4. PHƯƠNG PHÁP ƯỚC TÍNH VÀ ĐÁNH GIÁ CARBON HỮU CƠ TRONG ĐẤT RỪNG**

Từ thập niên 1960 của thế kỷ trước, các nghiên cứu định lượng trữ lượng SOC đã được triển khai ở quy mô toàn cầu [46]. Tuy nhiên, những ước tính ban đầu chủ yếu dựa trên số liệu mẫu đất hạn chế, dẫn đến độ tin cậy chưa cao. Mặc dù phần lớn nghiên cứu ghi nhận tổng trữ lượng SOC ở độ sâu tầng đất 1 m dao động quanh ngưỡng 1.500 Gt, sự khác biệt đáng kể về giá trị ước tính giữa các nghiên cứu phản ánh tính đa dạng trong các phương pháp được áp dụng [47, 48]. Sự không thống nhất về kết quả nghiên cứu SOS trong đất dẫn đến những đánh giá khác nhau về nguồn dự trữ C trong đất. Vì thế, phân tích những ưu và nhược điểm của từng phương pháp là vấn đề cần thiết. Bài báo này tổng hợp các nguyên lý, ứng dụng và hạn chế của bốn nhóm phương pháp chính: (1) Phương pháp dựa trên phân loại đất, (2) Phương pháp tích hợp đặc trưng thực vật, sinh cảnh và hệ sinh thái, (3) Phương pháp tương quan thống kê, (4) Phương pháp mô hình hóa.

##### **4.1. Phương pháp dựa trên phân loại đất**

Phương pháp này ước tính SOC thông qua tích hợp dữ liệu mẫu đất với hệ thống phân loại đất tiêu chuẩn (Ví dụ: (1) Hệ thống phân loại đất của WRB = World Reference Base for Soil Resources\_Cơ sở tham chiếu tài nguyên đất thế giới – WRB được phát triển bởi Tổ chức Nông Lương Liên Hợp Quốc; (2) Hệ thống phân loại đất của Bộ Nông nghiệp Hoa Kỳ \_ USDA (Soil Taxonomy)) [49]. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là khả năng xác định không chỉ tổng trữ lượng SOC theo không gian mà còn đánh giá định lượng các yếu tố bất định thông qua phân tích độ lệch chuẩn. Bên cạnh đó, phương pháp này hỗ trợ nhận diện mạng hình phân bố không gian SOC nhờ kết hợp GIS, góp phần tối ưu hóa độ chính xác. Tuy nhiên, hạn chế chính nằm ở tính không đồng nhất của đặc tính đất ở quy mô không gian lớn, khiến tính đại diện không gian của mẫu bị hạn chế. Quy trình thực hiện đòi

hỏi đầu tư lớn về thời gian và nhân lực, đồng thời chưa phản ánh được biến động SOC theo thời gian thực do phụ thuộc vào dữ liệu tĩnh.

##### **4.2. Phương pháp tích hợp các đặc trưng của thảm thực vật, sinh cảnh và hệ sinh thái**

Nhóm phương pháp này ước tính SOC dựa trên mối tương quan giữa mật độ SOC và đặc trưng của các quần xã thực vật, kết hợp với diện tích phân bố của chúng theo sinh cảnh [50]. Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là tốc độ tính toán nhanh và khả năng so sánh SOC giữa các hệ sinh thái (Rừng nhiệt đới và đồng cỏ) thông qua mô hình hóa đơn giản. Điển hình, mô hình sinh cảnh Holdridge đã được ứng dụng rộng rãi để ước tính SOC toàn cầu [51]. Tuy nhiên, việc bỏ qua yếu tố khác biệt về không gian ở cấp phân loại chi tiết dẫn đến dao động lớn trong kết quả, hạn chế khả năng ứng dụng cho nghiên cứu đòi hỏi độ phân giải cao. Ngoài ra, phương pháp này chưa tính đến tương tác giữa thực vật và quá trình tích lũy SOC.

##### **4.3. Phương pháp tương quan thống kê**

Phương pháp này xây dựng hàm hồi quy giữa SOC và các biến môi trường (thổ nhưỡng, khí hậu, địa hình) tại vị trí lấy mẫu [52]. Ưu điểm chính của phương pháp này là tính khả thi cao và tính không phá hủy, phù hợp với khu vực nhạy cảm về sinh thái. Tuy nhiên, độ chính xác của phương pháp này phụ thuộc vào việc hiệu chỉnh mô hình thống kê để giảm các yếu tố gây nhiễu và sự phù hợp của hàm hồi quy, nguồn mẫu và thuật toán tối ưu. Gần đây, sự phát triển của phân tích tổng hợp (meta-analysis) và học máy (machine learning) đã khắc phục phần nào hạn chế này thông qua tích hợp nguồn dữ liệu lớn, mở đường cho các mô hình dự báo SOC đa biến có độ tin cậy cao.

