NGHIÊN CỨU HÀM LƯỢNG MỘT SỐ KIM LOẠI TRONG MỐI LIÊN HỆ VỚI SINH KHỐI VÀ THÀNH PHẦN LOÀI RỪNG NGẬP MẶN TẠI VƯỜN QUỐC GIA XUÂN THỦY

Lê Như Ngà[1, *], Đinh Thị Dịu[2], Phạm Thị Minh Hạnh[1], Ngô Xuân Chiều[3], Nguyễn Xuân Tùng[4], Nguyễn Thị Việt Liên[1]

[1] Viện Cơ học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

[2] Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

[3] Vườn Quốc gia Xuân Thủy

[4] Trung tâm Nghiên cứu Hệ sinh thái Rừng ngập mặn, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội

**Email: lenhunga70@gmail.com*

TÓM TẮT

Rừng ngập mặn (RNM) có vai trò quan trọng trong cải thiện môi trường ven biển, lưu giữ carbon và giảm thiểu biến đổi khí hậu. Nghiên cứu đánh giá sinh khối trên mặt đất (AGB) và mức độ tích lũy của 8 kim loại (KL): Cu, Pb, Zn, Mn, Cr, As, Ni và Fe trong đất tầng mặt (0-50 cm) của 3 đơn loài và tổ hợp loài RNM chủ đạo tại Vườn Quốc gia (VQG) Xuân Thủy, tỉnh Ninh Bình: Trang (Kandelia obovata), Trang - Sú (K. obovata - Aegiceras corniculatum) và Trang - Đước vòi (K. obovata - Rhizophora stylosa), từ 25 điểm khảo sát. AGB cao nhất tại Trang - Sú, tiếp theo là Trang và thấp nhất tại Trang - Đước vòi (tương ứng 50,1; 43,2 và 38,5 tấn/ha), phản ánh khác biệt về mật độ và cấu trúc quần thể giữa các nhóm loài. Ngoại trừ Mn chưa có ngưỡng giới hạn quy định, hàm lượng các KL còn lại nhìn chung thấp hơn giới hạn tham chiếu theo QCVN 43:2025/BNNMT và QCVN 03:2023/BTNMT. Tuy nhiên, Fe vượt giới hạn theo QCVN 43:2025/BNNMT; đồng thời, giá trị lớn nhất của Pb và Cu tại các ô tiêu chuẩn vượt nhẹ giới hạn tương ứng. Chỉ số CF và Igeo cho thấy Pb ô nhiễm ở mức trung bình đến cao, As và Cu ở mức trung bình, trong khi Zn, Mn, Cr và Ni chủ yếu ở mức nền - phản ánh nguồn gốc địa hóa tự nhiên chi phối phần lớn quá trình tích lũy KL, có thể có thêm đóng góp nhân sinh cục bộ đối với Pb, As và Cu. Mối liên hệ giữa AGB và hàm lượng KL khác nhau giữa các nhóm loài: Pb tương quan mạnh với AGB tại Trang - Đước vòi ($r = 0,83$; $p = 0,02$), trong khi Cu, Mn, As và Ni tương quan với AGB tại Trang - Sú ($r = 0,60$-$0,66$; $p < 0,05$), cho thấy vai trò bổ sung của cơ chế sinh địa hóa bên cạnh cơ chế lắng đọng trầm tích mịn tự nhiên. Pb, As, Cu và Fe cần được ưu tiên trong các chương trình quan trắc môi trường đất RNM tại khu vực này.

Từ khóa: *Hàm lượng kim loại, loài cây ngập mặn, sinh khối trên mặt đất, Vườn Quốc gia Xuân Thủy.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rừng ngập mặn (RNM) là hệ sinh thái (HST) có năng suất sinh học cao, đóng vai trò quan trọng trong ứng phó với biến đổi khí hậu, là bể lọc tự nhiên của vùng cửa sông - ven biển nhờ khả năng giữ lại và tích lũy kim loại (KL) thông qua hệ rễ dày đặc và các quá trình hóa sinh đặc trưng của môi trường đất ngập nước [1]. Tuy nhiên, sự tích tụ KL quá mức có thể ảnh hưởng tiêu cực đến HST, tích lũy trong sinh vật và ảnh hưởng đến sức khỏe con người qua chuỗi thức ăn [2].

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu tại các khu vực RNM chịu tác động của quá trình đô thị hóa và công nghiệp hóa đã ghi nhận sự hiện diện của KL trong trầm tích, phản ánh đóng góp của cả nguồn phát thải tự nhiên và nhân sinh [3], đồng thời cho thấy sự khác biệt về hàm lượng KL giữa các quần xã cây ngập mặn (CNM) [1].

Tại Việt Nam, một số nghiên cứu đã đánh giá hiện trạng, mức độ tích lũy địa hóa và rủi ro sinh thái của KL tại các khu vực trọng điểm: RNM Cần Giờ [4], vùng cửa sông ven biển tỉnh Thái Bình cũ [5], cửa sông và bên trong hệ thống sông Hồng [6]. Ở quy mô toàn bộ RNM vùng Đồng bằng sông Hồng (ĐBSH), nghiên cứu của Le và cs (2026) [7] cho thấy, RNM đóng vai trò tích lũy KL quan trọng và có sự khác biệt giữa đơn loài

và tổ hợp đa loài, trong khi Roberts và cs (2022) [6] cung cấp thêm bằng chứng về nguồn gốc và cơ chế vận chuyển KL vào khu vực. Các nghiên cứu tại Cần Giờ cũng ghi nhận tương quan dương giữa các KL với nhau và giữa một số KL với OC, gợi ý nguồn gốc và cơ chế tích lũy chung [8].

Tuy nhiên, các nghiên cứu về KL trong đất RNM và trầm tích tại Việt Nam vẫn còn khoảng trống. Phần lớn tập trung làm rõ hiện trạng, nguồn gốc và vai trò tích lũy KL của HST RNM ở quy mô một khu vực cụ thể, hoặc mối liên hệ giữa KL với OC, trong khi mối quan hệ giữa các KL với sinh khối trên mặt đất (Above-Ground Biomass, AGB) hầu như chưa được xem xét đồng thời với thành phần loài, đặc biệt tại VQG Xuân Thủy. Bên cạnh đó, các nghiên cứu [5, 7] mới chỉ dùng QCVN 03:2023/BTNMT với đất rừng [9] hoặc QCVN 43:2017/BTNMT đối với trầm tích [10], chưa cập nhật QCVN 43:2025/BNNMT [11].

