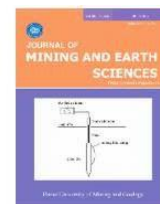




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Assessment of eutrophication in Yen So Lake using Sentinel-2 images and Co-kriging



Thao Phuong Thien Nguyen¹, Loan Kieu Pham¹, Ha Thu Thi Nguyen^{1,*},
Thuy Thu Thi Vu²

¹ Faculty of Geology, VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi, Vietnam

² Faculty of Geography, Hanoi National University of Education, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31st Mar. 2025

Revised 29th July 2025

Accepted 16th Aug. 2025

Keywords:

Eutrophication,
Modelling,
Sentinel 2,
TSI,
Yen So Lake.

ABSTRACT

This study aims to map the spatial distribution of the trophic state index (TSI) in Yen So Lake utilizing an in-situ dataset of Chlorophyll-a (Chla) collected from 23 sampling points within the Yen So Lake on 29/11/2021; 3/4/2022; 14/12/2023 and 69 sampling points in West Lake on 4/12/2021; 18/1/2022; 7/7/2023 coupled with Sentinel-2 (S2) satellite imagery acquired on these dates, thereby helping to optimize assessment of eutrophication in Yen So Lake. By leveraging the correlation between TSI_{Chla} and the spectral ratio of band 7 to band 3 of the S2 images (with a correlation coefficient of 0.83), this band ratio was incorporated as an auxiliary variable to enhance the accuracy of Co-kriging predictions, with a notable improvement in the determination coefficients (R^2) and the standard errors (RMSE), increasing from $0.17 \div 0.63$ to $0.67 \div 0.89$ and from $2.33 \div 4.22$ to $0.32 \div 0.58$, respectively. The results show that Yen So Lake is hypertrophic with $TSI_{Chla} > 78$ at all measurement times. The TSI_{Chla} values exhibited seasonal variations, being lower during the dry season (November to December) and higher during the rainy season (April). Spatially, elevated TSI_{Chla} values were primarily observed near the drainage channel inlets along the lakeshore and in the three smaller lakes within Yen So Park. These findings highlight the utility of S2 imagery as an effective tool for monitoring and evaluating eutrophication in Yen So Lake.

Copyright © 2025 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: hannt_kdc@vnu.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).05



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>

Đánh giá mức độ phú dưỡng nước cụm hồ điều hòa Yên Sở sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 và Co-kriging

Nguyễn Thiên Phương Thảo¹, Phạm Kiều Loan¹, Nguyễn Thị Thu Hà^{1,*}, Vũ Thị Thu Thủy²

¹ Khoa Địa chất, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

² Khoa Địa lý, Trường Đại học Sư phạm Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 31/3/2025

Sửa xong 29/7/2025

Chấp nhận đăng 16/8/2025

Từ khóa:

Hồ Yên Sở,
Mô hình hóa,
Phú dưỡng,
Sentinel 2,
TSI.

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm mô hình hóa sự phân bố không gian của chỉ số dinh dưỡng nước hồ (TSI: trophic state index) trong hồ Yên Sở dựa vào dữ liệu ảnh Sentinel 2 (S2) và số liệu đo đạc thực tế hàm lượng Chlorophyll-a (Chla) thu được từ 23 điểm khảo sát trên hồ Yên Sở ngày 29/11/2021; 3/4/2022; 14/12/2023 và 69 điểm khảo sát trên hồ Tây ngày 4/12/2021; 18/1/2022; 7/7/2023, từ đó tối ưu hóa việc đánh giá hiện trạng phú dưỡng cụm hồ này. Dựa vào sự tương quan cao giữa TSI_{Chla} và tỷ số kênh 7/kênh 3 của ảnh S2 (hệ số tương quan, $r = 0,83$), tỷ số này được sử dụng như thông tin bổ trợ giúp cải thiện độ chính xác của mô hình co-kriging trong lập bản đồ phân bố không gian của TSI_{Chla} (R^2 từ $0,17 \div 0,63$ lên $0,67 \div 0,89$; RMSE từ $2,33 \div 4,22$ xuống còn $0,32 \div 0,58$). Kết quả cho thấy nước hồ đang ở trạng thái siêu phú dưỡng với giá trị $TSI_{Chla} > 78$ tại mọi thời điểm khảo sát. Giá trị TSI_{Chla} có sự thay đổi nhẹ theo thời gian, cụ thể giá trị TSI_{Chla} có xu hướng thấp hơn trong mùa khô (tháng 11-12) và tăng cao hơn trong mùa mưa (tháng 4). Theo không gian, giá trị TSI_{Chla} cao tập trung ở cửa các cống thoát nước ven hồ và ba hồ nhỏ thuộc công viên Yên Sở. Nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng lớn của ảnh vệ tinh S2 trong việc hỗ trợ đánh giá và giám sát mức độ phú dưỡng của hồ Yên Sở.

