

XU THẾ LẮNG ĐỘNG KHÔ CÁC ION SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ TẠI CÁC TRẠM ĐẠI DIỆN Ở VIỆT NAM: BIẾN ĐỘNG THEO MÙA VÀ VÙNG MIỀN (2020-2024)

Tạ Thu Hằng, Doãn Hà Phong, Nguyễn Thị Kim Anh, Nguyễn Thị Hằng Nga
Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển

Ngày nhận bài: 30/12/2025; ngày chuyển phản biện: 31/12/2025; ngày chấp nhận đăng: 20/01/2026

Tóm tắt: Nghiên cứu này đánh giá phân bố mùa vụ của lắng đọng khô các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ tại năm trạm đại diện cho các vùng khí hậu và loại hình sử dụng đất khác nhau ở Việt Nam: Hà Nội, Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ), Yên Bái cũ (nay là Tỉnh Lào Cai), TP.HCM và Cần Thơ trong giai đoạn 2020-2024. Mẫu thu thập hàng tuần được phân tích bằng sắc ký ion và các phương pháp hóa phân tích tiêu chuẩn. Kết quả cho thấy SO_4^{2-} và NO_3^- giảm mạnh (20-30%) tại các đô thị lớn, trong khi các trạm miền núi xuất hiện biến động theo mùa rõ rệt, đặc biệt tăng trong mùa khô. Trạm Cần Thơ ghi nhận mức lắng đọng thấp nhất, phản ánh giảm axit hóa môi trường.

Các trạm miền Bắc có nồng độ mùa khô cao hơn đáng kể ($\text{SO}_4^{2-} +122\%$, $\text{NO}_3^- +140\%$, $\text{NH}_4^+ +168\%$), trong khi miền Nam biến động mùa thấp hơn ($\text{SO}_4^{2-} +97\%$, $\text{NO}_3^- +105\%$, $\text{NH}_4^+ +77\%$). Trung bình toàn quốc cho thấy mùa khô nồng độ ion cao hơn mùa mưa ($\text{SO}_4^{2-} +101\%$, $\text{NO}_3^- +129\%$, $\text{NH}_4^+ +121\%$), với NO_3^- có mức chênh lệch mùa cao nhất.

Dự báo giai đoạn 2025-2029 cho thấy xu thế phân hóa theo vùng tiếp tục duy trì: tại miền Bắc, SO_4^{2-} và NO_3^- dự kiến giảm khoảng 12-49% tại Hà Nội và Yên Bái cũ (nay là Tỉnh Lào Cai), trong khi Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ) tiệm cận mức nền và NH_4^+ giảm mạnh ở Hà Nội nhưng ổn định hoặc tăng nhẹ tại các trạm miền núi. Ngược lại, miền Nam ghi nhận SO_4^{2-} tăng khoảng 18-22% tại TP.HCM và Cần Thơ, NO_3^- ổn định hoặc tăng nhẹ, còn NH_4^+ có xu hướng giảm, cho thấy nguy cơ axit hóa đô thị phía Nam vẫn đáng lưu ý trong trung hạn.

Kết quả cung cấp bằng chứng định lượng hỗ trợ kiểm soát phát thải, quản lý rủi ro và giảm thiểu axit hóa đất - nước, đồng thời xác định các khu vực và mùa ưu tiên giám sát và can thiệp, phục vụ chiến lược quản lý chất lượng không khí toàn quốc.

Từ khóa: Lắng đọng khô, SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , biến động theo mùa, Việt Nam.

1. Mở đầu

Lắng đọng axit là một dạng ô nhiễm môi trường nghiêm trọng, phát sinh từ khí thải của các hoạt động công nghiệp, giao thông và nông nghiệp. Quá trình này gồm hai hình thức chính: lắng đọng ướt (qua nước mưa) và lắng đọng khô (lắng trực tiếp từ khí và aerosol), trong đó lắng đọng khô đóng vai trò quan trọng trong việc vận chuyển các chất ô nhiễm từ khí quyển xuống bề mặt đất và nước [1], gây ảnh hưởng đến chất lượng đất, nước, hệ sinh thái và sức

khỏe con người, đặc biệt tại các khu vực đô thị - công nghiệp.

Các khí tiền chất SO_2 , NO_x và NH_3 bị oxy hóa trong khí quyển tạo thành H_2SO_4 và HNO_3 , sau đó hình thành các ion thứ cấp SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong aerosol và nước mưa [2]. Tại Việt Nam, mạng lưới EANET đã triển khai quan trắc đồng thời wet deposition và dry deposition tại nhiều trạm (Hà Nội, Hòa Bình cũ - nay là tỉnh Phú Thọ, và các khu vực miền Trung, miền Nam) [3]. Tuy nhiên, các nghiên cứu công bố chủ yếu tập trung vào lắng đọng ướt, sử dụng pH và các ion hòa tan để đánh giá mưa axit, điển hình là các nghiên cứu giai đoạn 2000-2014 [4] và tổng hợp dữ liệu 2005-

Tác giả liên hệ: Tạ Thu Hằng

Email: tathuhang311@gmail.com

2018 phân tích vai trò trung hòa của Ca^{2+} và NH_4^+ [5].

Mặc dù một số nghiên cứu gần đây đã ước tính dry deposition riêng lẻ cho NH_3 [6], SO_2 [7] hoặc thông qua mô hình hóa (WRF-CMAQ) cho một số năm cụ thể [8], dữ liệu thực nghiệm dài hạn (≥ 5 năm) về lắng đọng khô, đặc biệt là phân tích đồng thời SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ theo mùa, theo vùng và theo không gian-thời gian, vẫn còn rất hạn chế. Nghiên cứu tổng hợp mới nhất sử dụng dữ liệu EANET (2000-2020) cho thấy SO_4^{2-} là tác nhân chính gây acid hóa nước mưa, với NH_4^+ đóng vai trò trung hòa, đồng thời ghi nhận xu hướng gia tăng mưa axit tại cả khu vực đô thị và nông thôn [9]; tuy nhiên, phân tích vẫn chủ yếu dừng ở lắng đọng ướt.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm thay đổi chế độ mưa và kéo dài mùa khô, việc đánh giá toàn diện nguy cơ axit hóa đòi hỏi phải xem xét đầy đủ lắng đọng khô và các ion thứ cấp trong aerosol. Do đó, nghiên cứu này nhằm: (1) Định lượng xu hướng SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong lắng đọng khô giai đoạn 2020-2024; (2) So sánh biến động theo mùa và theo vùng khí hậu; (3) Xác định các yếu tố chi phối chính (nguồn phát thải, khí tượng, biến đổi khí hậu); (4) Dự báo nồng độ các ion này giai đoạn 2025-2029; và (5) Cung cấp cơ sở khoa học phục vụ quản lý chất lượng không khí và giảm thiểu tác động của lắng đọng axit tại Việt Nam.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu và trạm quan trắc

Nghiên cứu được tiến hành tại năm (05) trạm quan trắc đại diện cho các vùng khí hậu và loại hình sử dụng đất khác nhau ở Việt Nam:

Bắc Bộ: Hà Nội (khu đô thị), Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ) (vùng miền núi), Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai) (khu nông - lâm nghiệp).

Nam Bộ: TP.HCM (khu đô thị công nghiệp), Cần Thơ (vùng nông nghiệp đồng bằng).

Việc lựa chọn các trạm nhằm phản ánh sự khác biệt về nguồn phát thải (công nghiệp, giao thông, nông nghiệp), đặc điểm sử dụng đất và điều kiện khí hậu giữa các vùng. Qua đó, nghiên cứu đánh giá được biến động không gian - thời gian của lắng đọng khô các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trên phạm vi đại diện cho Việt Nam.

2.2. Thu mẫu và xử lý mẫu

Mẫu không khí được thu định kỳ 1 lần/tuần trong giai đoạn 2020-2024. Việc lấy mẫu và phân tích được thực hiện theo Quy trình giám sát chất lượng không khí của EANET (Technical Manual for Air Concentration Monitoring).

Không khí được hút qua bộ lọc (filter pack hoặc PM sampler) với lưu lượng không đổi, trong khoảng thời gian xác định (24 giờ hoặc 1 tuần tùy loại mẫu), nhằm thu thập các hạt bụi/aerosol mang ion vô cơ.

Sau khi thu mẫu, bộ lọc được bảo quản và chiết bằng dung dịch siêu sạch với thể tích chiết xác định trước. Nồng độ các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong dung dịch chiết được phân tích bằng sắc ký ion (Ion Chromatography - IC). Kết quả phân tích được biểu diễn dưới dạng $\mu\text{g/L}$.

