



SỬ DỤNG CHỈ SỐ TÍCH HỢP ĐÁNH GIÁ MỨC ĐỘ Ô NHIỄM NƯỚC BIỂN VEN BỜ DO KIM LOẠI NẶNG Ở QUẢNG NINH GIAI ĐOẠN 2021-2025

PHẠM THỊ THANH THỦY¹, TRẦN HỮU ANH², LÊ VĨNH HÀ³, NGUYỄN KHẮC BẰNG³, TRỊNH QUỐC KHÁNH³, TRẦN THỊ HÒA², PHẠM TÔ MINH TUẤN², IGOR MYASNIKOV⁴, SERGEY BELENEV⁵, EVGENIA STARKOVA⁵, NGUYỄN THỊ MAI HƯƠNG⁶, NGUYỄN LÊ BẢO VY⁶, NESCHEROV YUREVICH⁷

¹Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội (HUNRE), Việt Nam

²Trường Đại học Thái Bình (TBU), Việt Nam

³Viện nghiên cứu xã hội và phát triển công nghệ (IST), Việt Nam

⁴Đại học khí tượng thủy văn quốc gia Nga (RSHU), Liên bang Nga

⁵Đại học liên bang Viễn đông Nga (FEFU), Liên bang Nga

⁶Viện nghiên cứu Bảo vệ môi trường và sức khỏe cộng đồng (IEH), Việt Nam

⁷Đại học Quốc gia Samara (SGU), Liên bang Nga

Tóm tắt

Nghiên cứu được thực hiện trên cơ sở các kết quả khảo sát giai đoạn 2021-2025 về thực trạng ô nhiễm môi trường nước mặt ven bờ do các kim loại nặng ở những khu vực trọng điểm có hoạt động kinh tế ven biển sôi nổi của tỉnh Quảng Ninh. Nhờ tích cực áp dụng các giải pháp bảo vệ môi trường, đặc biệt ở các tổ chức sản xuất kinh doanh ven biển, nên các chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPI) và chỉ số đánh giá kim loại (HEI) có giảm theo từng năm. Tuy nhiên qua nghiên cứu phân tích và đối chiếu với các Quy chuẩn an toàn môi trường do Bộ Nông nghiệp và Môi trường Việt Nam ban hành thì thấy mức độ rủi ro môi trường sinh thái vẫn còn cao (hệ số ERI lớn hơn 1). Nguyên nhân chính là sự tồn tại của những kim loại nặng có độc tính cao thải ra từ các hoạt động kinh tế biển thiếu kiểm soát. Những kết quả nghiên cứu này là cơ sở khoa học để đề xuất các giải pháp mang tính hệ thống nhằm nâng cao hiệu quả quản lý hoạt động kinh tế gắn với bảo vệ môi trường sinh thái và bảo tồn di sản thiên nhiên-văn hóa-lịch sử tỉnh Quảng Ninh, trọng điểm kinh tế Đông Bắc bộ Việt Nam.

Từ khóa: Môi trường nước biển ven bờ, kim loại nặng, rủi ro sinh thái môi trường, kinh tế biển, di sản thiên nhiên-văn hóa-lịch sử.

Ngày nhận bài: 11/2/2026; **Ngày sửa chữa:** 17/2/2026; **Ngày duyệt đăng:** 29/3/2026.

Using an integrated index to assess the level of coastal seawater pollution by heavy metals in Quang Ninh province during the period 2021-2025

Abstract

This study assesses the current state of heavy metal pollution in coastal surface water in key economic zones of Quang Ninh province during the period 2021-2025. The results show that thanks to the active implementation of environmental protection measures, the Heavy Metal Pollution Index (HPI) and the Heavy Metal Evaluation Index (HEI) have shown a gradual decrease over time. However, a comparative analysis with QCVN 10-MT:2015/BTNMT indicates that the Ecological Risk Index (ERI) remains high ($ERI > 1$), warning of the risk of chronic toxicity due to highly toxic metals from uncontrolled marine economic activities. The study establishes an important scientific basis for proposing system management solutions, helping to harmonize socio-economic development and marine ecosystem conservation in the Northeast key economic zone.

Keywords: Heavy metals, Ecological Risk Assessment (ERI), Quang Ninh, Marine environmental management, Vietnam-Russia cooperation.

JEL Classifications: Q51, Q53, O44.



1. TỔNG QUAN

Quảng Ninh là một trong những vùng kinh tế trọng điểm phía Bắc, sở hữu hệ sinh thái biển đa dạng và có giá trị kinh tế, văn hóa đặc biệt, nổi bật là Di sản thiên nhiên thế giới vịnh Hạ Long và vịnh Bái Tử Long. Tuy nhiên, cùng với tốc độ công nghiệp hóa và đô thị hóa nhanh chóng, khu vực ven biển này đang phải đối mặt với những áp lực lớn về ô nhiễm môi trường, đặc biệt là sự tích tụ của các kim loại nặng độc hại. Quảng Ninh có hoạt động công nghiệp mật độ cao, nhiều ngành nghề như: nhiệt điện, khai thác khoáng sản, xi măng... tập trung ở khu vực Cửa Ông, Cẩm Phả... là nguồn kim loại nặng (KLN) chính theo nước thải ra môi trường.

