

ĐÁNH GIÁ HÀM LƯỢNG CỦA MỘT SỐ KIM LOẠI NẶNG TRONG ĐẤT Ở CÁC KHU CÔNG NGHIỆP TRỌNG ĐIỂM CỦA THÀNH PHỐ ĐỒNG NAI

Nguyễn Thanh Hùng^{1,*}, Trương Công Phú¹, Lê Minh Chiến¹,
Hoàng Thị Thu Hoài¹, Phạm Thị Nguyên¹, Bùi Thị Thu Hà¹, Ngô Thị Hiệp¹

¹ Khoa Quản lý đất đai, Trường Đại học Tài nguyên
và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: nthung@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm đánh giá mức độ ô nhiễm và đặc điểm phân bố theo chiều sâu của các chất ô nhiễm trong đất tại các khu công nghiệp trọng điểm Thành phố Đồng Nai. Tổng cộng 150 mẫu đất được thu thập tại 6 khu công nghiệp, phân tích các chỉ tiêu pH và hàm lượng các kim loại nặng như: Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, As và sunfat (SO_4^{2-}). Nghiên cứu dựa trên việc phân tích hệ số tích tụ bề mặt (R), xác định mối tương quan dựa trên phương trình hồi quy tuyến tính giữa tầng đất mặt (0 - 30 cm) và tầng sâu (30 - 60 cm), phân tích phương sai (ANOVA) và chỉ số tích lũy địa chất (I_{geo}). Kết quả cho thấy, đất có xu hướng chua ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4,21 - 5,48$), có thể làm gia tăng tính linh động của một số kim loại nặng. Mối tương quan chặt chẽ giữa nồng độ hai tầng đất ($R^2 > 0,90$) phản ánh xu thế biến thiên đồng thời, tuy nhiên vẫn tồn tại sự khác biệt cục bộ theo không gian. Kết quả ANOVA ($p < 0,05$) cho thấy, sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các khu công nghiệp. Đánh giá theo chỉ số I_{geo} cho thấy, Cd là nguyên tố có mức độ tích tụ đáng chú ý nhất, trong khi các kim loại khác chủ yếu thể hiện sự giàu hóa cục bộ tại một số khu vực. Nhìn chung, sự phân bố kim loại nặng trong đất khu công nghiệp tại thành phố Đồng Nai chịu ảnh hưởng tổng hợp của nguồn phát thải và các yếu tố thổ nhưỡng. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho công tác quan trắc theo chiều sâu và quản lý rủi ro môi trường đất trong điều kiện công nghiệp hóa.

Từ khóa: Ô nhiễm kim loại nặng, ô nhiễm đất ở khu công nghiệp, ô nhiễm đất xám, ô nhiễm đất đỏ, phân bố theo chiều sâu.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ô nhiễm kim loại nặng (KLN) trong đất đang trở thành một trong những thách thức môi trường nghiêm trọng trên phạm vi toàn cầu, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển có tốc độ công nghiệp hóa và đô thị hóa nhanh. Các nguyên tố như: Cd, Pb, As, Cu và Zn có đặc tính bền vững, không phân hủy sinh học, khả năng tích lũy sinh học cao và có thể gây độc tính lâu dài đối với hệ sinh thái đất, cây trồng và sức khỏe con người [1, 2]. Trong bối cảnh toàn cầu, nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy, từ 14 - 17% diện tích đất nông nghiệp thế giới có dấu hiệu tích lũy KLN vượt ngưỡng an toàn, chủ yếu tập trung tại các khu vực chịu tác động mạnh của hoạt động công nghiệp và khai khoáng [3 - 6].

Sự gia tăng hàm lượng KLN trong đất gắn liền với các nguồn phát thải từ khu công nghiệp (KCN), luyện kim, sản xuất hóa chất, tái chế kim

loại, xử lý chất thải rắn và giao thông đô thị [7 - 9]. Các nghiên cứu tại Trung Quốc, Thái Lan và Ấn Độ đã chứng minh rằng, đất xung quanh KCN thường có hệ số làm giàu (EF) và chỉ số tích lũy địa hóa (I_{geo}) ở mức trung bình đến cao, phản ánh rõ ràng tác động nhân sinh [10 - 12]. Đặc biệt, các nghiên cứu giai đoạn 2015 - 2025 nhấn mạnh rằng, không chỉ tầng đất mặt mà cả tầng đất sâu (20 - 50 cm) cũng ghi nhận xu hướng tích lũy KLN do quá trình rửa trôi và vận chuyển thẳng đứng dưới tác động của pH, vật chất hữu cơ và cấu trúc đất [13 - 16].

Về mặt cơ chế địa hóa, tính linh động của KLN phụ thuộc mạnh vào đặc tính lý hóa đất như: pH, hàm lượng mùn, thành phần cation và điều kiện oxy hóa - khử [17]. Trong điều kiện nhiệt đới ẩm, việc nghiên cứu động học tích lũy KLN giữa tầng đất mặt và tầng đất sâu có ý nghĩa đặc biệt quan trọng do cường độ phong hóa mạnh, lượng mưa lớn và môi trường đất thường

có pH thấp, làm gia tăng khả năng hòa tan và di chuyển của kim loại trong phần diện đất [1, 2]. Quá trình rửa trôi theo mùa mưa có thể thúc đẩy sự dịch chuyển của các nguyên tố như Cd và Zn xuống tầng sâu, trong khi Pb và Cu có xu hướng bị giữ lại ở tầng mặt nhờ liên kết với chất hữu cơ và oxit Fe-Al đặc trưng của đất nhiệt đới. Do đó, phân tích đồng thời hai tầng đất không chỉ phản ánh mức độ tích lũy hiện tại mà còn cho phép đánh giá xu thế vận chuyển và nguy cơ lan truyền thứ cấp trong dài hạn.

Bên cạnh đó, các KCN đa ngành tại Đông Nam Á có tính đặc thù cao do sự tập trung đồng thời của nhiều loại hình sản xuất như cơ khí, luyện kim, điện - điện tử và chế biến thực phẩm trong cùng một không gian địa lý, tạo nên phổ phát thải kim loại phức tạp và chồng lấn [4, 12]. Quá trình công nghiệp hóa nhanh cùng sự khác biệt về quy mô quản lý môi trường giữa các quốc gia trong khu vực càng làm gia tăng nguy cơ tích lũy kim loại trong đất theo thời gian.