##### **4.4. Mô phỏng mô hình**

Các mô hình động lực (Ví dụ: Century, RothC, DNDC) mô phỏng quá trình tích lũy và phân hủy SOC dựa trên cơ chế sinh - địa - hóa [53, 54]. Trong đó, mô hình Century nổi bật với khả năng mô phỏng linh hoạt SOC dưới các kịch bản BĐKH và quản lý đất, nhờ tích hợp đồng thời

yếu tố tự nhiên và nhân tạo. Thách thức chính nằm ở yêu cầu đầu vào phức tạp (ví dụ: thông số vi khí hậu, cấu trúc hữu cơ đất), mà việc thu thập/định lượng ở quy mô không gian lớn vẫn còn hạn chế. Đáng chú ý, sự phát triển của công nghệ viễn thám độ phân giải cao (Lidar, Sentinel-2) đang tạo đột phá thông qua kết hợp dữ liệu đa nguồn (multisource data), cho phép đồng bộ hóa thông tin mô hình với quan trắc thực địa, từ đó nâng cao độ chính xác và tính ứng dụng thực tiễn.

## 5. CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN ĐỘNG THÁI CARBON HỮU CƠ TRONG ĐẤT RỪNG

Động thái trữ lượng SOC chịu sự chi phối của hai nhóm yếu tố chính: (1) điều kiện tự nhiên (đặc điểm của thực vật, địa hình, khí hậu, và tính chất đất) và (2) tác động của con người (quản lý rừng, chuyển đổi đất, cháy rừng) [55]. Sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố này quyết định cả lượng và chất SOC, đồng thời tạo ra tính không đồng nhất trong phân bố không gian và thời gian của nguồn dự trữ C này.

### 5.1. Yếu tố tự nhiên

Khí hậu đóng vai trò trọng tâm trong chu trình SOC thông qua cơ chế điều tiết nhiệt độ và độ ẩm [56, 57]. Nhiệt độ tăng thúc đẩy sự nâng cao sản lượng sơ cấp thuần (NPP), làm gia tăng lượng vật chất hữu cơ chuyển vào đất (Ví dụ: SOC ở vùng ôn đới ẩm tăng 15 - 20% khi nhiệt độ tăng 2°C). Tuy nhiên, nhiệt độ cao đồng thời kích hoạt hoạt động của vi sinh ( $Q_{10} = 2 - 3$ ), dẫn đến mất cân bằng giữa quá trình tích lũy và phân hủy SOC, đặc biệt ở vùng nhiệt đới. Độ ẩm đất điều khiển quá trình khoáng hóa SOC. Đất ngập nước (anaerobic) ức chế phân hủy, tích tụ SOC lâu dài ở dạng than bùn, trong khi đất khô hạn (aerobic) thúc đẩy oxy hóa, giải phóng  $CO_2$ . Biến động lượng mưa còn gây rửa trôi C hòa tan (DOC), làm thay đổi cấu trúc phân tầng SOC.

Đặc tính đất bao gồm thành phần cơ giới (hàm lượng sét > 20% tăng khả năng hấp phụ SOC), pH (tối ưu ở 5.5 - 7.5), và khoáng vật phản ứng (ví dụ: oxit Fe/Al) quyết định tính ổn định

của SOC [58]. Đất phát triển trên nền đá bazan giàu khoáng hoạt tính có khả năng lưu giữ SOC cao gấp 1,5 lần so với đất phát triển trên nền đá granit.