KLN trong môi trường biển là nhóm chất ô nhiễm nguy hiểm do đặc tính độc hại, khó phân hủy sinh học và khả năng tích lũy sinh học qua chuỗi thức ăn, gây rủi ro trực tiếp đến hệ sinh thái và sức khỏe con người [3, 10]. Tại Quảng Ninh, nguồn phát thải KLN rất phức tạp, bao gồm: (i) Nước thải và bụi bặm từ hoạt động khai thác, vận chuyển than đá tại các khu vực Cẩm Phả, Hạ Long; (ii) Nước thải công nghiệp từ các khu kinh tế ven biển; (iii) Hoạt động giao thông đường thủy và dịch vụ cảng biển quy mô lớn; (iv) Nước mưa rửa trôi từ đất liền mang theo các chất ô nhiễm từ bãi thải mở đổ ra biển.

Hầu hết các công bố hiện nay đều gặp phải giới hạn chung là tính tức thời (snapshot studies), thiếu hụt cái nhìn dài hạn để đánh giá quy luật biến đổi và dự báo xu hướng tương lai. Nghiên cứu của Lê Hồng Thía và cộng sự (2022) tại sông Vàm Thuật đã thực hiện thu 7 mẫu trầm tích trong duy nhất tháng 3 năm 2022. Kết quả này chỉ cho thấy mức độ ô nhiễm tại thời điểm khảo sát mà không thể phản ánh được sự tích lũy hay tự làm sạch của dòng sông qua các năm [4]. Nghiên cứu tại huyện Ngân Sơn, Bắc Kạn của Trần Thanh Sơn và cộng sự (2020), việc lấy mẫu chỉ được thực hiện vào tháng 10 năm 2019. Điều này khiến các kết luận về rủi ro sức khỏe từ Asen chỉ mang tính cảnh báo tại thời điểm đó, chưa chỉ ra được tác động tích lũy dài hạn do hoạt động khai khoáng gây ra [5]. Nghiên cứu trầm tích ven biển Quảng Ninh của Đỗ Thị Hiền và cộng sự (2025) mặc dù công bố mới gần đây nhưng mẫu cũng chỉ được lấy vào tháng 01 năm 2025. Nghiên cứu thừa nhận rằng kết quả này là cơ sở để định hướng quản lý nhưng chưa thể mô tả quy luật biến động theo chu kỳ nhiều năm [3]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu có cố gắng đánh giá sự thay đổi theo mùa, nhưng vẫn chỉ gói gọn trong vòng một năm như nghiên cứu lưu vực sông Sài Gòn (Nguyễn Xuân Tòng và cộng sự, 2023) đã thực hiện lấy mẫu vào hai mùa mưa và khô của năm 2022. Việc so sánh này rất hữu ích để hiểu tác động của dòng chảy tràn vào

mùa mưa, nhưng nó không thể trả lời được câu hỏi: Liệu ô nhiễm năm 2022 là một biến động bất thường hay là một phần của xu hướng tăng dần từ năm 2021 đến 2025 [10]. Như vậy, do thiếu dữ liệu quan trắc dài hạn và liên tục, các nghiên cứu (như nghiên cứu sông Vàm Thuật hay sông Đáy) thường phải sử dụng giá trị nền địa chất trung bình của thế giới từ năm 1961 để đánh giá mức độ làm giàu trầm tích (Enrichment Factor - EF) và tích lũy địa chất (Geoaccumulation Index - Igeo). Một chuỗi dữ liệu 5 năm (2021-2025) tại Quảng Ninh sẽ cho phép xác định giá trị chính xác hơn, phản ánh đúng đặc thù tích lũy địa chất và trầm tích vùng nước ven bờ do các tác động của thiên nhiên và hoạt động kinh tế, văn hóa, xã hội của cư dân tại vùng ven biển. Hơn nữa, các nghiên cứu ngắn hạn chỉ có thể kết luận về hiện trạng chứ chưa đưa ra được các dự báo dài hạn. Ví dụ, nghiên cứu về chỉ số HPI tại Quảng Ninh (2025) chỉ ra 72% mẫu bị ô nhiễm kim loại nặng tại thời điểm tháng 5/2024. Tuy nhiên, nếu không có dữ liệu các năm trước đó (như dữ liệu 2021-2023), các nhà quản lý không thể biết tình trạng này đang được cải thiện hay trở nên xấu đi để đưa ra chính sách kịp thời. Trong các nghiên cứu gần đây tại Vườn quốc gia Bái Tử Long tỉnh Quảng Ninh năm 2025, các nhóm nghiên cứu thừa nhận vì chỉ mới tập trung vào việc lấy mẫu và phân tích chất lượng nước biển tại các địa điểm cụ thể, bỏ qua việc đánh giá toàn diện chất lượng nước theo không gian và thời gian [9]. Nghiên cứu HPI Quảng Ninh (Le Xuan Sinh et al., 2025) đã thừa nhận rằng thời gian thu mẫu giới hạn trong tháng 5/2024 không thể nắm bắt đầy đủ các biến động theo mùa và theo năm do hoạt động nuôi trồng thủy sản và điều kiện khí tượng gây ra [8].