© 2025 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: hantt_kdc@vnu.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).05

1. Mở đầu

Thủ đô Hà Nội là một trong những đô thị có mật độ hồ dày đặc rải rác khắp thành phố (CECR, 2015). Các hồ đô thị không chỉ đóng vai trò quan trọng trong việc điều tiết nước mưa, giảm thiểu ngập úng, bảo tồn đa dạng sinh học mà còn hỗ trợ sinh kế cho cộng đồng dân cư. Tuy nhiên, tương tự như nhiều hồ đô thị trên thế giới, các hồ đô thị tại Hà Nội đang phải đối mặt với nguy cơ suy thoái nghiêm trọng do tác động của đô thị hóa, biến đổi khí hậu, ô nhiễm môi trường, và đặc biệt là hiện tượng phú dưỡng (Do và nnk. 2023). Hiện tượng này được biểu hiện qua sự bùng phát của tảo độc microcystins (Ha và nnk., 2015; Duong và nnk., 2014), sự giảm sút nồng độ oxy hòa tan trong nước (Hoang và nnk., 2020), và thậm chí là hiện tượng cá chết hàng loạt. Đáng lưu ý, các hồ trong khu vực đô thị thường chịu áp lực phú dưỡng lớn hơn so với các hồ ngoại ô, do chúng thường xuyên tiếp nhận lượng lớn chất thải hữu cơ từ các khu dân cư đông đúc lân cận (Xiangcan, 2003). Chính vì vậy, việc tiến hành các nghiên cứu nhằm đánh giá mức độ phú dưỡng của hồ và nhận diện các nguy cơ tiềm ẩn liên quan đến quá trình này là cần thiết, nhằm cung cấp cơ sở khoa học phục vụ công tác quản lý môi trường tại địa phương, từ đó hỗ trợ việc xây dựng các biện pháp chủ động và hiệu quả nhằm phòng ngừa các sự cố môi trường có thể xảy ra.

Hiện nay, có nhiều chỉ số đánh giá mức độ phú dưỡng của nước hồ được áp dụng trên thế giới, trong đó chỉ số trạng thái dinh dưỡng (TSI: Trophic State Index) do Carlson đề xuất vào năm 1977 được sử dụng rộng rãi hơn cả nhờ tính khả thi cao trong việc thu thập dữ liệu đầu vào và khả năng phản ánh toàn diện các khía cạnh của hiện tượng phú dưỡng (Cheng và Lei, 2001). TSI được tính toán từ một hoặc ba thông số chính là tổng phốt pho (TP), độ sâu đĩa Secchi (SD) và hàm lượng Chlorophyll-a (Chla). Mỗi thông số đại diện cho một khía cạnh đặc trưng của môi trường nước: TP phản ánh hàm lượng dinh dưỡng (hóa học), SD đại diện cho đặc tính quang học (vật lý), còn Chla phản ánh mật độ sinh vật phù du, đặc biệt là tảo (sinh học). Nhờ đó, giá trị TSI cung cấp cái nhìn tổng thể về tình trạng phú dưỡng từ cả ba góc độ: hóa học - vật lý - sinh học. Trong ba thông số nói trên, Chla được xem là biến số chủ chốt để đánh giá mức độ phú dưỡng, do phản ánh trực

