



DOI:10.22144/ctujos.2024.486

## 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

Lê Văn Cường<sup>1\*</sup>, Nguyễn Văn Quý<sup>2</sup> và Nguyễn Thị Xuân Viên<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Lâm nghiệp, Phân hiệu Đồng Nai, Việt Nam

<sup>2</sup>Trung tâm Nhiệt đới Việt – Nga, Chi nhánh phía Nam, Việt Nam

<sup>3</sup>Phòng Tài nguyên và Môi trường, huyện Cẩm Mỹ, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ (Corresponding author): cuongvf.90@gmail.com

### Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 22/06/2024

Sửa bài (Revised): 12/07/2024

Duyệt đăng (Accepted): 13/09/2024

**Title:** Characteristics of soil organic carbon and stability along a chronosequence of *Acacia hybrid* plantation in Xuan Loc Protection Forest Management Board, Dong Nai province

**Author(s):** Le Van Cuong<sup>1\*</sup>, Nguyen Van Quy<sup>2</sup> and Nguyen Thi Xuan Vien<sup>3</sup>

**Affiliation(s):** <sup>1</sup>Vietnam National University of Forestry – Dong Nai Campus, Viet Nam; <sup>2</sup>Russia Tropical Science and Technology Research Center, Southern Branch of Joint Viet Nam, Viet Nam; <sup>3</sup>Division of Natural Resources and Environment, Cam My district, Viet Nam

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm khám phá động thái tích lũy SOC và xác định các nhân tố chính điều chỉnh sự tích lũy SOC ở ba độ sâu tầng đất (0-10, 10-30 và 30-60 cm) của rừng trồng keo lai theo các tuổi lâm phần khác nhau (3, 5, 7 năm tuổi) tại rừng phòng hộ Xuân Lộc, tỉnh Đồng Nai. Kết quả cho thấy: (1) Hàm lượng SOC tăng lên đáng kể theo tuổi lâm phần. Hơn nữa, hàm lượng SOC chủ yếu tập trung ở lớp đất mặt và giảm đáng kể theo độ sâu đất. (2) Trữ lượng SOC (TC) tăng từ 57,86 tấn/ha (lâm phần tuổi 3) lên 100,57 tấn/ha (lâm phần tuổi 7) trong quá trình phát triển của rừng. TC có sự kết tụ bề mặt rõ ràng, với hơn 60% tổng TC hiện diện ở độ sâu 0–30 cm. (3) Dữ liệu từ phân tích phân vùng biến động (Variation Partitioning Analysis) cho thấy hàm lượng đạm tổng số, sinh khối vật rơi rụng và pH của đất là những yếu tố chính chi phối sự thay đổi về hàm lượng SOC. Kết quả nghiên cứu này cung cấp thông tin cho các hoạt động quản lý rừng trồng keo lai cũng như trong việc tiến hành lập mô hình tích lũy C trong đất rừng tại khu vực.

**Từ khóa:** Rừng trồng keo lai, tính ổn định carbon, hàm lượng carbon trong đất, trữ lượng carbon trong đất, tuổi lâm phần

### ABSTRACT

This study was carried out to explore the dynamics of SOC accumulation and identify the major factors regulating SOC accumulation at three soil depths (0-10, 10-30, and 30-60 cm) of *Acacia hybrid* plantations according to different stand ages (3, 5, and 7 years old) in Xuan Loc protection forest, Dong Nai province. The study revealed that: (1) SOC content increased significantly with forest age. Furthermore, SOC concentration is primarily concentrated in the topsoil layer and decreases considerably with depth. (2) SOC stocks (TC) increased from 57.86 tons/ha (3 year old stand) to 100.57 tons/ha (7 year old stand) during the forest development. TC demonstrated noticeable surface aggregation, with more than 60% present at a depth of 0–30 cm. (3) Data from Variation Partitioning Analysis revealed that total nitrogen content, litter biomass, and soil pH were the main factors that obviously exhibited alterations in SOC content. The results of this study provide information for *Acacia hybrid* plantation management activities as well as for conducting modelling of C accumulation in forest soil in the area.

**Keywords:** *Acacia hybrid* plantation, carbon stability, soil carbon content, soil carbon storage, stand age

## 1. GIỚI THIỆU

Đất rừng được xác định là bể chứa cacbon (Carbon \_ C) hữu cơ quan trọng trong các hệ sinh thái trên cạn, chiếm khoảng 39% tổng trữ lượng C hữu cơ trong đất (Carbon hữu cơ trong đất \_ SOC) trên thế giới (Liu et al., 2011). Những thay đổi nhỏ trong bể chứa SOC của đất rừng có thể gây ra những biến động đáng kể về nồng độ carbonic (carbonic - CO<sub>2</sub>) trong khí quyển, từ đó ảnh hưởng đến cân bằng C và biến đổi khí hậu toàn cầu (Yang et al., 2018; Chen et al., 2021). Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, SOC là một trong những nhân tố quan trọng giúp duy trì cấu trúc đất, chức năng sinh thái, chu trình dinh dưỡng và sự ổn định của các hệ sinh thái rừng (Yang et al., 2014; Luo et al., 2017). Do đó, việc định lượng chính xác về SOC trong đất rừng và điều tra các thông số chính điều chỉnh nó là rất quan trọng, giúp dự đoán nồng độ CO<sub>2</sub> trong khí quyển ở tương lai và góp phần đánh giá chính xác cân bằng C trong các kịch bản biến đổi khí hậu.

Keo lai (*Acacia* hybrid) là một loài cây trồng rừng chủ lực ở vùng Đông Nam Bộ nước ta. Loài cây này có đặc điểm sinh trưởng nhanh, khả năng thích ứng cao, chất lượng gỗ tốt và cho năng suất ổn định. Vì vậy, cây keo lai đóng vai trò tích cực trong việc thúc đẩy nền kinh tế quốc gia và nâng cao hiệu quả sinh thái cho các vùng kinh tế khác nhau. Theo kết quả công bố hiện trạng rừng toàn quốc, rừng trồng keo lai tính đến cuối năm 2022 có diện tích khoảng 1,5 triệu ha, chiếm khoảng 32,80% tổng diện tích rừng trồng cả nước (Chau et al., 2023). Bên cạnh cung cấp gỗ cho các ngành công nghiệp, rừng trồng keo lai còn giữ vai trò bảo vệ môi trường như giảm tác động tiêu cực đến chu trình C thông qua việc hấp thụ và lưu trữ C (Cuong et al., 2024). Do đó, sự hiểu biết về động lực tích lũy C trong đất rừng keo lai, đặc biệt tại khu vực Ban Quản lý rừng phòng hộ Xuân Lộc, huyện Xuân Lộc, tỉnh Đồng Nai - một đơn vị đang thực hiện nhiều mô hình trồng rừng sản xuất kinh doanh gỗ đường kính lớn với tổng diện tích 10.034,32 ha, trong đó loài cây keo lai chiếm ưu thế trên 50% tổng số diện tích rừng của đơn vị (Vu, 2019) có ý nghĩa rất quan trọng trong việc dự đoán chính xác trữ lượng C trong đất, xây dựng các biện pháp và chiến lược quản lý rừng bền vững cũng như hiểu được vai trò của chúng trong việc thích ứng và giảm thiểu biến đổi khí hậu. Trong nghiên cứu này, ba lâm phần ở tuổi 3, tuổi 5 và tuổi 7 của rừng trồng keo lai tại rừng phòng hộ Xuân Lộc (rừng phòng hộ Xuân Lộc \_ RPH Xuân Lộc), tỉnh Đồng Nai đã được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu. Mục tiêu cụ thể của nghiên cứu này là (1) phân tích động thái tích

lũy SOC và (2) xác định các nhân tố chính điều chỉnh sự tích lũy SOC của rừng trồng keo lai ở các độ tuổi khác nhau.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện tại RPH Xuân Lộc (12°05'00" đến 13°19'00" vĩ độ Bắc và 108°37'00" đến 109°10'00" kinh độ Đông), nằm trên địa bàn huyện Xuân Lộc, tỉnh Đồng Nai (Hình 1). Huyện này nằm trong vùng có chế độ khí hậu nhiệt đới gió mùa cận xích đạo, có nền nhiệt cao quanh năm và ít gió bão. Khí hậu khu vực phân hóa thành hai mùa rõ rệt, mùa mưa từ tháng 5 đến cuối tháng 11 và mùa khô từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau, lượng mưa trung bình hàng năm dao động từ 1.956 đến 2.139 mm/năm. Nhiệt độ bình quân năm khoảng 24,5°C. Loại đất tại khu vực nghiên cứu là đất xám nâu, phát triển trên đá mẹ Granit, độ dày tầng đất trên 40 cm. Cây keo lai trồng tại khu vực RPH Xuân Lộc chiếm khoảng 50% tổng số diện tích rừng trồng với sự đa dạng các độ tuổi và mật độ khác nhau.