### 5.2. Yếu tố con người

Khai thác gỗ gây biến động SOC phụ thuộc vào cường độ và phương pháp [59]. Khai thác chọn ( $\leq 30\%$  sinh khối) có thể tăng SOC nhờ tàn dư thực vật, trong khi khai thác trắng làm giảm 20 - 40% SOC do xáo trộn lớp mùn. Tương tự, tía thưa rừng với cường độ vừa (30 - 50% mật độ cây) cải thiện SOC đầu vào từ 20 - 25%, nhưng tía thưa rừng với cường độ cao (> 60%) gây mất ổn định vi khí hậu, thúc đẩy sự phân hủy các tàn dư hữu cơ. Chuyển đổi rừng thành đất nông nghiệp làm suy giảm 40 - 60% SOC trong 10 năm đầu do giảm lượng vật chất hữu cơ đầu vào và làm xáo trộn đất [60]. Ngược lại, tái trồng rừng trên đất thoái hóa có thể phục hồi 50 - 70% SOC sau 20 - 30 năm [61]. Cháy rừng tác động hai mặt. Cháy rừng với cường độ nhẹ làm tăng SOC ngắn hạn do tích tụ tro, trong khi cháy rừng với cường độ cao đốt cháy lớp mùn, giảm 30 - 50% SOC và giải phóng  $CO_2$ ,  $CH_4$  [62]. Ô nhiễm môi trường như mưa axit (pH < 5.0) làm suy thoái cấu trúc keo đất, tăng tính di động của SOC [63]. Nghiên cứu tại Trung Quốc ghi nhận mất 15 - 25% SOC ở khu vực công nghiệp hóa so với rừng nguyên sinh do phơi nhiễm  $SO_x/NO_x$  [49].

Như vậy có thể thấy, sự biến động SOC là hệ quả của tương tác đa chiều giữa yếu tố tự nhiên và hoạt động của con người. Điều đó đòi hỏi tiếp cận đa quy mô (địa phương-toàn cầu) và tích hợp dữ liệu in-situ/viễn thám để dự báo chính xác sự biến động SOC.

## 6. THÁCH THỨC VÀ TRIỂN VỌNG TRONG NGHIÊN CỨU CARBON HỮU CƠ TRONG ĐẤT RỪNG

Trong những thập kỷ gần đây, nghiên cứu về SOC trong các hệ sinh thái rừng đã đạt được những tiến bộ đáng kể, đặc biệt trong việc làm sáng tỏ các yếu tố điều khiển quá trình hình thành, phân bố không gian và biến động theo thời gian của SOC. Tuy nhiên, các thách thức

khoa học và lỗ hổng tri thức vẫn tồn tại, đòi hỏi sự tập trung nghiên cứu trong bối cảnh BĐKH ngày càng phức tạp.

### **6.1. Thách thức trong ước tính và mô hình hóa SOC**

Một trong những trở ngại lớn nhất là sự khác nhau về phương pháp ước tính SOC [40]. Dù đã có nhiều tiến bộ trong phát triển mô hình dựa trên đặc tính đất, thảm thực vật và mô phỏng sinh thái, sự không đồng nhất về phương pháp thu thập dữ liệu và quy mô phân tích dẫn đến sai số đáng kể giữa các nghiên cứu [63]. Các yếu tố như quy mô không gian (cảnh quan), tần suất thu thập mẫu và tính biến thiên tự nhiên của đất rừng làm gia tăng độ phức tạp khi lượng hóa SOC. Đặc biệt, việc thiếu dữ liệu chi tiết tại các hệ sinh thái đa dạng như rừng nhiệt đới ẩm, rừng ôn đới và núi cao đã hạn chế độ tin cậy của các mô hình dự báo [52]. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc tích hợp đa dạng thông tin môi trường (khí hậu, thổ nhưỡng) và cơ chế sinh học (hoạt động của vi sinh vật) để nâng cao mức độ chính xác của mô hình.

Bên cạnh đó, hiểu biết về vai trò của vi sinh vật trong cơ chế ổn định SOC vẫn còn hạn chế. Mặc dù yếu tố sinh học đã được ghi nhận là động lực chính trong quá trình tích lũy SOC, các tương tác sinh học giữa vi khuẩn, nấm và chất nền hữu cơ vẫn chưa được định lượng rõ ràng [64]. Hơn nữa, tác động kép từ BĐKH (gia tăng nhiệt độ, biến động lượng mưa) và hoạt động của con người (phá rừng, chuyển đổi mục đích sử dụng đất) đang làm thay đổi đột ngột động thái SOC, song các mô hình hiện tại chưa đủ mạnh để dự báo hậu quả dài hạn.

### **6.2. Triển vọng từ công nghệ và liên ngành**

Trước những thách thức trên, nhiều hướng tiếp cận đột phá đang mở ra cơ hội cải thiện nghiên cứu SOC. Đáng chú ý là việc ứng dụng công nghệ viễn thám (LiDAR, phổ kế) và mạng lưới cảm biến IoT, cho phép thu thập dữ liệu SOC liên tục ở quy mô lớn với độ phân giải không-thời gian cao [65, 66]. Khi kết hợp với dữ liệu thực địa, các công nghệ này có thể tối ưu

hóa hiệu chỉnh mô hình, đồng thời giảm thiểu sai số do tính không đồng nhất của đất. Song song đó, phương pháp thuật toán học máy (machine learning) và phân tích đa biến đang chứng minh tiềm năng trong việc xử lý khối dữ liệu phức tạp, giúp xác định các mô hình dự báo SOC dưới kịch bản BĐKH khác nhau [67].