tiếp sinh khối tảo trong nước - một chỉ dấu rõ nét về sức khỏe của hệ sinh thái thủy sinh, vượt trội hơn so với chỉ số gián tiếp như tổng nitơ và tổng phốt pho (Håkanson và nnk., 2007). Bên cạnh đó, TSI là một giá trị số dao động từ 0 đến 100, điều này giúp việc tính toán và mô hình hóa theo không gian và thời gian trở nên thuận lợi, đồng thời hỗ trợ hiệu quả trong việc so sánh và nhận diện các nguồn gây ô nhiễm (Prasad và Siddaraju, 2012; Linh và nnk., 2019).

Tại Hà Nội, cụm hồ điều hòa Yên Sở - bao gồm năm hồ lớn nhỏ với tổng diện tích mặt nước khoảng 132,8 ha - là một hệ thống hồ quan trọng ở phía Nam thành phố. Ngoài chức năng điều tiết nước mưa, giảm thiểu ngập úng và tạo cảnh quan sinh thái, hồ còn là nguồn cung cấp nước cho hoạt động nuôi trồng thủy sản của người dân địa phương. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, hồ Yên Sở đang phải đối mặt với tình trạng ô nhiễm nghiêm trọng và thậm chí hiện tượng cá chết hàng loạt đã được ghi nhận (Văn Yên, 2022; Nguyễn Ngân, 2019). Mặc dù vậy, cho đến nay vẫn chưa có nghiên cứu định lượng cụ thể nào đánh giá mức độ phú dưỡng của hồ Yên Sở cũng như sự biến động của nó theo không gian và thời gian. Bên cạnh đó, một trong những trở ngại lớn đối với việc đánh giá hiện trạng phú dưỡng tại hồ Yên Sở là điều kiện tiếp cận hiện trường còn nhiều hạn chế do thiếu phương tiện chuyên dụng như thuyền hoặc phao khảo sát, khiến cho việc thu thập dữ liệu thực tế không đầy đủ và thiếu tính đại diện. Trước thực tế đó, trong bối cảnh khoa học công nghệ ngày càng phát triển, việc sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh trong giám sát tình trạng phú dưỡng nước hồ đã đạt được nhiều thành tựu quan trọng giúp vượt qua những khó khăn của phương pháp khảo sát truyền thống (Membrillo-Abad, 2016). Đặc biệt, từ khi vệ tinh Sentinel 2 (S2, bao gồm cả Sentinel 2A và Sentinel 2B) được phóng lên quỹ đạo, việc giám sát tình trạng phú dưỡng của các hồ đô thị đã có những cơ hội mới nhờ nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh độ phân giải không gian cao (10 m), chu kỳ thu dữ liệu ngắn (5 ngày) và hoàn toàn miễn phí.

Dựa trên kinh nghiệm quốc tế và hiệu quả của công nghệ địa không gian trong giám sát tài nguyên môi trường, nghiên cứu này hướng đến việc tìm ra giải pháp nhằm đánh giá toàn diện hiện trạng phú dưỡng của cụm hồ điều hòa Yên Sở tại ba thời điểm khảo sát: ngày 29/11/2021,