Tại Việt Nam, quá trình công nghiệp hóa mạnh mẽ trong hơn ba thập kỷ qua đã làm gia tăng số lượng KCN và cụm công nghiệp, đặc biệt tại các tỉnh trọng điểm phía Nam. Nhiều nghiên cứu đã ghi nhận sự tích tụ KLN trong đất nông nghiệp và đất đô thị lân cận KCN, với một số vị trí vượt ngưỡng quy định [18, 19]. Các nghiên cứu tại khu vực thành phố Đà Nẵng và tỉnh An Giang cũng cho thấy hàm lượng Cu, Zn, Pb và As tăng cao tại các vị trí gần KCN và tuyến giao thông chính, phản ánh ảnh hưởng kết hợp của hoạt động công nghiệp và đô thị hóa [20, 21].

Ở các nước có nền công nghiệp đang phát triển, hoạt động sản xuất và thải bỏ chất thải kim loại dẫn đến phân bố KLN theo không gian và chiều sâu khác nhau, tạo ra các điểm nóng ô nhiễm có đặc thù riêng theo ngành nghề và lịch sử hoạt động. Bên cạnh đó, các phương pháp đánh giá ô nhiễm như hệ số tích tụ (R), chỉ số tích lũy địa hóa (I_{geo}), hệ số giàu hóa (EF) và các mô hình đánh giá rủi ro sinh thái và sức khỏe cộng đồng đã được sử dụng rộng rãi để định lượng mức độ ô nhiễm và nguy cơ liên quan [22].

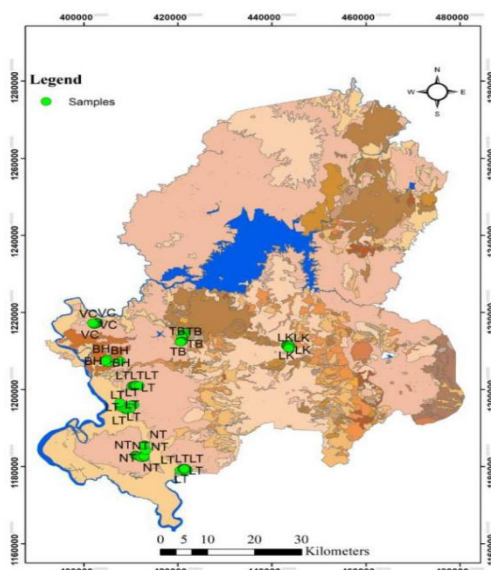
Thành phố Đồng Nai là một trong những trung tâm kinh tế - công nghiệp phát triển năng động nhất tại Việt Nam. Với lịch sử phát triển công nghiệp lâu đời, đặc biệt là sự tập trung của các KCN trọng điểm như Biên Hòa, Long Thành,

Nhơn Trạch, Trảng Bom, địa phương này đang phải đối mặt với những áp lực môi trường rất lớn. Các hoạt động sản xuất đa dạng từ luyện kim, cơ khí, linh kiện điện tử đến dệt nhuộm và chế biến gỗ là những nguồn phát thải tiềm tàng các nguyên tố như: Chì (Pb), asen (As), đồng (Cu) và kẽm (Zn) vào môi trường đất xám đặc trưng của khu vực. Nghiên cứu của Trần Văn Chính (2014) [23] đã cung cấp dữ liệu nền quan trọng về hàm lượng KLN trong đất xám và đất đỏ vùng Đông Nam Bộ. Tuy nhiên, các phân tích chuyên sâu về sự phân hóa ô nhiễm giữa các cụm công nghiệp có quy mô sản xuất khác nhau, cũng như mối liên hệ giữa các anion công nghiệp (SO_4^{2-}) với sự di động của KLN theo chiều sâu vẫn còn khá hạn chế. Vì vậy, nghiên cứu động học tích lũy theo chiều sâu trong bối cảnh KCN đa ngành không chỉ có ý nghĩa địa hóa môi trường mà còn góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho quản lý và quy hoạch bền vững tại khu vực nhiệt đới đang phát triển.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện tại 6 khu vực trọng điểm về công nghiệp thuộc thành phố Đồng Nai, bao gồm: KCN Biên Hòa (30 mẫu), Long Thành (20 mẫu), Nhơn Trạch (30 mẫu), Trảng Bom (28 mẫu), Long Khánh (22 mẫu) và Vĩnh Cửu (20 mẫu). Các KCN có quy mô lớn, lâu năm và đa dạng ngành nghề (như Biên Hòa, Nhơn Trạch, Trảng Bom) được bố trí số mẫu nhiều hơn nhằm đảm bảo tính đại diện không gian. Ngược lại, các KCN mới, có quy mô nhỏ hơn (như Vĩnh Cửu, Long Khánh, Long Thành) có số mẫu ít hơn. Các loại hình sản xuất tại các KCN này rất đa dạng từ cơ khí, điện tử đến dệt nhuộm và chế biến gỗ. Tổng cộng 150 mẫu đất đã được thu thập bằng phương pháp lấy mẫu phân tầng (stratified sampling). Tại mỗi vị trí quan trắc, mẫu được lấy ở hai độ sâu: Tầng mặt (0 - 30 cm) nhằm đánh giá sự tích tụ trực tiếp từ nguồn thải bề mặt và bụi lắng. Tầng sâu (30 - 60 cm) nhằm đánh giá khả năng di chuyển của các chất ô nhiễm. Bốn KCN trên nền đất xám bao gồm: Biên Hòa, Trảng Bom, Long Thành, Nhơn Trạch; 02 KCN trên nền đất đỏ gồm: Vĩnh Cửu, Long Khánh. KCN Biên Hòa (gồm Biên Hòa I và II) có tổng diện tích khoảng 1.137 ha; KCN Trảng Bom (Bàu Xéo và Giang Điền) khoảng 1.092 ha; KCN Long Khánh khoảng 264 ha; KCN Long Thành khoảng 487 ha; KCN Thạnh Phú (Vĩnh Cửu) khoảng 177 ha;

hệ thống các KCN tại Nhơn Trạch (Nhơn Trạch I, II, VI và các phân khu liên quan) 1.200 ha.



