



ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH CỦA CHẤT HỮU CƠ TỰ NHIÊN TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI NƯỚC VÀ KỸ THUẬT ĐẶC TRƯNG HÓA

NGUYỄN THÀNH MẬU¹

¹Khoa KTHT&MT Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Tóm tắt

Chất hữu cơ tự nhiên (NOM) là một hỗn hợp phức tạp hiện diện phổ biến trong mọi nguồn nước uống, ảnh hưởng trực tiếp đến sự hình thành sản phẩm phụ khử trùng (DBPs), quá trình ăn mòn, sự phát triển vi sinh và cảm quan nước trong hệ thống phân phối (WDS). Bài báo này đánh giá tổng quan các tác động đa chiều của đặc tính NOM đối với WDS và hệ thống cấp nước trong nhà, đồng thời phân tích chi tiết các kỹ thuật đặc trưng hóa tiên tiến bao gồm phổ huỳnh quang (EEM-PARAFAC), sắc ký loại trừ kích thước (HPSEC) và khối phổ phân giải cao (FTICR-MS). Nghiên cứu đặc biệt nhấn mạnh vai trò của chỉ số SUVA và các cảm biến quang học trực tuyến (UV-Vis, huỳnh quang vi sai) như những công cụ then chốt để giám sát thời gian thực và dự báo chính xác tiềm năng hình thành DBPs. Mục tiêu cuối cùng là thúc đẩy sự chuyển dịch từ quản lý nồng độ tổng quát sang đặc trưng hóa chi tiết cấu trúc NOM để đảm bảo an toàn nước từ nhà máy đến tận nơi tiêu dùng.

Từ khóa: Đặc tính chất hữu cơ tự nhiên, xử lý nước, hệ thống phân phối, giám sát chất lượng nước, sản phẩm phụ khử trùng.

Ngày nhận bài: 6/2/2026; Ngày sửa chữa: 28/2/2026; Ngày duyệt đăng: 10/3/2026.

Assessment of natural organic matter characteristics in water distribution systems and characterization techniques

Abstract

Natural Organic Matter (NOM) is a complex mixture ubiquitous in drinking water sources, directly influencing the formation of disinfection by-products (DBPs), corrosion, microbial growth, and aesthetic quality within water distribution systems (WDS). This paper provides a comprehensive review of NOM's multi-faceted impacts on both WDS and premise plumbing, while detailing advanced characterization techniques such as Fluorescence Excitation-Emission Matrix with Parallel Factor Analysis (EEM-PARAFAC), High-Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC), and Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry (FTICR-MS). Furthermore, the study clarifies the pivotal role of the SUVA index and online optical sensors (UV-Vis and differential fluorescence) as essential tools for real-time monitoring and accurate prediction of DBP formation potential. The ultimate goal is to facilitate a shift from bulk concentration management to detailed structural characterization of NOM to ensure water safety from treatment plants to consumers' taps.

Keywords: Natural organic matter characteristics, water treatment, distribution systems, water quality monitoring, disinfection by-products.

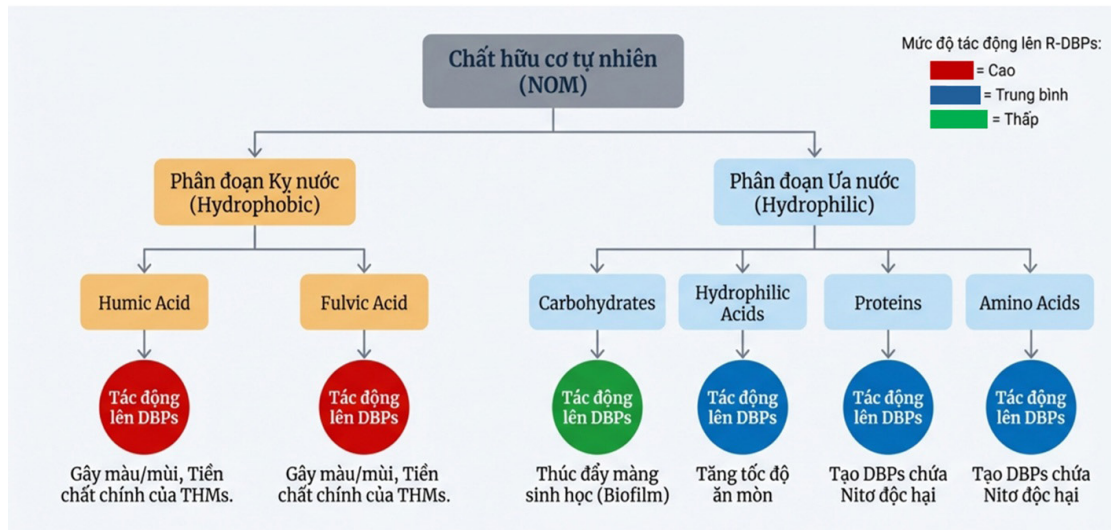
JEL Classifications: Q51, Q53, Q55, Q58.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