Để đảm bảo chất lượng số liệu, các bước kiểm soát chất lượng (QA/QC) được áp dụng, bao gồm: mẫu trắng, hiệu chuẩn thiết bị, kiểm tra độ lặp và giới hạn phát hiện của phương pháp phân tích.

2.3. Xử lý và phân tích số liệu

- Tính toán nồng độ ion trong không khí
- + Khối lượng ion thu được trên bộ lọc được xác định theo công thức:

$$Mass_{ion} (\mu\text{g}) = C_{extract} (\mu\text{g/L}) \times V_{extract} (L)$$

Trong đó: $Mass_{ion} (\mu\text{g})$ là tổng khối lượng ion SO_4^{2-} , NO_3^- hoặc NH_4^+ được thu trên bộ lọc sau thời gian lấy mẫu; $C_{extract} (\mu\text{g/L})$ là nồng độ ion đo được trong dung dịch chiết bộ lọc bằng sắc ký ion (IC). Đây là nồng độ trong dung dịch, không phải nồng độ ngoài không khí; $V_{extract} (L)$ là thể tích dung dịch dùng để chiết bộ lọc (ví dụ: 20 mL = 0,02 L).

- + Tính thể tích không khí lấy mẫu

$$V_{air} (m^3) = Q \times t$$

Trong đó: $V_{air} (m^3)$ là thể tích không khí đã lấy mẫu; Q là lưu lượng bơm ($m^3/\text{phút}$ hoặc $m^3/\text{giờ}$); t là thời gian lấy mẫu tương ứng với đơn vị lưu lượng (phút hoặc giờ).

- + Tính nồng độ ion trong không khí

$$C_{air}(\mu g/m^3) = \frac{Mass_{ion}(\mu g)}{V_{air}(m^3)}$$

Trong đó: $C_{air}(\mu g/m^3)$ là nồng độ ion ngoài không khí; $Mass_{ion}(\mu g)$ là khối lượng ion thu được trên bộ lọc; $V_{air}(m^3)$ là tổng thể tích không khí được hút qua sampler.

• Phân tích xu thế và biến động theo mùa:

- Tính giá trị trung bình năm và trung bình theo mùa của từng ion tại từng trạm.

- Phân chia mùa:

+ Miền Bắc: mùa mưa (tháng 5-10), mùa khô (tháng 11-4).

+ Miền Nam: mùa mưa (tháng 5-11), mùa khô (tháng 12-4).

- Tính chênh lệch mùa khô - mùa mưa (%) nhằm đánh giá mức độ khác biệt theo mùa.

- Tính trung bình theo vùng (Bắc - Nam) và 05 trạm trên toàn quốc để phân tích xu thế không gian - thời gian.

• Phân tích thống kê và độ tin cậy:

Kiểm định xu thế: Áp dụng kiểm định Mann-Kendall, phù hợp với chuỗi số liệu môi trường không tuân theo phân bố chuẩn, để xác định xu thế tăng/giảm có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$).

Phân tích chuỗi thời gian: Sử dụng time series decomposition (phân rã chuỗi thời gian) và seasonal decomposition (phân rã theo mùa) nhằm tách thành phần xu thế dài hạn, mùa vụ và nhiễu.

Hiển thị kết quả:

Biểu đồ chuỗi thời gian (time series) thể hiện xu thế theo năm.

Biểu đồ mùa (seasonal plot) minh họa biến động theo mùa mưa - khô tại từng trạm.

Việc lựa chọn năm 2020 làm năm cơ sở nhằm phục vụ phân tích xu thế dài hạn của chuỗi số liệu 2020-2024. Mặc dù năm 2020 mang tính dị thường do tác động của đại dịch COVID-19 làm suy giảm mạnh các hoạt động giao thông, công nghiệp và sinh hoạt, đặc biệt tại các đô thị lớn, cách tiếp cận này cho phép làm rõ chiều hướng và biên độ biến đổi theo thời gian; đồng thời, các phân tích trung bình nhiều năm và theo mùa được bổ sung để giảm thiểu ảnh hưởng của năm dị thường và bảo đảm tính đại diện của kết quả.

2.4. Phương pháp dự báo xu thế

Dự báo nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ cho giai đoạn 2025-2029 được thực hiện bằng mô hình hồi quy tuyến tính theo thời gian (Linear Trend Model). Với chuỗi dữ liệu 5 năm (2020-2024), mô hình được xây dựng cho từng trạm và từng ion theo dạng:

$$Y(t)=a+b \cdot t$$

Trong đó: a là hệ số chặn (intercept); b là độ dốc xu thế (trend slope); $b < 0 \rightarrow$ xu thế giảm; $b > 0 \rightarrow$ xu thế tăng.

Các tham số được ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu (OLS). Độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua hệ số xác định (R^2) và kiểm định ý nghĩa của hệ số b (p-value).

Giới hạn của phương pháp: Mô hình hồi quy tuyến tính giả định xu thế biến đổi ổn định theo thời gian và chưa xét đến các yếu tố tác động đột biến như thay đổi chính sách kiểm soát phát thải, biến động kinh tế - xã hội hay điều kiện khí tượng bất thường. Do đó, kết quả dự báo mang tính định hướng xu thế hơn là giá trị tuyệt đối chính xác, đặc biệt đối với chuỗi dữ liệu ngắn (5 năm).

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Xu thế SO_4^{2-} trong lắng đọng khô (2020-2024)

Trong lắng đọng khô, SO_4^{2-} đóng vai trò thiết yếu trong việc điều chỉnh axit hóa đất và nước, đồng thời là chỉ số quan trọng phản ánh chất lượng không khí và rủi ro sức khỏe. Bảng 1 trình bày xu thế nồng độ SO_4^{2-} tại các trạm quan trắc ở Việt Nam giai đoạn 2020-2024, kèm theo mức thay đổi (%) so với năm cơ sở nhằm phục vụ phân tích không gian-thời gian.

Kết quả Bảng 1 và Hình 1 cho thấy nồng độ SO_4^{2-} lắng đọng khô giai đoạn 2020-2024 có sự phân hóa rõ rệt theo vùng: giảm ở miền Bắc và tăng nhẹ ở miền Nam.

Tại miền Bắc (Hà Nội, Hòa Bình cũ - nay là tỉnh Phú Thọ; Yên Bái cũ - nay là tỉnh Lào Cai), nồng độ SO_4^{2-} giảm đáng kể: Hà Nội -30,55%, Hòa Bình cũ -38,46%, Yên Bái cũ -32,40%. Xu thế này phản ánh hiệu quả kiểm soát phát thải SO_2 từ công nghiệp và giao thông, đồng thời phù hợp với đặc điểm khí tượng-địa hình miền núi

(khuếch tán khí mạnh, tốc độ gió cao, nghịch nhiệt kém bền vững) và mùa đông khô lạnh làm hạn chế quá trình oxy hóa SO_2 .

Ngược lại, tại miền Nam, nồng độ SO_4^{2-} tăng nhẹ tại TP. Hồ Chí Minh (+17,24%) và Cần Thơ (+23,99%), cho thấy ảnh hưởng của phát thải đô thị-công nghiệp, nguồn ngoại lai (vận chuyển xa trong mùa gió chướng) và đốt sinh khối nông nghiệp. Trong điều kiện nóng ẩm và mưa nhiều, SO_4^{2-} dễ hình thành thông qua các con đường oxy hóa ẩm, phù hợp với vai trò

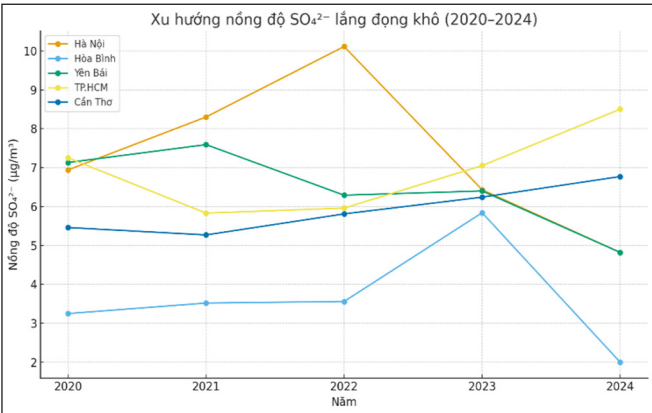
của sulfate aerosol là thành phần chính của aerosol khí quyển, được tạo thứ cấp từ SO_2 và từ các nguồn tự nhiên như DMS phát thải từ đại dương [10].