Hình 1. Vị trí các điểm lấy mẫu

Bảng 1. Kết quả phân tích thành phần cơ giới đất cho hai loại đất đỏ và đất xám

Chỉ tiêu	Đất đỏ	Đất xám
pH _{KCL}	4,52	5,17
Hàm lượng hữu cơ tổng số (%)	1,43	0,98
Cát (sand) (< 2 - 0,05 mm) %	20,2	61,1
Thịt (silt) (0,05 - 0,002 mm) %	17,6	17,4
Sét (clay) (< 0,002 mm) %	62,2	21,5

Mẫu đất sau khi thu thập được phơi khô tự nhiên, loại bỏ rễ cây và tạp chất, sau đó nghiền và rây qua rây 2 mm. Các chỉ tiêu được phân tích theo các tiêu chuẩn hiện hành. Chỉ tiêu lý hóa: pH đất được đo bằng máy đo pH trong dịch chiết KCl (tỷ lệ 1 : 2,5). Điện thế oxy hóa khử (Eh) được đo trực tiếp tại hiện trường. Hàm lượng KLN: Các mẫu được phá mẫu bằng hỗn hợp axit mạnh (HNO₃, HCl, HClO₄). Hàm lượng Pb, Cu, Zn, Cd, As được xác định bằng phương pháp ICP - MS. Thủy ngân (Hg) được phân tích bằng phương pháp hóa hơi lạnh. Anion SO₄²⁻ được xác định bằng phương pháp sắc ký ion.

Phân tích thống kê và xử lý số liệu: Toàn bộ dữ liệu được xử lý thống kê bằng phần mềm Microsoft Excel. Phân tích tương quan Pearson:

Xác định mối quan hệ giữa các KLN và các đặc tính lý hóa đất (pH, Eh, Anion).

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiện trạng ô nhiễm đất tại các KCN

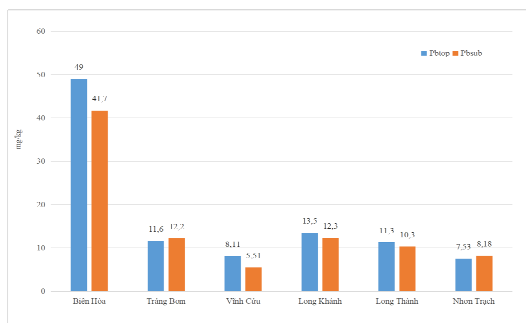
Dữ liệu từ 150 mẫu đất tại 6 KCN cho thấy môi trường đất có xu hướng bị chua, với giá trị pH dao động từ 3,39 (tầng mặt tại Long Thành) đến 5,68 (tầng mặt tại Trảng Bom). Khoảng giá trị pH này phản ánh điều kiện đất chua đến chua mạnh, đặc trưng cho nhiều khu vực đất công nghiệp trong điều kiện nhiệt đới ẩm (Hình 9). Giá trị pH thấp có thể ảnh hưởng đáng kể đến khả năng trao đổi và hấp phụ của đất, từ đó làm gia tăng tính linh động của một số KLN. Trong môi trường chua, các nguyên tố như Cd, Zn có xu hướng tồn tại ở dạng dễ hòa tan hơn, trong khi khả năng hấp phụ của đất lên các ion kim loại có thể bị suy giảm.

Hình 2 đến 8 cho thấy, hàm lượng trung bình các KLN và các anion ở các khu KCN tại thành phố Đồng Nai cho thấy sự phân hóa rõ rệt theo đặc thù sản xuất và loại hình thổ nhưỡng của từng khu vực. KCN Biên Hòa ghi nhận nồng độ Pb trung bình cao nhất ở cả hai tầng đất (41,7 - 49,0 mg/kg), trong khi KCN Long Khánh trên nền đất đỏ bazan có hàm lượng As (5,32 - 5,61 mg/kg) và Zn (75,4 - 78,9 mg/kg) vượt trội so với các khu vực đất xám bạc màu. Anion SO₄²⁻ cũng tập trung cao tại các khu vực có lịch sử hoạt động lâu đời và mật độ nhà máy lớn như Biên Hòa, Long Thành và Trảng Bom, điều này liên quan đến hoạt động của các nhà máy dệt nhuộm và chế tạo linh kiện điện tử tại các khu vực này.

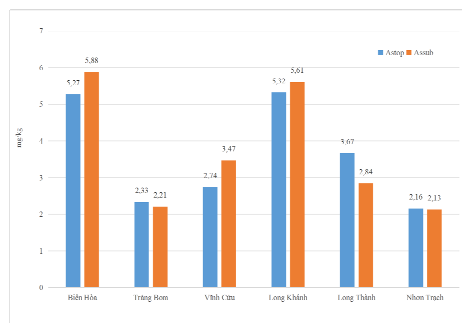
Hệ số tích tụ bề mặt (R) được xác định là tỷ số giữa nồng độ trung bình của chất ô nhiễm tại tầng đất mặt (C_{top}, 0 - 30 cm) và tầng đất sâu (C_{sub}, 30 - 60 cm), theo công thức $R = C_{top}/C_{sub}$. Chỉ số này được sử dụng rộng rãi để đánh giá sự khác biệt nồng độ giữa các tầng đất và xu hướng giàu hóa bề mặt của các nguyên tố trong môi trường đất [24]. Giá trị R > 1 cho thấy xu hướng giàu hóa tương đối tại tầng đất mặt, thường được xem là dấu hiệu của ảnh hưởng từ các nguồn phát thải bề mặt hoặc quá trình tích tụ sinh - địa hóa. Ngược lại, R ≈ 1 phản ánh sự phân bố tương đối đồng đều giữa các tầng đất, trong khi R < 1 có thể gợi ý sự tích lũy tương đối ở tầng sâu hoặc ảnh hưởng của các quá trình vận chuyển thẳng đứng

[24, 25]. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng, đất là một hệ động, có sự trao đổi vật chất giữa các tầng, do đó hệ số R chủ yếu phản ánh xu thế phân bố tương

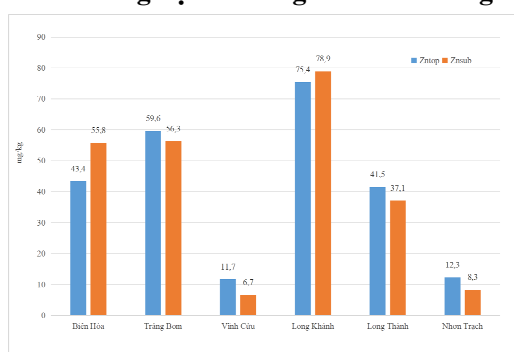
đối và không đủ để khẳng định trực tiếp nguồn gốc ô nhiễm nếu không kết hợp với các chỉ tiêu và phân tích bổ sung [24].