NOM trong môi trường nước là một tập hợp phức tạp của nhiều hợp chất, được hình thành từ các quá trình sinh học và lý hóa liên quan đến sự trao đổi chất và phân hủy của các sinh vật [2]. Với cấu trúc hóa học đa dạng, NOM bao gồm một dải rộng các hợp chất hữu cơ từ cấu trúc béo (aliphatic) đơn giản đến các vòng thơm (aromatic) có màu phức tạp [2]. Sự đa dạng này là kết quả của các quá trình biến đổi không ngừng của vật chất hữu cơ trong môi trường tự nhiên, tạo nên các hợp chất có sự khác biệt lớn về điện tích bề mặt, kích thước, trọng lượng phân tử và các nhóm chức hóa học. Do tính chất không đồng nhất này, việc xác định chính xác cấu trúc hóa học cụ thể của NOM là một thách thức lớn; vì vậy, các tiểu nhóm NOM

thường được định nghĩa dựa trên tính chất vận hành hoặc chức năng để nhận diện các nhóm hóa chất có đặc tính tương tự. Một cách phân loại phổ biến là chia NOM thành hai phân đoạn: kỵ nước (hydrophobic) và ưa nước (hydrophilic) [2]. Trong đó, các axit kỵ nước (chủ yếu là hợp chất humic) chiếm phần lớn lượng carbon hữu cơ hòa tan (DOC) còn phân đoạn ưa nước (như carbohydrate và protein) thường tồn tại ở nồng độ thấp hơn.

Các nhà máy xử lý nước luôn nỗ lực giảm thiểu mức độ NOM đến mức thấp nhất, bởi lẽ lượng hữu cơ còn sót lại sau xử lý có thể gây ra những vấn đề nghiêm trọng trong WDS [3]. Mặc dù hầu hết các hợp chất NOM không gây độc trực tiếp, sự tồn tại kéo dài của chúng trong mạng lưới đường ống dẫn đến sự



Hình 1. Tóm tắt tác động của các thành phần NOM đến chất lượng nước trong hệ thống phân phối

suy giảm chất lượng nước đáng kể. Chẳng hạn, NOM gây ra sự tiêu hao các chất khử trùng dư vốn là yếu tố quan trọng để ngăn ngừa ô nhiễm vi sinh. Điều này tạo điều kiện cho màng sinh học phát triển, không chỉ làm hỏng cơ sở hạ tầng mà còn làm giảm độ an toàn của nguồn nước. Thêm vào đó, tương tác giữa NOM và vật liệu đường ống có thể thúc đẩy sự rửa trôi các kim loại nặng độc hại như chì và đồng, đồng thời làm tăng nồng độ của các chất ô nhiễm hữu cơ phức tạp. NOM cũng đóng vai trò là tiền chất hình thành DBPs, gây khó khăn cho công tác quản lý an toàn hóa học. Về mặt cảm quan, sự hiện diện của NOM gây ra các hiện tượng như nước bị đổi màu, có vị và mùi lạ, từ đó làm suy giảm niềm tin của người tiêu dùng đối với chất lượng nước được cung cấp [3].

Một trong những hạn chế lớn hiện nay là phương pháp đo lường và theo dõi các tiểu nhóm NOM trong WDS. Phần lớn các phương pháp đặc trưng hóa hiện nay vẫn đòi hỏi phải lấy mẫu thủ công và phân tích phức tạp trong phòng thí nghiệm [4]. Đặc thù của WDS yêu cầu khả năng giám sát trên một mạng lưới rộng lớn về mặt không gian, điều mà các phương pháp truyền thống khó lòng đáp ứng hiệu quả. Ngoài ra, các biến động theo mùa và các sự kiện khí hậu như lũ lụt hay hạn hán càng làm trầm trọng thêm thách thức quản lý do nồng độ NOM thay đổi thường xuyên [5]. Mặc dù các nghiên cứu về NOM trong nguồn nước thô và trong quá trình xử lý đã được thực hiện rất sâu rộng, nhưng động học của lượng NOM còn sót lại trong mạng lưới phân phối sau các quy trình xử lý truyền thống vẫn chưa được xem xét một cách toàn diện. Bài viết này tập trung vào vai trò, hành vi và tác động của NOM sau khi rời khỏi nhà máy xử lý và vận chuyển qua mạng lưới phân phối đến người tiêu dùng [6], [7].

2. TÁC ĐỘNG CỦA NOM ĐẾN CHẤT LƯỢNG NƯỚC TRONG HỆ THỐNG PHÂN PHỐI

Sự hiện diện của NOM sau quá trình xử lý không chỉ đơn thuần là vấn đề về nồng độ mà còn nằm ở các đặc tính lý hóa của các phân đoạn còn sót lại. Những đặc tính này quyết định các phản ứng hóa học, sinh học và thẩm mỹ của nước khi di chuyển qua mạng lưới phân phối (Hình 1).