Xuất phát từ những khoảng trống trên, nghiên cứu này được thực hiện tại VQG Xuân Thủy, tỉnh Ninh Bình nhằm: (i) đánh giá mức độ tích lũy của 8 KL (Cu, Pb, Zn, Mn, Cr, As, Ni và Fe) trong đất tầng mặt (0-50 cm) theo QCVN 03:2023/BTNMT [9] đối với đất rừng và QCVN 43:2025/BNNMT [11] đối với trầm tích, kết hợp các chỉ số ô nhiễm và tích lũy địa hóa; (ii) phân tích mối tương quan giữa hàm lượng các KL với AGB theo thành phần loài.

Trong 8 KL nêu trên, 6 nguyên tố Cu, Pb, Zn, Cr, As và Ni được QCVN 03:2023/BTNMT [9] xếp vào nhóm KL nặng; Fe cũng được quy định cùng nhóm này trong QCVN 43:2025/BNNMT [11]. Riêng Mn tuy không thuộc danh mục của cả hai quy chuẩn trên, nhưng được nhiều nghiên cứu đưa vào đánh giá chất lượng môi trường đất và rủi ro sinh thái tại các HST RNM.

Kết quả nghiên cứu kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học phục vụ công tác giám sát, kiểm soát ô nhiễm KL và bảo tồn HST RNM tại VQG Xuân Thủy, trên cơ sở xem xét sự khác biệt về đặc trưng quần xã thực vật ngập mặn thông qua thành phần loài và cấu trúc quần xã.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vùng nghiên cứu

VQG Xuân Thủy nằm ở phía Nam cửa Ba Lạt của sông Hồng, có tổng diện tích khoảng 15.000 ha, được công nhận là khu Ramsar đầu tiên của Đông Nam Á vào năm 1988 và là vùng lõi của Khu Dự trữ Sinh quyển châu thổ sông Hồng từ năm 2004 [12]. Đây là vùng đất ngập nước cửa sông điển hình, trầm tích được hình thành và phát triển liên tục nhờ quá trình bồi tụ phù sa từ sông Hồng, địa hình được kiến tạo theo quy luật bồi tụ - xói lở đặc thù, tạo nên hệ thống bãi bồi, cồn cát xen kẽ RNM và các lạch triều. Theo các mẫu thu thập của nghiên cứu vào tháng 11 năm 2023, thành phần chính của trầm tích là sét, cát mịn, mùn lá và rễ cây. Tỷ lệ cát tăng theo độ sâu. Ngược lại, tỷ lệ sét, rễ và mùn lá cây giảm dần theo độ sâu. Ở độ sâu 80-100 cm và các tầng sâu hơn, cát mịn chiếm ưu thế.

Vùng nghiên cứu (VNC) là khu vực có RNM, có diện tích khoảng 3.100 ha. Ba đơn loài và tổ hợp loài CNM chiếm ưu thế, khoảng 83% diện tích rừng, gồm: Trang (Kandelia obovata - KO, 35,4%), Trang-Sú (KO - Aegiceras corniculatum, 29,3%) và Trang - Đước vòi (KO - Rhizophora stylosa, 18,3%) [12]. RNM tại đây chủ yếu là rừng trồng, bắt đầu từ năm 1994, có sinh khối và trữ lượng các-bon đáng kể. Theo Hà Thị Hiền và cs (2018) [13], AGB của rừng Trang 18-20 tuổi dao động từ 79,95 - 87,66 tấn/ha; trong khi Nguyen Hai Hoa và cs (2017) [14] ước tính tổng AGB đạt khoảng 62.693 tấn, tương ứng trữ lượng các-bon khoảng 29.466 tấn.

2.2. Điều tra thực địa và lấy mẫu

2.2.1. Điều tra thành phần loài, cấu trúc và sinh khối RNM



Hình 1. Các loài CNM được nghiên cứu:
(a) Trang, (b) Trang - Sú và (c) Trang - Đước vòi

Điều tra thành phần loài và cấu trúc quần thể RNM được thực hiện vào tháng 11 năm 2023 tại 25 ô tiêu chuẩn (OTC), đại diện cho các đơn loài và tổ hợp loài CNM phổ biến trong VNC, gồm: Trang (13 OTC), Trang - Sú (7 OTC) và Trang - Đước vòi (5 OTC). Tại mỗi OTC, kích thước 10 × 10 m, toàn bộ cá thể CNM được nhận dạng đến loài, đếm số lượng và đo các chỉ tiêu sinh trưởng: Đường kính thân cây ở độ cao ngang ngực, chiều cao cây và đường kính tán lá bằng các thước chuyên dụng, làm cơ sở tính toán AGB. Đây là phương pháp đã được áp dụng ở khu vực ĐBSH [15].

2.2.2. Lấy mẫu đất

Mẫu đất được lấy đồng thời với điều tra thực vật, tại đúng vị trí 25 OTC nêu trên, bằng thiết bị lấy mẫu HUNIWILDE (Hoa Kỳ) đến độ sâu 50 cm theo TCVN 7538-4:2007 [16]. Mỗi lõi mẫu được chia thành 3 tầng theo độ sâu: 0-15 cm, 15-30 cm và 30-50 cm (Hình 2), nhằm phản ánh đặc điểm phân bố KL theo chiều sâu phẫu diện đất. Mẫu đất sau khi thu được đựng trong túi zip, dán nhãn, bảo quản ở nhiệt độ 4°C trong quá trình vận chuyển về phòng thí nghiệm.



Hình 2. Thu thập mẫu đất bằng thiết bị lấy mẫu tại thực địa

2.3. Phân tích KL

Mẫu đất được xử lý sơ bộ theo TCVN 6647:2007 [17] và phân hủy bằng phương pháp vô cơ hóa ướt trong hệ kín sử dụng lò vi sóng. Hàm lượng các KL (Cu, Pb, Zn, As, Mn, Cr, Ni và Fe) trong mẫu đất được xác định bằng phương pháp khối phổ plasma cảm ứng (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, ICP-MS) theo US EPA Method 6020B [18].