Nhìn chung, xu thế SO_4^{2-} lắng đọng khô tại Việt Nam giai đoạn 2020-2024 phản ánh tác động kết hợp của kiểm soát phát thải, đặc điểm địa hình, điều kiện khí tượng - gió mùa, và biến đổi khí hậu, nhấn mạnh sự cần thiết của giám sát dài hạn và quản lý theo vùng nhằm giảm nguy cơ axit hóa đất và nước.

Bảng 1. Nồng độ SO_4^{2-} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lắng đọng khô hàng năm tại năm trạm Việt Nam, giai đoạn 2020-2024

Trạm	2020	2021	2022	2023	2024	Thay đổi (%)
Hà Nội	6,94	8,30	10,11	6,43	4,82	-30,55%
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	3,25	3,52	3,56	5,84	2,00	-38,46%
Yên Bái cũ (nay là Tỉnh Lào Cai)	7,13	7,59	6,29	6,40	4,82	-32,40%
TP.HCM	7,25	5,83	5,96	7,05	8,50	+17,24%
Cần Thơ	5,46	5,27	5,81	6,24	6,77	+23,99%

Ghi chú: Mức thay đổi (%) được tính so với năm đầu chuỗi (2020) nhằm phản ánh xu thế biến đổi tích lũy; các phân tích trung bình nhiều năm và theo mùa được sử dụng để giảm ảnh hưởng của năm dị thường (do tác động của đại dịch COVID-19).



Hình 1. Nồng độ SO_4^{2-} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lắng đọng khô hàng năm tại năm trạm ở Việt Nam, giai đoạn 2020-2024

3.2. Xu thế NO_3^- trong lắng đọng khô (2020-2024)

Bảng 2 trình bày xu thế nồng độ ion NO_3^- trong lắng đọng khô tại năm trạm đại diện ở Việt Nam trong giai đoạn 2020-2024. Dữ liệu cho thấy sự biến động theo không gian và thời gian của NO_3^- , phản ánh ảnh hưởng của các nguồn phát thải địa phương và điều kiện khí tượng theo mùa.

Phân tích Bảng 2 và Hình 2 cho thấy xu thế NO_3^- trong lắng đọng khô giai đoạn 2020-2024 có

sự khác biệt rõ rệt giữa miền Bắc và miền Nam.

Tại miền Bắc (Hà Nội, Hòa Bình cũ - nay là tỉnh Phú Thọ; Yên Bái cũ - nay là tỉnh Lào Cai), nồng độ NO_3^- nhìn chung có xu hướng giảm, kèm biến động theo mùa rõ rệt. Hà Nội giảm -10% so với năm 2020, phản ánh tác động kết hợp của giao thông đô thị và hoạt động công nghiệp. Hòa Bình cũ giảm mạnh -75%, với các đỉnh nồng độ theo mùa xuất hiện vào năm 2020 và 2023, cho thấy ảnh hưởng của kiểm soát phát thải địa

phương và/hoặc điều kiện khí tượng thuận lợi cho rửa trôi và khuếch tán NO_3^- . Yên Bái cũ gần như ổn định, giảm nhẹ -2,7%, phản ánh sự pha trộn giữa nguồn phát thải nông-lâm nghiệp và yếu tố khí tượng địa phương. Tổng thể, các trạm miền Bắc thể hiện mức biến động NO_3^- cao hơn, đặc biệt tại khu vực đô thị và miền núi.

Ngược lại, tại miền Nam, nồng độ NO_3^- ổn định hơn. TP. Hồ Chí Minh tăng nhẹ +0,9%, cho thấy nguồn phát thải NO_x tương đối ổn định và ảnh hưởng khí tượng theo mùa không rõ rệt. Cần Thơ tăng +9,9%, phản ánh vai trò của các hoạt động nông nghiệp (sử dụng phân bón, sinh hoạt) kết hợp với điều kiện khí tượng mùa khô-

mưa. So với miền Bắc, miền Nam có biên độ biến động theo mùa nhỏ hơn.

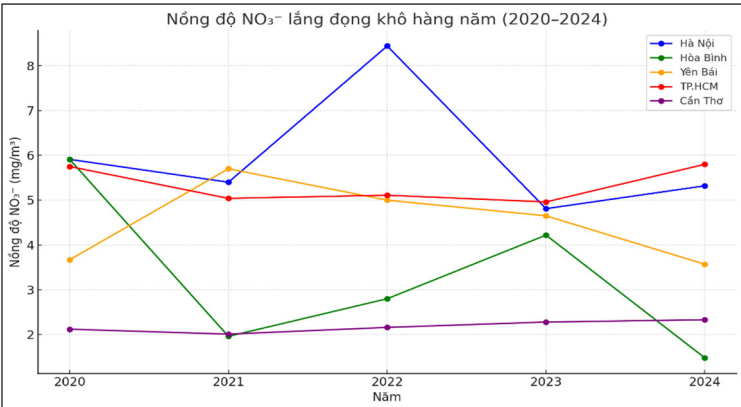
Các kết quả này phù hợp với nhận định của Shaosong Zhen và cs. (2025), trong đó NO_3^- là thành phần quan trọng của ô nhiễm khí quyển, với nguồn đóng góp chính từ giao thông (34%), đốt sinh khối (30%), đốt than (21%) và đất (16%) trong $\text{PM}_{2.5}$, tỷ lệ tương tự đối với PM_{10} [11].

Nhìn chung, sự khác biệt không gian-thời gian của NO_3^- giữa hai miền cho thấy các chiến lược kiểm soát phát thải và giảm axit hóa cần được thiết kế theo đặc thù vùng, ưu tiên các đô thị và khu vực miền núi nơi biến động theo mùa mạnh.

Bảng 2. Nồng độ NO_3^- ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lắng đọng khô hàng năm tại năm trạm Việt Nam, giai đoạn 2020-2024

Trạm	2020	2021	2022	2023	2024	Thay đổi (%)
Hà Nội	5,91	5,40	8,44	4,81	5,32	-10,0%
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	5,91	1,96	2,80	4,22	1,48	-75,0%
Yên Bái cũ (nay là Tỉnh Lào Cai)	3,67	5,70	5,00	4,65	3,57	-2,7%
TP.HCM	5,75	5,04	5,11	4,96	5,80	+0,9%
Cần Thơ	2,12	2,01	2,16	2,28	2,33	+9,9%

Ghi chú: Mức thay đổi (%) được tính so với năm đầu chuỗi (2020) nhằm phản ánh xu thế biến đổi tích lũy; các phân tích trung bình nhiều năm và theo mùa được sử dụng để giảm ảnh hưởng của năm dị thường (do tác động của đại dịch COVID-19).



Hình 2. Nồng độ NO_3^- ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lắng đọng khô hàng năm tại năm trạm Việt Nam, giai đoạn 2020-2024

3.3. Xu thế NH_4^+ trong lắng đọng khô (2020-2024)

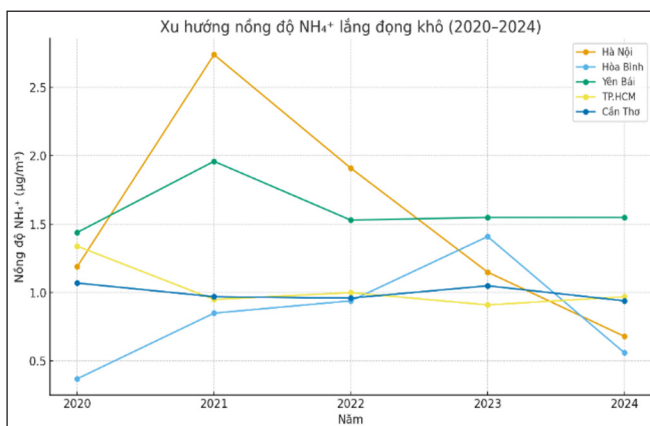
NH_4^+ là một trong những ion vô cơ thứ cấp quan trọng trong khí quyển, được hình thành chủ yếu từ quá trình chuyển hóa khí NH_3 phát thải từ nông nghiệp, sinh hoạt và công nghiệp. NH_4^+ không chỉ góp phần vào quá trình axit hóa

đất và nước thông qua lắng đọng khô và ướt, mà còn là thành phần chính của aerosol vô cơ thứ cấp (SNA: SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+), ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng không khí và sức khỏe cộng đồng. Bảng 3 trình bày nồng độ NH_4^+ trong lắng đọng khô đo tại năm trạm đại diện cho Việt Nam giai đoạn 2020-2024.