Một triển vọng khác nằm ở sự hội tụ giữa sinh học vi sinh vật và mô hình hóa sinh thái [36]. Nghiên cứu đa ngành trong lĩnh vực này có thể làm sáng tỏ cơ chế phân tử của yếu tố sinh học, từ đó đề xuất giải pháp tăng cường ổn định SOC thông qua quản lý hệ vi sinh vật đất. Ngoài ra, việc mở rộng nghiên cứu đến các hệ sinh thái đặc thù (rừng ngập mặn, rừng núi đá vôi) sẽ cung cấp cơ sở khoa học để xây dựng chiến lược quản lý rừng thích ứng với BĐKH, tối ưu hóa khả năng lưu trữ C.

### **6.3. Định hướng nghiên cứu tương lai**

Nghiên cứu SOC trong bối cảnh BĐKH không chỉ là vấn đề của lĩnh vực khoa học cơ bản mà còn có ý nghĩa ứng dụng then chốt trong giảm thiểu phát thải và phục hồi hệ sinh thái [42]. Việc giải mã các cơ chế điều khiển SOC sẽ góp phần hoàn thiện mô hình khí hậu toàn cầu, đồng thời định hướng chính sách quản lý tài nguyên bền vững [58]. Để giải quyết các thách thức và hiện thực hóa tiềm năng nghiên cứu, bốn nội dung cần được ưu tiên:

(1) Xây dựng cơ sở dữ liệu dài hạn: thiết lập mạng lưới quan trắc SOC tại các vùng sinh thái đại diện, kết hợp dữ liệu vệ tinh và hiện trường để đảm bảo tính nhất quán.

(2) Nghiên cứu chuyên sâu về các cơ chế vi sinh: ứng dụng kỹ thuật genomics và stable isotope probing để định lượng đóng góp của từng nhóm vi sinh vật vào quá trình ổn định SOC trong đất rừng.

(3) Phát triển mô hình tích hợp đa ngành: kết hợp dữ liệu sinh học, hóa học đất và biến số khí hậu trong các mô hình học sâu (deep learning) để nâng cao độ chính xác dự báo.

(4) Nghiên cứu ứng dụng tại các hệ sinh thái nhạy cảm: đánh giá tính dễ tổn thương của SOC

ở khu vực có nguy cơ tổn thương cao (ven biển, núi cao) nhằm đề xuất giải pháp bảo tồn.

## 7. KẾT LUẬN

SOC đóng vai trò trung tâm trong cân bằng sinh địa hóa toàn cầu, đặc biệt ở các hệ sinh thái rừng. Nghiên cứu SOC không chỉ làm sáng tỏ các cơ chế hình thành, chuyển hóa và phân bố theo không gian và thời gian của C mà còn cung cấp nền tảng định lượng để đánh giá tính bền vững của các hệ sinh thái dưới áp lực kép từ BĐKH và tác động của con người. Trong đó, các yếu tố vi khí hậu, đặc tính lý-hóa đất, quần xã vi sinh vật đất, cùng các hoạt động như chuyển đổi mục đích sử dụng đất và quản lý rừng là động lực chính điều tiết động thái SOC. Tuy nhiên, sự phức tạp trong tương tác đa yếu tố và hạn chế về dữ liệu đã tạo ra rào cản lớn trong việc lượng hóa chính xác SOC. Đột phá gần đây từ công nghệ viễn thám độ phân giải cao, kết hợp với thuật toán học sâu (deep learning) và mô hình hóa đa quy mô, đang mở ra hướng tiếp cận tích hợp để giảm thiểu sự khác biệt về kết quả dự báo SOC. Các phương pháp này không chỉ nâng cao độ chính xác của mô hình mà còn cho phép mô phỏng kịch bản phục hồi C dưới các mô hình quản lý rừng khác nhau. Định hướng tương lai đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa nghiên cứu cơ bản và ứng dụng. Trọng tâm cần đặt vào: (1) Phát triển hệ thống quan trắc SOC liên tục dựa trên cảm biến IoT và vệ tinh thế hệ mới; (2) Giải mã cơ chế phân tử của quá trình ổn định SOC thông qua nghiên cứu hệ gene vi sinh vật đất; (3) Xây dựng khung chính sách dựa trên bằng chứng khoa học để tối ưu hóa quản lý rừng bền vững. Đặc biệt, việc tăng cường hợp tác đa ngành (sinh học, khoa học dữ liệu, hoạch định chính sách) và đầu tư dài hạn vào các điểm nghiên cứu đại diện (rừng nhiệt đới, vùng núi cao) sẽ là chìa khóa để hiện thực hóa tiềm năng của SOC trong giảm phát thải dioxit carbon và thích ứng với BĐKH. Như vậy, việc làm chủ các cơ chế điều tiết SOC không chỉ nâng cao hiểu biết về chu trình carbon toàn cầu mà còn định hướng chiến lược