### 2.2. Thiết kế thí nghiệm

Từ tháng 2 đến tháng 6 năm 2023, ba lâm phần ở ba độ tuổi (3, 5, 7 tuổi) của rừng trồng keo lai đại diện cho ba cấp tuổi khác nhau (cấp I: rừng non, cấp 2: rừng sào và cấp 3: rừng gần thành thực) có điều kiện lập địa tương tự nhau đã được lựa chọn để thu thập số liệu. Tất cả các lâm phần đều được trồng luân canh chu kỳ thứ hai và được bón phân NPK 16-16-8 năm đầu tiên với khối lượng 100 kg/ha. Mật độ ban đầu của các lâm phần là 2.220 cây/ha (3 m × 1,5 m). Trong suốt giai đoạn sinh trưởng và phát triển của các lâm phần, không có hoạt động tía thưa nào được thực hiện. Hơn nữa, trong quá trình chăm sóc cây trồng, ta đều tiến hành loại bỏ dây leo và cây bụi thâm tươi dưới tán mỗi năm một lần nên số lượng của chúng mọc thưa thớt dưới tán các lâm phần rừng keo lai.

Đối với mỗi tuổi rừng, tiến hành lập 3 ô tiêu chuẩn với diện tích là 500 m<sup>2</sup>/ô (25 m × 20 m). Như vậy, tổng số ô tiêu chuẩn là 9 ô, gồm 3 tuổi rừng x 3 ô/tuổi rừng. Tất cả các ô tiêu chuẩn đều hướng về phía Đông Nam và có độ dốc nhỏ hơn 5°. Chiều cao cây, bao gồm chiều cao vút ngọn (H<sub>vn</sub>) và chiều cao dưới cành (H<sub>dc</sub>) và đường kính ngang ngực (DBH, 1,3 m) được đo đếm và ghi lại cho tất cả các cây trong mỗi ô. Độ tàn che tầng cây cao được xác định bằng phần mềm chụp ảnh bán cầu phân tích độ tàn che (**Gap Light Analysis Mobile App**) cài đặt trong thiết bị di động, mỗi ô tiêu chuẩn xác định 20 điểm, lấy giá trị trung bình đại diện cho ô tiêu chuẩn.

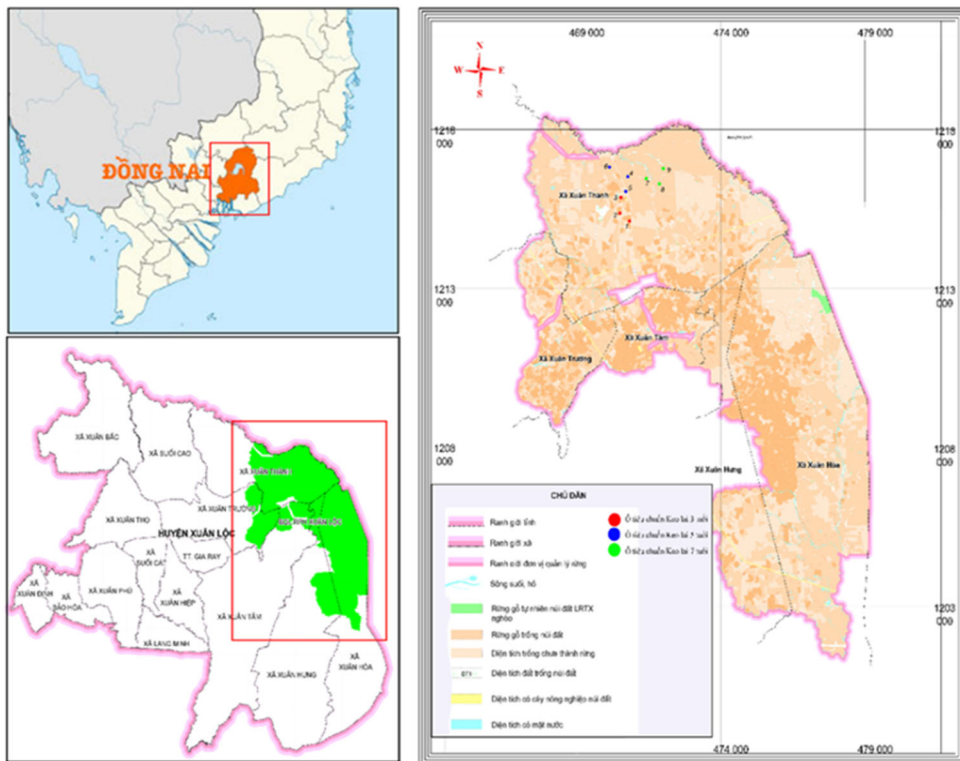
Trong mỗi ô tiêu chuẩn, ta tiến hành lập 5 ô dạng bản tại vị trí 4 góc và 01 ở giữa của ô tiêu chuẩn, diện tích 1 m<sup>2</sup>/ô (1 x 1 m) để tiến hành điều tra vật rơi rụng. Tất cả vật rơi rụng trong các ô dạng bản được thu thập và cân theo trọng lượng tươi bằng cân đĩa, sau đó khoảng 500 g mẫu được thu thập đưa về phòng thí nghiệm và cho vào túi sấy ở nhiệt độ 105°C

để sấy khô đến khối lượng không đổi. Sau khi cân, thu được khối lượng khô của vật rơi rụng trong các ô dạng bản và lượng vật rơi rụng trên một đơn vị diện tích. Các mô tả chi tiết khác về địa điểm nghiên cứu và ước tính sinh khối vật rơi rụng được trình bày ở Bảng 1.

**Bảng 1. Đặc điểm lâm phần của rừng keo lai ở ba độ tuổi khác nhau**

Các nhân tố đo đếm	Tuổi lâm phần (năm)		
	3	5	7
MD (cây/ha)	2.067±50 <sup>a</sup>	1.947±70 <sup>b</sup>	1.713±50 <sup>c</sup>
DBH (cm)	8,17±0,39 <sup>a</sup>	11,31±0,22 <sup>b</sup>	17,61±0,06 <sup>c</sup>
H <sub>vn</sub> (m)	7,62±0,12 <sup>a</sup>	13,63±0,06 <sup>b</sup>	16,00±0,30 <sup>c</sup>
H <sub>dc</sub> (m)	5,36±0,40 <sup>a</sup>	10,36±0,13 <sup>b</sup>	11,46±0,45 <sup>c</sup>
D <sub>t</sub>	0,65±0,04 <sup>a</sup>	0,74±0,04 <sup>b</sup>	0,87±0,03 <sup>c</sup>
VRR (Mg/ha)	7,21±0,44 <sup>a</sup>	8,28±0,67 <sup>b</sup>	10,89±0,28 <sup>c</sup>
Độ dốc (°)	4	3	3
Độ cao (m)	110	107	112
Độ dày tầng đất (cm)	40-45	45-55	60-70

Ghi chú: Các giá trị biểu thị giá trị trung bình ± Độ lệch chuẩn (SD). Trong một hàng, các chữ cái viết thường khác nhau chỉ ra sự khác biệt đáng kể ở mức p<0,05. MD là viết tắt của mật độ lâm phần, DBH là đường kính ngang ngực (1,3 m), H<sub>vn</sub> là chiều cao vút ngọn của cây, H<sub>dc</sub> là chiều cao dưới cành của cây, D<sub>t</sub> là độ tàn che, VRR là sinh khối vật rơi rụng.