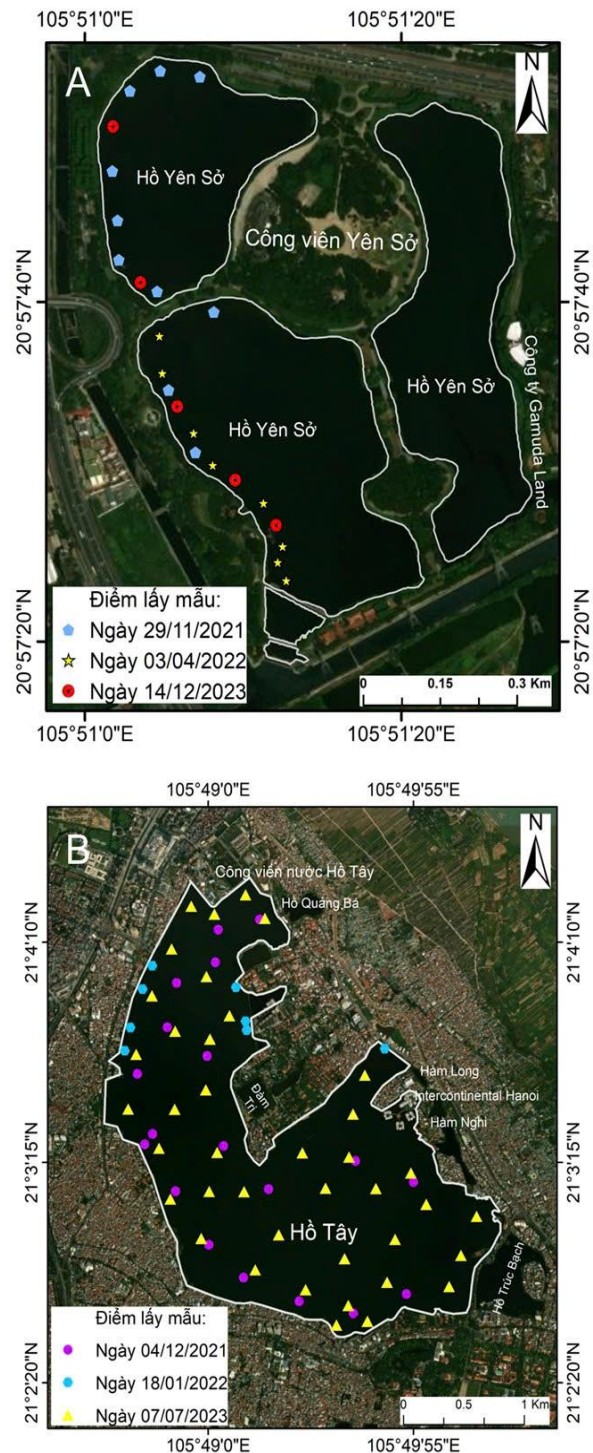
3/4/2022, và 14/12/2023. Trong điều kiện số lượng và phân bố các điểm quan trắc trên hồ bị hạn chế, nghiên cứu tập trung xác định các thông số hỗ trợ từ ảnh vệ tinh S2 chụp cùng ngày khảo sát nhằm cải thiện độ chính xác trong việc ước tính chỉ số TSI_{Chla} theo không gian bằng mô hình Co-kriging. Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp cơ sở khoa học và dữ liệu quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả trong việc giám sát nhanh hiện trạng phú dưỡng, quản lý môi trường nước, và bảo vệ hệ sinh thái hồ Yên Sở.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Phương pháp đo đạc và xác định các thông số chất lượng nước