Bảng 3. Nồng độ NH_4^+ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lắng đọng khô hàng năm tại 5 trạm Việt Nam, giai đoạn 2020-2024

Trạm	2020	2021	2022	2023	2024	Thay đổi (%)
Hà Nội	1,19	2,74	1,91	1,15	0,68	-42,86
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	0,37	0,85	0,94	1,41	0,56	+51,35
Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai)	1,44	1,96	1,53	1,55	1,55	+7,64
TP.HCM	1,34	0,95	1,00	0,91	0,97	-27,61
Cần Thơ	1,07	0,97	0,96	1,05	0,94	-12,15

Ghi chú: Mức thay đổi (%) được tính so với năm đầu chuỗi (2020) nhằm phản ánh xu thế biến đổi tích lũy; các phân tích trung bình nhiều năm và theo mùa được sử dụng để giảm ảnh hưởng của năm dị thường (do tác động của đại dịch COVID-19).



Hình 3. Nồng độ NH_4^+ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) lắng đọng khô hàng năm tại năm trạm Việt Nam, giai đoạn 2020-2024

Kết quả Bảng 3 và Hình 3 cho thấy nồng độ NH_4^+ lắng đọng khô tại 5 trạm ở Việt Nam giai đoạn 2020-2024 biến động rõ rệt theo vùng khí hậu và điều kiện khí tượng.

Tại miền Bắc (Hà Nội, Hòa Bình cũ - nay là tỉnh Phú Thọ; Yên Bái cũ - nay là tỉnh Lào Cai), NH_4^+ thể hiện xu thế phân hóa mạnh. Hà Nội giảm đáng kể -42,86%, với đỉnh nồng độ năm 2021, phản ánh hiệu quả kiểm soát phát thải từ giao thông và sinh hoạt, kết hợp với điều kiện khí tượng thuận lợi cho khuếch tán và rửa trôi trong các năm sau. Ngược lại, Hòa Bình cũ tăng rõ rệt +51,35%, đạt cực đại năm 2023, cho thấy ảnh hưởng của địa hình thung lũng, hoạt động nông-lâm nghiệp, chăn nuôi và đốt sinh khối trong điều kiện mùa khô, gió yếu. Yên Bái cũ biến động nhẹ +7,64%, phản ánh đặc trưng khí hậu miền núi ẩm, nơi lượng mưa lớn giúp pha loãng aerosol chứa NH_4^+ , dù vẫn có khả năng tích tụ cục bộ vào mùa khô.

Tại miền Nam, nồng độ NH_4^+ có xu hướng ổn định hoặc giảm. TP. Hồ Chí Minh giảm -27,61%,

phù hợp với xu thế giảm các ion hòa tan trong $\text{PM}_{2.5}$ giai đoạn 2019-2020 liên quan đến suy giảm giao thông và hoạt động công nghiệp [12], đồng thời chịu tác động của khí hậu nóng ẩm và gió mùa giúp hạn chế tích tụ aerosol thứ cấp. Cần Thơ giảm nhẹ -12,15%, phản ánh sự chi phối của nguồn nông nghiệp và sinh hoạt tương đối ổn định, cùng điều kiện khí tượng đồng bằng với mưa lớn kéo dài trong mùa mưa.

Nhìn chung, xu thế NH_4^+ lắng đọng khô cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa hai miền: miền Bắc chịu ảnh hưởng mạnh của mùa khô, nghịch nhiệt và các nguồn nông nghiệp - đốt sinh khối, trong khi miền Nam được điều hòa bởi lượng mưa lớn và gió mùa. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Junsu Park và cs. (2021), cho thấy hơn 88% NH_3 trong khí quyển có nguồn gốc trong nước, chủ yếu từ nông nghiệp, sinh hoạt và công nghiệp; do đó, kiểm soát phát thải NH_3 , đặc biệt trong mùa khô, là giải pháp then chốt nhằm giảm hình thành aerosol vô cơ thứ cấp và lắng đọng axit [13].

3.4. Sự khác biệt theo mùa và theo khu vực của nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ theo mùa - từng trạm (2020-2024)

Để đánh giá sự khác biệt theo mùa và theo khu vực trong các dạng ion vô cơ thứ cấp, bảng 4 dưới đây tổng hợp giá trị trung bình 5 năm (2020-2024) của SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong lắng đọng khô tại năm trạm đại diện ở Việt Nam, phân tách theo mùa khô và mùa mưa.

Kết quả tại từng trạm (Bảng 4, Hình 4a-c) cho thấy biến động mùa rõ rệt của các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong giai đoạn 2020-2024, với sự khác biệt rõ giữa miền Bắc và miền Nam.

Tại miền Bắc, nồng độ các ion trong mùa khô đều cao hơn đáng kể so với mùa mưa. Hà Nội ghi nhận mức tăng mạnh nhất, trong đó NH_4^+ tăng gần gấp đôi, phản ánh ảnh hưởng kết hợp của giao thông - sinh hoạt đô thị và điều kiện khí tượng mùa khô (nghịch nhiệt, gió yếu, mưa thấp) thuận lợi cho tích tụ aerosol thứ cấp. Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ) cho thấy mức chênh lệch mùa trung bình, với SO_4^{2-} và NO_3^- tăng ~120-125% và NH_4^+ tăng ~116%, cho thấy vai trò chi phối của nguồn phát thải nông-lâm

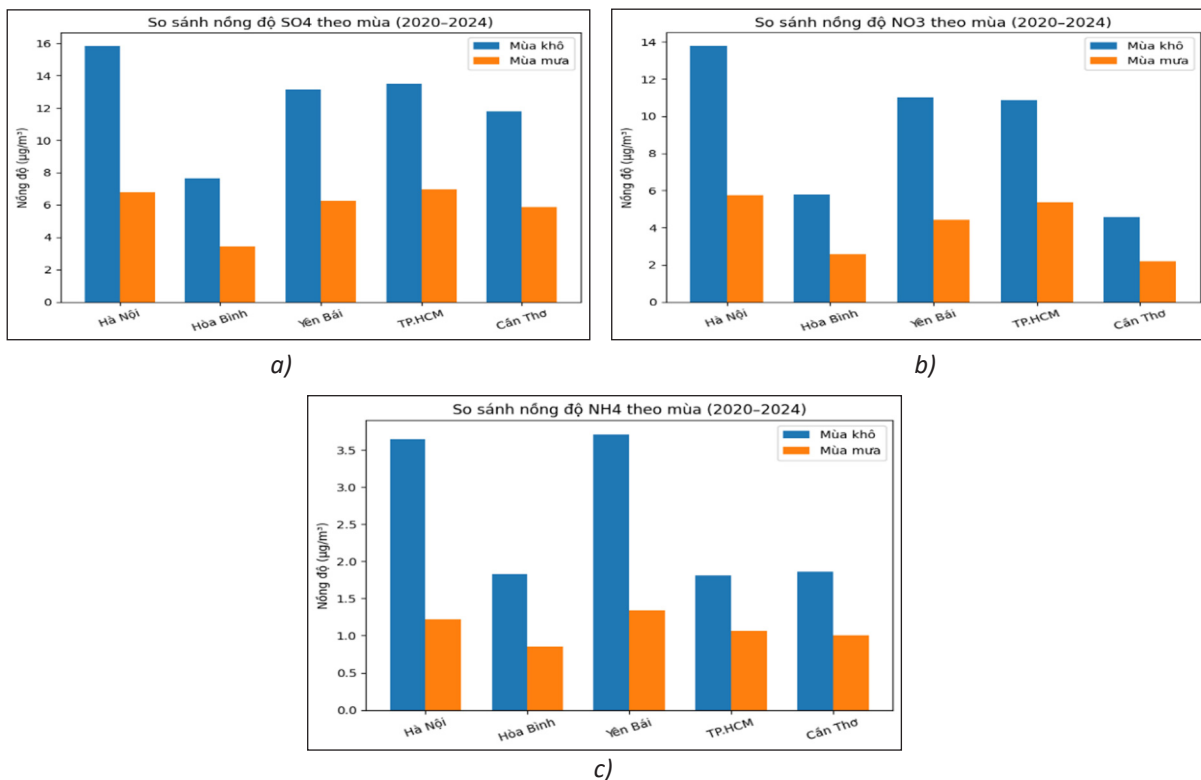
ng nghiệp trong bối cảnh khí hậu mùa khô ít mưa và địa hình miền núi hạn chế khuếch tán. Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai) thể hiện biên độ biến động lớn nhất, đặc biệt với NO_3^- (~149%) và NH_4^+ (~176%), phản ánh phát thải nông nghiệp theo mùa kết hợp với điều kiện tích tụ khí quyển trong giai đoạn khô.