Do đó, nghiên cứu này được tiến hành trên cơ sở dữ liệu dài hạn trong 5 năm (2021-2025) vì đây là một giai đoạn đặc biệt, đánh dấu sự chuyển đổi từ giai đoạn giãn cách xã hội do đại dịch COVID-19 sang giai đoạn phục hồi kinh tế, văn hóa mạnh mẽ, làm thay đổi đáng kể tải lượng chất thải đổ ra biển. Nghiên cứu được thực hiện nhằm các mục tiêu: (1) Phân tích diễn biến nồng độ các kim loại nặng (Cu, Zn, Pb, Cd, As, Hg) trong nước biển ven bờ Quảng Ninh giai đoạn 2021 - Quý 2/2025; (2) Sử dụng các chỉ số tích hợp như: Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPI) và Chỉ số đánh giá kim loại (HEI) để định lượng mức độ ô nhiễm; (3) Đánh giá rủi ro sinh thái tiềm ẩn tại khu vực. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc quản lý chất lượng nước và quy hoạch không gian biển bền vững phục vụ quản lý phát triển kinh tế, văn hóa, xã hội theo hướng bền vững tại tỉnh Quảng Ninh và các khu vực ven biển khác của Việt Nam.



2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu

Nghiên cứu được thực hiện tại vùng nước biển ven bờ tỉnh Quảng Ninh, bao gồm một hệ thống mạng lưới quan trắc rộng khắp với 99 vị trí lấy mẫu. Các điểm quan trắc bao phủ các khu vực trọng điểm về kinh tế và sinh thái như: Vịnh Hạ Long, vịnh Cửa Lục, khu vực cảng biển và nhiệt điện Cẩm Phả, vùng nuôi trồng thủy sản Vân Đồn, Tiên Yên, Đầm Hà và khu vực biên giới Móng Cái. Khác biệt hoàn toàn với các nghiên cứu trên, nghiên cứu này sử dụng bộ dữ liệu quan trắc dài hạn được thực hiện định kỳ hàng quý (04 đợt/năm) liên tục trong 05 năm từ 2021 đến 2025. Đây là chuỗi số liệu quan trọng để khắc phục khoảng trống nghiên cứu về quy luật biến đổi dài hạn mà các công bố trước đây chưa làm rõ được.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp thu thập và kế thừa dữ liệu quan trắc

Nghiên cứu tiến hành thu thập và kế thừa kết quả quan trắc từ Sở Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Quảng Ninh (thông qua các báo cáo hiện trạng môi trường và dữ liệu quan trắc môi trường nước biển giai đoạn từ năm 2021 đến hết Quý 2 năm 2025). Bộ dữ liệu kế thừa bao gồm: các thông số chất lượng nước biển ven bờ được thực hiện định kỳ hàng quý (04 đợt/năm) tại mạng lưới 99 trạm quan trắc (ký hiệu từ NB01 đến NB99). Các vị trí này bao phủ toàn bộ vùng biển ven bờ trọng điểm của tỉnh, từ khu vực cửa sông biên



Hình 1. Vị trí các điểm quan trắc môi trường trên vùng biển Quảng Ninh

giới KaLong (Móng Cái), vùng vịnh Hạ Long - Cửa Lục đến các huyện đảo Vân Đồn và Cô Tô. Việc sử dụng chuỗi dữ liệu kế thừa dài hạn 5 năm này là cơ sở khoa học quan trọng để nhận diện quy luật biến đổi và đánh giá rủi ro sinh thái tại khu vực nghiên cứu (Hình 1).

2.2.2. Các chỉ số đánh giá chất lượng môi trường và rủi ro

Để đánh giá toàn diện chất lượng nước và mức độ ô nhiễm, nghiên cứu áp dụng hệ thống các chỉ số sau:

+) Chỉ số HPI (Heavy Metal Pollution Index): Dùng để đánh giá ảnh hưởng tổng hợp của các kim loại nặng đối với chất lượng nước biển theo công thức 1 và giá trị HPI > 100 được coi là ngưỡng bắt đầu bị ô nhiễm [6].

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Trong đó:

W_i, Q_i là các đại lượng không đơn vị, do được chuẩn hóa từ các giá trị nồng độ và tiêu chuẩn môi trường.

$W_i = \frac{1}{S_i}$ là trọng số phản ánh mức độ quan trọng hoặc độc tính tương ứng của từng kim loại. S_i là giá trị được lấy từ QCVN 10-MT:2015/BTNMT [1].