**Hình 1. Vị trí các ô điều tra thực nghiệm tại Ban Quản lý rừng phòng hộ Xuân Lộc, huyện Xuân Lộc, tỉnh Đồng Nai**

### 2.3. Thu thập mẫu đất

Dựa theo các phương pháp điều tra lâm học cơ bản (Cuong et al., 2024), trước khi thu thập mẫu đất, lớp vật rơi rụng ở mỗi ô mẫu được dọn bỏ. Các mẫu đất ở các độ sâu khác nhau 0 - 10, 10 - 30 và 30 - 60 cm được thu thập bằng phương pháp lấy mẫu năm điểm ngẫu nhiên tạo thành một đường cong hình chữ S trong mỗi ô. Một mũi khoan đất có đường kính 4,5 cm đã được sử dụng để thu thập mẫu ở mỗi mặt cắt phẳng diện. Năm điểm lấy mẫu trong cùng một độ sâu từ mỗi ô mẫu được thu thập ngẫu nhiên và trộn đều để tạo thành mẫu tổ hợp. Tổng cộng, 27 mẫu đất đã được thu thập (3 độ tuổi  $\times$  3 ô lặp lại cho mỗi độ tuổi  $\times$  3 độ sâu tầng đất). Các mẫu đất được sàng qua 2 mm, rễ và các mảnh vụn thô khác cũng được loại bỏ. Các mẫu đất được làm khô trong không khí và bảo quản ở nhiệt độ phòng để xác định các tính chất vật lý và hóa học của đất.

### 2.4. Phân tích trong phòng thí nghiệm

Để ước tính hàm lượng C hữu cơ trong đất và phân tích các yếu tố ảnh hưởng của nó, các tính chất lý hóa của đất như dung trọng, pH đất và hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số (Đạm\_N, Lân\_P và Kali\_K) đã được đo đếm:

(i) Dung trọng của đất được xác định bằng phương pháp dao vòng, trong khi đó pH của đất được đo bằng máy đo pH metter (Sartorius PB-10) theo tỷ lệ đất: nước là 1: 2,5 (Chau et al., 2023);

(ii) Hàm lượng C hữu cơ trong đất (SOC\_g/kg) được xác định bằng quy trình oxy hóa  $H_2SO_4 - K_2Cr_2O_7$  (Van Reeuwijk, 2002);

(iii) Hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số (N, P và K) trong đất được phân tích theo các phương pháp Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam (Tiêu chuẩn Quốc gia Việt Nam\_TCVN) (Cuong et al., 2024). Đạm tổng số (g/kg) được xác định theo TCVN 6498:1999; Lân tổng số (g/kg) được xác định theo TCVN 8940:2011; và Kali tổng số (g/kg) được xác định theo TCVN 8660:2011.

### 2.5. Trữ lượng carbon hữu cơ trong đất

Trữ lượng carbon hữu cơ trong mỗi tầng đất được tính toán theo hàm lượng C hữu cơ tổng số, dung trọng của đất và độ sâu lấy mẫu. Các phần thô (> 2 mm) rất hiếm trong các mẫu đất. Do đó, phương trình sau được sử dụng để tính toán trữ lượng C hữu cơ tổng số trong đất (TC) (Deng et al., 2013; Wang et al., 2019).

$$TC_i = SOC_i \times D_i \times d_i \times 10^{-1} \quad (1)$$

Trong đó:  $TC_i$ , trữ lượng carbon hữu cơ trong tầng đất thứ  $i$  (tấn/ha);  $i$  đại diện cho các tầng đất 0 - 10 cm, 10 - 30 cm và 30 - 60 cm;  $SOC_i$ , hàm lượng carbon hữu cơ tổng số của tầng đất thứ  $i$  (g/kg);  $D_i$ , dung trọng của tầng đất thứ  $i$  (g/cm<sup>3</sup>);  $d_i$ , độ sâu của tầng đất thứ  $i$  (cm).

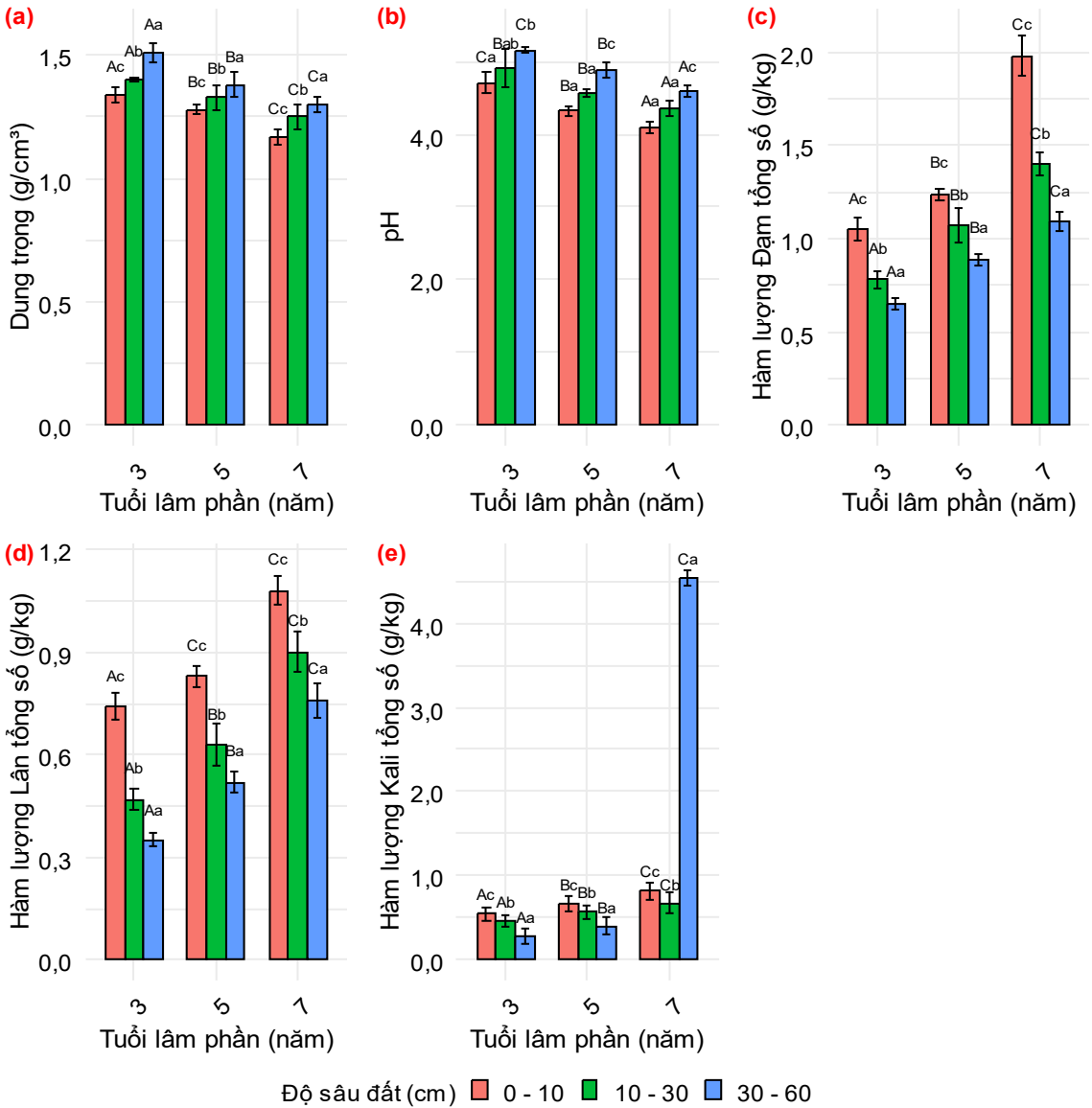
### 2.6. Phân tích thống kê

Tất cả dữ liệu đã được kiểm tra tính phân bố chuẩn và tính đồng nhất của phương sai bằng cách sử dụng phép kiểm định Kolmogorov-Smirnov và Levene trước khi tiến hành phân tích thống kê. Sự khác biệt giữa hàm lượng và trữ lượng C hữu cơ cũng như các đặc điểm lý hóa học của đất giữa ba lâm phần và ba độ sâu của đất được kiểm tra bằng phân tích phương sai ANOVA một nhân tố, sau đó là kiểm định sự sai khác nhỏ nhất có ý nghĩa (LSD) của Fisher ( $p < 0,05$ ). Phương pháp phân tích hồi quy bình phương nhỏ nhất (Ordinary Least Squares - OLS) được sử dụng để ước tính mối quan hệ giữa hàm lượng SOC và các biến số môi trường (dung trọng, hàm lượng nước trong đất, pH, Đạm tổng số, lân tổng số, kali tổng số và hàm lượng vật rơi rụng) (Nie et al., 2020). Các biến số môi trường không đóng góp đáng kể vào hàm lượng SOC đã bị loại khỏi bước phân tích phân vùng biến động tiếp theo (Nie et al., 2020). Ngoài ra, trước khi thực hiện phân tích phân vùng biến động, mô hình phân tích hồi quy đa biến theo phương pháp từng bước cũng được áp dụng để tránh các vấn đề đa cộng tuyến nghiêm trọng giữa các biến số môi trường được lựa chọn và các biến được giữ lại trong mô hình phân tích hồi quy tuyến tính từng bước được sử dụng trong phân tích phân vùng biến động (Wang et al., 2020). Đối với phân tích phân vùng biến động, sự thay đổi hàm lượng SOC giữa các rừng keo lai ở các độ tuổi khác nhau được phân chia theo các biến giải thích cũng như các tác động kết hợp của chúng. Phương pháp phân tích phân vùng biến động có thể xác định mức độ biến động của biến phân hồi được giải thích bởi các biến được lựa chọn (Legendre, 2008). Tất cả các dữ liệu được xử lý và phân tích thống kê bằng cách sử dụng gói phần mềm R phiên bản 4.3.3 (R Core Team, 2022).