+ *Xử lý mẫu sơ bộ:* Ngay khi đưa về phòng thí nghiệm, mẫu đất được sấy trong tủ sấy ở 40°C trong 72 giờ, nghiền đồng nhất bằng cối mã não và sàng qua rây 0,1 mm.

+ *Xử lý mẫu đất bằng phương pháp vô cơ hóa ướt trong hệ kín:* Mỗi mẫu (0,5000 g đất khô) được phân hủy bằng hỗn hợp 3 mL HNO_3, 1 mL HF và 1 mL H_2O_2 trong hệ thống phân hủy vi sóng trong 30 phút. Dung dịch sau phân hủy được lọc qua màng lọc 0,45 µm, định mức đến 100 mL.

+ *Phân tích KL bằng ICP-MS:* Dung dịch mẫu sau khi xử lý được phân tích định lượng bằng thiết bị ICP-MS Elan 9000 (PerkinElmer, Hoa Kỳ).

Thông số vận hành của thiết bị ICP-MS: Công suất RF 1250 W; khí plasma 16 L min^{-1}; khí phụ trợ 1,25 L min-1; khí tạo sương 0,9 L min-1; bộ phun sương trục ngang (cross-flow); buồng phun sương đường đôi (PFA double pass). Các đồng vị được theo dõi, gồm: Cu (63), Pb (208), Zn (65), Mn (55), Cr (53), As (75), Ni (60) và Fe (57); đo ở chế độ peak hopping, thời gian lưu tín hiệu 100 ms, lặp lại 3 lần/mẫu.

+ *Đảm bảo chất lượng và kiểm soát chất lượng (QA/QC):* Độ chính xác của phân tích được kiểm soát thông qua mẫu chuẩn chứng nhận MESS-3. Sai lệch giữa giá trị đo được và giá trị chứng nhận của các nguyên tố phân tích đều nhỏ hơn 15%, cho thấy độ chính xác của phương pháp đáp ứng yêu cầu phân tích môi trường.

Hàm lượng KL đại diện cho tầng đất 0-50 cm tại mỗi OTC được tính bằng giá trị trung bình của 3 mẫu đất thu tại các độ sâu 0-15 cm, 15-30 cm và 30-50 cm.

2.4. Tính toán sinh khối trên mặt đất

Bảng 1. Các phương trình tính sinh khối trên mặt đất áp dụng cho các loài CNM tại VNC

STT	Loài	Công thức tính AGB (kg/cây)	Tham số	Độ chính xác (R^2)
1	Trang	$0,251 \times \rho \times D_{1,3}^{2,46}$	$D_{1,3}$ - đường kính thân cây ở độ cao ngang ngực, 130 cm phía trên mặt đất (cm); H - chiều cao cây (m); CD - đường kính tán lá; ρ - khối lượng riêng gỗ (tấn khối lượng khô/m^3 thể tích tươi)	0,96
2	Sú	$3,1253 \times CD^2 \times H$		0,99
3	Đước vòi	$0,168 \times D_{1,3}^{2.42} + 0,0209 \times D_{1,3}^{2,55}$		0,99

AGB của từng loài CNM được ước tính bằng các phương trình thực nghiệm (allometric equations) đã được công bố cho các loài CNM khu vực ĐBSH [15] (Bảng 1). AGB của mỗi OTC được xác định bằng tổng sinh khối của tất cả các cá thể cây trong ô. Giá trị này sau đó được quy đổi theo đơn vị diện tích để tính AGB trên một hecta (tấn/ha).

2.5. Đánh giá mức độ tích lũy KL trong đất

Nghiên cứu sử dụng ngưỡng quy định đối với đất rừng theo QCVN 03:2023/BTNMT [9] cho mục đích quản lý sử dụng đất rừng và trầm tích biển theo QCVN 43:2025/BNNMT [11] cho mục đích đánh giá, kiểm soát chất lượng trầm tích cho mục đích bảo vệ đời sống thủy sinh; kết hợp hệ số ô nhiễm (Contamination Factor, CF) và chỉ số tích lũy địa hóa (Geo-accumulation Index, Igeo) để đánh giá mức tích lũy KL trong đất của các đơn loài và tổ hợp loài nghiên cứu.

Chỉ số CF và Igeo được tính theo công thức (1) [19] và (2) [20]. Do chưa có dữ liệu nền địa phương, giá trị nền của KL được sử dụng theo Turekian và Wedepohl (1961) [21], tương ứng với giá trị nền trung bình của đá phiến sét (shale values) đối với đá trầm tích (Cu = 45, Pb = 20, Zn = 95, Mn = 850, Cr = 90, As = 13, Ni = 68 và Fe = 47.200). Cách tiếp cận này cũng đã được áp dụng trong các nghiên cứu tại bãi triều và RNM vùng ĐBSH [5].

$$CF_n = \frac{C_n}{C_{bn}} \quad (1)$$

$$Igeo_n = log_2\left(\frac{C_n}{1.5\, C_{bn}}\right) \quad (2)$$

Trong đó: CF_n là hệ số ô nhiễm của KL n; $Igeo_n$ là chỉ số tích lũy địa hóa của KL n; C_n là hàm lượng KL n được xác định trong mẫu nghiên cứu; C_{bn} là giá trị hàm lượng nền của KL n (mg/kg).

Theo Hakanson (1980) [19], chỉ số CF được phân thành 4 mức: Ô nhiễm nhẹ (CF < 1), ô nhiễm trung bình (1 ≤ CF < 3), ô nhiễm nặng (3 ≤ CF < 6) và ô nhiễm rất nặng (CF ≥ 6). Trong khi đó, chỉ số Igeo được phân thành 7 mức: Không ô nhiễm (Igeo ≤ 0), từ không ô nhiễm đến ô nhiễm trung bình (0 < Igeo ≤ 1), ô nhiễm trung bình (1 < Igeo ≤ 2), từ ô nhiễm trung bình đến ô nhiễm nặng (2 < Igeo ≤ 3), ô nhiễm nặng (3 < Igeo ≤ 4), từ ô nhiễm nặng đến ô nhiễm rất nặng (4 < Igeo ≤ 5) và ô nhiễm cực kỳ nghiêm trọng (Igeo > 5).