Bảng 1. Giá trị giới hạn của các thông số chất lượng nước biển vùng biển ven bờ [1]

| Kim loại | Ký hiệu | Đơn vị | Giới hạn Si | | |
|-----------|---------|--------|---|----------------------------------|--------------|
| | | | Vùng nuôi trồng thủy sản, bảo tồn thủy sinh | Vùng bãi tắm, thể thao dưới nước | Các nơi khác |
| Asen | As | mg/L | 0.02 | 0.04 | 0.05 |
| Chì | Pb | mg/L | 0.05 | 0.05 | 0.1 |
| Cadimi | Cd | mg/L | 0.005 | 0.005 | 0.01 |
| Thủy ngân | Hg | mg/L | 0.001 | 0.002 | 0.005 |
| Crom (VI) | Cr | mg/L | 0.02 | 0.05 | 0.05 |
| Đồng | Cu | mg/L | 0.2 | 0.5 | 1.0 |
| Kẽm | Zn | mg/L | 0.5 | 1.0 | 2.0 |
| Mangan | Mn | mg/L | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

Q_i là chỉ số phụ của từng kim loại và được tính theo dạng chuẩn hóa sau:

$$Q_i \text{ được tính theo dạng chuẩn hóa sau:} \\ Q_i = \frac{(C_i - I_i)}{(S_i - I_i)} \times 100 \quad (2)$$

Trong đó:
 C_i : nồng độ đo được (mg/L hoặc $\mu\text{g/L}$);
 S_i : tiêu chuẩn cho phép (mg/L hoặc $\mu\text{g/L}$);
 I_i : giá trị lý tưởng (thường = 0).

$$HEI = \sum \frac{C_i}{S_i} \quad (3)$$

Trong đó:
 C_i : Nồng độ đo được của kim loại nặng thứ i trong mẫu. Đơn vị thường dùng: mg/L hoặc $\mu\text{g/L}$;

S_i : Giá trị giới hạn cho phép (tiêu chuẩn môi trường) của kim loại thứ i . Được quy định bởi các tổ chức như: WHO, QCVN, EPA.

+ Hệ số nguy hại (Hazard Quotient – HQ): Được tính toán dựa trên nồng độ kim loại và hệ số đáp ứng độc học của từng nguyên tố để dự báo nguy cơ đối với hệ sinh thái thủy sinh [7].

$$HQ = \frac{C_i}{PNEC} \quad (4)$$

"PNEC" (Predicted No Effect Concentration) là nồng độ dự đoán không gây tác động và được tính bằng công thức sau:

$$PNEC = \frac{\text{Toxicity Value}}{\text{Assessment Factor}} \quad (5)$$

Trong đó:
 Toxicity Value (TV): NOEC (No Observed Effect Concentration); LC50, EC50 (nồng độ gây chết/ảnh hưởng 50%).

Assessment Factor (AF): Hệ số an toàn (thường từ 10 ÷ 1000); Dùng để giảm sai số khi áp dụng từ phòng thí nghiệm ra môi trường thực.

Giá trị độc tính (TV) thể hiện mức độ nguy hại tương đối của mỗi kim loại nặng, có xét đến tác động tiềm tàng của chúng đối với sức khỏe con người và hệ sinh thái. Giá trị này thường được tích hợp vào hệ số trọng số của mô hình HPI, trong đó các nguyên tố độc hại hơn sẽ được gán trọng số cao hơn.

Hệ số tích lũy (AF) được sử dụng để đánh giá mức độ làm giàu kim loại trong các mẫu môi trường hoặc sinh học. Nó được định nghĩa là tỷ lệ giữa nồng độ kim loại trong môi trường mục tiêu và nồng độ tương ứng của nó trong môi trường tham chiếu. Giá trị AF lớn hơn 1 cho thấy sự tích lũy đáng kể và nguy cơ sinh thái tiềm tàng.

Bảng 2. So sánh giữa Hệ số nguy hại (HQ) và Chỉ số rủi ro sinh thái tổng hợp (ERI)

| Tiêu chí | HQ | ERI |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Mục tiêu | 1 chất riêng lẻ | Nhiều chất tổng hợp |
| Cơ sở | Ngưỡng an toàn (PNEC) | Nền tự nhiên + độc tính |
| Độ phức tạp | Đơn giản | Phức tạp hơn |
| Có xét độc tính riêng | Không | Có |
| Kết quả | Nguy cơ có/không | Mức độ rủi ro (thấp → rất cao) |

+ Chỉ số rủi ro sinh thái tổng hợp (Ecological Risk Index - ERI):

$$ERI = \sum E_r^i = \sum (T_r^i \times \frac{C_i}{C_n}) \quad (6)$$

Trong đó:

C_i : Nồng độ đo được;
 C_n : Nồng độ nền;
 T_r^i : Hệ số độc tính của từng kim loại.

2.2.3. Tiêu chuẩn so sánh và xử lý thống kê

Kết quả quan trắc được so sánh đối chiếu với QCVN 10-MT:2015/BTNMT (Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước biển) cho các mục đích: Nuôi trồng thủy sản, bảo tồn thủy sinh, vùng tắm biển và các mục đích khác [1].