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Đặc điểm đất dưới tán rừng keo lai

Số liệu phân tích đất trên 09 OTC tại khu vực được tổng hợp và trình bày trong Hình 2.



**Hình 2. Một số đặc điểm lý hóa học đất dưới tán rừng keo lai**

Ghi chú: Các chữ cái viết hoa khác nhau biểu thị sự khác biệt đáng kể giữa các tuổi rừng trong cùng một độ sâu tầng đất ( $p < 0,05$ ), các chữ cái viết thường khác nhau biểu thị sự khác biệt đáng kể giữa các độ sâu tầng đất trong cùng một tuổi rừng ( $p < 0,05$ ). Các giá trị biểu thị giá trị trung bình  $\pm$  độ lệch chuẩn (SD)

Số liệu từ Hình 2a cho thấy, dung trọng đất tăng theo độ sâu của đất ở cả ba tuổi lâm phần với giá trị lớn nhất ghi nhận được ở độ sâu 30 - 60 cm ( $p < 0,05$ ), dao động từ 1,30 g/cm<sup>3</sup> đến 1,51 g/cm<sup>3</sup>. Trong khi đó, dung trọng đất ở các độ sâu khác nhau giảm đáng kể theo tuổi rừng ( $p < 0,05$ ). Giá trị dung trọng đất trung bình giảm từ 1,42 g/cm<sup>3</sup> ở lâm phần tuổi 3 xuống 1,24 g/cm<sup>3</sup> ở lâm phần tuổi 7. Theo thang đánh giá về dung trọng đất của Katrinski (Sam et al., 2006), đất dưới tán rừng keo lai trong khu vực

nguyên cứu thuộc đất bị nén chặt dưới tầng canh tác (lâm phần tuổi 3) đến đất bị nén chặt (lâm phần tuổi 5) và đất bị nén ít (lâm phần tuổi 7). Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, sự phát triển của cây, sự xâm nhập của hệ thống rễ, sự phát triển của giun và các cấu trúc vi sinh vật khác sẽ làm mềm lớp đất bị nén và tăng hàm lượng chất hữu cơ trong đất, sau đó ảnh hưởng đến dung trọng đất (Dang et al., 2017; Ali et al., 2019).

Dữ liệu từ Hình 2b cho thấy, pH của đất giảm đáng kể qua các tuổi lâm phần đối với tất cả các độ sâu lấy mẫu ( $p < 0,05$ ). Giá trị pH trung bình trên tất cả các độ sâu 0 - 60 cm giảm từ 4,93 ở lâm phần tuổi 3 đến 4,35 ở lâm phần tuổi 7. Bất kể tuổi lâm phần, giá trị pH của đất tăng theo độ sâu tầng đất. Tuy nhiên, phân tích thống kê chỉ ra rằng, không có sự khác biệt đáng kể về giá trị pH giữa 2 độ sâu 0 - 10 và 10 - 30 cm ở cùng tuổi rừng ( $p > 0,05$ ). Theo chỉ tiêu đánh giá của Sam et al. (2006), đất tại khu vực thuộc loại đất chua đến chua mạnh. Sự suy giảm giá trị pH ở các khu vực lâm phần già hơn trong nghiên cứu này là do lượng lớn vật rụng rơi xuống và có liên quan đến sự liên kết axit hữu cơ, dẫn đến sự phân hủy chất hữu cơ tăng nhanh (Yin et al., 2021). Điều này được cho là do hàm lượng chất hữu cơ tăng theo tuổi lâm phần (Bảng 1), dẫn đến sự hình thành axit humic trong đất (Bot & Benites, 2005). Axit humic là thành phần quan trọng của các chất humic, thành phần hữu cơ chính của mùn trong đất, được tạo ra bởi quá trình phân hủy sinh học các chất hữu cơ chết.

Số liệu tổng hợp ở Hình 2c-2e cho thấy, sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số (đạm, lân và kali) trong đất được quan sát giữa ba tuổi lâm phần ở tất cả các độ sâu lấy mẫu ( $p < 0,05$ ). Các giá trị của các thông số này tăng theo tuổi rừng trồng, cao nhất ở rừng trồng tuổi 7 và thấp nhất ở rừng trồng tuổi 3 và xu hướng này cho thấy sự nhất quán ở cả ba độ sâu của đất. Kết quả tổng hợp ở Bảng 1 phản ánh một thực tế, đất dưới tán rừng trồng keo lai 7 tuổi do độ tàn che và độ dày lớp thảm khô lá rụng dày hơn so với các tuổi rừng trồng khác đã ảnh hưởng trực tiếp đến hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số trong đất. Điều đó chứng tỏ rằng, thảm thực vật vừa có tác dụng che phủ đất, bảo vệ đất và chống xói mòn rửa trôi cho đất, vừa trả lại cho đất một lượng vật rơi rụng đáng kể, qua quá trình phân giải của vi sinh vật đất đã tạo hàm lượng dinh dưỡng cho đất (Afifi et al., 2021; Cuong et al., 2024). Do vậy, hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số dưới trạng thái có độ che phủ cao sẽ lớn hơn hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số ở trạng thái có độ che phủ thấp. Tuy nhiên, xét theo chiều sâu phẫu diện, hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số (ngoại trừ kali) trong đất giảm đáng kể với sự gia tăng độ sâu của đất trên cả ba tuổi lâm phần. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, hàm lượng N và P trong đất bị ảnh hưởng bởi sự phân bố phong phú của lượng vật rơi rụng trên mặt đất và sự phân bố của hệ rễ dưới mặt đất (Yin et al., 2021; Chau et al., 2024). Do đó, hàm lượng N và P giảm theo chiều sâu. Bên cạnh đó, hàm lượng K trong đất

bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, trong đó thành phần cơ giới (hàm lượng sét vật lý) là yếu tố chính chi phối đến sự biến đổi vì hàm lượng sét vật lý có khả năng hấp phụ cao đối với K. Nghiên cứu trước đây đã thừa nhận rằng, hàm lượng sét vật lý có xu hướng ngày càng tăng bằng cách phân tích thành phần cấp hạt đối với mặt cắt phẫu diện, do đó dẫn đến hàm lượng K tăng đáng kể theo chiều sâu phẫu diện (Wang et al., 2013).

### 3.2. Hàm lượng C hữu cơ trong đất dưới tán rừng keo lai

Hàm lượng SOC của tất cả các rừng trồng keo lai là cao nhất ở tầng đất mặt (0 - 10 cm) và thể hiện xu hướng giảm đáng kể theo độ sâu tầng đất ( $p < 0,05$ , hình 3a). Phát hiện này phù hợp với kết quả từ các nghiên cứu trước đây (Selvaraj et al., 2018; Cuong et al., 2023; Chau et al., 2024). Điều này có thể được giải thích là do thực vật ảnh hưởng đến lượng chất hữu cơ đầu vào của C trong đất giảm với sự gia tăng độ sâu tầng đất, nên hàm lượng C ở lớp đất bề mặt được cho là sẽ cao hơn ở các lớp đất sâu hơn (Noh et al., 2010; Yin et al., 2021). Kết quả này cho thấy, lớp đất bề mặt tham gia tích cực nhất vào quá trình hấp thụ C (Wang et al., 2021). Hơn nữa, hàm lượng C trong hai lớp đất trên cùng (0-10 cm và 10-30 cm) và lớp đất sâu nhất (30-60 cm) tăng đáng kể khi tuổi của rừng trồng tăng lên. Ở độ sâu 0 - 10, 10 - 30 và 30 - 60 cm; hàm lượng SOC của rừng keo lai 3 tuổi tương ứng lần lượt là 11,66; 7,70; 4,58 g/kg; hàm lượng SOC của rừng keo lai 5 tuổi tương ứng lần lượt là 16,16; 9,94 và 6,77 g/kg; và hàm lượng SOC của rừng keo lai 7 tuổi tương ứng lần lượt là 23,49; 13, 71; 9,96 g/kg. Điều này có thể là do năng suất vật rơi rụng ngày càng tăng và quá trình phân hủy chậm ở các lâm phần già hơn (Ming et al., 2014; Zhang et al., 2019).