Ngược lại, tại miền Nam, biên độ biến động mùa thấp hơn. TP. Hồ Chí Minh ghi nhận SO_4^{2-} và NO_3^- tăng ~94-103%, trong khi NH_4^+ tăng ~69%, cho thấy tác động điều hòa của khí hậu cận xích đạo với mưa phân bố tương đối đều và hoàn lưu gió ổn định. Cần Thơ có mức tăng SO_4^{2-} và NO_3^- ~101-108%, còn NH_4^+ <90%, phản ánh vai trò chủ đạo của nguồn nông nghiệp kết hợp với lượng mưa dồi dào làm giảm tích tụ theo mùa.

Nhìn chung, các trạm miền Bắc nhạy cảm hơn với biến động khí tượng theo mùa, trong đó mùa khô là giai đoạn rủi ro tích tụ ion cao nhất; trong khi miền Nam có nồng độ các ion ổn định hơn theo mùa. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Ngọc Tran và cs. (2023), cho thấy $PM_{2.5}$ và các ion hòa tan (NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+) thấp hơn trong mùa mưa so với mùa khô [12].

Bảng 4. Nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ ($\mu g/m^3$) theo mùa - từng trạm (2020-2024)

Trạm	Ion	Mùa khô	Mùa mưa	Chênh lệch (Mùa khô - Mùa mưa)	Tăng/Giảm (%)
Hà Nội	SO_4^{2-}	15,86	6,80	9,06	133,20
	NO_3^-	13,80	5,76	8,04	139,57
	NH_4^+	3,64	1,22	2,43	199,18
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	SO_4^{2-}	7,63	3,43	4,19	122,07
	NO_3^-	5,79	2,57	3,22	125,12
	NH_4^+	1,83	0,85	0,99	116,55
Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai)	SO_4^{2-}	13,13	6,24	6,88	110,22
	NO_3^-	11,01	4,41	6,61	149,93
	NH_4^+	3,71	1,34	2,36	175,74
TP.HCM	SO_4^{2-}	13,50	6,97	6,53	93,74
	NO_3^-	10,88	5,35	5,53	103,40
	NH_4^+	1,81	1,07	0,74	69,42
Cần Thơ	SO_4^{2-}	11,81	5,88	5,93	100,95
	NO_3^-	4,56	2,19	2,37	107,84
	NH_4^+	1,86	1,00	0,86	86,75



Hình 4. Nồng độ SO_4^{2-} (a), NO_3^- (b), NH_4^+ (c) (ug/m^3) theo mùa - từng trạm (2020-2024)

3.5. Đánh giá sự khác biệt không gian trong đặc điểm lắng đọng khô

Để đánh giá sự khác biệt không gian trong đặc điểm lắng đọng khô và xác định những vùng nhạy cảm hơn trước biến động khí tượng theo mùa, việc phân tích trung bình theo vùng giữa Miền Bắc và Miền Nam là cần thiết. Bảng 5 trình bày giá trị trung bình mùa khô - mùa mưa của ba ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ , cho phép nhận diện rõ mức độ tích tụ mùa và xác định những khu vực có nguy cơ axit hóa không khí cao hơn.

Kết quả trung bình theo vùng (Bảng 5, Hình 5) cho thấy sự khác biệt rõ rệt về biến động mùa của các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ giữa miền Bắc và miền Nam trong giai đoạn 2020-2024, phản ánh vai trò chi phối của điều kiện khí hậu - khí tượng khu vực.

Tại miền Bắc, nồng độ mùa khô của cả ba ion đều cao hơn đáng kể so với mùa mưa, với

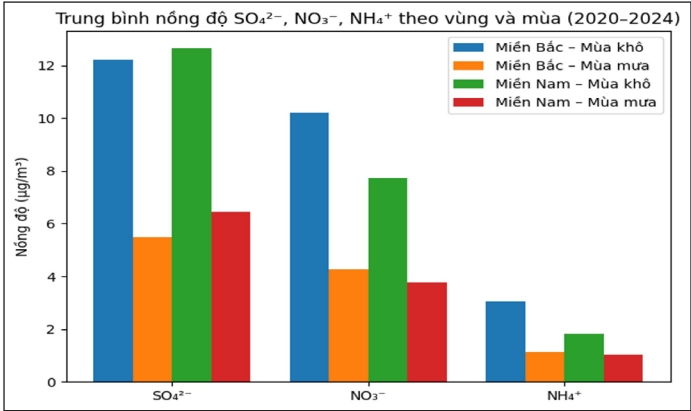
mức tăng từ ~122% (SO_4^{2-}) đến ~168% (NH_4^+). Xu thế này gắn liền với đặc trưng khí tượng mùa khô (nghịch nhiệt, mưa thấp, độ ẩm giảm và gió yếu), làm hạn chế khuếch tán và rửa trôi, qua đó thúc đẩy tích tụ các ion trong khí quyển.

Ngược lại, miền Nam ghi nhận biên độ biến động mùa thấp hơn (SO_4^{2-} ~97%, NO_3^- ~105%, NH_4^+ ~77%), cho thấy ảnh hưởng mùa kém rõ rệt. Khí hậu cận xích đạo với nền nhiệt cao, mưa phân bố tương đối đều và chế độ gió ổn định đã tăng cường khuếch tán và lắng đọng ướt, làm giảm chênh lệch nồng độ giữa các mùa.

Đáng chú ý, mức tăng NH_4^+ cao tại miền Bắc phản ánh đóng góp đáng kể của các nguồn phát thải phụ thuộc mùa (nông nghiệp, chăn nuôi, đốt sinh khối) trong điều kiện khí tượng bất lợi. Nhìn chung, kết quả cho thấy miền Bắc nhạy cảm hơn trước biến động khí hậu theo mùa, hàm ý cần ưu tiên kiểm soát phát thải SO_2 , NO_x và NH_3 trong mùa khô, đồng thời tăng cường quan trắc theo mùa.

Bảng 5. Giá trị trung bình nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong lắng đọng khô theo mùa tại miền Bắc và miền Nam giai đoạn 2020-2024

Vùng	Ion	Mùa khô (mg/L)	Mùa mưa (mg/L)	Chênh lệch	Tăng/Giảm (%)
Miền Bắc (Hà Nội - Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ) - Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai)	SO_4^{2-}	12,21	5,49	6,72	122,39
	NO_3^-	10,20	4,25	5,95	140,02
	NH_4^+	3,06	1,14	1,92	167,79
Miền Nam (TP.HCM - Cần Thơ)	SO_4^{2-}	12,66	6,43	6,23	96,91
	NO_3^-	7,72	3,77	3,95	104,66
	NH_4^+	1,84	1,04	0,80	76,87



Hình 5. So sánh trung bình nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong lắng đọng khô theo mùa tại miền Bắc và miền Nam giai đoạn 2020-2024

3.5. Xu thế lắng đọng khô theo mùa - trên phạm vi cả nước

Để đánh giá xu thế tổng thể của lắng đọng khô các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trên phạm vi cả nước, trung bình nồng độ mùa khô và mùa mưa được tổng hợp từ 5 trạm đại diện ở miền Bắc: Hà Nội, Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ),

Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai) và miền Nam: TP.HCM, Cần Thơ trong giai đoạn 2020-2024. Kết quả cung cấp cái nhìn toàn cảnh về tính mùa vụ và mức độ chênh lệch giữa mùa khô và mùa mưa, từ đó hỗ trợ xác định các khu vực và thời điểm cần ưu tiên kiểm soát ô nhiễm và nguy cơ axit hóa.

Bảng 6. Giá trị trung bình nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ trong lắng đọng khô theo mùa giai đoạn 2020-2024 được tính toán từ số liệu của 5 trạm đại diện cho hai vùng: miền Bắc (Hà Nội, Hòa Bình - nay thuộc tỉnh Phú Thọ và Yên Bái - nay thuộc tỉnh Lào Cai) và miền Nam (TP. Hồ Chí Minh và Cần Thơ)

Ion	Mùa khô ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mùa mưa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Chênh lệch (Mùa khô - Mùa mưa)	Tăng/Giảm (%)
SO_4^{2-}	11,77	5,86	5,91	101
NO_3^-	9,41	4,10	5,31	129
NH_4^+	2,61	1,18	1,43	121

Ghi chú: Giá trị trung bình được tính từ 5 trạm đại diện cho miền Bắc và miền Nam.

Xu thế mùa vụ: kết quả Bảng 6 cho thấy mùa khô có nồng độ ion cao hơn mùa mưa đối với cả SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ , với mức tăng trung bình từ 101% (SO_4^{2-}) đến 129% (NO_3^-) và NH_4^+ tăng $\approx 121\%$. Điều này phản ánh tác động tích tụ khí quyển trong mùa khô, khi lượng mưa thấp, nghịch nhiệt kéo dài và khuếch tán hạn chế, đặc biệt tại các khu đô thị và vùng trung du miền Bắc.