Toàn bộ dữ liệu được xử lý thống kê bằng các phần mềm chuyên dụng như Microsoft Excel 2016, SPSS 20.0.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả

3.1.1. Diễn biến nồng độ các kim loại nặng

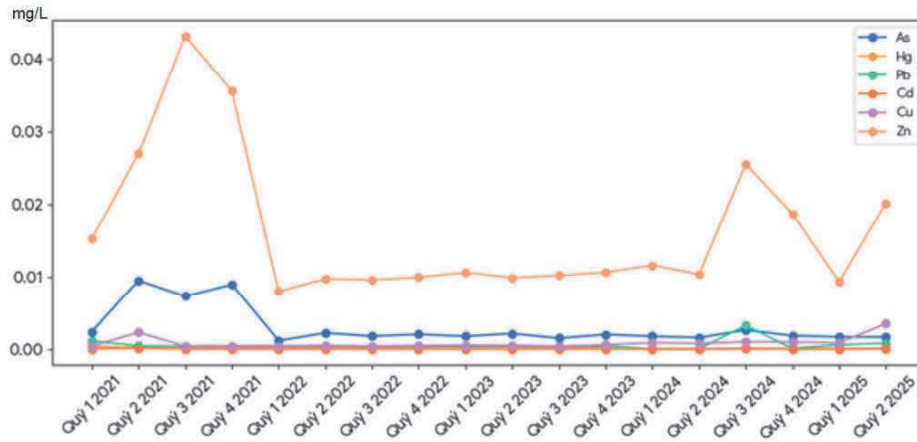
Kết quả quan trắc giai đoạn 2021 – 2025 cho thấy nồng độ các kim loại nặng (As, Hg, Pb, Cd, Cu, Zn) có xu hướng giảm rõ rệt và dần đi vào ổn định (Hình 1). Đặc biệt, năm 2021 ghi nhận nồng độ các kim loại (đáng chú ý là Zn và As) ở mức cao nhất trong chuỗi số liệu, phản ánh tác động mạnh mẽ của quá trình rửa trôi bề mặt từ các bãi thải mỏ than và hoạt động nạo vét luồng lạch. Từ năm 2022 đến Quý 2/2025, nồng độ các kim loại duy trì ở ngưỡng thấp, các chỉ số quan trắc đều nằm trong giới hạn cho phép của QCVN 10-MT:2015/BTNMT, cho thấy hiệu quả của các biện pháp kiểm soát nguồn thải tại khu vực (Hình 2).

3.1.2. Định lượng ô nhiễm bằng chỉ số tích hợp (HPI & HEI)

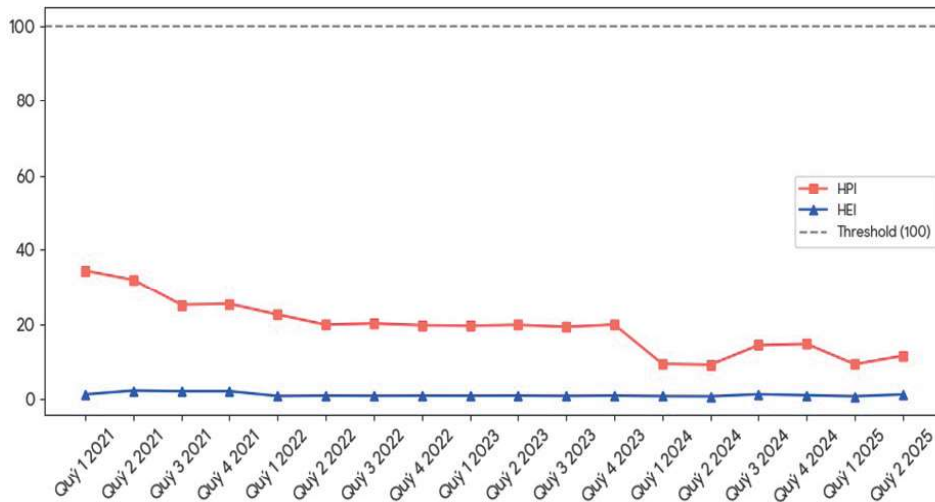
Chỉ số ô nhiễm kim loại nặng (HPI) trong suốt giai đoạn nghiên cứu dao động từ 10.5 đến 34.5, thấp hơn nhiều so với ngưỡng tới hạn 100 (Hình 2). Chỉ số đánh giá kim loại (HEI) cũng có xu hướng giảm tương ứng, minh chứng cho việc môi trường nước biển ven bờ Quảng Ninh hiện chưa có dấu hiệu ô nhiễm kim loại nặng tổng hợp. Sự đồng nhất giữa hai chỉ số này khẳng định tải lượng kim loại nặng đổ vào vịnh đang được kiểm soát tốt, không gây áp lực tích tụ nghiêm trọng lên cột nước (Hình 3).

3.1.3. Đánh giá rủi ro sinh thái tổng hợp (ERI)