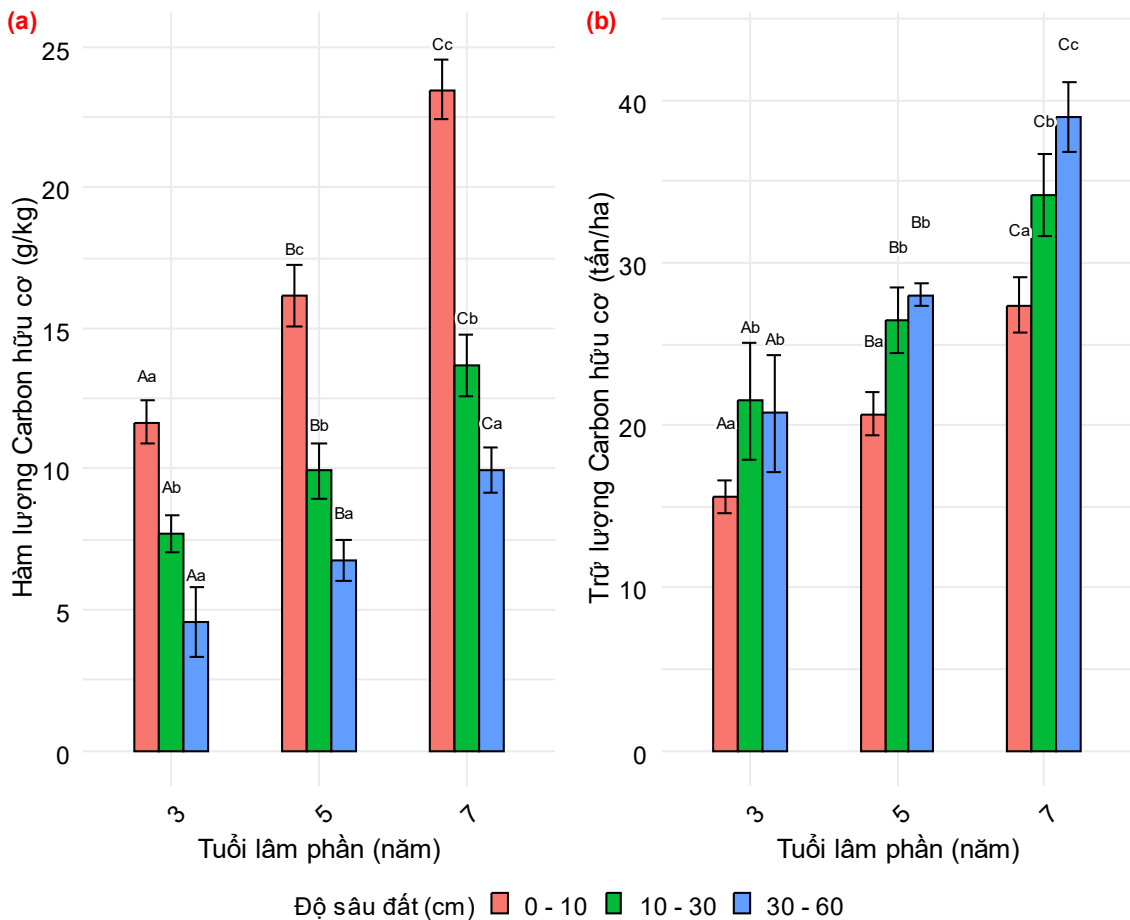
### 3.3. Trữ lượng C hữu cơ trong đất dưới tán rừng keo lai

Trữ lượng C hữu cơ quan sát được trong đất khoáng các độ sâu khác nhau tăng liên tục theo tuổi rừng ( $p < 0,05$ , Hình 3b). Cụ thể, trữ lượng C hữu cơ trong các rừng keo lai từ tuổi 3 đến tuổi 7: (i) ở độ sâu 0 - 10 cm tăng từ 15,62 tấn/ha đến 27,41 tấn/ha; (ii) ở độ sâu 10 - 30 cm tăng từ 21,49 tấn/ha đến 34,19 tấn/ha; (iii) ở độ sâu 30 - 60 cm tăng từ 20,74 tấn/ha đến 38,97 tấn/ha; (iv) và ở độ sâu 0 - 60 cm tăng từ 57,86 tấn/ha đến 100,57 tấn/ha. Kết quả này cho thấy một quá trình tích lũy rõ ràng của C hữu cơ trong các tầng đất khoáng sau khi trồng rừng. Quan sát này có thể được giải thích, ít nhất một phần là do sự tích tụ quan trọng của các vật liệu hữu cơ trong đất (vật rơi rụng và rễ cây) khi tuổi lâm

phần ngày càng tăng ở các rừng trồng keo lai (Cuong et al., 2024; Zhang et al., 2019). Ngoài ra, khi tuổi rừng tăng lên, hoạt động của enzyme và vi sinh vật trong đất cũng tăng lên từ đó tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình chuyển hóa và lưu trữ dinh dưỡng trong đất (García de León et al., 2016). Tuy nhiên, các nghiên cứu khác đã phát hiện ra rằng trữ lượng SOC trong đất thường giảm trong giai đoạn đầu sau đó tăng (Wang et al., 2018), tăng trong giai đoạn đầu sau đó giảm (Ali et al., 2019); hoặc không có ảnh hưởng đáng kể (Yue et al., 2018) trong quá trình phát triển của rừng. Những kết quả này chỉ ra rằng, tuổi rừng có thể không tác động trực tiếp đến hàm lượng và trữ lượng SOC mà tuổi rừng có thể ảnh hưởng đến hàm lượng và trữ lượng SOC thông qua

các yếu tố sinh học và phi sinh học khác (Peichl & Arain, 2006). Kết quả là đã có các kết luận khác nhau về mối quan hệ giữa hàm lượng và trữ lượng SOC với tuổi rừng trong các nghiên cứu trước đây.

Ngoài ra, theo hướng phân bố thẳng đứng của SOC, hơn 60% trữ lượng SOC được ghi nhận ở độ sâu 30 cm phía trên cùng trong cả ba tuổi lâm phần (Hình 3b), chứng tỏ rằng tỷ lệ lưu trữ SOC trong đất lớn hơn đáng kể tập trung ở lớp bề mặt. Điều này cho thấy lớp đất mặt ở khu vực nghiên cứu là một bể chứa C lớn mặc dù nó dễ bị xói mòn tự nhiên và sự tác động của con người. Do đó, để thúc đẩy quá trình hấp thụ C, rõ ràng cần phải thực hiện các biện pháp quản lý rừng trồng tốt.