So sánh ion: NO_3^- có mức chênh lệch mùa cao nhất, tiếp đến NH_4^+ , trong khi SO_4^{2-} có mức tăng vừa phải. Điều này phù hợp với đặc điểm nguồn phát thải: NO_3^- chịu ảnh hưởng mạnh từ giao thông, sinh hoạt và nông nghiệp, NH_4^+ chủ yếu từ hoạt động nông nghiệp, SO_4^{2-} liên quan đến đốt nhiên liệu và công nghiệp.

Kết quả cho thấy cần ưu tiên kiểm soát lắng đọng khô vào mùa khô, đặc biệt tại các khu đô thị miền Bắc, đồng thời duy trì giám sát và giảm phát thải SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ để hạn chế axit hóa đất và nước cũng như cải thiện chất lượng không khí toàn quốc.

Các kết quả nghiên cứu về lắng đọng khô và sự phân bố các ion vô cơ thứ cấp tại Việt Nam trong giai đoạn 2020-2024 cũng phù hợp với các nghiên cứu quốc tế gần đây. Một nghiên cứu ở khu vực ven biển Xiamen (Trung Quốc) đã chỉ ra rằng các ion nitrat (NO_3^-) và amoni (NH_4^+) chiếm phần lớn tổng nitơ aerosol và là thành phần chính đóng góp vào lắng đọng khô, đồng thời có sự khác biệt theo mùa giữa mùa ẩm và mùa lạnh, phản ánh nguồn phát thải và điều kiện khí

tượng thay đổi theo mùa [14]. Tại Đông Á, sự gia tăng tỷ lệ nitrat so với sulfate trong aerosol $\text{PM}_{2.5}$ đã được quan sát tại miền Đông Trung Quốc, cho thấy xu hướng nitrat chiếm ưu thế hơn sulfate trong các điều kiện phát thải và khí tượng nhất định [15]. Ngoài ra, một nghiên cứu tại Hàn Quốc cho thấy quá trình hình thành thứ cấp chi phối $\text{PM}_{2.5}$, trong đó HNO_3 là tiền chất chính tạo nitrat aerosol, còn NH_3 từ nông nghiệp làm gia tăng nitrat tại khu vực bán đô thị. Kết quả cũng nhấn mạnh vai trò quan trọng của vận chuyển ô nhiễm khu vực so với nguồn tại chỗ, trong đó ảnh hưởng theo mùa và sự vận chuyển không khí xa được ghi nhận rõ rệt [16]. Các kết quả này cho thấy tính tương đồng về xu hướng mùa vụ và không gian của lắng đọng ion vô cơ thứ cấp, đồng thời củng cố nhận định rằng sự khác biệt theo vùng miền ở Việt Nam phản ánh sự kết hợp của nguồn phát thải địa phương và điều kiện khí tượng đặc thù.

3.6. Dự báo nồng độ ion trong lắng đọng khô SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ giai đoạn 2025-2029

- Nồng độ SO_4^{2-}

Dự báo nồng độ SO_4^{2-} trong lắng đọng khô đóng vai trò quan trọng trong việc nhận diện sớm xu thế axit hóa và hỗ trợ hoạch định chính sách giảm phát thải SO_2 . Việc dự báo cho phép đánh giá rủi ro môi trường trung hạn, đặc biệt tại các đô thị lớn và khu vực chịu tác động mạnh từ giao thông, công nghiệp và biến động khí tượng. Kết quả dự báo cho giai đoạn 2025-2029 được trình bày trong Bảng 7.

Bảng 7. Dự báo nồng độ SO_4^{2-} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 2025-2029

Trạm	2025	2026	2027	2028	2029
Hà Nội	5,487	4,876	4,265	3,654	3,043
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	3,580	3,562	3,544	3,526	3,508
Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai)	4,703	4,122	3,541	2,960	2,379
TP.HCM	8,034	8,406	8,778	9,150	9,522
Cần Thơ	6,987	7,346	7,705	8,064	8,423

Kết quả Bảng 7 cho thấy sự phân hóa rõ rệt về xu thế SO_4^{2-} giữa hai miền trong giai đoạn dự báo 2025-2029.

Tại miền Bắc: Hà Nội - Hòa Bình cũ (nay thuộc tỉnh Phú Thọ) - Yên Bái cũ (nay thuộc tỉnh Lào Cai), nồng độ SO_4^{2-} nhìn chung giảm hoặc ổn

định. Hà Nội giảm từ 5,487 xuống 3,043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ đến năm 2029, trong khi Yên Bái cũ giảm mạnh từ 4,703 xuống 2,379 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Xu thế giảm nhất quán này phản ánh hiệu quả của các biện pháp kiểm soát phát thải SO_2 kết hợp với điều kiện khí tượng-địa hình thuận lợi cho khuếch tán. Ngược

lại, Hòa Bình cũ duy trì tương đối ổn định ($3,580 \rightarrow 3,508 \mu\text{g}/\text{m}^3$), cho thấy nồng độ SO_4^{2-} đã tiệm cận mức nền khí quyển và ít nhạy cảm với biến động phát thải địa phương. Nhìn chung, miền Bắc tiếp tục duy trì xu hướng giảm SO_4^{2-} đến năm 2029.

Trái lại, miền Nam (TP.HCM - Cần Thơ) ghi nhận xu hướng tăng rõ rệt và liên tục. Tại TP.HCM, SO_4^{2-} tăng từ 8,034 lên 9,522 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, trong khi Cần Thơ tăng từ 6,987 lên 8,423 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mức tăng đồng pha tại hai trạm phản ánh đóng góp chi phối của các nguồn phát thải SO_2 từ giao thông, công nghiệp, đô thị hóa và đốt sinh khối, cùng khả năng lan truyền khu vực theo gió mùa. Giá trị dự báo tại TP.HCM cao gấp 2-3 lần nhiều trạm miền Bắc, cho thấy nguy cơ

axit hóa đô thị vẫn ở mức đáng lo ngại.

Tổng thể, kết quả dự báo cho thấy miền Bắc duy trì xu thế cải thiện, trong khi miền Nam đối mặt với gia tăng SO_4^{2-} , hàm ý cần tăng cường kiểm soát phát thải SO_2 , đặc biệt tại các đô thị lớn và vùng phụ cận.

- Nồng độ NO_3^-

NO_3^- trong lắng đọng khô là sản phẩm oxy hóa của NO_x phát thải từ giao thông, công nghiệp và đốt sinh khối. Sự tích tụ NO_3^- góp phần quan trọng vào axit hóa môi trường và hình thành bụi mịn thứ cấp ($\text{PM}_{2.5}$). Vì vậy, dự báo xu thế NO_3^- là cần thiết để nhận diện sớm rủi ro ô nhiễm và hỗ trợ hoạch định các biện pháp giảm phát thải NO_x . Bảng 8 trình bày kết quả dự báo nồng độ NO_3^- giai đoạn 2025-2029.

Bảng 8. Dự báo nồng độ NO_3^- ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 2025-2029

Trạm	2025	2026	2027	2028	2029
Hà Nội	5,445	5,268	5,091	4,914	4,737
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	1,294	0,634	-0,026	-0,686	-1,346
Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai)	4,143	4,018	3,893	3,768	3,643
TP.HCM	5,308	5,310	5,312	5,314	5,316
Cần Thơ	2,387	2,456	2,525	2,594	2,663

Ghi chú: Một số giá trị dự báo nồng độ NO_3^- tại trạm Hòa Bình cũ (giai đoạn 2027–2029 cho kết quả âm do phương pháp ngoại suy xu thế từ chuỗi số liệu quan trắc dài hạn. Về mặt vật lý, nồng độ các ion khí quyển không thể mang giá trị âm; các kết quả này phản ánh nồng độ đã giảm và tiệm cận ngưỡng rất thấp, có thể coi là xấp xỉ 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, đồng thời cho thấy xu thế suy giảm mạnh của các hợp chất này tại các trạm nghiên cứu.

Kết quả Bảng 8 cho thấy xu thế NO_3^- phân hóa rõ rệt giữa hai miền trong giai đoạn dự báo 2025-2029.