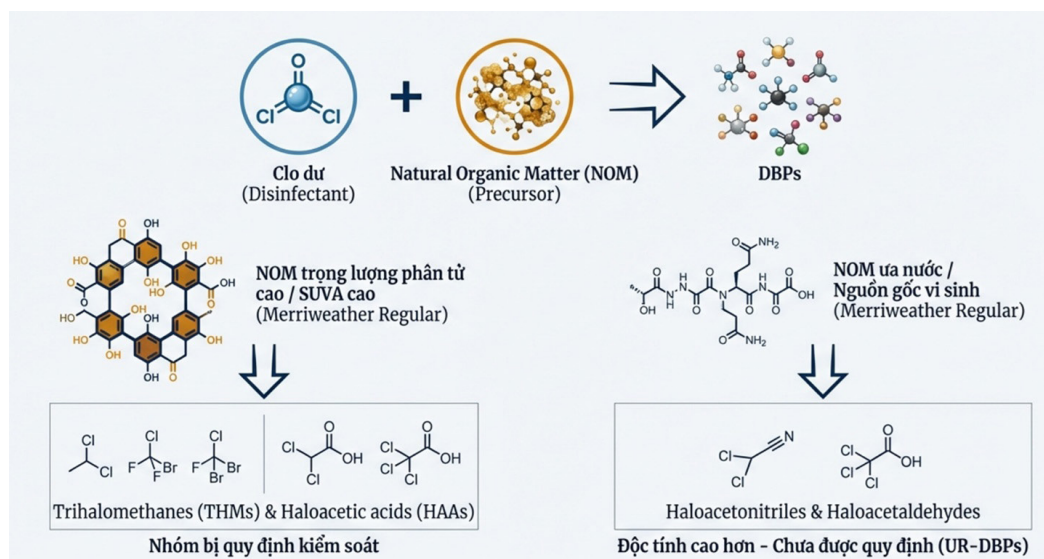
2.1. Tương tác với Clo và nghịch lý DBPs

Clo và các tác nhân khử trùng dựa trên clo phản ứng trực tiếp với NOM để tạo ra DBPs [2]. Việc duy trì clo dư là một chiến lược chủ động nhằm bảo vệ sức khỏe cộng đồng trước rủi ro tái nhiễm khuẩn. Tuy nhiên, điều này tạo ra một "nghịch lý khử trùng" khi clo phản ứng với NOM tạo thành DBPs.

Việc hình thành DBPs tiếp diễn ngay cả sau khi nước đã rời nhà máy xử lý, đặc biệt là trong các hệ thống có thời gian lưu nước kéo dài. Các nghiên cứu chỉ ra rằng nồng độ DBPs như Trihalomethanes (THMs) có thể tiếp tục tăng ngay cả khi thời gian lưu vượt quá 10 ngày [4]. Các phân đoạn NOM kỵ nước và có trọng lượng phân tử (MW) lớn là tiền chất chính tạo ra các THMs và HAAs (axit haloacetic) [5]. Ngược lại, phân đoạn ưa nước và MW thấp thường ưu tiên phản ứng với brom và iod. Chỉ số SUVA (độ hấp thụ UV254 chia cho nồng độ DOC) là một thước đo quan trọng; NOM có chỉ số SUVA cao (giàu tính thơm) liên quan mật thiết đến việc hình thành các DBPs carbonaceous [6] (Hình 2).

2.2. Ăn mòn và đóng cặn

NOM ảnh hưởng đến sự ổn định vật lý của WDS thông qua việc tác động đến tốc độ ăn mòn và đóng cặn kim loại [10]. Các axit kỵ nước (VHA) ít gây ăn mòn, nhưng sự gia tăng các axit ưa nước có điện tích



Hình 2. Sự hình thành DBPs

(CHA) làm tăng đáng kể tốc độ ăn mòn sắt [11]. Đối với ống đồng, nồng độ DOC trên 1,0 mg/L thúc đẩy sự rửa trôi kim loại (leaching) thông qua cơ chế tạo phức và huy động keo, độc lập với liều lượng hay tính kỵ nước [12]. Ngoài ra NOM hấp phụ mạnh lên các cặn ăn mòn, tạo môi trường thuận lợi cho vi khuẩn phát triển, từ đó gây ra hiện tượng ăn mòn do vi sinh vật thông qua hoạt động của vi khuẩn khử sắt (IRB) hoặc khử nitrat (NRB) [13]. Thêm nữa NOM tương tác với cân bằng canxi-cacbonat. Các phân tử hữu cơ trong NOM bám lên bề mặt tinh thể canxi, làm chậm tốc độ phát triển của chúng và thay đổi động học của các lớp lắng đọng trong đường ống [14].

2.3. Vận chuyển chất ô nhiễm

NOM có ái lực hấp phụ cao, đóng vai trò như một phương tiện vận chuyển các chất ô nhiễm trong toàn bộ hệ thống [15]. Với nhóm kim loại nặng gồm: Sắt (Fe) và Nhôm (Al) tạo phức mạnh với NOM, làm tăng độ hòa tan và độ ổn định của chúng, khiến nồng độ kim loại tại vòi nước của người dùng có thể cao hơn dự kiến. Ngược lại, Chì (Pb) và Kẽm (Zn) tạo phức yếu hơn nhưng vẫn bị ảnh hưởng đáng kể bởi đặc tính của NOM [16]. Với nhóm vi nhựa (Microplastics) thì NOM bám vào bề mặt vi nhựa tạo thành lớp "eco-corona", làm thay đổi các thuộc tính lý hóa của hạt nhựa, từ đó ảnh hưởng đến khả năng lắng đọng hoặc vận chuyển của chúng trong mạng lưới [15].