2.6. Xử lý thống kê

Xử lý thống kê bao gồm phân tích tương quan giữa hàm lượng KL và AGB bằng phương pháp tương quan Pearson (r), với mức ý nghĩa thống kê p-value (p) < 0,05, sử dụng phần mềm Jamovi 2.7. Phương pháp này đã được sử dụng trong các nghiên cứu về KL trong đất RNM [1].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tích lũy KL trong đất VNC

Kết quả ở bảng 2 cho thấy, theo QCVN 03:2023/BTNMT [9] đối với mục đích sử dụng đất rừng, hàm lượng của 6 KL (Cu, Pb, Zn, Cr, As và Ni) trong đất của các đơn loài và tổ hợp loài RNM tại VNC đều thấp hơn giới hạn quy định (Mn và Fe chưa có ngưỡng quy định). Tuy nhiên, khi đối chiếu với QCVN 43:2025/BNNMT [11] áp dụng cho trầm tích biển nhằm bảo vệ đời sống thủy sinh, hàm lượng Fe trung bình (36.755 mg/kg) vượt giá trị giới hạn tham chiếu (20.000 mg/kg), trong khi giá trị lớn nhất của Pb tại Trang và Trang - Sú, và của Cu tại Trang - Sú, lần lượt vượt nhẹ ngưỡng cho phép. Sự khác biệt kết quả giữa hai quy chuẩn cho thấy, mức độ vượt ngưỡng phụ thuộc nhiều vào giá trị tham chiếu được lựa chọn và mục đích áp dụng, do đó cần thận trọng khi diễn giải mức độ tích lũy chỉ dựa trên một quy chuẩn duy nhất. Tuy hàm lượng Fe vượt xa giá trị giới hạn tham chiếu nhưng vẫn thấp hơn giá trị nền địa hóa tham chiếu (47.200 mg/kg) [21], phản ánh nguồn gốc tự nhiên là chủ yếu, liên quan đến thành phần khoáng vật chứa Fe phổ biến trong trầm tích châu thổ sông Hồng.

Các chỉ số CF và Igeo cho thấy bức tranh rõ hơn về mức độ làm giàu nhân sinh so với so sánh trực tiếp với quy chuẩn [4]. Theo đó, CF, Pb ở mức ô nhiễm nặng, As và Cu ở mức ô nhiễm trung bình, trong khi Zn, Mn, Cr, Ni và Fe chủ yếu ở mức nền đến ô nhiễm nhẹ. Sự phân hóa này gợi ý nguồn gốc khác nhau giữa các nhóm KL: Zn, Mn, Cr, Ni và Fe có xu hướng gắn với vật liệu trầm tích tự nhiên do sông Hồng vận chuyển và bồi lắng tại cửa Ba Lạt, trong khi mức làm giàu rõ rệt của Pb (và ở mức độ thấp hơn là As, Cu) cho thấy khả năng có đóng góp từ nguồn phát thải nhân sinh bên cạnh nguồn tự nhiên. Cần lưu ý rằng, đánh giá làm giàu nêu trên dựa trên nền đá phiến sét toàn cầu [21]; do đặc điểm địa chất, địa hóa của mỗi khu vực khác nhau, việc thiếu giá trị nền địa phương (của VNC hoặc khu vực lân cận) có thể khiến mức độ làm giàu bị ước lượng

chưa chính xác, và đây cũng là một hạn chế cần được khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo

Về nguồn gốc có thể của Pb, nghiên cứu tại vịnh Cồn Lu (phía Nam VNC) và tại cửa sông Diêm Hộ (phía Bắc VNC) [5], vốn cũng ghi nhận Pb tích lũy và làm giàu cao và được cho là liên quan đến hoạt động tàu thuyền tại các cảng cá lân cận. Bên cạnh đó, phân tích đồng vị Pb của Zhenghua Tao và cs (2023) [3] tại Hải Nam (Trung Quốc) cho thấy, các nguồn nhân sinh như đốt than, hoạt động nông nghiệp và giao thông đóng góp khoảng 38,6% lượng Pb tích lũy trong trầm tích RNM. Các kết quả tham khảo gợi mở rằng, Pb tại VNC có thể nhận thêm đóng góp từ các nguồn nhân sinh tương tự trong đất liền và được vận chuyển theo hệ thống sông Hồng và cung cấp qua cửa Ba Lạt. Tuy nhiên, đây mới chỉ là suy luận dựa trên các nghiên cứu tham khảo; nguồn gốc tích lũy KL tại VNC cần được xác nhận bằng các phương pháp truy xuất nguồn phát thải như phân tích thành phần chính (Principal Component Analysis - PCA) hoặc phân tích đồng vị.