Tại miền Bắc: Hà Nội - Hòa Bình cũ (nay thuộc tỉnh Phú Thọ) - Yên Bái cũ (nay thuộc tỉnh Lào Cai), NO_3^- nhìn chung giảm, song mức độ khác nhau giữa các trạm. Hà Nội giảm từ 5,445 xuống 4,737 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, phản ánh tác động tích lũy của các biện pháp kiểm soát phát thải NO_x đô thị. Yên Bái cũ giảm đều từ 4,143 xuống 3,643 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cho thấy vai trò hỗ trợ của điều kiện khí tượng-địa hình miền núi và mức phát thải thấp. Đáng chú ý, Hòa Bình cũ giảm rất mạnh và dự báo đạt giá trị âm từ năm 2027, phản ánh nồng độ NO_3^- đã tiệm cận mức rất thấp; về mặt thực tế có thể coi là xấp xỉ 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nhìn chung, miền Bắc duy trì xu thế giảm NO_3^- đến năm 2029.

Ngược lại, miền Nam: TP.HCM, Cần Thơ thể

hiện xu thế ổn định hoặc tăng nhẹ. Tại TP.HCM, nồng độ NO_3^- gần như không đổi ($5,308 \rightarrow 5,316 \mu\text{g}/\text{m}^3$), cho thấy sự ổn định của các nguồn phát thải NO_x đô thị. Trong khi đó, Cần Thơ tăng từ 2,387 lên 2,663 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, phản ánh ảnh hưởng của phát thải nông nghiệp và đô thị hóa, cùng điều kiện khí tượng đồng bằng thuận lợi cho tích tụ.

Tổng thể, kết quả dự báo cho thấy hiệu quả giảm NO_x rõ rệt tại miền Bắc, trong khi miền Nam cần tăng cường kiểm soát phát thải, đặc biệt tại các khu vực đô thị và nông nghiệp tập trung.

- Nồng độ NH_4^+

Để chủ động đánh giá xu hướng ô nhiễm khí quyển và lập kế hoạch ứng phó kịp thời, việc dự báo nồng độ NH_4^+ trong lắng đọng khô giai đoạn 2025-2029 là cần thiết, bổ sung thông tin định lượng ngoài các phân tích xu hướng thực đo 2020-2024.

Bảng 9. Dự báo nồng độ NH_4^+ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 2025-2029

Trạm	2025	2026	2027	2028	2029
Hà Nội	0,751	0,490	0,229	-0,032	-0,293
Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ)	1,108	1,202	1,296	1,390	1,484
Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai)	1,549	1,530	1,511	1,492	1,473
TP. HCM	0,800	0,722	0,644	0,566	0,488
Cần Thơ	0,944	0,926	0,908	0,890	0,872

Ghi chú: Một số giá trị dự báo nồng độ NH_4^+ tại trạm Hà Nội (giai đoạn 2028-2029) cho kết quả âm do phương pháp ngoại suy xu thế từ chuỗi số liệu quan trắc dài hạn. Về mặt vật lý, nồng độ các ion khí quyển không thể mang giá trị âm; các kết quả này phản ánh nồng độ đã giảm và tiệm cận ngưỡng rất thấp, có thể coi là xấp xỉ $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, đồng thời cho thấy xu thế suy giảm mạnh của các hợp chất này tại các trạm nghiên cứu.

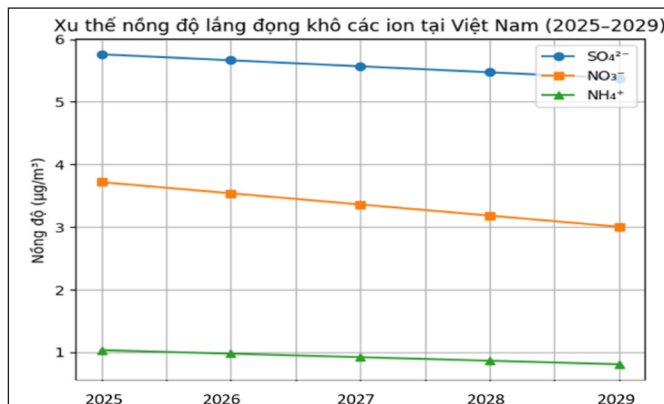
Kết quả Bảng 9 cho thấy xu thế biến động NH_4^+ khác biệt giữa các vùng trong giai đoạn dự báo.

Tại miền Bắc: Hà Nội - Hòa Bình cũ (nay thuộc tỉnh Phú Thọ) - Yên Bái cũ (nay thuộc tỉnh Lào Cai), Hà Nội ghi nhận mức giảm mạnh, từ 0,751 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ năm 2025 xuống giá trị âm vào năm 2029, phản ánh xu thế suy giảm rõ rệt của NH_4^+ ; giá trị âm mang ý nghĩa mô hình và có thể coi là tiệm cận $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ trong thực tế. Ngược lại, Hòa Bình cũ và Yên Bái cũ duy trì xu thế ổn định hoặc tăng nhẹ, trong đó Hòa Bình cũ tăng khoảng 33% trong 5 năm, cho thấy vai trò chi phối của các nguồn phát thải nông nghiệp kết hợp với điều

kiện khí hậu-địa hình miền núi.

Tại miền Nam: TP.HCM, Cần Thơ, NH_4^+ tại cả hai trạm đều giảm nhẹ, từ 0,800 xuống 0,488 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ở TP.HCM và từ 0,944 xuống 0,872 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ở Cần Thơ, phản ánh tác động tích cực của các biện pháp quản lý môi trường đô thị và kiểm soát phát thải liên quan đến giao thông và công nghiệp.

Nhìn chung, kết quả dự báo cho thấy xu thế giảm NH_4^+ rõ rệt tại đô thị lớn, trong khi các khu vực miền núi và nông nghiệp vẫn duy trì nồng độ tương đối ổn định, hàm ý cần phân hóa chiến lược kiểm soát phát thải theo đặc thù vùng.



Hình 6. Xu thế dự báo nồng độ lắng đọng khô các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ tại Việt Nam, giai đoạn 2025-2029

Ghi chú: Dữ liệu dự báo được tổng hợp từ các trạm đại diện Miền Bắc và Miền Nam; mô hình dự báo cho phép xuất hiện giá trị tiệm cận 0 trong trường hợp xu thế suy giảm mạnh.

Dự báo giai đoạn 2025-2029 cho thấy miền Bắc: Hà Nội, Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ), Yên Bái cũ (nay là tỉnh Lào Cai) có xu hướng giảm hoặc ổn định nồng độ SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ , phản ánh hiệu quả kiểm soát phát thải và điều

kiện khí tượng thuận lợi. Ngược lại, miền Nam: TP.HCM, Cần Thơ ghi nhận SO_4^{2-} và NO_3^- duy trì hoặc tăng nhẹ, trong khi NH_4^+ giảm nhẹ, cho thấy cần tăng cường quản lý ô nhiễm khí quyển và theo dõi tác động môi trường tại các đô thị

lớn và khu vực nông nghiệp tập trung.

Các giá trị dự báo âm được hiệu chỉnh về mặt ý nghĩa, xem như xấp xỉ $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$;

Kết quả này được sử dụng để nhấn mạnh xu thế suy giảm mạnh và tiệm cận ngưỡng nền, chứ không nhằm cung cấp giá trị tuyệt đối chính xác;

Đây cũng là cơ sở để đề xuất các mô hình dự báo phi tuyến hoặc có ràng buộc không âm trong các nghiên cứu tiếp theo nhằm nâng cao độ tin cậy.

4. Kết luận

Phân tích lắng đọng khô các ion SO_4^{2-} , NO_3^- và NH_4^+ tại Việt Nam giai đoạn 2020-2024 cho thấy sự khác biệt rõ rệt theo vùng và mùa. Miền Bắc: Hà Nội, Hòa Bình cũ (nay thuộc tỉnh Phú Thọ), Yên Bái cũ (nay thuộc tỉnh Lào Cai) ghi nhận nồng độ mùa khô cao hơn mùa mưa 122-168%, phản ánh tác động tổng hợp của nghịch nhiệt, lượng mưa thấp, gió yếu và khả năng khuếch tán khí quyển hạn chế. Ngược lại, miền Nam: TP.HCM, Cần Thơ có biên độ biến động mùa thấp hơn (77-105%), cho thấy vai trò điều

hòa của khí hậu cận xích đạo với mưa phân bố tương đối đồng đều và chế độ gió ổn định.

Trung bình toàn bộ các trạm cho thấy mùa khô là giai đoạn tích tụ ion mạnh nhất, trong đó NO_3^- và NH_4^+ nhạy cảm mùa cao hơn SO_4^{2-} , phản ánh vai trò của giao thông, nông nghiệp và quá trình hình thành aerosol thứ cấp. Mức tăng mạnh NH_4^+ tại miền Bắc nhấn mạnh đóng góp của các nguồn phát thải phụ thuộc mùa như chăn nuôi, phân bón và đốt sinh khối.