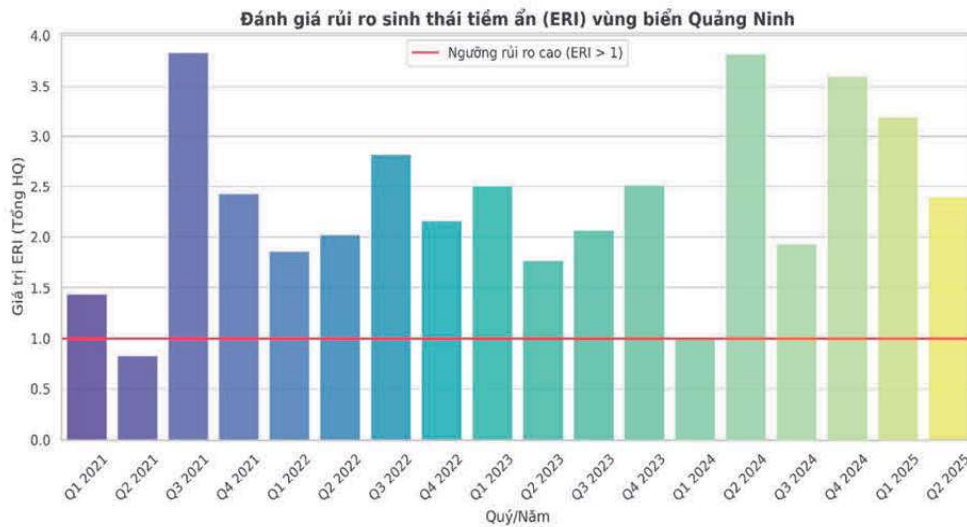
Mặc dù nồng độ các kim loại nặng đạt quy chuẩn cho phép, chỉ số rủi ro sinh thái (ERI)



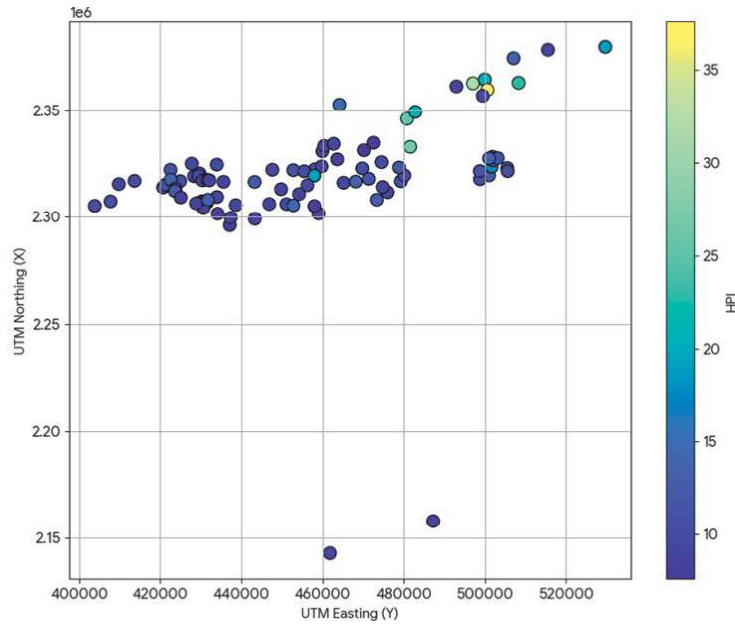
Hình 2. Biểu đồ biểu thị nồng độ các kim loại nặng trong nước biển tại Quảng Ninh



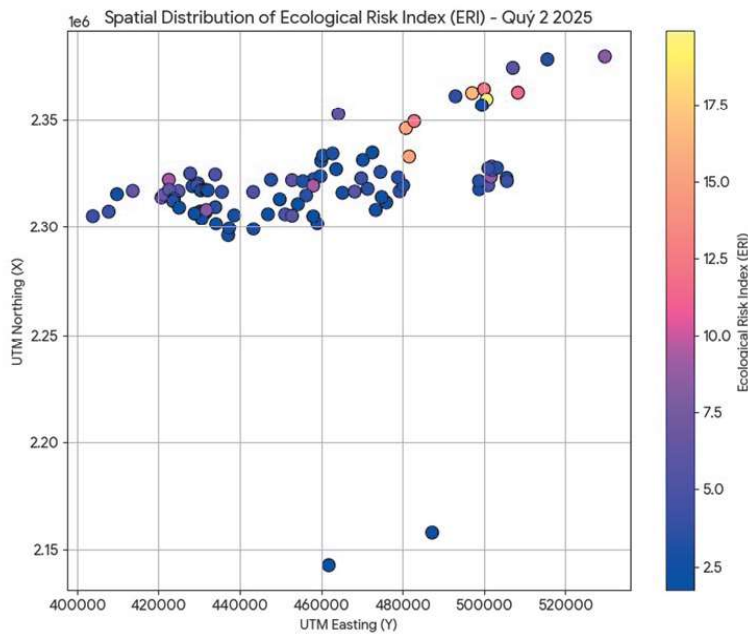
Hình 3. Biểu đồ biểu thị các chỉ số ô nhiễm kim loại nặng tổng hợp (HPI) và đánh giá tích tụ (HEI) tại ven biển tỉnh Quảng Ninh



Hình 4. Biểu đồ biểu thị kết quả đánh giá rủi ro sinh thái tại vùng biển Quảng Ninh



Hình 5. Phân bố không gian chỉ số HPI - Quý 2 năm 2025 tại Quảng Ninh



Hình 6. Phân bố không gian chỉ số ERI - Quý 2 năm 2025 tại Quảng Ninh

vẫn duy trì ở mức > 1 tại hầu hết các kỳ quan trắc (Hình 3). Sau khi đạt mức cao nhất vào năm 2021 (với giá trị ERI trung bình xấp xỉ 4.0), chỉ số này có xu hướng giảm nhẹ vào giai đoạn 2024 đến Quý 2/2025. Điều này chỉ ra rằng, do độc tính tích lũy cao của các kim loại như Hg và Cd, hệ sinh thái biển vẫn tiềm ẩn các rủi ro mạn tính. Kết quả này nhấn mạnh rằng việc đánh giá chất lượng nước chỉ dựa trên nồng độ đơn lẻ là chưa đủ, cần phải xem xét đến các chỉ số rủi ro độc học tích hợp.