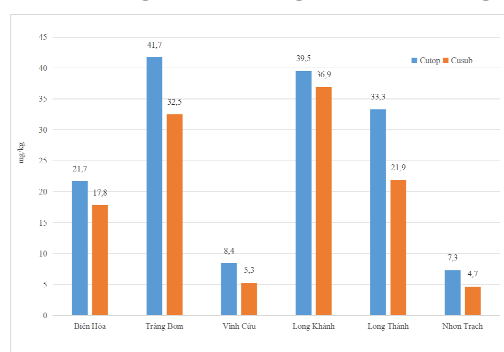
Hình 2. Nồng độ Pb trung bình theo tầng đất



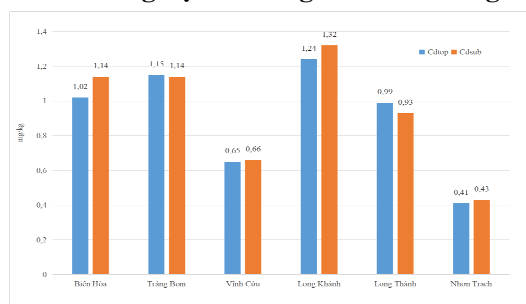
Hình 3. Nồng độ As trung bình theo tầng đất



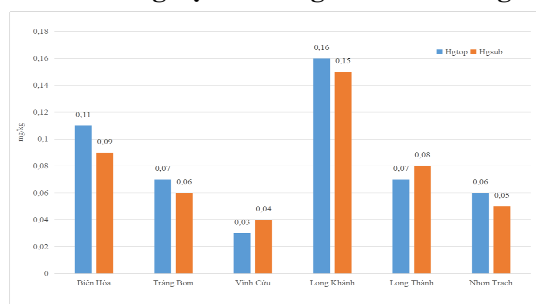
Hình 4. Nồng độ Zn trung bình theo tầng đất



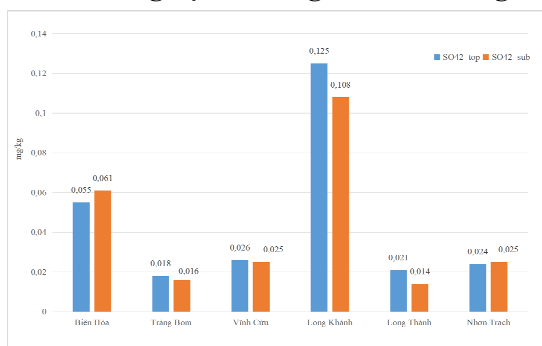
Hình 5. Nồng độ Cu trung bình theo tầng đất



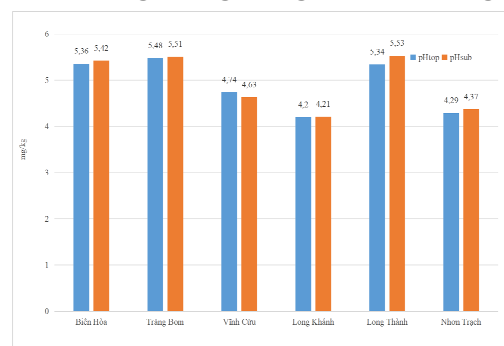
Hình 6. Nồng độ Cd trung bình theo tầng đất



Hình 7. Nồng độ Hg trung bình theo tầng đất



Hình 8. Nồng độ SO_4^{2-} trung bình theo tầng đất



Hình 9. Giá trị pH trung bình theo tầng đất

Bảng 2. Tỷ lệ giữa hàm lượng trung bình của các KLN ở tầng mặt/tầng sâu và hệ số tích tụ (*R*) của chúng theo khu từng KCN

KCN	Chỉ tiêu	pH	Eh (mV)	As	Pb	Zn	Cu	Cd	Hg	SO ₄ ²⁻ (g/kg)
Biên Hòa (đất xám)	<i>C_{top}/C_{sub}</i>	5,36/5,42	85,9/82,8	5,27/5,88	49,0/41,7	43,4/55,8	21,7/17,8	1,02/1,14	0,11/0,09	0,055/0,061
	<i>R</i>	0,99	1,04	0,90	1,18	0,78	1,22	0,89	1,22	0,90
Trảng Bom (đất xám)	<i>C_{top}/C_{sub}</i>	5,48/5,51	69,9/72,5	2,33/2,21	11,6/12,2	59,6/56,3	41,7/32,5	1,15/1,14	0,07/0,06	0,018/0,016
	<i>R</i>	0,99	0,96	1,05	0,95	1,06	1,28	1,01	1,17	1,12
Vĩnh Cửu (đất đỏ)	<i>C_{top}/C_{sub}</i>	4,74/4,63	117,5/124,1	2,74/3,47	8,11/5,51	11,7/6,7	8,4/5,3	0,65/0,66	0,03/0,04	0,026/0,025
	<i>R</i>	1,02	0,95	0,79	1,47	1,75	1,58	0,98	0,75	1,04
Long Khánh (đất đỏ)	<i>C_{top}/C_{sub}</i>	4,20/4,21	148,8/152,3	5,32/5,61	13,5/12,3	75,4/78,9	39,5/36,9	1,24/1,32	0,16/0,15	0,125/0,108
	<i>R</i>	1,00	0,98	0,95	1,10	0,96	1,07	0,94	1,07	1,16
Long Thành (đất xám)	<i>C_{top}/C_{sub}</i>	5,34/5,53	108,8/102,5	3,67/2,84	11,3/10,3	41,5/37,1	33,3/21,9	0,99/0,93	0,07/0,08	0,021/0,014
	<i>R</i>	0,97	1,06	1,29	1,03	1,12	1,52	1,07	0,89	1,50
Nhơn Trạch (đất xám)	<i>C_{top}/C_{sub}</i>	4,29/4,37	142,6/137,1	2,16/2,13	7,53/8,18	12,3/8,3	7,3/4,7	0,41/0,43	0,06/0,05	0,024/0,025
	<i>R</i>	0,98	1,04	1,01	0,92	1,47	1,56	0,95	1,20	0,96

Kết quả ở bảng 2 cho thấy, đa số các chỉ tiêu có $R > 1$ cho thấy xu thế giàu hóa bề mặt tương đối. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng, chỉ số *R* phản ánh trạng thái phân bố tương đối tại thời điểm khảo sát và chưa đủ để khẳng định trực tiếp nguồn gốc ô nhiễm, do còn chịu ảnh hưởng của các yếu tố như đặc tính thổ nhưỡng và điều kiện môi trường.