Nhóm nghiên cứu đã thực hiện thu thập tổng cộng 23 điểm thuộc cụm hồ điều hòa Yên Sở trong ba đợt khảo sát: đợt 1 vào ngày 29/11/2021, đợt 2 vào ngày 03/04/2022, và đợt 3 vào ngày 14/12/2023. Tại mỗi điểm khảo sát, mẫu nước được thu thập để phân tích hàm lượng Chla trong phòng thí nghiệm, đồng thời vị trí của các điểm khảo sát được xác định bằng GPS (Hình 1A). Tuy nhiên, do hạn chế về phương tiện tiếp cận lòng hồ, các mẫu nước chỉ được lấy từ các điểm ven bờ, gần các cống xả thải tại hai hồ nhỏ thuộc công viên Yên Sở, nơi có giá trị hàm lượng Chla tương đối cao. Nhằm đảm bảo sự biến thiên từ thấp đến cao của hàm lượng Chla và giá trị TSI_{Chla} để xác định mối tương quan chính xác với dữ liệu ảnh vệ tinh, nghiên cứu bổ sung 69 điểm khảo sát tại Hồ Tây (Hình 1B) - hồ có điều kiện khá tương đồng với hồ Yên Sở nhưng có giá trị hàm lượng Chla thấp hơn, giúp mở rộng dải biến thiên dữ liệu. Dữ liệu của Hồ Tây bổ sung trong nghiên cứu này được nhóm tác giả thu thập vào ngày 04/12/2021, 18/01/2022 và 07/07/2023 với các điểm đo được lựa chọn nhằm phản ánh được đầy đủ sự thay đổi của thông số chất lượng nước và thuận tiện cho việc khảo sát như khuyến cáo của Karabok (2010).

Theo đó, toàn bộ mẫu nước được thu thập ở độ sâu 0÷30 cm ngay trên bề mặt và mang về phân tích trong ngày nhằm xác định hàm lượng Chla. Quá trình phân tích tuân theo phương pháp đo phổ chuẩn TCVN 6662:2000, với sự hỗ trợ của thiết bị quang phổ tử ngoại khả kiến UV-VIS Hach DR6000 (Hoa Kỳ).



Hình 1. Vị trí các điểm lấy mẫu tại 2 hồ:
A- Hồ Yên Sở, B- Hồ Tây.

Cuối cùng, mức độ phú dưỡng của nước hồ được xác định thông qua TSI được tính toán từ Chla (TSI_{Chla}) theo công thức của Carlson và Simpson (1996), cụ thể như sau:

$$TSI_{Chla} = 9,81 * \ln(Chla) + 30,6 \quad (1)$$

Trong đó: TSI_{Chla} - đại lượng không thứ nguyên, Chla có đơn vị là $\mu g/L$. Dựa vào giá trị TSI_{Chla} , trạng thái phú dưỡng của hồ được phân thành 4 mức độ: 1) nghèo dinh dưỡng với $TSI_{Chla} < 30$; 2) dinh dưỡng trung bình khi TSI_{Chla} dao động từ 30 đến 50; 3) phú dưỡng trong khoảng TSI_{Chla} từ 50 đến 70; 4) siêu phú dưỡng khi TSI_{Chla} vượt ngưỡng 70.

2.2. Phương pháp xử lý ảnh vệ tinh

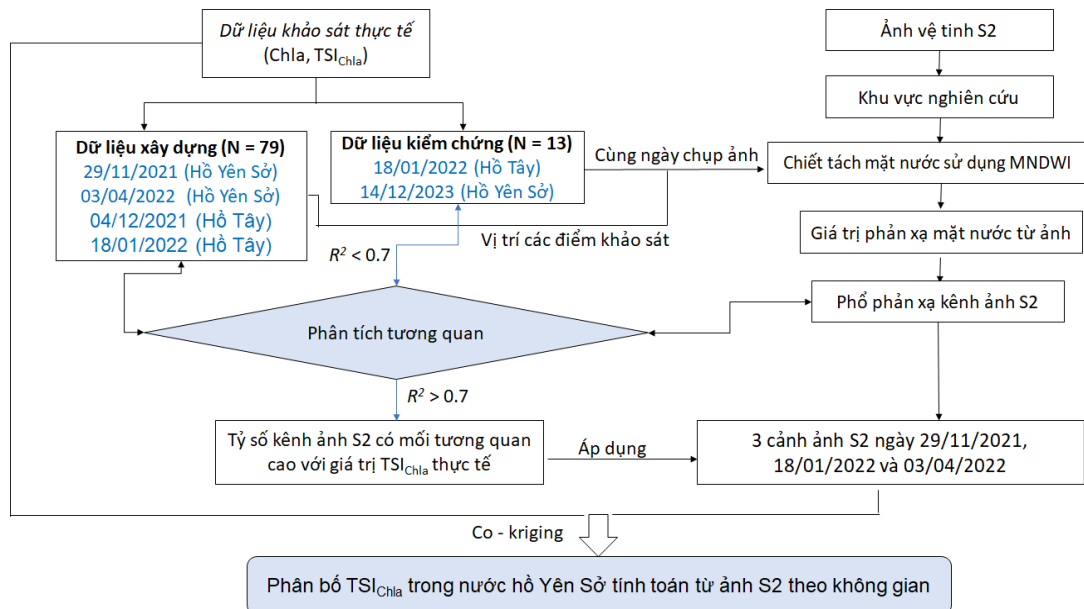
Vệ tinh S2 chụp ảnh khu vực hồ Yên Sở và hồ Tây vào khoảng 3:20 GMT (tương ứng với 10:20 giờ địa phương) với dữ liệu được định vị theo hệ tọa độ WGS84, múi giờ 48N, và độ phân giải không gian ở ba mức khác nhau là 10 m, 20 m, và 60 m. Trong nghiên cứu này, 6 cảnh ảnh S2 Level 2 thu được vào ngày 29/11/2021, 04/12/2021, 18/01/2022, 03/04/2022, 07/07/2023 và 14/12/2023 tải miễn phí từ trang web của ESA