Bảng 2. Hàm lượng KL và đánh giá ô nhiễm

Loài	Tham số		Cu	Pb	Zn	Mn	Cr	As	Ni	Fe
Trang	Hàm lượng (mg/kg)	Nhỏ nhất	11,8	41,2	14,2	137,7	19,5	8,6	13,2	9.792
		Lớn nhất	104,2	118,3	199,7	1.010,2	103,3	31,2	60,1	52.065
		Trung bình	53,2	73,9	88,4	518,7	64,6	18,8	37,1	33.351
	CF		1,2	3,7	0,9	0,6	0,7	1,4	0,5	0,7
			ONTB	ONNg	ONN	ONN	ONN	ONTB	ONN	ONN
	Igeo		-0,3	1,3	-0,7	-1,3	-1,1	-0,1	-1,5	-1.1
			KON	ONTB	KON	KON	KON	KON	KON	KON
Trang - Sú	Hàm lượng (mg/kg)	Nhỏ nhất	21,0	37,1	49,6	137,8	20,0	4,0	15,8	11.850
		Lớn nhất	116,0	119,8	186,2	892,7	112,2	39,7	69,0	65.922
		Trung bình	64,7	85,9	118,5	537,6	76,7	26,7	44,8	42.188
	CF		1,4	4,3	1,2	0,6	0,9	2,1	0,7	0,9
			ONTB	ONNg	ONTB	ONN	ONN	ONTB	ONN	ONN
	Igeo		-0,1	1,5	-0,3	-1,2	-0,8	0,5	-1,2	-0,7
			KON	ONTB	KON	KON	KON	ONTB	KON	KON
Trang - Đước vòi	Hàm lượng (mg/kg)	Nhỏ nhất	25,0	33,2	35,0	235,5	48,2	10,7	24,7	21.180
		Lớn nhất	96,9	85,9	153,3	764,2	110,4	29,5	61,6	53.427
		Trung bình	53,3	66,8	93,9	480,2	69,1	19,5	41,0	34.723
	CF		1,2	3,3	1,0	0,6	0,8	1,5	0,6	0,7
			ONTB	ONNg	ONN	ONN	ONN	ONTB	ONN	ONN
	Igeo		-0,3	1,2	-0,6	-1,4	-1,0	0,0	-1,3	-1,0
			KON	ONTB	KON	KON	KON	KON	KON	KON
Trung bình ba loài			57,1	75,5	100,3	512,2	70,2	21,7	41,0	36.755
QCVN 03:2023/BTNMT (đất rừng) [9]			500	400	600	-	200	50	200	-
			Đạt	Đạt	Đạt	-	Đạt	Đạt	Đạt	-
QCVN 43:2025/BNNMT (trầm tích biển) [11]			108	112	271	-	160	41,6	-	20.000
			Đạt	Đạt	Đạt	-	Đạt	Đạt	-	Vượt QC
Đất RNM ĐBSH [7] *			53,5	75,3	103,9	661,4	76,8	25,2	38,9	36.827
Đất RNM Cần Giờ (0-100 cm), Thành Phố Hồ Chí Minh [8]			26,5	26,6	107,2	-	102,4	-	50,9	-
Đất RNM (0-20 cm) vịnh Thâm Quyến (Trung Quốc), phía Bắc Biển Đông [1]			79,7	-	-	-	75,7	76,6	40,4	-

*Ghi chú: KON - không ô nhiễm, ONN - ô nhiễm nhẹ, ONTB - ô nhiễm trung bình, ONNg - ô nhiễm nặng. * Phân tích dựa trên 93 OTC, bao gồm 22 OTC thuộc VNC.*

Hàm lượng KL nhìn chung giảm theo thứ tự Fe (36.755) > Mn (512,2) > Zn (100,3) > Pb (75,5) > Cr (70,2) > Cu (57,1) > Ni (41,0) > As (21,7) mg/kg. Trong cả 8 nguyên tố, tổ hợp Trang - Sú có hàm lượng cao nhất. Đáng chú ý, hàm lượng Pb và Mn tại quần xã Trang cao hơn so với quần xã Trang - Đước vòi, trong khi Cu, Zn, Cr, As và Ni tại Trang tương đương hoặc chỉ thấp hơn không đáng kể so với Trang - Đước vòi. Sự khác biệt về hàm lượng KL giữa các quần xã có thể liên quan đến sự khác nhau về đặc điểm sinh thái và cấu trúc của từng quần xã. Kết quả điều

tra thực địa (Hình 1) cho thấy, Đước vòi thường được trồng với mật độ thưa, trong khi Trang có phần thân tương đối nhỏ và thẳng; cả quần xã Trang và Trang - Đước vòi đều có số lượng cây tái sinh dưới tán tương đối ít. Cấu trúc thảm thực vật thưa có thể làm giảm khả năng cản dòng và giữ lại vật chất lơ lửng, đặc biệt là các hạt trầm tích mịn - thành phần thường có khả năng hấp phụ và lưu giữ KL cao [6]. Ngược lại, Sú thường mọc thành cụm, có thân cong, nhiều nhánh nhỏ và trong tổ hợp Trang - Sú xuất hiện nhiều cây tái sinh dưới tán, tạo nên cấu trúc thảm thực vật tương đối dày - thể hiện qua giá trị AGB cao nhất trong cả 3 nhóm loài (mục 3.2). Đặc điểm này có thể làm giảm vận tốc dòng chảy và giữ lại vật chất hạt mịn, qua đó tạo điều kiện thuận lợi hơn cho sự tích lũy KL trong trầm tích.

Xu hướng này phù hợp với một số nghiên cứu tại các HST RNM. Tại RNM Cần Giờ, các nghiên cứu ghi nhận sự tích lũy KL chịu chi phối bởi các hạt trầm tích mịn (kích thước khoảng 5-10 μm) và cấu trúc thảm thực vật ngập mặn [8] cũng như loài Đước đôi có khả năng tích lũy KL kém hơn so với loài Mắm trắng [22]. Tại Khu bảo tồn Phúc Điền, Thâm Quyến (Trung Quốc), hàm lượng KL ở Mắm biển cao hơn Xu ổi, Bần chua và Bần không cánh [1].

So với các khu vực RNM khác, hàm lượng KL tại VNC vừa có điểm tương đồng vừa có khác biệt, phản ánh sự chi phối của điều kiện nguồn cung cấp trầm tích, mức độ tác động nhân sinh, đặc điểm HST RNM và thuỷ động lực học đặc thù theo từng khu vực. Tại RNM Cần Giờ [8], Cu và Pb tại VNC cao hơn trong khi Zn, Cr và Ni thấp hơn; sự khác biệt này có thể liên quan đến nguồn trầm tích khác nhau (VNC chịu ảnh hưởng trực tiếp của sông Hồng với hàm lượng phù sa rất cao và rất giàu Pb [6], trong khi Cần Giờ chịu ảnh hưởng của hệ thống sông Đồng Nai - Sài Gòn và nằm ngay sát khu đô thị, công nghiệp lớn nhất cả nước là Thành phố HCM - Đồng Nai [4, 8]). So với RNM vịnh Thâm Quyến, Trung Quốc [1], Cr và Ni tương đương nhưng Cu và As thấp hơn, có thể do khác biệt về nền địa chất ven biển và mức độ phát triển công nghiệp, cảng biển và nông nghiệp giữa hai khu vực. Đối với toàn bộ RNM ĐBSH đo tại tầng 0-100 cm [7], As, Cr và Mn tại VNC (tầng 0-50 cm) cao hơn khoảng 1,09-1,29 lần so với phần còn lại của vùng, trong khi Pb, Zn, Fe tương đương và Cu, Ni thấp hơn; sự khác biệt này có thể xuất phát từ việc VNC chịu ảnh hưởng trực tiếp của cửa Ba Lạt, trong khi phần còn lại của RNM ĐBSH chịu tác động chính từ các cửa sông Thái Bình và Văn Úc, dẫn đến khác biệt về nguồn vật liệu trầm tích và động lực bồi lắng giữa các cửa sông.