2.4. Động học vi sinh

NOM là nguồn dinh dưỡng quyết định tiềm năng tái phát triển vi khuẩn trong mạng lưới phân phối. Chỉ số ổn định sinh học: AOC (Carbon hữu cơ dễ oxy hóa) và BDOC (Carbon hữu cơ dễ phân hủy sinh học) là các chỉ số then chốt. Quá trình ozon hóa tại nhà

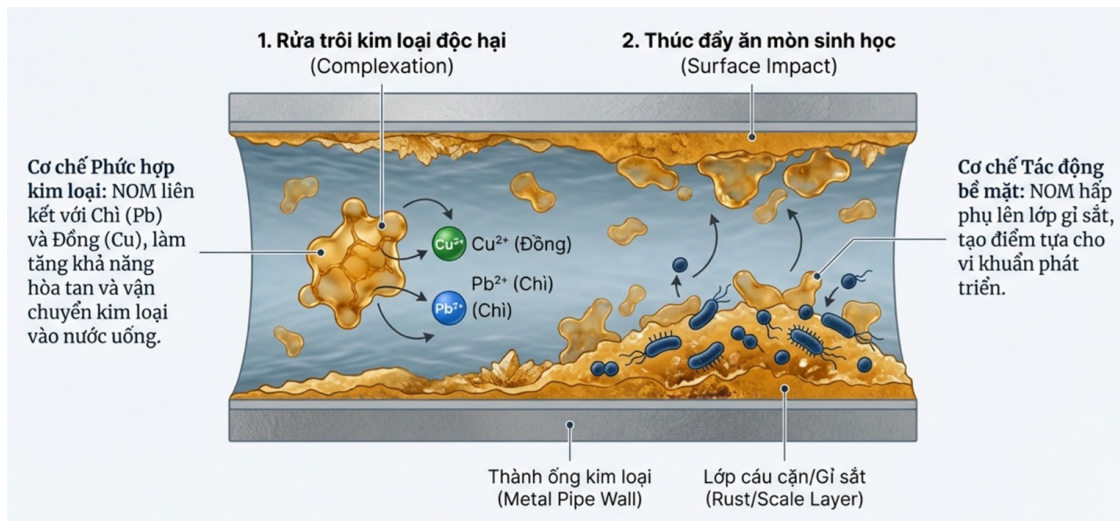
máy xử lý thường làm tăng tỷ lệ AOC và BDOC trong tổng TOC, khiến nước trở nên kém ổn định hơn về mặt sinh học [19]. Nồng độ AOC vượt quá 100 µg/L có liên quan trực tiếp đến sự phát triển (tăng 82%) số mẫu dương tính với coliform. Phân đoạn ưa nước (hydrophilic), giàu glucose và axit amin, được xác định là thành phần hỗ trợ mạnh mẽ nhất cho sự phát triển của vi khuẩn [20].

2.5. Cảm quan của nước

Các đặc tính của NOM ảnh hưởng trực tiếp đến cảm nhận của người sử dụng thông qua màu sắc và mùi, vị của nước sử dụng. Với màu sắc Axit humic và fulvic là nguyên nhân chính gây ra màu sắc từ vàng đến đen trong nước uống [21]. Với vị và mùi của nước chủ yếu do một số vi khuẩn sử dụng NOM để sản sinh ra geosmin và MIB gây mùi mốc đất. Ngoài ra, khi NOM giàu nitơ (như axit amin từ sự phân hủy màng sinh học) phản ứng với clo, chúng tạo ra các nitrile hoặc aldehyde gây mùi "swampy" (mùi đầm lầy) hoặc mùi thuốc tây khó chịu, có thể tồn tại trong hệ thống lên tới 21 ngày [22].

3. HỆ THỐNG ĐƯỜNG ỐNG CẤP NƯỚC TRONG NHÀ

Hệ thống đường ống cấp nước trong nhà bao gồm mạng lưới đường ống, phụ kiện và thiết bị bên trong các tòa nhà, có nhiệm vụ phân phối nước từ đường ống cấp nước ngoài nhà của thành phố đến các thiết bị. Các điều kiện trong hệ thống này khác biệt đáng kể so với mạng lưới phân phối ngoài nhà do đường kính ống nhỏ hơn, vật liệu đa dạng, sự thay đổi thường xuyên về lưu lượng và áp suất, cùng với thời gian lưu nước (đọng lại) kéo dài. Những đặc điểm này khiến hệ thống trong nhà dễ bị suy giảm chất lượng nước và trở thành môi trường nuôi cấy các mầm bệnh [1] (Hình 3).