Sự khác biệt giữa hệ số *R* và hàm lượng trung bình của các KLN cho thấy mức độ tích tụ không hoàn toàn phụ thuộc vào nồng độ cao hay thấp, mà còn phản ánh lịch sử phát thải và khả năng lưu giữ của đất. Mặc dù ở KCN Vĩnh Cửu có hệ số tích tụ chì, kẽm, đồng trên tầng đất mặt cao ($R_{Pb} = 1,47$, $R_{Zn} = 1,75$, $R_{Cu} = 1,58$) nhưng hàm lượng trung bình chỉ khoảng 6 - 8 mg/kg, trong khi KCN Biên Hòa có *R* thấp hơn ($R_{Pb} = 1,18$, $R_{Zn} = 0,78$, $R_{Cu} = 1,22$) nhưng hàm lượng trung bình ở cả hai tầng đất đều cao gấp 5 - 8 lần so với KCN Vĩnh Cửu. Điều này phản ánh rõ nét lịch sử hoạt động: KCN Biên Hòa là KCN lâu đời nhất Việt Nam, được thành lập từ năm 1963 với thời gian hoạt động trên 60 năm và tập trung nhiều ngành có nguy cơ phát thải KLN như: Hóa chất,

luyện kim, cơ khí, xi mạ, điện - điện tử và sản xuất ắc quy. Quá trình phát thải kéo dài qua nhiều thập kỷ đã làm các KLN thâm sâu và tích lũy trong cả tầng đất dưới, làm tăng giá trị *C_{sub}* và dẫn đến hệ số *R* giảm; điển hình là điểm nóng ô nhiễm Pb đạt 81,5 mg/kg tại khu vực nhà máy sản xuất pin ắc quy Đồng Nai. Ngược lại, KCN Vĩnh Cửu (KCN Thạnh Phú) được hình thành từ đầu những năm 2000, có quy hoạch hạ tầng và hệ thống xử lý nước thải tập trung đồng bộ hơn, đồng thời chủ yếu thu hút các ngành cơ khí, công nghiệp hỗ trợ, chế biến gỗ, nhựa và điện - điện tử, ít tập trung các ngành hóa chất và luyện kim. Do thời gian hoạt động ngắn hơn, KLN, đặc biệt là Zn và Pb, chủ yếu mới tích lũy ở lớp đất mặt, chưa kịp di chuyển và tích tụ đáng kể xuống tầng đất dưới, dẫn đến hệ số *R* cao hơn nhưng hàm lượng vẫn thấp hơn nhiều so với KCN Biên Hòa.

Về thổ nhưỡng, đất xám bạc màu tại KCN Biên Hòa, Long Thành, Trảng Bom, Nhơn Trạch có khả năng đệm kém, nghèo keo sét (Bảng 1) nên KLN dễ dàng di động xuống tầng sâu hơn. Ngược lại, đất đỏ bazan tại KCN Long Khánh và

Vĩnh Cửu với dung tích hấp phụ cao giúp cố định KLN và Asen (8,22 mg/kg) ổn định hơn trong tầng mặt, giảm nguy cơ rửa trôi. Hệ số tích tụ SO_4^{2-} cao tại KCN Long Thành ($R=1,50$) và sự hiện diện của nó tại KCN Biên Hòa (0,05 - 0,06 mg/kg) là dấu ấn của nước thải ngành dệt nhuộm và hóa chất.

Phương trình hồi quy tuyến tính giữa nồng độ tại tầng đất mặt (C_{top}) và tầng đất sâu (C_{sub}) được xây dựng trên cơ sở các cặp mẫu tương ứng theo từng vị trí lấy mẫu. Các phương trình hồi quy tuyến tính dạng: $C_{sub} = a \cdot C_{top} + b$. Tổng hợp các phương trình hồi quy và độ tin cậy (r^2) cho các chỉ tiêu chính được thể hiện ở bảng 3.

Bảng 3. Phương trình tương quan hàm lượng các chất giữa lớp đất mặt và đất sâu

STT	Chỉ tiêu	Phương trình hồi quy tuyến tính	Độ tin cậy (r^2)
1	pH	$C_{sub}=1,02 \cdot C_{top} - 0,10$	0,98
2	As	$C_{sub}=1,09 \cdot C_{top} - 0,35$	0,94
3	Pb	$C_{sub}=0,85 \cdot C_{top} + 0,70$	0,99
4	Cd	$C_{sub}=1,02 \cdot C_{top} - 0,02$	0,96
5	Zn	$C_{sub}=1,11 \cdot C_{top} - 6,50$	0,95
6	Cu	$C_{sub}=0,88 \cdot C_{top} - 4,50$	0,94
7	Hg	$C_{sub}=0,82 \cdot C_{top} + 0,005$	0,91
8	SO_4^{2-}	$C_{sub}=0,86 \cdot C_{top} + 0,004$	0,99
9	Eh (mV)	$C_{sub}=1,02 \cdot C_{top} - 1,84$	0,98

Kết quả cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa hai tầng đất đối với hầu hết các chỉ tiêu ($r^2 > 0,91$). Tuy nhiên, các hệ số hồi quy ($a < 1$) kết hợp với hệ số tự do (b) cho thấy mối quan hệ này không tuyến tính đơn giản theo dạng tỷ lệ, mà có sự chông lẩn giá trị giữa hai tầng đất. Cần lưu ý rằng, hệ số hồi quy phản ánh xu thế trung bình của toàn bộ tập dữ liệu, không đại diện cho tất cả các trường hợp riêng lẻ. Thực tế quan trắc vẫn ghi nhận một số điểm có giá trị $C_{sub} > C_{top}$, phản ánh sự không đồng nhất không gian và ảnh hưởng của các yếu tố địa hóa tại từng khu vực. Do đó, các phương trình hồi quy được sử dụng nhằm mô tả xu hướng phân bố theo chiều sâu, thay vì thiết lập một mối quan hệ xác định tuyệt đối giữa hai tầng đất. Sự tồn tại của các trường hợp $C_{sub} > C_{top}$ tại một số KCN không mâu thuẫn với mô hình hồi quy, mà phản ánh đặc điểm biến động cục bộ của môi trường đất.

Kết quả ở bảng 3 cho thấy, hệ số góc $a < 1$ ở Pb (0,85), Cu (0,88), Hg (0,82) và SO_4^{2-} (0,86) phản ánh xu thế tích tụ tương đối ưu thế tại tầng đất mặt, có thể liên quan đến nguồn phát thải bề mặt từ hoạt động công nghiệp. Tuy nhiên, xu thế này không chỉ do yếu tố phát thải mà còn chịu ảnh hưởng đáng kể bởi khả năng hấp phụ mạnh của Pb lên các pha oxit Fe-Al và chất hữu cơ trong đất.

Đối với các nguyên tố như As (1,09), Cd (1,02) và Zn (1,11), giá trị a xấp xỉ 1 cho thấy sự phân bố tương đối đồng đều giữa tầng đất mặt và tầng sâu, phản ánh trạng thái cân bằng động giữa quá trình hấp phụ và giải hấp. Tuy nhiên, cơ chế này cần được xem xét trong mối liên hệ với đặc tính thổ nhưỡng, đặc biệt là dung tích hấp phụ, thành phần khoáng và điều kiện hóa lý của đất, thay vì chỉ quy về quá trình rửa trôi đơn thuần.