3.2. Tương quan giữa KL và sinh khối trên mặt đất

Bảng 3. Tương quan giữa hàm lượng các KL với sinh khối trên mặt đất

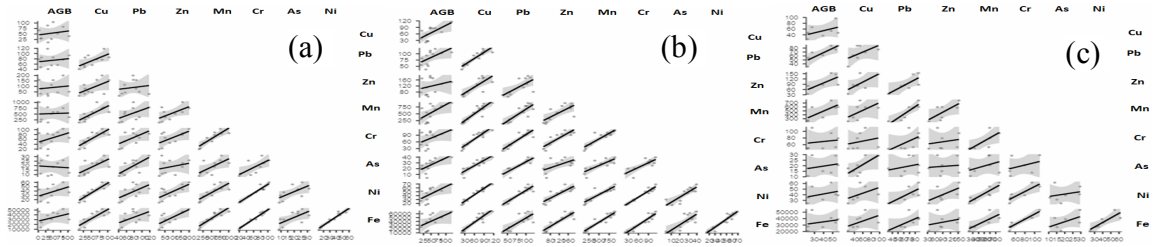
Loài	Cu		Pb		Zn		Mn		Cr		As		Ni		Fe	
	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r	p
Trang	0,19	0,60	0,16	0,65	0,13	0,71	0,05	0,90	0,44	0,20	-0,08	0,82	0,45	0,19	0,35	0,32
Trang - Sú	0,66	0,02	0,57	0,05	0,26	0,41	0,60	0,04	0,49	0,11	0,64	0,02	0,61	0,03	0,51	0,09
Trang - Đước vòi	0,47	0,29	0,83	0,02	0,73	0,06	0,70	0,08	0,16	0,74	0,25	0,60	0,32	0,48	0,26	0,58

Kết quả tính toán cho thấy, AGB tại VNC biến động khá mạnh giữa 3 đơn loài và tổ hợp loài, cũng như trong từng nhóm loài, cao nhất ở Trang - Sú, tiếp theo là Trang và thấp nhất tại Trang - Đước vòi, tương ứng là 50,1 (19,5-118,8), 43,2 (10,2-103,7) và 38,5 (22,5-55,8) tấn/ha. Ước tính của Nguyen và cs (2017) [14] cho kết quả thấp hơn (trung bình toàn vùng 32,8 tấn/ha), trong khi Nguyễn Thị Hiền và cs (2018) [13] cho kết quả cao hơn ở Trang (trung bình 83,8 tấn/ha). Sự khác biệt này có thể đến từ vị trí và số lượng OTC được chọn, dẫn đến khác biệt về mật độ và kích thước cây: Nguyen và cs (2017) [14] dùng 8 OTC, trong khi nghiên cứu này sử dụng 25 OTC; Nguyễn Thị Hiền và cs (2018) [13] dùng 3 OTC cạnh nhau với mật độ cao hơn (197 cây/OTC) so với 137 (40-272) cây/OTC của Trang trong nghiên cứu này tại 13 OTC phân tán. Biên độ dao động AGB lớn giữa các OTC cùng nhóm loài (ví dụ Trang: 10,2-103,7 tấn/ha) cũng cho thấy vị trí OTC ảnh hưởng đáng kể đến kết quả đo được.

Mối tương quan giữa AGB và hàm lượng KL có sự khác biệt đáng kể giữa các đơn loài và tổ hợp loài RNM và trong từng đơn loài, tổ hợp loài (Bảng 3 và hình 3). Tại Trang, AGB không có

tương quan có ý nghĩa thống kê với các KL ($p > 0,05$), với hệ số tương quan từ -0,08-0,45, cho thấy chưa có mối tương quan rõ rệt giữa AGB và sự tích lũy KL trong đất. Trong khi đó, tại Trang - Sú, AGB có tương quan mạnh với Cu ($r = 0,66$), Mn ($r = 0,60$), As ($r = 0,64$) và Ni ($r = 0,61$), đồng thời tương quan có ý nghĩa thống kê với Cu, Mn, As và Ni ($p < 0,05$), cho thấy xu hướng hàm lượng các KL gia tăng cùng với AGB ở tổ hợp loài này. Tại Trang - Đước vòi, chỉ riêng Pb có tương quan mạnh và có ý nghĩa với AGB ($r = 0,83$; $p = 0,02$), trong khi Zn ($r = 0,73$; $p = 0,06$) và Mn ($r = 0,70$; $p = 0,08$) có xu hướng tương quan khá cao nhưng chưa đạt ý nghĩa thống kê.

Mức tương quan với AGB nhìn chung là không quá rõ ràng, đồng thời các chỉ số CF và Igeo ở mục 3.1 cho thấy, hàm lượng các KL vẫn không quá xa giá trị nền địa hóa, cho thấy nguồn địa hóa tự nhiên vẫn chi phối chính quá trình tích lũy KL tại VNC. Tuy vậy, hàm lượng KL và AGB đều cao hơn tại quần xã Trang - Sú, đồng thời nhiều KL có tương quan có ý nghĩa thống kê với AGB tại quần xã này, gợi mở khả năng tồn tại sự khác biệt về vai trò của các quá trình sinh địa hóa trong tích lũy KL giữa các quần xã thực vật ngập mặn. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu khác tại Việt Nam và ở quốc gia khác [8], trong đó vai trò của trầm tích hạt mịn và cấu trúc thảm thực vật ngập mặn, với đặc trưng khác nhau giữa các loài, được cho là có liên quan đến quá trình tích lũy KL.



Hình 3. Biểu đồ tương quan giữa hàm lượng các KL và giữa hàm lượng các KL với sinh khối trên mặt đất: (a) Trang, (b) Trang - Sú và (c) Trang - Đước vòi

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

AGB của RNM tại VNC khác biệt rõ giữa 3 đơn loài và tổ hợp loài, đồng thời có biên độ dao động lớn trong nội bộ từng nhóm loài. AGB cao nhất ở Trang - Sú, tiếp theo là Trang và thấp nhất ở Trang - Đước vòi (tương ứng 50,1; 43,2 và 38,5 tấn/ha), phản ánh sự khác biệt về mật độ và cấu trúc quần thể giữa các quần xã cũng như trong từng nhóm loài.