Dự báo 2025-2029 cho thấy xu thế phân hóa tiếp tục giữa hai miền: miền Bắc có xu hướng giảm hoặc ổn định SO_4^{2-} và NO_3^- , phản ánh hiệu quả kiểm soát phát thải SO_2 và NO_x ; trong khi miền Nam ghi nhận gia tăng SO_4^{2-} và ổn định hoặc tăng nhẹ NO_3^- , gắn với đô thị hóa và phát triển công nghiệp-giao thông, còn NH_4^+ giảm nhẹ.

Nhìn chung, mùa khô là giai đoạn then chốt chỉ phối nguy cơ tích tụ ion và axit hóa môi trường, hàm ý cần chiến lược kiểm soát phát thải theo vùng và theo mùa, ưu tiên miền Bắc trong hiện tại và miền Nam trong trung hạn, đồng thời tăng cường quan trắc dài hạn.

Đóng góp của từng tác giả trong bài báo: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Tạ Thu Hằng; Doãn Hà Phong; Tổng hợp tài liệu: Nguyễn Thị Kim Anh, Nguyễn Thị Hằng Nga; Phân tích tài liệu, viết bản thảo bài báo: Tạ Thu Hằng; Chỉnh sửa bài báo: Tạ Thu Hằng, Doãn Hà Phong.

Lời cảm ơn: Các tác giả bài báo chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của nhiệm vụ “Triển khai hoạt động quan trắc lắng đọng axit trong khuôn khổ mạng lưới giám sát lắng đọng axit vùng đông á (EANET)”, đã cung cấp nguồn số liệu cho bài báo này.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của mình, chưa từng công bố trước đó, không sao chép, đạo văn; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. Giardina and P. Buffa, “A new approach for modeling dry deposition velocity of particles,” *Atmospheric Environment*, vol. 180, pp. 11-22, 2018.
- [2] American Meteorological Society, “Acid deposition,” *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 85, pp. 299-301, 2003.
- [3] Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, *The Fourth Periodic Report on the State of Acid Deposition in East Asia - Part II: National Assessment*, 2021. [Online]. Available: https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2022/07/PRSad4_PART2-National-Assessment-2. Accessed: May 25, 2026.
- [4] P. T. T. Hà, Đ. T. N. Anh, T. M. Tiến, B. N. Khả, và L. T. Sỹ, “Đánh giá diễn biến mưa axit ở tỉnh Hòa Bình cũ (nay là tỉnh Phú Thọ) giai đoạn 2000-2014,” *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường*, tập 32, số 1S, tr. 102-109, 2016.
- [5] H. T. Ngân và cộng sự, “Study on acidity and neutralizing ability of ions in the chemical composition of rainwater,” *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, vol. 37, no. 2, 2021.

- [6] M. T. Nguyen, "Ammonia: A trend of dry deposition in Viet Nam," *IgMin Research*, vol. 3, no. 1, pp. 070-075, 2025, doi: 10.61927/igmin285.
- [7] M. T. Nguyen, "Trend of SO₂ gas dry deposition in Viet Nam," *IgMin Research*, vol. 2, no. 8, pp. 734-738, 2024.
- [8] Đ. D. Ân và cộng sự, "Đánh giá ảnh hưởng của lan truyền xuyên biên giới đến lắng đọng khô tại miền Bắc Việt Nam sử dụng phương pháp mô hình hóa WRF-CMAQ," *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, vol. 32, no. 3S, 2016.
- [9] L. H. Vu, H. T. T. Pham, and P. A. Vu, "Spatial-temporal variations of chemical components and trends of acid rain in Viet Nam: A case study of Hanoi, Hoa Binh and Ho Chi Minh Cities," *EnvironmentAsia*, vol. 17, no. 1, pp. 41–54, 2024, doi: 10.14456/ea.2024.4.
- [10] M. Bettineschi et al., "Across land, sea, and mountains: Sulphate aerosol sources and transport dynamics over the northern Apennines," *Environ. Sci.: Atmos.*, vol. 5, pp. 1023-1034, 2025.
- [11] S. Zhen et al., "Study on the source of nitrate in atmospheric particulate matter in Beijing using nitrogen and oxygen dual isotopes," *Sci. Rep.*, vol. 15, art. no. 18174, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-01179-9.
- [12] N. Tran, Y. Fujii, V. X. Le, D. T. C. Nguyen, H. Okochi, T. H. Tran, and N. Takenaka, "Annual variation of PM_{2.5} chemical composition in Ho Chi Minh City, Viet Nam including the COVID-19 outbreak period," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 23, art. no. 220312, 2023, doi: 10.4209/aaqr.220312.
- [13] J. Park et al., "Contributions of ammonia to high concentrations of PM_{2.5} in an urban area," *Atmosphere*, vol. 12, no. 12, art. no. 1676, 2021, doi: 10.3390/atmos12121676.
- [14] A. Chatterjee et al., "High rise in carbonaceous aerosols under very low anthropogenic emissions over eastern Himalaya, India: Impact of lockdown for COVID-19 outbreak," *Atmospheric Environment*, vol. 244, art. no. 117947, 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117947.
- [15] W. Liang et al., "Reduced atmospheric sulfate enhances fine particulate nitrate formation in eastern China," *Sci. Total Environ.*, vol. 898, art. no. 165303, 2023.
- [16] K.-C. Kim et al., "Characterization of secondary aerosol formation via HONO and HNO₃ reactions and source apportionment in South Korea," *Atmosphere*, vol. 16, no. 9, art. no. 1067, 2025.

TRENDS IN DRY DEPOSITION OF SO₄²⁻, NO₃⁻, AND NH₄⁺ AT REPRESENTATIVE SITES IN VIET NAM: SEASONAL AND REGIONAL VARIATIONS (2020-2024)

Ta Thu Hang, Doan Ha Phong, Nguyen Thi Kim Anh, Nguyen Thi Hang Nga
Institute of Meteorology, Hydrology, Environment and Marine Sciences

Received: 30/12/2025; Accepted: 20/1/2026

Abstract: This study investigates the seasonal patterns and regional variability of dry deposition of sulfate (SO₄²⁻), nitrate (NO₃⁻), and ammonium (NH₄⁺) ions at five representative monitoring sites across Viet Nam-Ha Noi, Hoa Binh (currently in Phu Tho Province), Yen Bai (currently in Lao Cai Province), Ho Chi Minh City, and Can Tho-during the period 2020-2024. Weekly samples were collected and analyzed using ion chromatography and standard chemical analytical methods. The results indicate substantial declines (20-30%) in SO₄²⁻ and NO₃⁻ concentrations at major urban sites, whereas mountainous stations exhibited pronounced seasonal variability, with marked increases during the dry season. Can Tho recorded the lowest dry deposition levels, suggesting a reduced risk of environmental acidification.

Northern sites showed significantly higher dry-season concentrations than wet-season values, with

increases of approximately 122% for SO_4^{2-} , 140% for NO_3^- , and 168% for NH_4^+ . In contrast, southern sites displayed weaker seasonal contrasts ($\text{SO}_4^{2-} \approx 97\%$, $\text{NO}_3^- \approx 105\%$, and $\text{NH}_4^+ \approx 77\%$). Nationwide averages revealed consistently higher ion concentrations during the dry season compared to the wet season, with increases of 101% for SO_4^{2-} , 129% for NO_3^- , and 121% for NH_4^+ . Among the three ions, NO_3^- exhibited the strongest seasonal contrast.

Projections for the 2025-2029 period suggest that observed regional disparities are likely to persist. In northern Vietnam, SO_4^{2-} and NO_3^- concentrations are expected to decrease by approximately 12-49% at Ha Noi and the former Yen Bai station (Lao Cai Province), while the former Hoa Binh station (Phu Tho Province) is projected to remain near background levels. NH_4^+ is predicted to decline markedly in Ha Noi but remain stable or slightly increase at mountainous sites. Conversely, southern Viet Nam is projected to experience increases in SO_4^{2-} of about 18-22% in Ho Chi Minh City and Can Tho, with NO_3^- remaining stable or increasing slightly and NH_4^+ showing a decreasing trend, indicating that the risk of urban acidification in southern regions may remain a concern in the medium term.

Overall, these findings provide quantitative evidence to support emission control strategies, risk management, and mitigation of soil and water acidification, while identifying priority regions and seasons for enhanced monitoring and targeted interventions in Viet Nam's national air quality management framework.

Keywords: Dry deposition, sulfate, nitrate, ammonium, seasonal variation, Viet Nam.