Hình 3. Tương tác giữa NOM và đường ống

3.1. Động học ăn mòn và hành vi của chất ô nhiễm

NOM đóng vai trò là yếu tố quyết định trong việc giải phóng các kim loại nặng, đặc biệt là chì (Pb^{2+}) thông qua quá trình ăn mòn galvanic [2]. Các nghiên cứu cho thấy sự hiện diện của NOM làm tăng đáng kể nồng độ Chì hòa tan. Minh chứng là khi bổ sung NOM ở nồng độ 7 mg C/L, nồng độ chì hòa tan trung bình tăng thêm 2320 $\mu\text{g/L}$. Cơ chế này là do NOM có khả năng tạo phức hợp với chì, làm huy động chì hòa tan và ảnh hưởng đến sự phân tán của các hạt keo giàu chì. Đặc biệt, các axit humic làm tăng khả năng hòa tan Chì (plumbosolvency) thông qua việc giữ kim loại trong dung dịch. Ngoài ra NOM có tác động kép đối với Đồng. Một mặt, NOM có thể ức chế hoạt tính xúc tác của đồng trong việc hình thành N-nitrosodimethylamine (NDMA) bằng cách tiêu thụ nhanh chloramine và cạnh tranh tạo phức với Đồng. Mặt khác, nồng độ Cu (II) cao lại có thể xúc tác hình thành DBPs trong quá trình clo hóa các hợp chất humic, làm tăng tiềm năng tạo ra THM và HAA [3]. Cuối cùng NOM làm giảm khả năng giữ lại của các kim loại trên vảy ăn mòn, làm tăng tính di động và sự rửa trôi của chúng vào nước uống. Trong hệ thống cấp nước trong nhà, các khoảng thời gian nước đọng và lưu lượng thay đổi làm tăng thời gian tiếp xúc giữa nước, NOM và vật liệu ống, từ đó đẩy cao rủi ro hình thành phức hợp kim loại-NOM [4].

3.2. Chloramine và quá trình Nitrat hóa

Chloramine thường được ưu tiên sử dụng trong đường ống cấp nước trong nhà nhờ tính ổn định lâu dài và khả năng kiểm soát vi khuẩn màng sinh học tốt hơn clo tự do. Tuy nhiên, sự tồn tại của NOM dẫn đến các thách thức về sinh học bao gồm:

- *Sự phân hủy Chloramine*: NOM tương tác với monochloramine, thúc đẩy sự phân hủy của nó và giải

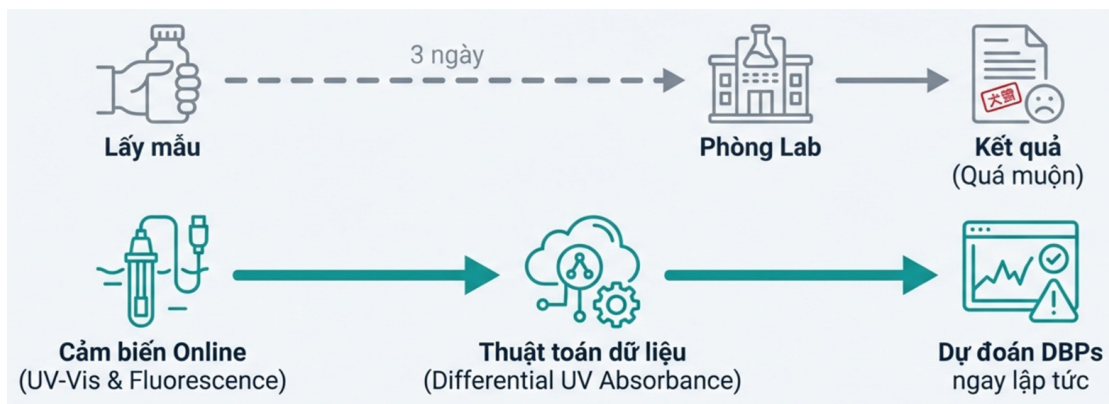
phóng amoniac tự do vào hệ thống. Amoniacc này trở thành chất nền cho các vi khuẩn oxy hóa amoniacc, dẫn đến quá trình nitrat hóa [5].

- *Biến đổi đặc tính NOM*: Quá trình nitrat hóa làm thay đổi thành phần hữu cơ trong nước. Sử dụng kỹ thuật phổ huỳnh quang (FEEM/PARAFAC), nghiên cứu đã phát hiện ra sự xuất hiện của các hợp chất giống vi sinh vật và protein trong nước đã bị nitrat hóa, trong khi nước chưa nitrat hóa chủ yếu chứa các hợp chất humic nguồn gốc từ đất. Điều này cho thấy chất hữu cơ vừa là chất nền vừa là sản phẩm phụ của hoạt động vi sinh trong quá trình nitrat hóa [5].

- *Tăng khả năng chống chịu của vi khuẩn*: NOM trong các hệ thống sử dụng chloramine còn giúp vi khuẩn hiếu khí trong màng sinh học tăng khả năng chống lại các chất khử trùng dư, làm trầm trọng thêm vấn đề nitrat hóa [6].