Kết quả phân tích hàm lượng KL trong đất tại 3 đơn loài và tổ hợp loài cho thấy, ngoại trừ Mn chưa có ngưỡng giới hạn quy định, hàm lượng các KL còn lại đều thấp hơn giới hạn đối với đất rừng theo QCVN 03:2023/BTNMT. Đối với trầm tích biển, hàm lượng Cu, Pb, Zn, Cr, As và Ni đều thấp hơn giới hạn tương ứng theo QCVN 43:2025/BNNMT, trong khi Fe vượt ngưỡng quy định. Bên cạnh đó, giá trị lớn nhất của Pb tại Trang và Trang - Sú, cũng như Cu tại Trang - Sú, ở các OTC vượt nhẹ giới hạn tương ứng của quy chuẩn. Các chỉ số CF và Igeo cho thấy, Pb, As và Cu có mức làm giàu cao hơn các KL còn lại, đặc biệt tại Trang - Sú, trong khi Fe, Mn, Cr, Ni, Zn chủ yếu ở mức nền, phản ánh nguồn gốc tự nhiên là chủ đạo, có thể có thêm đóng góp nhân sinh cục bộ đối với Pb, As và Cu.

Mối quan hệ giữa hàm lượng KL và AGB khác nhau giữa các đơn loài và tổ hợp loài: Không rõ ràng tại Trang, có ý nghĩa với nhiều KL (Cu, Mn, As, Ni) tại Trang - Sú và chỉ với Pb tại Trang - Đước vòi - gợi ý khả năng có sự tham gia của các quá trình sinh địa hóa chỉ nổi bật ở một số quần xã nhất định, bên cạnh vai trò chi phối chính của cơ chế trầm tích tự nhiên.

Nhìn chung, khả năng tích lũy KL và mối liên hệ với AGB thể hiện rõ nét nhất tại Trang - Sú, cho thấy sự khác biệt về cấu trúc và thành phần loài của quần xã có thể liên quan đến sự khác biệt về hàm lượng KL trong đất RNM tại VNC. Do đó, các chương trình quan trắc môi trường đất RNM nên ưu tiên các KL có mức làm giàu cao (Pb, As, Cu) và xem xét sự khác biệt giữa các quần xã thực vật, thay vì chỉ đánh giá ở quy mô toàn hệ sinh thái.

Tuy nhiên, nghiên cứu còn một số hạn chế cần được khắc phục trong các hướng nghiên cứu tiếp theo. Số lượng OTC, đặc biệt tại tổ hợp loài Trang - Đước vòi còn hạn chế và biên độ dao động AGB giữa các OTC khá lớn, do đó các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng số lượng điểm khảo sát và bổ sung thêm các đơn loài, tổ hợp loài để nâng cao độ tin cậy và khả năng khái quát hóa

kết quả. Nghiên cứu mới dừng ở đánh giá mức độ tích lũy và tương quan, chưa truy xuất nguồn phát thải cũng như chưa xem xét đầy đủ các yếu tố khác như cấu trúc hệ rễ, vật rơi rụng, hàm lượng chất hữu cơ trong đất và cộng đồng vi sinh vật; vì vậy, việc kết hợp các phương pháp truy xuất nguồn như PCA, phân tích đồng vị, cùng với các chỉ tiêu bổ sung nêu trên, sẽ giúp làm rõ hơn cơ chế tích lũy KL và vai trò của sinh khối thực vật trong quá trình này. Cuối cùng, do CF và Igeo trong nghiên cứu này được tính dựa trên giá trị nền tham chiếu ngoài khu vực (đá phiến sét trung bình toàn cầu), các nghiên cứu tiếp theo nên xây dựng giá trị nền địa hóa địa phương để đánh giá chính xác hơn mức độ tích lũy KL tại VNC.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED), mã số 105.08-2021.26. Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn các cán bộ Vườn Quốc gia Xuân Thủy đã hỗ trợ trong quá trình khảo sát thực địa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. R. Li, M. Chai, G. Y. Qiu (2016). Distribution, fraction, and ecological assessment of heavy metals in sediment-plant system in mangrove forest, South China Sea. *PLoS ONE, 11*(1), e0147308.

[2]. M. S. Rahman, M. Rahman, Y. N. Jolly, M. K. Hossain, S. A. Semme, B. A. Paray, T. Arai, J. Yu, M. B. Hossain (2024). Heavy metals in afforested mangrove sediment from the world's largest delta: Distributional mapping, contamination status, risk assessment and source tracing. *Marine Pollution Bulletin*, *203*, 116429.

[3]. Z. Tao, G. Peng, F. Chen, Q. Guo, R. Wei, J. Liu, Y. Li, H. Jiang, Y. Liao, K. Pan (2023). Isotopic signatures unveil the lead sources and migration in surface mangrove sediments. *Science of The Total Environment*, *892*, 164765.

[4]. S. Costa-Böddeker, P. Hoelzmann, L. X. Thuyen, H. D. Huy, H. A. Nguyen, O. Richter, A. Schwalb (2017). Ecological risk assessment of a coastal zone in Southern Vietnam: Spatial distribution and content of heavy metals in water and surface sediments of the Thi Vai estuary and Can Gio mangrove forest. *Marine Pollution Bulletin*, *114*(2), 1141-1151.

[5]. Đỗ Thị Hiền, Lê Bảo Linh, Trịnh Thị Thủy, Trịnh Thị Thắm (2024). Đánh giá mức độ tích lũy một số kim loại nặng trong trầm tích mặt tại một số cửa sông ven biển tỉnh Thái Bình. T*ạp chí Môi trường*, *4*, 27-34.

[6]. L. R. Roberts, N. T. Do, V. N. Panizzo, S. Taylor, M. Watts, E. Hamilton, S. McGowan, D. A. Trinh, M. J. Leng, J. Salgado (2022). In flux: Annual transport and deposition of suspended heavy metals and trace elements in the urbanised, tropical Red River Delta, Vietnam. *Water Research*, *224*, 119053.