quản lý rừng thích hợp, góp phần duy trì dịch vụ hệ sinh thái và đạt mục tiêu trung hòa C. Để đạt được điều này, cần ưu tiên xây dựng cơ chế hợp tác quốc tế linh hoạt, đồng thời thúc đẩy chuyển giao công nghệ tiên tiến vào thực tiễn quản lý tài nguyên.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jörn PW Scharlemann, Edmund VJ Tanner, Roland Hiederer & Valerie Kapos (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon management*. 5(1): 81-91.
- [2]. Shan He, Juan Liu, Pei Kun Jiang, Guo Mo Zhou, Hui Lai Wang, Yong Fu Li & Jia Sen Wu (2019). Effects of forest management on soil organic carbon pool: a review. *Journal of Zhejiang A&F University*. 36(4): 818-827.
- [3]. Hari Eswaran, Evert Van Den Berg & Paul Reich (1993). Organic Carbon in Soils of the World. *Soil Science Society of America Journal*. 57(1): 192-194.
- [4]. Moslem Ladoni, Hosein Ali Bahrami, Sayed Kazem Alavipanah & Ali Akbar Norouzi (2010). Estimating soil organic carbon from soil reflectance: a review. *Precision Agriculture*. 11: 82-99.
- [5]. Esteban G Jobbágy & Robert B Jackson (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*. 10(2): 423-436.
- [6]. Rodney J Keenan, Gregory A Reams, Frédéric Achard, Joberto V de Freitas, Alan Grainger & Erik Lindquist (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest ecology and management*. 352: 9-20.
- [7]. Mai Hai Chau, Nguyen Van Quy, Bui Manh Hung, Xu Xiao Niu, Le Van Cuong, Tran Thi Ngoan & Yun Ze Dai (2024). Soil Nitrogen Storage and Associated Regulation Factors in an *Acacia* Hybrid Plantation Chronosequence in Southern Vietnam. *Applied Ecology & Environmental Research*. 22(1): 145-162.
- [8]. Kai Yue, Dario A Fornara, Wanqin Yang, Yan Peng, Changhui Peng, Zelin Liu & Fuzhong Wu (2017). Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: additive effects are common. *Ecology Letters*. 20(5): 663-672.
- [9]. Valérie Masson-Delmotte, Panmao Zhai, Hans Otto Pörtner, Debra Roberts, Jim Skea, Priyadarshi R Shukla, Anna Pirani, Wilfran Moufouma-Okia, Clotilde Péan & Roz Pidcock (2019). Global warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of. 1: 93-174.
- [10]. Yanlong Jia, Guirui Yu, Nianpeng He, Xiaoyun Zhan, Huajun Fang, Wenping Sheng, Yao Zuo, Dayong Zhang & Qiufeng Wang (2014). Spatial and decadal



variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity. *Scientific reports*. 4(1): 3763.

[11]. R K Dixon, A M Solomon, S Brown, R A Houghton, M C Trexler & J Wisniewski (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* (Washington, D.C.); (United States). 263:5144: Medium: X; Size. 185-190.

[12]. J. Six, P. Callewaert, S. Lenders, S. De Gryze, S. J. Morris, E. G. Gregorich, E. A. Paul & K. Paustian (2002). Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by Physical Fractionation. *Soil Science Society of America Journal*. 66(6): 1981-1987.

[13]. Yude Pan, Richard A. Birdsey, Jingyun Fang, Richard Houghton, Pekka E. Kauppi, Werner A. Kurz, Oliver L. Phillips, Anatoly Shvidenko, Simon L. Lewis, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Stephen W. Pacala, A. David McGuire, Shilong Piao, Aapo Rautiainen, Stephen Sitch & Daniel Hayes (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World. *Science*. 333(6045): 988-993.