**Hình 3. Hàm lượng và trữ lượng Carbon trong đất dưới tán rừng keo lai**

Ghi chú: Các chữ cái viết hoa khác nhau biểu thị sự khác biệt đáng kể giữa các tuổi rừng trong cùng một độ sâu tầng đất ( $p < 0,05$ ), các chữ cái viết thường khác nhau biểu thị sự khác biệt đáng kể giữa các độ sâu tầng đất trong cùng một tuổi rừng ( $p < 0,05$ ). Các giá trị biểu thị giá trị trung bình  $\pm$  độ lệch chuẩn (SD)



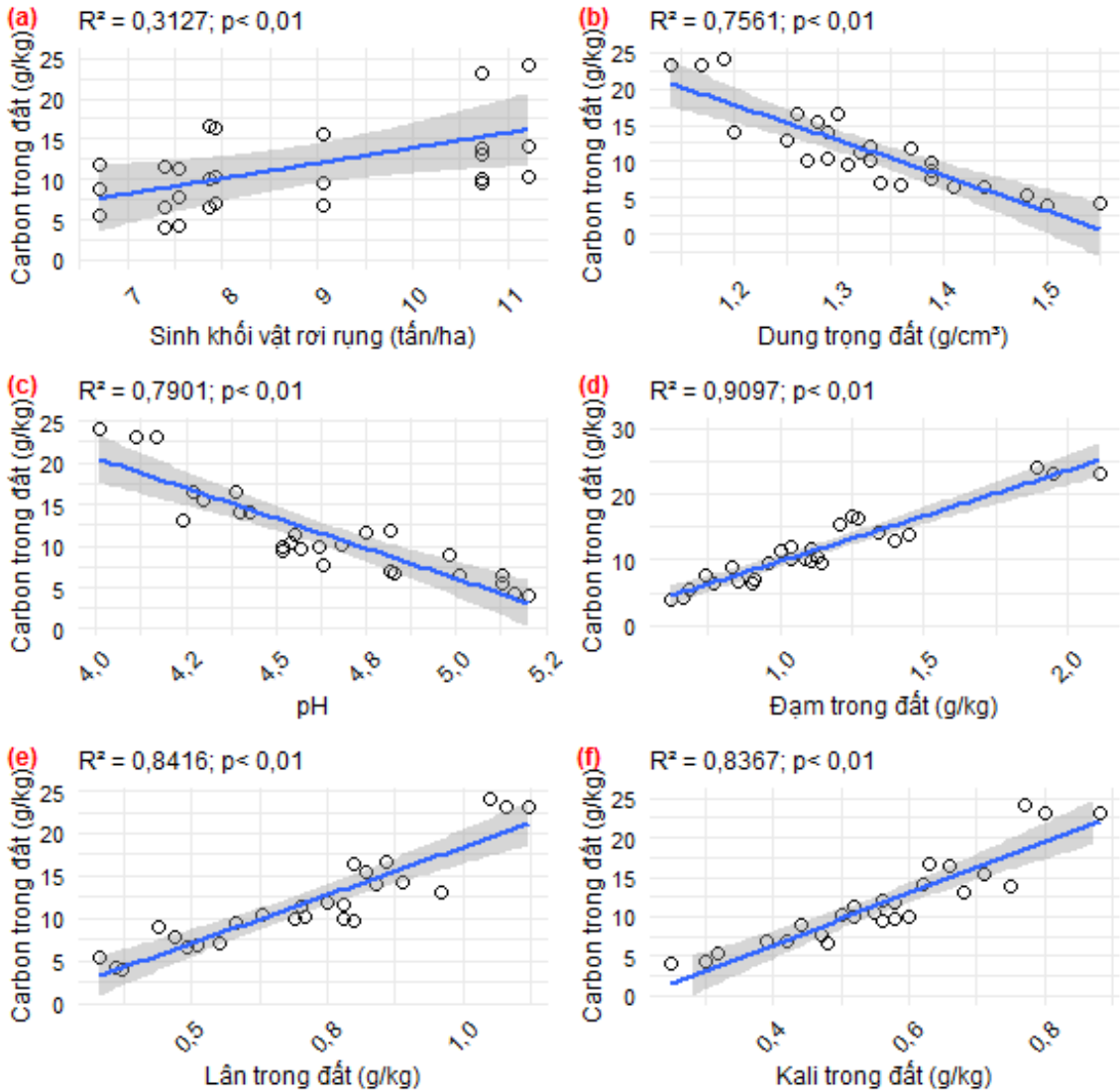
**3.4. Các yếu tố chính điều khiển tiềm năng hấp thụ C hữu cơ trong đất dưới tán rừng keo lai**

(i) Sinh khối vật rơi rụng được quan sát tăng lên đáng kể cùng với hàm lượng SOC ( $R^2 = 0,313, p < 0,01$ , hình 4a). Kết quả này đồng nghĩa sinh khối vật rơi rụng có thể kích thích đáng kể sự tích lũy hàm lượng SOC.

(ii) Có mối tương quan thuận đáng kể giữa hàm lượng các chất dinh dưỡng tổng số (TN, TP, TK) và hàm lượng SOC ( $R^2 = 0,910, p < 0,01$ ; Hình 4d;  $R^2 = 0,842, p < 0,01$ ; Hình 4e;  $R^2 = 0,834, p < 0,01$ ;

Hình 4g), trong khi các giá trị dung trọng và pH đất giảm đáng kể khi SOC tăng ( $R^2 = 0,756, p < 0,01$ , Hình 4b;  $R^2 = 0,790, p < 0,05$ , Hình 4c).

Phân tích kết quả mối tương quan giữa các biến số môi trường với hàm lượng SOC dưới tán rừng keo lai tại khu vực (Hình 4a – 4g) cho thấy rằng, các biến số như sinh khối vật rơi rụng của thực vật, dung trọng, pH, TN, TP và TK ảnh hưởng đáng kể đến hàm lượng SOC; do đó, các biến này đã được lựa chọn để tiến hành phân tích phân vùng biến động tiếp theo.



**Hình 4. Mối quan hệ giữa các biến số môi trường và hàm lượng carbon hữu cơ trong đất dưới tán rừng keo lai ở các tuổi khác nhau**



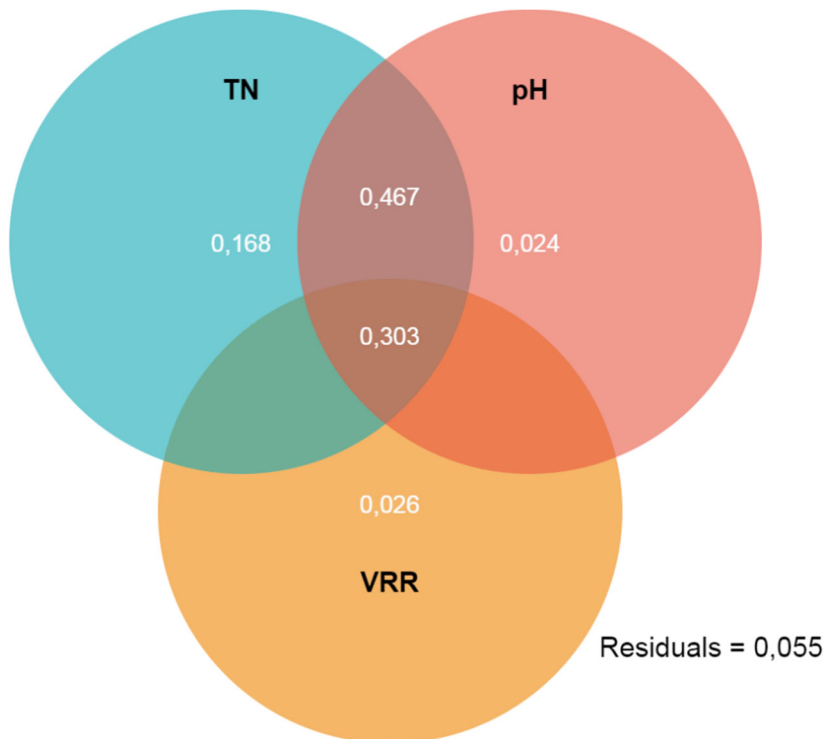
Hơn nữa, để tránh hiện tượng đa cộng tuyến cao giữa các biến số môi trường quan trọng trước khi thực hiện phân tích phân vùng biến động, mô hình phân tích hồi quy đa biến theo phương pháp từng bước cũng đã được sử dụng trên các chỉ tiêu đã lựa chọn. Kết quả phân tích mô hình hồi quy đa biến chỉ ra rằng, các biến số môi trường TN, sinh khối vật rơi rụng và pH của đất là những yếu tố chính điều khiển sự hấp thụ C hữu cơ trong đất và được sử dụng trong phân tích phân vùng biến động, điều này càng chứng minh thêm rằng, hàm lượng SOC được giải thích rõ ràng bởi các biến nói trên và kết quả này được thể hiện ở Bảng 3.

Kết quả phân tích phân vùng biến động cho thấy, tổng lượng biến động được giải thích bởi các biến môi trường đã chọn đối với sự tích lũy hàm lượng SOC là 94,45%, trong khi đó các biến động không giải thích được chỉ là 5,55% (Hình 5). Biến số môi trường chi phối tác động lớn nhất đến sự tích lũy hàm lượng SOC tại khu vực là hàm lượng đạm tổng số, lên tới 16,80%. Điều đó chỉ ra rằng, hàm lượng đạm tổng số trong đất là một thông số mạnh mẽ kiểm soát sự hấp thụ C trong đất rừng keo lai tại khu vực nghiên cứu.