[7]. N. N. Le, K. T. Nguyen, T. D. Dinh, T. M. H. Pham, T. H. V. Le, X. T. Nguyen, T. Dat Pham, T. Duc Pham (2026). Distribution of heavy metals in mangrove soils of Red River Delta, Northern of Vietnam. *Marine Environmental Research*, *213*, 107631.

[8]. T. T. Hung, T. A. Tu, D. T. Huyen, M. Desmet (2019). Presence of trace elements in sediment of Can Gio mangrove forest, Ho Chi Minh city, Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, *41*(1), 21-35.

[9]. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 03:2023/BTNMT về Chất lượng đất.

[10]. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 43:2017/BTNMT về Chất lượng trầm tích.

[11]. Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia QCVN 43:2025/BNNMT về Chất lượng trầm tích.

[12]. Lê Như Ngà, Ngô Xuân Chiều, Nguyễn Xuân Tùng, Phạm Thị Minh Hạnh, Đinh Thị Dịu (2026). Phân bố không gian thành phần loài cây ngập mặn tại Vườn Quốc gia Xuân Thuỷ (tỉnh Ninh Bình) dựa trên học máy và dữ liệu ảnh viễn thám đa cảm biến. *Tạp chí Nông nghiệp và Môi trường*, *10*, 79-87.

[13]. Hà Thị Hiền, Nguyễn Thị Kim Cúc (2018). Cấu trúc và sinh khối tích lũy trên mặt đất của rừng ngập mặn trồng tại Vườn quốc gia Xuân Thủy. *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, *63*(2018), 32-39.

[14]. H. H. Nguyen, Q. T. Dinh, T. H. Duong (2017). Using Landsat 8 to estimate aboveground biomass and carbon stocks in Xuan Thuy National Park, Nam Dinh province. *Vietnam Journal of Forest Science*, *1*, 84-93.

[15]. T. Dat Pham, N. Yokoya, J. Xia, N. T. Ha, N. N. Le, T. T. T. Nguyen, T. H. Dao, T. T. P. Vu, T. Duc Pham, W. Takeuchi (2020). Comparison of machine learning methods for estimating mangrove above-ground biomass using multiple source remote sensing data in the Red River Delta Biosphere Reserve, Vietnam. *Remote Sensing*, *12*(8), 1334.

[16]. Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 7538-4:2007 về Chất lượng đất - Lấy mẫu - Phần 4: Hướng dẫn Qui trình điều tra các vùng tự nhiên, bán tự nhiên và vùng canh tác.

[17]. Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 6647:2007. Chất lượng đất - Xử lý sơ bộ mẫu để phân tích lý - hóa.

[18]. U.S. Environmental Protection Agency (2014). Method 6020B (SW-846): Inductively coupled plasma-mass spectrometry, revision 2.

[19]. Lars Hakanson (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control.a sedimentological approach. *Water Research*, *14*(8), 975-1001.

[20]. G. M. S. Abrahim, R. J. Parker (2008). Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, *136*(1), 227-238.

[21]. K. K. Turekian, K. H. Wedepohl (1961). Distribution of the elements in some major units of the Earth's Crust. *GSA Bulletin*, *72*(2), 175-192.

[22]. N. Thanh-Nho, C. Marchand, E. Strady, T. V. Vinh, T. T. Nhu-Trang (2019). Metals geochemistry and ecological risk assessment in a tropical mangrove (Can Gio, Vietnam). *Chemosphere*, *219*, 365-382.

STUDY ON METAL CONCENTRATIONS IN RELATION TO BIOMASS AND SPECIES COMPOSITION OF MANGROVE FORESTS AT XUAN THUY NATIONAL PARK

Le Nhu Nga[1], Dinh Thi Diu[2], Pham Thi Minh Hanh[1], Ngo Xuan Chieu[3], Nguyen Xuan Tung[4], Nguyen Thi Viet Lien[1]

[1] *Institute of Mechanics, Vietnam Academy of Science and Technology*

[2] *Faculty of Environmental Sciences, VNU University of Science*

[3] *Xuan Thuy National Park*

[4] *Mangrove Ecosystem Research Center, Hanoi National University of Education*

Abstract

Mangrove forests play an important role in improving coastal environmental quality, carbon sequestration and climate change mitigation. This study assessed aboveground biomass (AGB) and the enrichment levels of eight metals (M: Cu, Pb, Zn, Mn, Cr, As, Ni and Fe) in surface soil (0-50 cm) across three dominant monospecific and mixed-species mangrove communities at Xuan Thuy National Park, Ninh Binh Province: Kandelia obovata, K. obovata - Aegiceras corniculatum and K. obovata - Rhizophora stylosa, based on 25 sampling plots. AGB was highest in the K. obovata - A. corniculatum community, followed by K. obovata and lowest in the K. obovata - R. stylosa community (50.1, 43.2 and 38.5 t/ha, respectively), reflecting differences in stand density and structure among communities. Except for Mn, for which no regulatory threshold has been established, the concentrations of the other metals were generally below the reference limits specified in QCVN 43:2025/BNNMT and QCVN 03:2023/BTNMT. However, Fe exceeded the limit specified in QCVN 43:2025/BNNMT; meanwhile, the maximum concentrations of Pb and Cu in sampling plots slightly exceeded the corresponding limits. The contamination factor (CF) and geoaccumulation index (Igeo) indicated moderate-to-high enrichment of Pb, moderate enrichment of As and Cu and predominantly background levels of Zn, Mn, Cr and Ni - suggesting that natural geochemical sources govern most M accumulation, with possible localized anthropogenic contributions to Pb, As and Cu. The relationship between AGB and M concentrations varied among communities: Pb correlated strongly with AGB in the K. obovata - R. stylosa community ($r = 0.83$; $p = 0.02$), whereas Cu, Mn, As and Ni correlated with AGB in the K. obovata - A. corniculatum community ($r = 0.60$-0.66; $p < 0.05$), suggesting that biogeochemical processes may additionally contribute to the observed relationships, alongside the likely role of fine-sediment deposition. Pb, As, Cu and Fe should be prioritized in soil environmental monitoring programs for this mangrove ecosystem.

Keywords: *Metal concentrations, mangrove species, above-ground biomass, Xuan Thuy National Park.*

Ngày nhận bài: 15/6/2026

Ngày chuyển phản biện: 2/7/2026

Ngày thông qua phản biện: 31/8/2026

Ngày duyệt đăng: 15/9/2026