[14]. G. M. Domke, C. H. Perry, B. F. Walters, L. E. Nave, C. W. Woodall & C. W. Swanston (2017). Toward inventory-based estimates of soil organic carbon in forests of the United States. *Ecological Applications*. 27(4): 1223-1235.

[15]. Kazuhito Morisada, Kenji Ono & Hidesato Kanomata (2004). Organic carbon stock in forest soils in Japan. *Geoderma*. 119(1): 21-32.

[16]. Xuli Tang, Xia Zhao, Yongfei Bai, Zhiyao Tang, Wantong Wang, Yongcun Zhao, Hongwei Wan, Zongqiang Xie, Xuezheng Shi, Bingfang Wu, Gengxu Wang, Junhua Yan, Keping Ma, Sheng Du, Shenggong Li, Shijie Han, Youxin Ma, Huifeng Hu, Nianpeng He, Yuanhe Yang, Wenxuan Han, Hongling He, Guirui Yu, Jingyun Fang & Guoyi Zhou (2018). Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115(16): 4021-4026.

[17]. Jingyun Fang, Guirui Yu, Lingli Liu, Shuijin Hu & F. Stuart Chapin (2018). Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115(16): 4015-4020.

[18]. Wanlong Sun & Xuehua Liu (2020). Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China. *Forest Ecosystems*. 7(1): 4.

[19]. Yuanhe Yang, Pin Li, Jinzhi Ding, Xia Zhao, Wenhong ma, Chengjun Ji & Jingyun Fang (2014). Increased topsoil carbon stock across China's forests. *Global change biology*. 20.

[20]. Jinhong Guan, Lei Deng, Jian-Guo Zhang, Qiu-Yue He, Wei-Yu Shi, Guoqing Li & Sheng Du (2019). Soil organic carbon density and its driving factors in forest ecosystems across a northwestern province in China.

*Geoderma*. 352: 1-12.

[21]. C. Tewksbury & Helga Miegroet (2007). *Soil Organic Carbon Dynamics Along a Climatic Gradient in a Southern Appalachian Spruce-Fir Forest*. Watershed Sciences Faculty Publications. 37.

[22]. Martin Wiesmeier, Jörg Prietzel, Frauke Barthold, Peter Spörlein, Uwe Geuß, Edzard Hangen, Arthur Reischl, Bernd Schilling, Margit Lützow & Ingrid Kögel-Knabner (2013). Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) - Implications for carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 295: 162-172.

[23]. Jörg Prietzel & Dominik Christophel (2014). Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. *Geoderma*. 221-222: 28-39.

[24]. Yan Liu, Suyan Li, Xiangyang Sun & Xin Yu (2016). Variations of forest soil organic carbon and its influencing factors in east China. *Annals of Forest Science*. 73(2): 501-511.

[25]. L. Mujuru, T. Gotoro, E. J. Velthorst, J. Nyamangara & M. R. Hoosbeek (2014). Soil carbon and nitrogen sequestration over an age sequence of *Pinus patula* plantations in Zimbabwean Eastern Highlands. *Forest Ecology and Management*. 313: 254-265.

[26]. Jörn P. W. Scharlemann, Edmund V. J. Tanner, Roland Hiederer & Valerie Kapos (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*. 5(1): 81-91.

[27]. Yuanhe Yang, Anwar Mohammat, Jianmeng Feng, Rui Zhou & Jingyun Fang (2008). Storage, Patterns and Environmental Controls of Soil Organic Carbon in China. *Biogeochemistry*. 84: 131-141.

[28]. LV Cuong, BM Hung, Oluwasanmi Bolanle-Ojo, Xiaoniu Xu, NM Thanh, Chai Lak, Nebiyu Hadush, Jingjing Wang & BV Thang (2020). Biomass and carbon storage in an age-sequence of *Acacia mangium* plantation forests in Southeastern region, Vietnam. *Forest Systems*. 29: e009.

[29]. Võ Đại Hải, Đặng Thịnh Triều, Nguyễn Văn Tiệp, Nguyễn Văn Bích & Đặng Văn Dương (2009). Nghiên cứu tiềm năng hấp thụ carbon và giá trị thương mại của một số loại rừng trồng chính ở Việt Nam. *Báo cáo dự án số VAFS2009*; Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam.