Cần lưu ý rằng, mô hình hồi quy tuyến tính đơn chỉ phản ánh mối quan hệ thống kê giữa hai tầng đất và chưa đủ để khẳng định đầy đủ cơ chế vận chuyển của các kim loại trong môi trường đất. Do đó, các kết quả này cần được diễn giải kết hợp với các yếu tố địa hóa và nguồn phát thải đặc thù của từng khu vực nghiên cứu.

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy giá trị F (Fisher's ratio) cao đối với hầu hết các chỉ tiêu KLN khi so sánh giữa 6 KCN, đặc biệt là Pb ($F \gg F_{critical}$), cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về hàm lượng giữa các khu vực. Mức ý nghĩa $p < 0,05$ (thậm chí $p < 0,001$ đối với Pb và SO_4^{2-}) cho phép bác bỏ giả thuyết về sự đồng nhất, phản ánh sự tồn tại của các vùng có mức độ ô nhiễm khác nhau, trong đó một số khu vực như: KCN Biên Hòa ($Pb_{avg} \approx 49,0$ mg/kg) hay Long Khánh ($As_{avg} \approx 5,32$ mg/kg) có xu hướng cao hơn so với các khu vực còn lại. Tuy nhiên, sự khác biệt này không chỉ liên quan đến cường độ và đặc thù nguồn phát thải công nghiệp, mà còn chịu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường và thổ nhưỡng như: pH, Eh, thành phần khoáng vật, khả năng hấp phụ của đất và điều kiện thủy văn tại từng khu vực. Trong phân tích tương quan giữa hai tầng đất, giá trị $p < 0,01$ đi kèm với hệ số xác định cao (R^2 đạt tới 0,99 trong một số trường hợp như Pb và SO_4^{2-}) cho thấy tồn tại mối liên hệ chặt chẽ về mặt thống kê giữa nồng độ tầng mặt và tầng sâu. Tuy nhiên, mối quan hệ này chủ yếu

phản ánh xu thế biến thiên đồng thời giữa hai tầng đất và chưa đủ để khẳng định vai trò dự báo tuyệt đối của tầng mặt đối với tầng sâu, do vẫn tồn tại sự biến động cục bộ.

Việc kết hợp phân tích phương sai (ANOVA) và các chỉ tiêu thống kê liên quan cho thấy sự phân bố chất ô nhiễm trong đất tại thành phố Đồng Nai có tính không đồng nhất rõ rệt, phản ánh sự tương tác phức tạp giữa nguồn phát thải và đặc tính môi trường đất, thay vì một quy luật đơn giản hay đồng nhất trên toàn khu vực nghiên cứu.

3.2. Kết quả phân tích chỉ số tích lũy địa chất (I_{geo})

Việc phân tích chỉ số tích lũy địa chất (I_{geo}) trong nghiên cứu này được thực hiện dựa trên giá trị nền kim loại nặng của khu vực Đông Nam Bộ theo Trần Văn Chính (2014) [23], với các giá trị lần lượt là Pb = 25 mg/kg, Zn = 65 mg/kg, Cu = 22 mg/kg, Cd = 0,15 mg/kg, As = 5 mg/kg và Hg = 0,05 mg/kg. I_{geo} được xác định theo công thức:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \cdot B_n} \right)$$

Trong đó: C_n là nồng độ kim loại đo được trong mẫu đất (mg/kg); B_n là giá trị nền của kim loại đó (mg/kg); 1,5 là hệ số hiệu chỉnh.

Kết quả cho thấy, cadimi (Cd) là nguyên tố có mức độ ô nhiễm nổi bật nhất tại khu vực nghiên cứu, với giá trị I_{geo} dao động từ khoảng 1,12 - 2,96, tương ứng mức ô nhiễm từ trung bình đến nặng trên cả hai nhóm đất xám và đất đỏ. Trong khi đó, các kim loại khác nhìn chung có giá trị I_{geo} thấp hơn, tuy nhiên vẫn ghi nhận hiện tượng giàu hóa cục bộ tại một số KCN có thời gian hoạt động lâu dài. Cụ thể, chì (Pb) tại KCN Biên Hòa đạt $I_{geo} = 1,95$; đồng (Cu) tại Long Thành đạt $I_{geo} = 1,88$; và asen (As) tại Long Khánh đạt $I_{geo} = 1,15$. Những giá trị này cho thấy sự gia tăng cục bộ so với nền địa hóa tự nhiên và gợi ý ảnh hưởng của các nguồn phát thải nhân sinh kết hợp với điều kiện môi trường đất tại từng khu vực.

3.3. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy, môi trường đất tại các KCN ở thành phố Đồng Nai có xu hướng chua, với pH_{KCl} dao động trong khoảng 4,21 - 5,48. Điều kiện này có thể ảnh hưởng đáng kể

đến khả năng hấp phụ và trao đổi ion trong đất, từ đó làm gia tăng tính linh động của một số KLN. Trong đất nhiệt đới, đặc biệt là đất xám nghèo keo sét, pH thấp kết hợp với lượng mưa lớn theo mùa (2.000 - 2.500 mm/năm) có thể thúc đẩy các quá trình rửa trôi và vận chuyển thẳng đứng của KLN. Theo Alloway (2012) [1] và Kabata-Pendias và cs (2011) [2], trong điều kiện pH < 5,5, khả năng hấp phụ của đất đối với các kim loại như Cd, Zn có xu hướng giảm, làm tăng phần tồn tại ở dạng linh động. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng còn phụ thuộc vào thành phần khoáng vật, hàm lượng chất hữu cơ và điều kiện oxy hóa – khử của từng khu vực. Xu thế này phù hợp với các nghiên cứu được thực hiện tại Thành phố Hồ Chí Minh và tỉnh Bắc Ninh, nơi đất công nghiệp có pH thấp ghi nhận hệ số tích lũy sinh học và nguy cơ rửa trôi KLN cao hơn đáng kể so với nền tự nhiên [18, 19]. Một số các nghiên cứu tại Trung Quốc và Ấn Độ cũng cho thấy mối quan hệ nghịch giữa pH và tính linh động của Cd, Zn trong đất công nghiệp nhiệt đới - cận nhiệt đới [4, 11].