4. KỸ THUẬT ĐẶC TRƯNG HÓA VÀ GIÁM SÁT NOM

Sự phức tạp và biến đổi không ngừng của NOM đặt ra những thách thức lớn trong việc hiểu rõ hành vi của chúng trong mạng lưới WDS. Để hiểu rõ bản chất đa chiều của NOM đòi hỏi sự kết hợp giữa các phương pháp định lượng truyền thống và kỹ thuật phân tích cấu trúc chuyên sâu, với các kỹ thuật đặc trưng hóa chuyên sâu sẽ làm rõ được cả phương diện cấu trúc và chức năng của hỗn hợp NOM. Các phương pháp truyền thống được sử dụng bao gồm: TOC, DOC và UV254 vẫn là những chỉ số phổ biến nhất nhờ tính nhanh chóng và chi phí thấp, tuy nhiên chúng chỉ cung cấp thông tin định lượng tổng quát mà không thể phân biệt được các tiểu nhóm NOM cụ thể. Để làm rõ cấu trúc và đặc tính chức năng, các kỹ thuật phân tích chuyên sâu như: phổ huỳnh quang (EEM-PARAFAC), sắc ký loại trừ kích thước (HPSEC), và khối phổ phân



Hình 4. Kỹ thuật giám sát thời gian thực dự báo hình thành DBPs

giải cao (FTICR-MS) được sử dụng để xác định trọng lượng phân tử, các nhóm chức và nguồn gốc của NOM (từ đất hay vi sinh vật). Tuy nhiên hai nhóm phương pháp này đòi hỏi lấy mẫu thủ công và mất thời gian phân tích. Để giải quyết các hạn chế này việc ứng dụng các cảm biến quang học trực tuyến (UV-Vis và huỳnh quang vi sai) cho phép dự báo tiềm năng hình thành DBPs và theo dõi sự thay đổi chất lượng nước trong thời gian thực (Real-time monitoring) mà không cần lấy mẫu thủ công. Đây là xu hướng và là giải pháp hiệu quả giúp các đơn vị quản lý

nhận diện và ứng phó kịp thời với các sự cố ô nhiễm đột xuất một cách hiệu quả (Hình 4).

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này khẳng định rằng NOM trong WDS là một yếu tố phức tạp, ảnh hưởng đa chiều đến chất lượng nước uống, từ việc thúc đẩy sự hình thành các sản phẩm phụ khử trùng (DBPs), tốc độ ăn mòn, đến việc cung cấp dinh dưỡng cho màng sinh học phát triển. Để giải quyết các thách thức về an toàn hóa học, đặc biệt là việc giám sát sự hình thành DBPs trong

Bảng 1. Tóm tắt các kỹ thuật mô tả NOM áp dụng trong hệ thống phân phối nước

Kỹ thuật	Đặc điểm	Ưu điểm	Nhược điểm
Phổ huỳnh quang (Fluorescence Spectroscopy)[23].	Kích thích các phân tử bằng các bước sóng cụ thể và đo bức xạ phát ra; các chất phát quang (fluorophores) giúp phân tích thành phần cấu trúc của các vật liệu giống humic và protein trong NOM.	Nhanh, nhạy và có tính chọn lọc; yêu cầu thể tích mẫu nhỏ; không yêu cầu hoặc yêu cầu rất ít quá trình tiền xử lý mẫu; có tiềm năng giám sát trực tuyến (on-line).	Nhạy cảm với môi trường; giới hạn ở các thành phần có khả năng phát huỳnh quang; bị nhiễu bởi các hợp chất khác; việc giải thích dữ liệu phức tạp; yêu cầu thiết bị và chuyên môn chuyên dụng.
Phân tích huỳnh quang (Peak Picking hoặc Single Point Monitoring)[23],[24].	Đo cường độ huỳnh quang tại các điểm bước sóng cụ thể; ít thâm dụng dữ liệu hơn so với phân tích toàn phổ.	Thời gian đo nhanh hơn so với EEM đầy đủ; thiết bị đơn giản hơn; có thể tiết kiệm chi phí hơn; phù hợp để giám sát theo thời gian thực hoặc trên đường ống (inline).	Cung cấp thông tin hạn chế so với EEM; có thể bỏ lỡ một số đặc tính huỳnh quang không nằm trong các bước sóng đã chọn; không phù hợp cho các nền mẫu nước phức tạp.
Phân tích huỳnh Quang (Spectrum/EEM Analysis) [23],[24]	Sử dụng các kỹ thuật như nhận dạng đỉnh, chỉ số vùng huỳnh quang (FRI) và các phương pháp hóa học để đánh giá quá trình xử lý nước, hiệu hành vi của chất hữu cơ hòa tan (DOM), và theo dõi các chất ô nhiễm vi lượng cũng như DBPs.	Tăng cường tính đa chiều và độ nhạy; hiệu quả trong việc định tính và định lượng DOM; hữu ích cho phân tích đa biến.	Dễ bị ảnh hưởng bởi thay đổi thời tiết; giới hạn ở các thành phần hữu cơ phát huỳnh quang; khó khăn trong việc thiết lập tương quan với các thông số; cần thêm các thiết bị bổ sung.