(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>) được sử dụng (Bảng 1).

Tất cả cảnh ảnh sử dụng đã được ESA đưa dữ liệu về giá trị phản xạ tại mặt đất (BOA-reflectance) thông qua hiệu chỉnh bức xạ và hiệu chỉnh khí quyển trước khi đến tay người sử dụng. Do vậy, nghiên cứu này tập trung chủ yếu vào hiệu chỉnh hình học. Cụ thể, các cảnh ảnh được đồng nhất độ phân giải không gian về 10 m sử dụng công cụ Resampling trong phần mềm SNAP (Sentinel Application Platform). Mặt nước hồ nghiên cứu được chiết tách sử dụng chỉ số chuẩn hóa khác biệt nước MNDWI do Xu (2006) đề xuất. Sau đó, giá trị phản xạ các kênh phổ của ảnh S2 được trích xuất từ 92 điểm khảo sát cùng ngày với thời điểm thu nhận ảnh, được thực hiện bằng công cụ chuyên dụng trong phần mềm ENVI 5.3 (Hình 2). Các giá trị này tiếp theo được phân tích nhằm xác định các tỷ số có mối tương quan cao với giá trị TSI_{Chla} thực tế, làm cơ sở xây dựng biến số cho phép phân tích không gian Co-kriging.

Bảng 1. Dữ liệu ảnh vệ tinh được sử dụng trong nghiên cứu.

TT	Mã cảnh ảnh	Ngày	Độ che phủ mây
1	MSIL2A_20211129T033111_N0500_R018_T48QWJ	29/11/2021	12,1%
2	MSIL2A_20211204T033119_N0301_R018_T48QWJ	04/12/2021	0%
3	MSIL2A_20220118T033051_N0301_R018_T48QWJ	18/01/2022	13,4%
4	MSIL2A_20220403T032539_N0400_R018_T48QWJ	03/04/2022	1,01%
5	MSIL2A_20230707T032519_N0509_R018_T48QWJ	07/07/2023	19,6%
6	MSIL2A_20231214T033139_N0510_R018_T48QWJ	14/12/2023	43%



Hình 2. Quy trình thực hiện nghiên cứu (MNDWI là viết tắt của chỉ số chuẩn hóa khác biệt nước (Modified Normalized Difference Water Index)).