[30]. Nguyễn Minh Thanh & Lê Xuân Trường (2016). Đánh giá trữ lượng carbon trong đất dưới một số trạng thái rừng tự nhiên ở huyện Mang Yang, tỉnh Gia Lai. *Tạp chí Nông nghiệp & Phát triển Nông thôn*. 22: 130-134.

[31]. Phạm Minh Toại, Lê Bá Thường & Nguyễn Hoàng Long (2016). Trữ lượng carbon trong đất dưới tán rừng tự nhiên của Vườn quốc gia Ba Vì. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp*. 4: 10-14.

[32]. Phạm Minh Toại, Lê Bá Thường & Nguyễn Hoàng Long (2016). Trữ lượng carbon trong đất dưới tán

rừng tự nhiên của Vườn Quốc gia Ba Vì. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp. 4: 10-14.

[33]. Lê Văn Cường, Nguyễn Văn Quý & Nguyễn Thị Xuân Viên (2024). Đặc điểm carbon hữu cơ trong đất và tính ổn định theo trình tự thời gian của rừng trồng keo lai (*Acacia hybrid*) tại ban quản lý rừng phòng hộ Xuân Lộc, tỉnh Đồng Nai. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ. 60(6A): 71-82.

[34]. Nguyễn Thị Hồng Hạnh & Đàm Trọng Đức (2017). Đánh giá khả năng tạo bể chứa cacbon của rừng trồng thuần loài trang (*Kandelia obovata* Sheue, Liu & Yong) ven biển xã Đa Lộc, huyện Hậu Lộc, tỉnh Thanh Hóa. Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Khoa học Tự nhiên và Công nghệ. 33(3): 14-25.

[35]. Nguyễn Ngọc Duy, Nguyễn Như Quỳnh & Nguyễn Xuân Hoàng (2021). Đánh giá sự tích lũy carbon trong đất rừng ngập mặn tại Vườn Quốc gia mũi Cà Mau. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ. 57(6A): 130-138.

[36]. Feihan Yu & Lixin Tian (2024). Research Progress on the Forest Soil Organic Carbon Dynamics. Anhui Forestry Science and Technology. 50(4): 10-14.

[37]. Daniel P Rasse, Cornelia Rumpel & Marie-France Dignac (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant and soil. 269(1): 341-356.

[38]. Gerrit Angst, Kevin E Mueller, Klaas GJ Nierop & Myrna J Simpson (2021). Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry. 156: 108189.

[39]. Chao Liang, Joshua P Schimel & Julie D Jastrow (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. Nature microbiology. 2(8): 1-6.

[40]. Guomo Zhou, Enbin Liu & Guanghui She (2006). Advances in Research Methods of Forest Soil Carbon Pools. Journal of Zhejiang Forestry University. 23(2): 207-216.

[41]. Zhang Hui, Duan HuaBo, Song MingWei & Guan DongSheng (2018). The dynamics of carbon accumulation in *Eucalyptus* and *Acacia* plantations in the Pearl River Delta region. Annals of Forest Science. 75: 4.

[42]. Shaoqiang Wang, Chenghu Zhou & Keren Li (2000). Analysis of Soil Organic Carbon Pools and Their Spatial Distribution Characteristics in China. Acta Geographica Sinica. 55(5): 533-544.

[43]. Xiaolu Tang, Mingpeng Xia, César Pérez-Cruzado, Fengying Guan & Shaohui Fan (2017). Spatial distribution of soil organic carbon stock in Moso bamboo forests in subtropical China. Scientific Reports. 7(1): 42640.

[44]. Haibin Wu, Zhengtang Guo & Changhui Peng (2003). Distribution and storage of soil organic carbon in China. Global biogeochemical cycles. 17(2): 1048.

[45]. Huajun Fang, Shulan Cheng, Yongsheng Wang, Guirui Yu, Minjie Xu, Xusheng Dang, Linsen Li & Lei Wang (2014). Changes in soil heterotrophic respiration, carbon availability, and microbial function in seven forests along a climate gradient. Ecological Research. 29: 1077-1086.

[46]. Umakant Mishra & Ranjith B Mapa (2019). National soil organic carbon estimates can improve global estimates. Geoderma. 337: 55-64.

[47]. Budiman Minasny, Brendan P Malone, Alex B McBratney, Denis A Angers, Dominique Arrouays, Adam Chambers, Vincent Chaplot, Zueng-Sang Chen, Kun Cheng & Bhabani S Das (2017). Soil carbon 4 per mille. Geoderma. 292: 59-86.