Sự khác biệt giữa hàm lượng trung bình (C_{avg}) và hệ số tích tụ bề mặt (R) cung cấp thông tin về đặc điểm phân bố theo chiều sâu của các chất ô nhiễm. Tại KCN Biên Hòa, mặc dù nồng độ Pb tương đối cao, hệ số R ở mức trung bình ($\approx 1,18$) cho thấy sự chênh lệch giữa tầng mặt và tầng sâu không lớn, phản ánh xu hướng phân bố tương đối đồng đều theo chiều sâu. Điều này có thể liên quan đến quá trình vận chuyển thẳng đứng diễn ra trong thời gian dài. Tương tự các nghiên cứu tại Hàn Quốc và Ba Lan, nơi các KCN lâu năm ghi nhận sự phân bố KLN tương đối đồng đều theo chiều sâu do tích lũy nhiều thập kỷ [10, 26]. Ngược lại, tại các KCN mới như Vĩnh Cửu, giá trị R cao ($R_{Zn} \approx 1,75$; $R_{Pb} \approx 1,47$) trong khi hàm lượng trung bình còn thấp, cho thấy xu hướng giàu hóa tương đối ở tầng mặt. Xu thế tương tự được ghi nhận tại các KCN mới ở Thái Lan [7]. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng hệ số R chỉ phản ánh sự khác biệt tương đối giữa các tầng đất và có thể chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như điều kiện môi trường, cấu trúc đất và lịch sử sử dụng đất.

Các phương trình hồi quy tuyến tính giữa nồng độ tầng mặt (C_{top}) và tầng sâu (C_{sub}) cho thấy mối tương quan chặt chẽ ($R^2 \geq 0,91$), phản ánh xu thế biến thiên đồng thời giữa hai tầng đất.

Tuy nhiên, hệ số hồi quy cho thấy mối quan hệ này không hoàn toàn tuyến tính đơn giản. Cụ thể, các trường hợp có hệ số góc gần 1 (như As, Cd và Zn) có thể gợi ý trạng thái cân bằng tương đối giữa quá trình hấp phụ và giải hấp trong điều kiện môi trường hiện tại. Theo Sparks và cs (2022), trong điều kiện đất chua với dung tích hấp phụ thấp, kim loại có thể di chuyển xuống tầng sâu theo cơ chế đối lưu - khuếch tán kết hợp [17]. Trong khi đó, hệ số góc nhỏ hơn 1 đối với Pb phản ánh xu hướng tích tụ tương đối ở tầng mặt do ái lực mạnh với các pha hấp phụ như oxit Fe-Al và chất hữu cơ, phù hợp với các nghiên cứu trên đất feralit ở Brazil [27]. Ngoài ra, sự tồn tại các trường hợp $C_{sub} > C_{top}$ trong dữ liệu thực tế cho thấy sự không đồng nhất không gian và ảnh hưởng của các quá trình địa hóa cục bộ.

Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về hàm lượng các chất giữa các KCN ($p < 0,05$; một số chỉ tiêu đạt $p < 0,001$), phản ánh tính không đồng nhất không gian của môi trường đất trong khu vực nghiên cứu. Giá trị F cao đối với một số nguyên tố như Pb và SO_4^{2-} cho thấy mức độ biến động giữa các khu vực lớn hơn đáng kể so với biến động nội tại trong từng khu. Tuy nhiên, sự khác biệt này không chỉ phản ánh ảnh hưởng của nguồn phát thải công nghiệp mà còn có thể liên quan đến các yếu tố môi trường và thổ nhưỡng như pH, điều kiện oxy hóa - khử, thành phần khoáng vật và đặc điểm thủy văn. Do đó, kết quả ANOVA chủ yếu cung cấp bằng chứng về sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các khu vực, trong khi việc xác định nguyên nhân cần được xem xét trong bối cảnh tổng hợp của các quá trình địa hóa và điều kiện môi trường cụ thể.

Tổng hợp các bằng chứng địa hóa và thống kê cho thấy đất công nghiệp tại thành phố Đồng Nai đang chuyển từ giai đoạn tích tụ bề mặt sang giai đoạn thâm thấu sâu đối với một số nguyên tố như As, Cd và Zn. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng cường độ mưa cực đoan ở Đông Nam Bộ, nguy cơ vận chuyển KLN xuống tầng chứa nước sẽ gia tăng nếu không kiểm soát phát thải và cải thiện khả năng đệm của đất. Những phát hiện này đóng góp cơ sở khoa học cho chiến lược quan trắc đa tầng và quản lý rủi ro môi trường đất tại các vùng công nghiệp hóa nhanh ở các quốc gia đang phát triển.

4. KẾT LUẬN

Kết quả cho thấy, đất có xu hướng chua ($pH_{KCl} = 4,21 - 5,48$), có thể ảnh hưởng đến khả năng hấp phụ và làm gia tăng tính linh động của một số KLN. Sự phân bố theo chiều sâu của chúng thể hiện tính không đồng nhất, được phản ánh qua hệ số tích tụ bề mặt (R) và mối tương quan chặt chẽ giữa tầng đất mặt và tầng sâu ($R^2 > 0,90$). Phân tích ANOVA ($p < 0,05$) cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê giữa các KCN, cho thấy mức độ ô nhiễm không đồng đều trong không gian. Kết quả phân tích theo chỉ số Igeo cho thấy, Cd là nguyên tố có mức độ tích tụ đáng chú ý nhất, trong khi các nguyên tố khác chủ yếu thể hiện xu hướng giàu hóa cục bộ.

Hiện tại nghiên cứu chủ yếu dựa trên phân tích tổng hàm lượng và các phương pháp thống kê, do đó chưa phản ánh đầy đủ dạng tồn tại và tính khả dụng sinh học của các chất trong đất. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần bổ sung các phương pháp phân tích phân đoạn, đánh giá khả năng di động và tích lũy sinh học, đồng thời xem xét chi tiết hơn vai trò của các yếu tố môi trường nhằm làm rõ cơ chế phân bố và vận chuyển các chất ô nhiễm trong đất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Alloway, B. J. (2012). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer Science & Business Media.
- [2]. Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2011). *Trace elements in soils and plants*, 4, 397 - 401. London: CRC press.
- [3]. Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R. & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union. *Environment International*, 88, 299 - 309.
- [4]. Wei, B. & Yang, L. (2010). Heavy metal contamination in urban soils and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 94(2), 99 - 107.
- [5]. Wuana, R. A. & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: Sources, chemistry, risks and remediation strategies. *International Scholarly Research Notices*, Article ID 402647. DOI:10.5402/2011/402647.
- [6]. Shi, H., Wang, S., Xu, X., Huang, L. Gu, Q. & Liu, H. (2024). Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution from

enterprises in China. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136147.