**Bảng 2. Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính từng bước thể hiện sự phụ thuộc của hàm lượng carbon hữu cơ trong đất vào các biến số môi trường**

Biến phụ thuộc	Biến giải thích	Hệ số hồi quy	Sai số chuẩn của hệ số	Giá trị t	Giá trị p	R <sup>2</sup>	VIF
SOC	Hằng số	29,34	8,96	3,28	0,003	0,95	4,37
	TN	11,98	1,39	8,60	<0,001		
	VRR	-0,78	0,22	-3,52	0,002		
	pH	-5,29	1,56	-3,39	0,003		

Ghi chú: SOC, hàm lượng carbon hữu cơ trong đất; VRR, sinh khối vật rơi rụng



**Hình 5. Kết quả phân tích phân vùng biến động về hàm lượng carbon hữu cơ trong đất dưới tán rừng keo lai tại khu vực**

Ghi chú: Phân tích phân vùng biến động bao gồm các biến động được giải thích (ảnh hưởng của TN, VRR, pH đất và các tác động chung của chúng) cũng như các biến động không giải thích được. SOC, hàm lượng carbon hữu cơ trong đất; VRR, sinh khối vật rơi rụng

Trong thực tiễn, các nhà khoa học đã chứng minh rằng C và N trong đất là hai quá trình sinh địa hóa có liên quan chặt chẽ với nhau trong nhiều hệ sinh thái (Abaker et al., 2016; Cuong et al., 2022). Là một trong những chất dinh dưỡng cần thiết nhất cho sự phát triển khỏe mạnh của cây trồng, chất lượng và số lượng N trong đất có thể ảnh hưởng đến năng suất sinh khối và số lượng vật rơi rụng của thực vật, đây là nguồn cung cấp C hữu cơ chủ yếu (Bronson et al., 2004). Keo lai có khả năng cố định đạm sinh học (Zhang et al., 2018), nó có thể duy trì N đầu vào tại các địa điểm trong nghiên cứu này và gián tiếp làm tăng C hữu cơ trong đất. Một phần do sự đóng góp của chúng, sự gia tăng hàm lượng đạm trong đất có thể ảnh hưởng đến sự tích tụ C hữu cơ trong đất (Liu et al., 2011), bao gồm cả sự biến đổi C trong đất dưới tán rừng keo lai tại khu vực.

Vật rơi rụng của thực vật là nguồn cung cấp C chủ yếu cho đất, là nền tảng của chu trình sinh địa hóa và dinh dưỡng của hệ sinh thái rừng, bởi vì sự thay đổi về số lượng và chất lượng của vật rơi rụng có thể ảnh hưởng đến cơ chế phân hủy chất hữu cơ trong đất, qua đó điều chỉnh sự phân hủy chất hữu cơ trong đất, và cuối cùng ảnh hưởng đến sự tích lũy hàm lượng C hữu cơ trong đất (Cuong et al., 2024). Các nghiên cứu đã công bố trước đây về sự phân hủy của vật rơi rụng đã chứng minh rằng, sự hiện diện của vật rơi rụng tạo điều kiện cho sự tích tụ hàm lượng C trong đất, và điều này có mối liên hệ mật thiết và quan trọng với các đặc điểm vật rơi rụng của thực vật (Berg, 2018).

pH của đất thường được coi là yếu tố chính để điều chỉnh quá trình luân chuyển chất hữu cơ trong đất (Duan et al., 2020), vì ảnh hưởng của độ pH đất đến hoạt động của vi sinh vật, quần xã vi sinh vật và sự đa dạng của chúng có thể ảnh hưởng đến sự phân hủy chất hữu cơ trong đất. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng, quá trình axit hóa đất (độ pH thấp) có khả năng làm chậm quá trình phân hủy chất hữu cơ ở một số loại đất chua bằng cách thay đổi thành phần của vi sinh vật và sẽ tạo điều kiện tích lũy SOC nhiều hơn (Lu et al., 2021). Vì vậy, pH đất tương đối thấp có thể tăng cường tích tụ C trong đất ở vùng đất trồng rừng keo lai tại khu vực nghiên cứu.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO (REFERENCES)

Abaker, W. E., Berninger, F., Saiz, G., Braojos, V., & Starr, M. (2016). Contribution of *Acacia senegal* to biomass and soil carbon in plantations of varying age in Sudan. *Forest Ecology and Management*, 368, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.003>

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khám phá động lực tích lũy C hữu cơ trong đất rừng keo lai theo các tuổi lâm phần khác nhau tại rừng phòng hộ huyện Xuân Lộc. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng: (1) Ảnh hưởng của tuổi rừng trồng đến hàm lượng và trữ lượng C hữu cơ trong đất là rất đáng kể. (2) Hàm lượng C hữu cơ trong đất tăng lên rõ rệt theo tuổi rừng. Hơn nữa, hàm lượng C chủ yếu xuất hiện ở lớp đất mặt và giảm đáng kể theo độ sâu. (3) Trữ lượng C hữu cơ trong đất thể hiện xu hướng tăng liên tục trong suốt quá trình phát triển lâm phần và độ sâu tầng đất 0–30 cm phía trên cùng chiếm hơn 60% tổng trữ lượng C trong đất ở cả 3 tuổi lâm phần. (4) Phân tích VPA cho thấy hàm lượng đạm tổng số, vật rơi rụng và pH của đất là những yếu tố chính cho thấy rõ sự thay đổi về hàm lượng SOC. Tổng hợp lại, độ ổn định của SOC tăng lên khi tuổi rừng keo lai tăng lên ở khu vực này. Các kết quả ghi nhận được trong nghiên cứu này hữu ích cho việc quản lý các lâm phần rừng trồng keo lai cũng như trong việc tiến hành lập mô hình tích lũy C trong đất rừng tại khu vực nghiên cứu.

#### LỜI CẢM ƠN

Kết quả nghiên cứu là sản phẩm của Đề tài nghiên cứu Khoa học sinh viên “Đánh giá trữ lượng carbon trong đất dưới tán rừng trồng keo lai (*Acacia hybrid*) tại Ban Quản lý rừng phòng hộ Xuân Lộc, huyện Xuân Lộc, tỉnh Đồng Nai”, Quyết định số 1605/QĐ-PHDHLN-KHCN&HTQT, thời gian thực hiện từ năm 2023-2024. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Ban Quản lý rừng phòng hộ Xuân lộc đã cung cấp những thông tin quý giá về địa điểm nghiên cứu và cho phép chúng tôi sử dụng những khu rừng cho nghiên cứu này. Nhóm tác giả cũng xin cảm ơn PGS.TS. Nguyễn Minh Thanh và các nhà nghiên cứu khác của Trung tâm Thực nghiệm và Phát triển Công nghệ thuộc Trường Đại học Lâm nghiệp Phân hiệu tại tỉnh Đồng Nai (VNUF2) và Bộ môn Sinh thái và Môi trường rừng thuộc Viện Khoa học Lâm nghiệp Nam Bộ (FSIS) đã hỗ trợ phân tích trong phòng thí nghiệm và có những ý kiến đóng góp để hoàn thiện bản thảo này.

Afifi, N., Ismail, J., & Wasli, M. E. (2021). Growth of *Acacia mangium* at different stand ages and soil physicochemical properties in Sarawak, Malaysia. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 44, 773-793. <https://doi.org/10.47836/pjtas.44.4.05>