[48]. Robert J Blakemore (2024). Biomass Refined: 99% of Organic Carbon in Soils. Biomass. 4(4): 1257-1300.

[49]. Shaoqiang Wang, Jiuyan Liu & Guirui Yu (2003). Error Analysis of Estimating Soil Organic Carbon Stock in China's Terrestrial Ecosystems. Chinese Journal of Applied Ecology. 14(5): 797-802.

[50]. Wilfred M Post, John Pastor, Paul J Zinke & Alan G Stangenberger (1985). Global patterns of soil nitrogen storage. Nature. 317(6038): 613-616.

[51]. Andrew M Crowe, Ai Sakata, Colin McClean & Malcolm S Cresser (2004). What factors control soil profile nitrogen storage? Water, Air, & Soil Pollution: Focus. 4: 75-84.

[52]. Lin Yang, Yanyan Cai, Lei Zhang, Mao Guo, Anqi Li & Chenghu Zhou (2021). A deep learning method to predict soil organic carbon content at a regional scale using satellite-based phenology variables. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 102: 102428.

[53]. Hongju Zhao, Chong Luo, Depiao Kong, Yunfei Yu, Deqiang Zang & Fang Wang (2024). Spatial and Temporal Variations in Soil Organic Matter and Their Influencing Factors in the Songnen and Sanjiang Plains of China (1984–2021). Land. 13(9): 1447.

[54]. Pritpal Singh & Dinesh Kumar Benbi (2020). Modeling soil organic carbon with DNDC and RothC models in different wheat-based cropping systems in north-western India. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 51(9): 1184-1203.

[55]. Zekun Zhong, Zhengxing Chen, Yadong Xu, Chengjie Ren, Gaihe Yang, Xinhui Han, Guangxin Ren & Yongzhong Feng (2018). Relationship between soil organic carbon stocks and clay content under different climatic conditions in Central China. Forests. 9(10): 598.

- [56]. Richard D Bardgett, Chris Freeman & Nicholas J Ostle (2008). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME journal*. 2(8): 805-814.
- [57]. Rattan Lal (2013). Soil carbon management and climate change. *Carbon Management*. 4(4): 439-462.
- [58]. Zhongkui Luo, Wenting Feng, Yiqi Luo, Jeff Baldock & Enli Wang (2017). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global change biology*. 23(10): 4430-4439.
- [59]. Tommaso Chiti, L Perugini, D Vespertino & R Valentini (2016). Effect of selective logging on soil organic carbon dynamics in tropical forests in central and western Africa. *Plant and Soil*. 399: 283-294.
- [60]. Thilde Bech Bruun, Bo Elberling, Andreas de Neergaard & Jakob Magid (2015). Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. *Land Degradation & Development*. 26(3): 272-283.
- [61]. Wilfred M Post & Kyung C Kwon (2000). Soil carbon sequestration and land - use change: processes and potential. *Global change biology*. 6(3): 317-327.
- [62]. Alex Amerh Agbeshie, Simon Abugre, Thomas Atta-Darkwa & Richard Awuah (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*. 33(5): 1419-1441.
- [63]. Rolf Nieder, Dinesh K Benbi & Klaus Isermann (2024). Soil organic matter dynamics. In: *Handbook of processes and modeling in the soil-plant system*. CRC Press: 345-408f.
- [64]. Xuefeng Zhu, Randall D Jackson, Evan H DeLucia, James M Tiedje & Chao Liang (2020). The soil microbial carbon pump: From conceptual insights to empirical assessments. *Global Change Biology*. 26(11): 6032-6039.
- [65]. Shams R Rahmani, Jason P Ackerson, Darrell Schulze, Kabindra Adhikari & Zamir Libohova (2022). Digital mapping of soil organic matter and cation exchange capacity in a low relief landscape using LiDAR data. *Agronomy*. 12(6): 1338.
- [66]. Qiulan Wu, Yong Liang, Ying Li, Xizhi Wang, Lei Yang & Xiaotong Wang (2017). Factors acquisition and content estimation of farmland soil organic carbon based upon Internet of Things. *Chinese Geographical Science*. 27: 431-440.
- [67]. T Blesslin Sheeba, LD Vijay Anand, Gunaselvi Manohar, Saravana Selvan, C Basil Wilfred, K Muthukumar, S Padmavathy, P Ramesh Kumar & Belete Tessema Asfaw (2022). Machine Learning Algorithm for Soil Analysis and Classification of Micronutrients in IoT - Enabled Automated Farms. *Journal of Nanomaterials*. 2022(1): 5343965.