UV-Vis [25].	Đo độ hấp thụ của tia cực tím và ánh sáng khả kiến trên một dải bước sóng; xác định sự phong phú, chất lượng, nguồn gốc và khả năng phản ứng của các biến thể cấu trúc NOM.	Chi phí thấp; độ nhạy cao; dễ sử dụng; thời gian đo nhanh.	Nhiều phân đoạn NOM hấp thụ ánh sáng khiến phổ UV-Vis thường không rõ ràng; các hợp chất khác có thể làm gián đoạn phép đo.
Phổ cộng hưởng từ hạt nhân (NMR Spectroscopy)[26].	Được sử dụng để nghiên cứu các nhóm chức trong NOM thông qua các kỹ thuật khác nhau như ¹³ C, ¹ H, ¹⁵ N và NMR 2 chiều.	Phân tích được cả mẫu rắn và lỏng; cung cấp thông tin chi tiết về cấu trúc thông qua các kỹ thuật NMR đa chiều.	NOM có tính phức tạp và không đồng nhất cao; kỹ thuật phức tạp và chi phí lớn; khả năng định lượng hạn chế.
Phân đoạn bằng nhựa (Resin Fractionation) [27].	Phương pháp phân đoạn hóa học và vật lý sử dụng nhựa (Amberlite XAD) dựa trên tính phân cực; sử dụng các phương pháp cô lập tiêu chuẩn hóa.	Cô lập và phân loại được các nhóm NOM; phương pháp được chấp nhận rộng rãi; cho phép phân tách chi tiết các thành phần.	Có khả năng làm thay đổi bản chất NOM do thay đổi pH; xảy ra hiện tượng hấp phụ không thuận nghịch hoặc rò rỉ nhựa; điều kiện vận hành thay đổi ảnh hưởng đến kết quả.
HPSEC (Sắc ký loại trừ kích thước hiệu năng cao) [27].	Phân tách các phân tử dựa trên kích thước phân tử, trong đó các phân tử lớn hơn sẽ được rửa giải nhanh hơn.	Phân tích định tính NOM; có thể cung cấp ước tính thô về định lượng khi kết hợp với UV-Vis; không cần chiết tách trước; tốc độ nhanh và độ nhạy cao; thiết bị sẵn có.	Lựa chọn dung môi rửa giải ảnh hưởng đến kết quả; tương tác hấp phụ và hiệu ứng loại trừ điện tích có thể ảnh hưởng đến độ chính xác.
Py-GC-MS (Sắc ký khí - Khối phổ nhiệt phân) [27], [28].	Các phân tử NOM được tháo rời thành các mảnh nhỏ hơn bằng nhiệt trong điều kiện thiếu oxy, sau đó được đưa vào cột sắc ký khí để phát hiện qua khối phổ.	Tháo rời các phân tử NOM để phân tích; nhiệt phân trong bình kín quy mô nhỏ giúp tăng hiệu suất; khả năng phân tách mạnh và độ nhạy cao; cung cấp thông tin chi tiết về cấu trúc.	Giới hạn ở các hợp chất dễ bay hơi; thách thức lớn trong việc giải thích các phổ phức tạp.
FTICR-MS (Khối phổ cộng hưởng từ ion cyclotron biến đổi Fourier) [29].	Phân tách hiệu quả các ion và xác định gần như chính xác công thức phân tử; thường dùng kết hợp với các kỹ thuật như Ion hóa phun điện tử (ESI).	Xác định công thức phân tử chính xác; độ chính xác khối lượng và độ nhạy cực cao; tiết lộ các kiểu phân mảnh, nhóm chức và kết nối phân tử.	Đắt tiền và yêu cầu chuyên môn kỹ thuật cao; nhạy cảm với các chất gây nhiễm bẩn và tốn nhiều thời gian phân tích.

mạng lưới, bài báo nhấn mạnh vai trò của chỉ số SUVA và các cảm biến quang học trực tuyến (như UV-Vis và huỳnh quang vi sai). Các kỹ thuật này cho phép dự báo tiềm năng hình thành các hợp chất như THMs và HAAs trong thời gian thực (real-time monitoring) mà không cần qua các bước lấy mẫu và phân tích thủ công phức tạp.

Bên cạnh đó, việc hiểu rõ bản chất của các tiền chất DBPs đòi hỏi sự hỗ trợ từ các kỹ thuật đặc trưng hóa cấu trúc chuyên sâu như phổ huỳnh quang (EEM-PARAFAC), sắc ký loại trừ kích thước (HPSEC) và

khối phổ phân giải cao (FTICR-MS) để xác định trọng lượng phân tử và các nhóm chức đặc trưng. Sự chuyển dịch từ quản lý nồng độ tổng quát (TOC/DOC) sang đặc trưng hóa chi tiết đặc tính cấu trúc (tính thơm, phân đoạn kỵ nước/ưa nước) là điều kiện tiên quyết để tối ưu hóa quản lý dư lượng khử trùng và đảm bảo an toàn nước từ nhà máy đến tận vòi tiêu dùng. Các nghiên cứu tương lai nên tập trung xây dựng mô hình dự báo dựa trên các chỉ số quang học này để nâng cao khả năng ứng phó kịp thời với các biến đổi chất lượng nước trong đô thị. ■



TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Riyadh, A.; Peleato, N.M. (2024). *Natural Organic Matter Character in Drinking Water Distribution Systems: A Review of Impacts on Water Quality and Characterization Techniques*. *Water*, 16(3), 446.
2. Chen, W.; Yu, H.-Q. (2021). *Advances in the Characterization and Monitoring of Natural Organic Matter Using Spectroscopic Approaches*. *Water Res.*
3. Matilainen, A. et al. (2011). *An Overview of the Methods Used in the Characterisation of Natural Organic Matter (NOM) in Relation to Drinking Water Treatment*. *Chemosphere*.
4. Hayes, M.H.B.; Swift, R.S. (2020). *Vindication of Humic Substances as a Key Component of Organic Matter in Soil and Water*. *Advances in Agronomy*.
5. Sillanpää, M. (2014). *Natural Organic Matter in Water: Characterization and Treatment Methods*. Butterworth-Heinemann.
6. Kennedy, A. et al. (2021). *Regulated Disinfection Byproduct Formation over Long Residence Times*. *Water Res.*
7. Hua, G.; Reckhow, D.A. (2007). *Characterization of Disinfection Byproduct Precursors Based on Hydrophobicity and Molecular Size*. *Environ. Sci. Technol.*
8. Hua, G. et al. (2015). *Correlation between SUVA and DBP Formation during Chlorination and Chloramination of NOM Fractions from Different Sources*. *Chemosphere*.
9. Zhao, Y. et al. (2018). *The Dependence of Chlorine Decay and DBP Formation Kinetics on Pipe Flow Properties in Drinking Water Distribution*. *Water Res.*
10. Poleneni, S.R.; Inniss, E.C. (2019). *Array of Prediction Tools for Understanding Extent of Wall Effects on DBP Formation in Drinking Water Distribution Systems*. *J. Water Supply Res. Technol.-AQUA*.
11. Gruškeviča, K. et al. (2008). *Influence of Water Velocity and NOM Composition on Corrosion of Iron Pipes. Materials and Related Substances in Drinking Water*.
12. Korshin, G.V. et al. (1996). *Influence of NOM on Copper Corrosion*. *J.-Am. Water Work. Assoc.*
13. Ali, I. et al. (2022). *Interaction of Microplastics and Nanoplastics with Natural Organic Matter (NOM) and the Impact of NOM on the Sorption Behavior of Anthropogenic Contaminants*. *J. Clean. Prod.*
14. Dalmau-Soler, J. et al. (2022). *Microplastics throughout a Tap Water Supply Network*. *Water Environ. J.*
15. Peng, C.-Y. et al. (2013). *Effects of Chloride, Sulfate and Natural Organic Matter (NOM) on the Accumulation and Release of Trace-Level Inorganic Contaminants from Corroding Iron*. *Water Res.*
16. LeChevallier, M.W. et al. (1996). *Full-Scale Studies of Factors Related to Coliform Regrowth in Drinking Water*. *Appl. Environ. Microbiol.*
17. Sambo, S.P. et al. (2020). *Quantification of Biodegradable Natural Organic Matter (NOM) Fractions and Its Impact on Bacterial Regrowth in a South African Water Treatment Plant*. *J. Water Process Eng.*
18. Terry, L.G.; Summers, R.S. (2018). *Biodegradable Organic Matter and Rapid-Rate Biofilter Performance: A Review*. *Water Res.*
19. Fish, K.E. et al. (2016). *Characterising and Understanding the Impact of Microbial Biofilms and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) Matrix in Drinking Water Distribution Systems*. *Environ. Sci. Water Res. Technol.*
20. Abokifa, A.A. et al. (2016). *Investigating the Role of Biofilms in Trihalomethane Formation in Water Distribution Systems with a Multicomponent Model*. *Water Res.*
21. Arnold, R.B. (2011). *New Insights into Lead and Copper Corrosion: Impacts of Galvanic Corrosion, Flow Pattern, Potential Reversal, and Natural Organic Matter*. *Master's Thesis*.
22. King, P.W. et al. (2022). *Role of Natural Organic Matter and Hardness on Lead Release from Galvanic Corrosion*. *Environ. Sci. Water Res. Technol.*
23. Moradi, S. et al. (2018). *Tracking Changes in Organic Matter during Nitrification Using Fluorescence Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Coupled with Parallel Factor Analysis (FEEM/PARAFAC)*. *J. Environ. Chem. Eng.*
24. Zhang, Y.; Edwards, M. (2009). *Accelerated Chloramine Decay and Microbial Growth by Nitrification in Premise Plumbing*. *J. Am. Water Work. Assoc.*
25. Nguyen, H.V.-M. et al. (2023). *Fluorescence Spectroscopy in the Detection and Management of Disinfection By-Product Precursors in Drinking Water Treatment Processes: A Review*. *Chemosphere*.
26. Stéphanie, G.; Caetano, D. (2020). *Real-Time Estimation of Disinfection By-Products through Differential UV Absorbance*. *Water*.
27. Korshin, G. et al. (2008). *Real Time Monitoring of Disinfection By-Products Using Differential UV Spectroscopy*. *Water*.
28. Dong, F. et al. (2022). *Spatio-Temporal Variability of Halogenated Disinfection by-Products in a Large-Scale Two-Source Water Distribution System with Enhanced Chlorination*. *J. Hazard. Mater.*
29. Weiss, W.J. et al. (2013). *Minimizing Raw Water NOM Concentration through Optimized Source Water Selection*. *J. Am. Water Work. Assoc.*