- Ali, A., Ahmad, A., Akhtar, K., Teng, M., Zeng, W., Yan, Z., & Zhou, Z. (2019). Patterns of biomass, carbon, and soil properties in Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb) plantations with different stand ages and management practices. *Forests*, 10(8), 645. <https://doi.org/10.3390/f10080645>
- Berg, B. (2018). Decomposing litter; limit values; humus accumulation, locally and regionally. *Applied Soil Ecology*, 123, 494-508. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.026>
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The Importance of Soil Organic Matter Key to drought-Resistant Soil and Sustained Food and Production*. FAO Soils Bulletin 80, FAO, Rome.
- Bronson, K. F., Zobeck, T. M., Chua, T. T., Acosta-Martinez, V., Van Pelt, R. S., & Booker, J. D. (2004). Carbon and nitrogen pools of Southern high plains cropland and grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1695-1704. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1695>
- Chau, M. H., Quy, N. V., Hung, B. M., Xu, X. N., Cuong, L. V., Ngoan, T. T., & Dai, Y. Z. (2023). Soil nitrogen storage and associated regulation factors in an *Acacia* hybrid plantation chronosequence in Southern Vietnam. *Applied Ecology and Environmental Research*, 22, 145-162. [https://doi.org/10.15666/aer/2201\\_145162](https://doi.org/10.15666/aer/2201_145162)
- Cuong, L. V., Quy, N. V., Hung, B. M., Chau, M. H., & Doan, P. V. T. D. (2024). The relative importance of stand and soil properties parameters on soil organic matter content of *Acacia* hybrid forests in the South Central Coast Region of Vietnam. *Malaysian Journal of Soil Science*, 28,134-146.
- Chau, M. H., Hung, B. M., Cuong, L. V., Ruan, X., Xiaoni, X., & Thanh, N. M. (2024). Variations in soil carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and stoichiometry with stand age in *Acacia* hybrid plantations in Southern Vietnam. *Biodiversitas*, 25(2), 565-573. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250215>
- Chen, Z., Shen, Y., Tan, B., Li, H., You, C., Xu, Z., Wei, X., Ni, X., Yang, Y., & Zhang, L. (2021). Decreased soil organic carbon under litter input in three subalpine forests. *Forests*, 12(11), 1479. <https://doi.org/10.3390/f12111479>
- Cuong, L., Thang, B., Tope Bolanle-Ojo, O., Bao, T., Tuan, N., Sang, T., Xu, X., & Thanh, N. (2022). Enhancement of soil organic carbon by *Acacia mangium* afforestation in Southeastern Region, Vietnam. *Agriculture and Forestry*, 68(2), 133-155. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.68.2.10>
- Cuong, L. V., Ngoan, T. T., Quy, N. V., Chau, M. H., Thanh, N. M., Bao, T. Q., Bolanle-Ojo, O. T., Xu, X., & Sang, T. V. (2023). Soil physicochemical properties of *Acacia mangium* plantations at different stand ages in the Southeastern region of Vietnam. *The Malaysian Forester*, 86(2), 353 - 369.
- Cuong, L. V., Quy, N. V., Hung, B. M., Chau, M. H., & Doan, P. V. T. D. (2024). The relative importance of stand and soil properties parameters on soil organic matter content of *Acacia* hybrid Forests in the South Central Coast Region of Vietnam. *Malaysian Journal of Soil Science*, 28, 134-146.
- Dang, P., Yu, X., Le, H., Liu, J., Shen, Z., & Zhao, Z. (2017). Effects of stand age and soil properties on soil bacterial and fungal community composition in *Chinese pine* plantations on the Loess Plateau. *Plos One*, 12, e0186501. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186501>
- Deng, L., Shangquan, Z. P., & Sweeney, S. (2013). Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China. *Plos One*, 8, e71923. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071923>
- Duan, B., Man, X., Cai, T., Xiao, R., Ge, Z. (2020). Increasing soil organic carbon and nitrogen stocks along with secondary forest succession in permafrost region of the Daxing'an mountains, northeast China. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01258. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01258>
- García de León, D., Moora, M., Öpik, M., Neuenkamp, L., Gerz, M., Jairus, T., Vasar, M., Bueno, C. G., Davison, J., & Zobel, M. (2016). Symbiont dynamics during ecosystem succession: co-occurring plant and arbuscular mycorrhizal fungal communities. *FEMS Microbiology Ecology*, 92, fiw097. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw097>
- Legendre, P. (2008). Studying beta diversity: ecological variation partitioning by multiple regression and canonical analysis. *Journal of Plant Ecology*, 1, 3-8. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm001>
- Liu, S., Wang, H., & Luan, J. (2011). A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China. *Shengtai Xuebao/Acta Ecologica Sinica*, 31, 5437-5448.
- Lu, X., Vitousek, P. M., Mao, Q., Gilliam, F. S., Luo, Y., Turner, B. L., Zhou, G., & Mo, J. (2021). Nitrogen deposition accelerates soil carbon sequestration in tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118: e2020790118.
- Luo, Z., Feng, W., Luo, Y., Baldock, J., & Wang, E. (2017). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global*

- Change Biology*, 23, 4430-4439.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.13767>
- Ming, A., Jia, H., Zhao, J., Tao, Y., & Li, Y. (2014). Above- and below-ground carbon stocks in an indigenous tree (*Mytilaria laosensis*) plantation chronosequence in Subtropical China. *Plos One*, 9, e109730.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109730>
- Nie, X., Wang, D., Yang, L., & Zhou, G. (2020). Controlling soil total nitrogen factors across shrublands in the Three Rivers Source Region of the Tibetan Plateau. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 13, 559-565.  
<https://doi.org/10.3832/ifor3533-013>
- Noh, N.J., Son, Y., Lee, S.K., Seo, K.W., Heo, S.J., Yi, M.J., Park, P.S., Kim, R.H., Son, Y.M., & Lee, K.H. (2010). Carbon and nitrogen storage in an age-sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea. *Science China. Life Sciences*, 53, 822-830. <https://doi.org/10.1007/s11427-010-4018-0>
- Peichl, M., & Arain, M.A. (2006). Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 51-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.004>
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Sam, D. D., Que, D. N., Siem, T. N., Binh, N. N. (2006). *Forest soils, nutrition, and management*. Hanoi Agriculture Publishing House, Vietnam (in Vietnamese).
- Selvaraj, S., Vasu, D., Huang, Z., Guo, F. T., & Ma, X. (2018). Soil nutrients dynamics in broadleaved forest and Chinese fir plantations in subtropical forests. *Journal of Tropical Forest Science*, 30,  
<https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.242251>
- Van Reeuwijk, L. P. (2002). Procedures for Soil Analysis. 6th Edition, ISRIC, FAO, Wageningen.
- Vu, N. T. (2019). *Study on biomass and carbon sequestration capacity of Acacia hybrid (Acacia auriculiformis x Acacia mangium) plantations at Xuan Loc Protection Forest Management Board, Dong Nai Province*. (Master's thesis Forestry). Vietnam National University of Forestry – Dong Nai Campus (in Vietnamese).
- Wang, X., Guo, Z., Guo, X., & Wang, X. (2020). The relative importance of succession, stand age and stand factors on carbon allocation of Korean pine forests in the Northern Mt. Xiaoxing'anling, China. *Forests*, 11(5), 512.  
<https://doi.org/10.3390/f11050512>
- Wang, X., Li, Y., Duan, Y., Wang, L., Niu, Y., Li, X., & Yan, M. (2021). Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in desert steppes of China's Hexi Corridor. *Frontiers in Environmental Science*, 9.  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.761313>
- Wang, Y., Liu, L., Yue, F., & Li, D. (2019). Dynamics of carbon and nitrogen storage in two typical plantation ecosystems of different stand ages on the Loess Plateau of China. *PeerJ*, 7, e7708. <https://doi.org/10.7717/peerj.7708>
- Wang, Z., Yao, X., & Wang, W. (2018). Variation of soil carbon pools in *Pinus sylvestris* plantations of different ages in north China. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 248-254.  
<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.08.004>
- Yang, X., Wang, D., Lan, Y., Meng, J., Jiang, L., Sun, Q., Cao, D., Sun, Y., & Chen, W. (2018). Labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a 3-year field study with biochar amendment. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 1569-1578.  
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1874-2>
- Yang, Y., Li, P., Ding, J., Zhao, X., Ma, W., Ji, C., & Fang, J. (2014). Increased topsoil carbon stock across China's forests. *Global change biology*, 20, 2687-2696.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.12536>
- Yin, X., Zhao, L., Fang, Q., & Ding, G. (2021). Differences in soil physicochemical properties in different-aged *Pinus massoniana* plantations in Southwest China. *Forests*, 12(8), 987.  
<https://doi.org/10.3390/f12080987>
- Yue, J. W., Guan, J. H., Deng, L., Zhang, J. G., Li, G., & Du, S. (2018). Allocation pattern and accumulation potential of carbon stock in natural spruce forests in northwest China. *PeerJ*, 6, e4859.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.4859>
- Zhang, H., Duan, H., Song, M., & Guan, D. (2018). The dynamics of carbon accumulation in *Eucalyptus* and *Acacia* plantations in the Pearl River delta region. *Annals of Forest Science*, 75, 40.  
<https://doi.org/10.1007/s13595-018-0717-7>
- Zhang, W., Liu, W., Xu, M., Deng, J., Han, X., Yang, G., Feng, Y., & Ren, G. (2019). Response of forest growth to C: N: P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 337, 280-289.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.042>