3.1.4. Đánh giá rủi ro sinh thái tiềm ẩn (ERI)

Bản đồ phân bố không gian (Hình 4 và Hình 5) cho thấy sự phân hóa rõ rệt về mức độ rủi ro giữa các khu vực. Các điểm nóng về HPI

và ERI tập trung chủ yếu tại các trạm gần cửa vịnh Cửa Lục, ven biển Cẩm Phả và khu vực cảng Cái Lân. Đây là những khu vực chịu tác động trực tiếp từ nước thải mỏ than, hoạt động giao thông hàng hải sầm uất và sự rửa trôi từ lục địa. Ngược lại, các khu vực xa bờ có chỉ số thấp hơn do tác động của quá trình pha loãng và trao đổi nước với ngoài khơi (Hình 5, 6).

3.2. Thảo luận

So với các hệ thống thủy vực nội địa, nồng độ KLN tại Quảng Ninh thấp hơn đáng kể so với hạ lưu sông Vàm Thuật và sông Sài Gòn, nơi ghi nhận sự ô nhiễm nặng nề bởi Zn, Cd và Pb do tiếp nhận trực tiếp nước thải đô thị và công nghiệp chưa xử lý [4, 10]. Ngược lại, chỉ số HPI (10.5 - 34.5) tại vùng nuôi trồng thủy sản Quảng Ninh tương đồng với mức độ ô nhiễm trung bình tại khu vực ngoài khơi Xuwen, Trung Quốc (HPI dao động 7.24 - 65.79) và cao hơn các thủy vực ít chịu tác động con người như hồ Nasser, Ai Cập [8]. Sự cải thiện chất lượng nước năm 2020 tại vịnh Hạ Long là minh chứng thực nghiệm cho thấy việc giảm thiểu các hoạt động kinh tế (do đại dịch COVID-19) có tác động tức thời đến việc giảm tải lượng ô nhiễm.

Trong suốt giai đoạn từ năm 2021 đến 2025, nồng độ Cd tại hầu hết các điểm quan trắc đều duy trì ở mức rất thấp, thường ghi nhận là < 0,0002 mg/L (dưới giới hạn phát hiện của thiết bị). Trong các năm 2021-2023, nồng độ Pb thường được ghi nhận ở mức < 0,0009 mg/L hoặc dao động quanh mức 0,001 mg/L tại một số vị trí như luồng vào cảng Cái Lân. Đến năm 2024 và 2025, kết quả đo thường hiển thị ở mức < 0,0002 mg/L. Như vậy, một điểm đáng lưu ý là dù nồng độ các kim loại nằm trong ngưỡng cho phép của QCVN 10-MT:2015/BTNMT, nhưng chỉ số ERI vẫn thường xuyên > 1. Điều này chứng tỏ độc tính tích lũy của Hg ($T_{r^i}=40$) và Cd ($T_{r^i}=30$) vẫn là mối đe dọa tiềm tàng đối với hệ sinh thái thủy



sinh. Điều này đặt ra yêu cầu phải quản lý dựa trên tải lượng và rủi ro thay vì chỉ dựa trên nồng độ tức thời.