[7]. Simatupang, C. A., Santhaweesuk, K., Strezov, V., Pongkiatkul, P., Boontanon, N. Jindal, R. & Boontanon, S. K. (2024). Health risk assessment of soil contamination with heavy metals in a child care center co-located in vicinity to small scale industrial area: Case study of Thailand. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100727.

[8]. Tong, S., Li, H., Wang, L., Tudi, M. & Yang, L. (2020). Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 - a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3099.

[9]. Peng, J. Y., Zhang, S., Han, Y., Bate, B. Ke, H. & Chen, Y. (2022). Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 816, 151632.

[10]. Lee, H. G., Kim, H. K., Noh, H. J. Byun, Y. J., Chung, H. M. & Kim, J. I. (2021). Source identification and assessment of heavy metal contamination in urban soils based on cluster analysis and multiple pollution indices. *Journal of Soils and Sediments*, 21(5), 1947-1961.

[11]. Singh, A., Sharma, R. K., Agrawal, M. & Marshall, F. M. (2010). Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. *Food and Chemical Toxicology*, 48(2), 611 - 619.

[12]. Machender, G., Dhakate, R. Prasanna, L. & Govil, P. K. (2011). Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area, Hyderabad, India. *Environmental Earth Sciences*, 63(5), 945 - 953.

[13]. Kicińska, A., Pomykała, R. & Izquierdo - Diaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13203.

[14]. Li, X., Wu, Y., Leng, Y., Xiu, D., Pei, N., Li, S. & Tian, Y. (2023). Risk assessment,

spatial distribution, and source identification of heavy metals in surface soils in Zhijin County, Guizhou province, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 132.

[15]. Liu, J., Ren, J., Zhou, Y., Tsang, D. C., Lin, J., Yuan, W. ... & Chen, Y. (2020). Effects and mechanisms of mineral amendment on thallium mobility in highly contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 262, 110251.

[16]. Shang, E., Ma, Y., Yao, W. & Zhang, S. (2024). Trends in heavy metal pollution in agricultural land soils of tropical Islands in China (2000 - 2024): A case study on Hainan Island. *Toxics*, 12(12), 934.

[17]. Sparks, D. L., Singh, B. & Siebecker, M. G. (2022). *Environmental Soil Chemistry*. Elsevier.

[18]. Binh, N. T. L., Hoang, N. T., Truc, N. T. T., Khang, V. D. & Le, H. A. (2021). Estimating the possibility of lead contamination in soil surface due to lead deposition in atmosphere. *Journal of Nanomaterials*, 2021(1), 5586951.

[19]. Trần Thị Minh Thu, Trần Anh Tuấn, Trần Minh Tiến (2018). Đánh giá thực trạng ô nhiễm kim loại nặng trong đất nông nghiệp tỉnh Bắc Ninh. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam*, 8(93)/2018, 102 - 107.

[20]. Giao, N. T. & Hong, T. T. K. Evaluating ecological risk for the occurrence of heavy metal in soil in industrial areas in An Giang province, Vietnam. *Science on Natural Resources and Environment*, 43(2022), 60 - 69

[21]. Nguyen, T. H. T. & Tran, B. Q. (2025). Assessment of Heavy Metal Contamination and Sources in Road Dust from the Da Nang's Largest Industrial Zone and Surrounding Areas. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 41(2), 100 - 115.

[22]. Sharafi, S. & Salehi, F. (2025). Comprehensive assessment of heavy metal (HMs) contamination and associated health risks in agricultural soils and groundwater proximal to industrial sites. *Scientific Reports*, 15(1), 7518.

[23]. Trần Văn Chính (2014). Nghiên cứu xác định giá trị nền của một số kim loại nặng

trong đất khu vực Đông Nam Bộ, *Tạp chí Khoa học Đất*, 44, 45 - 51.

[24]. Sucharova, J., Suchara, I., Hola, M., Marikova, S., Reimann, C., Boyd, R. ... & Englmaier, P. (2012). Top-/bottom-soil ratios and enrichment factors: what do they really show? *Applied Geochemistry*, 27(1), 138 - 145.

[25]. Reimann, C. & Garrett, R. G. (2005). Geochemical background - concept and reality. *Science of the Total Environment*, 350(1 - 3), 12 - 27.

[26]. Kabala, C. & Singh, B. R. (2001). Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 485 - 492.

[27]. Fontes, M. P. F. & Alleoni, L. R. F. (2006). Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils, *Scientia Agricola*, 63(6), 589 - 608.

ASSESSMENT OF SELECTED HEAVY METAL CONCENTRATIONS IN SOILS OF MAJOR INDUSTRIAL PARKS IN DONG NAI CITY

**Nguyen Thanh Hung¹, Truong Cong Phu¹, Le Minh Chien¹,
Hoang Thi Thu Hoai¹, Pham Thi Nguyen¹, Bui Thi Thu Ha¹, Ngo Thi Hiep¹**

¹ *Faculty of Land Management, Ho Chi Minh City University
of Natural Resources and Environment*

Abstract

This study aims to assess the degree of soil contamination and characterize the vertical distribution of pollutants in soils across key industrial parks in Dong Nai city, Vietnam. A total of 150 soil samples were collected from six industrial parks and analyzed for pH and concentrations of heavy metals, including Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, and As, as well as sulfate (SO_4^{2-}). The study employed the surface accumulation ratio (R), linear regression analysis to examine relationships between the surface soil layer (0-30 cm) and the deeper soil layer (30-60 cm), analysis of variance (ANOVA), and the geoaccumulation index (Igeo). The results showed that the soils were generally acidic ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4.21\text{-}5.48$), which may increase the mobility of certain heavy metals. Strong correlations between metal concentrations in the two soil layers ($R^2 > 0.90$) indicated similar patterns of variation with depth, although localized spatial differences were also observed. The ANOVA results ($p < 0.05$) revealed statistically significant differences among the industrial parks. Based on the Igeo values, Cd exhibited the most notable degree of accumulation, whereas the other metals mainly showed localized enrichment in specific areas. Overall, the distribution of heavy metals in soils within the industrial parks of Dong Nai city appears to be controlled by the combined effects of emission sources and soil-related factors. These findings provide a scientific basis for depth-specific soil monitoring and environmental risk management under conditions of ongoing industrialization.

Keywords: *Heavy metal pollution, soil pollution in industrial zones, Acrisol soil pollution, Ferralsols soil pollution, depth distribution.*

Ngày nhận bài: 27/3/2026

Ngày chuyển phản biện: 15/4/2026

Ngày thông qua phản biện: 23/6/2026

Ngày duyệt đăng: 10/7/2026