Giải thích cho sự mâu thuẫn giữa nồng độ các kim loại đơn lẻ và rủi ro sinh thái nêu trên là do quá trình keo tụ tại cửa sông. Khi nước sông tiếp xúc với độ mặn của nước biển (ngay cả ở mức thấp 0.9‰), quá trình keo tụ tự nhiên xảy ra mạnh mẽ. Các ion KLN (đặc biệt là Pb, Zn, Ni) kết tủa và lắng đọng xuống đáy cửa sông, biến khu vực này thành “bẫy trầm tích” tích lũy ô nhiễm. Điều này lý giải tại sao các điểm nóng rủi ro sinh thái tại Quảng Ninh luôn tập trung tại cửa vịnh Cửa Lục và ven biển gần bờ. Sau khi vượt qua cửa sông, phần KLN hòa tan còn lại được phân tán nhờ dòng triều và hải lưu ven bờ. Cơ chế pha loãng tự nhiên và trao đổi nước với ngoài khơi giúp nồng độ KLN giảm dần khi đi xa bờ, tạo ra sự phân hóa không gian rõ rệt giữa vùng nhạy cảm ven bờ và các trạm quan trắc xa bờ.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các kết quả nghiên cứu khảo sát thực địa của cơ quan quản lý môi trường biển tỉnh Quảng Ninh và các nhóm nghiên cứu thuộc một số Viện nghiên cứu và trường Đại học Việt Nam, với sự tham gia tư vấn của các nhà khoa học Liên bang Nga có hợp tác với Việt Nam về nghiên cứu môi trường biển [2]. Nghiên cứu khẳng định chất lượng nước biển ven bờ tỉnh Quảng Ninh giai đoạn 2021–2025 có sự cải thiện rõ rệt, với nồng độ các kim loại nặng (As, Hg, Pb, Cd, Cu, Zn) hầu hết nằm trong ngưỡng cho phép của QCVN 10-MT:2015/BTNMT. Mặc dù các chỉ số HPI và HEI cho thấy chưa có dấu hiệu ô nhiễm tổng hợp nghiêm trọng, song chỉ số rủi ro sinh thái ERI thường xuyên vượt ngưỡng ($ERI > 1$) tại các điểm nóng như vịnh Hạ Long, Cẩm Phả và cảng Cái Lân do đặc tính tích lũy của Hg và Cd. Kết quả này là cơ sở dữ liệu quan trọng phục vụ quản trị rủi ro và quy hoạch bền vững tại địa phương. Trong thời gian tới, nghiên cứu cần mở rộng đánh giá khả năng tích lũy sinh học trong mô sinh vật biển và trầm tích lõi để làm rõ lịch sử bồi lắng ô nhiễm. Đồng thời, việc ứng dụng mô hình thủy động lực học kết hợp với trí tuệ nhân tạo (AI) và chuyển đổi số trong khuôn khổ hợp tác quốc tế Việt – Nga sẽ là hướng đi then chốt nhằm dự báo chính xác các kịch bản ô nhiễm, hướng tới mục tiêu tối ưu hóa quản lý tài nguyên và bảo tồn hệ sinh thái biển bền vững.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã hỗ trợ kinh phí để thực hiện nhiệm vụ khoa học công nghệ cấp Quốc gia theo Nghị định thư Mã số: NĐT/RU/25-10. Nhóm Để tài cảm ơn các trường Đại học Việt Nam và Liên bang Nga, các Viện nghiên cứu khoa học thuộc Liên hiệp các Hội khoa học và kỹ thuật Việt Nam (VUSTA) đã hỗ trợ kinh phí và cử cán bộ tham gia phối hợp nghiên cứu. ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường (2015), QCVN 10-MT:2015/BTNMT: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước biển. Thư viện Quốc gia.
2. Phạm Hoàng Hải, Nguyễn Khắc Bằng, Nguyễn Thị Huệ và nnk. (2023), Hợp tác Việt- Nga để xuất các giải pháp kỹ thuật kinh tế nâng cao năng lực giám sát, quan trắc môi trường biển nhằm bảo vệ sức khỏe cộng đồng dân cư và phát triển kinh tế biển. *Thí điểm tại tỉnh Quảng Ninh. Nhiệm vụ KHCN theo Nghị định thư hợp tác Việt-Nga.*
3. Đỗ Thị Hiền, Lê Thu Trang, Trịnh Thị Thủy (2025), Đánh giá hàm lượng một số kim loại nặng trong trầm tích mặt tại khu vực ven biển tỉnh Quảng Ninh. *Tạp chí khoa học Tài nguyên và Môi trường.* 57: p. 25-32.
4. Lê Hồng Thía, Nguyễn Văn Phương (2022), Đánh giá ô nhiễm kim loại nặng trong trầm tích hạ lưu sông Vàm Thuật. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ.* 59: p. 134-144.
5. Trần Thanh Sơn, Đinh Việt Chiến, Nguyễn Thị Ánh Hường và cộng sự. (2020), Hàm lượng kim loại nặng và Asen trong mẫu nước, đất nông nghiệp và gạo tại huyện Ngân Sơn, tỉnh Bắc Kạn, Việt Nam. *Vietnamese Journal of Food Control.* 3(4): p. 270-282.
6. Khadija, D., A. Hicham, A. Rida, et al. (2021), Surface water quality assessment in the semi-arid area by a combination of heavy metal pollution indices and statistical approaches for sustainable management. *Environmental Challenges.* 5.
7. Le Thi Trinh, Kieu Thi Thu Trang, Nguyen Thanh Trung, et al. (2018), Heavy Metal Accumulation and Potential Ecological Risk Assessment of Surface Sediments from Day River Downstream. *Journal of Science: Earth and Environmental Sciences.* 34(4): p. 140-147.
8. Le Xuan Sinh, Le Van Nam, Nguyen Van Bach, et al. (2025), The Heavy Metal Pollution Index in Seawater of the Coastal Aquaculture Zone in Quang Ninh, Vietnam. *Research in Ecology.* 7(2): p. 224-238.
9. Nguyen Thi Kim Oanh, Tran Thi Nhan, Nguyen Thi Chinh, et al. (2025), Assessment of Coastal Water Quality in Bai Tu Long National Park, Quang Ninh Province *Journal of Tropical Science and Engineering.* 39: p. 73-87.
10. Nguyen Xuan Tong, Pham Thi Bich Van, and Le Hung Anh (2023), Assessing the Current Status and Proposing Solutions for Heavy Metal Management in the Saigon River Basin Sediments. *Journal of Science: Earth and Environmental Sciences.* 39(2): p. 95-111.