2.3. Phương pháp phân tích thống kê và lập bản đồ

Phương pháp địa thống kê Co-kriging đã được sử dụng để lập bản đồ phân bố không gian của chỉ số TSI_{Chla} trong nước hồ Yên Sở. Đây là phương pháp mở rộng của Kriging, cho phép kết hợp biến chính (TSI_{Chla}) với một hoặc nhiều biến phụ (như chỉ số ảnh S2) nhằm nâng cao độ chính xác ước lượng tại các vị trí chưa đo. Nguyên lý của Co-kriging dựa trên mối tương quan không gian của từng biến và mối tương quan chéo giữa các biến thông qua hệ hàm biến thiên (variogram) và đồng biến thiên (cross-variogram). Trọng số nội suy được xác định từ hệ phương trình tuyến tính sao cho sai số phương sai là nhỏ nhất, có xét đến khoảng cách và hướng không gian (Wackernagel, 2003; Journel, 1989). Quy trình thực hiện gồm: phân tích dữ liệu đầu vào, xác định tương quan giữa các biến, xây dựng mô hình biến thiên, và áp dụng nội suy Co-kriging. Việc tích hợp dữ liệu ảnh vệ tinh làm biến phụ trợ giúp mô hình phản ánh tốt hơn sự biến thiên trong không gian của TSI_{Chla} , đặc biệt trong điều kiện số lượng điểm đo hạn chế và phân bố không đều.

Trong nghiên cứu này, các biến được lựa chọn cho mô hình Co-kriging phải đáp ứng tiêu chí

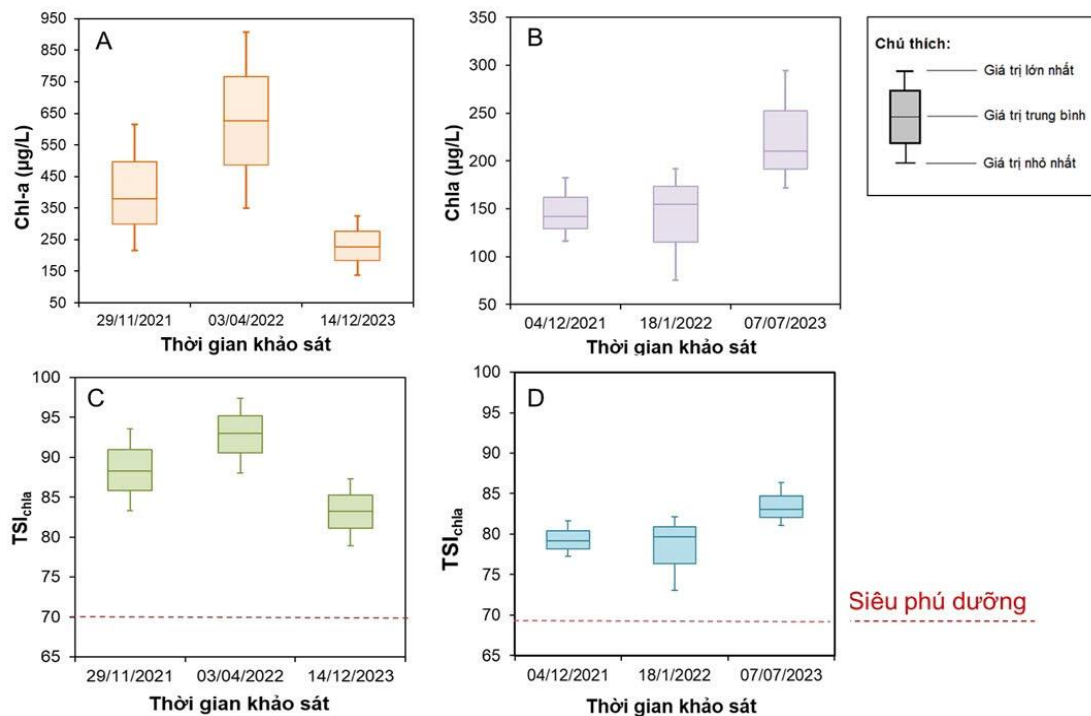
tương quan chặt chẽ với giá trị TSI_{Chla} thực tế, thể hiện qua hệ số tương quan lớn hơn 0,70. Đồng thời, kết quả ước tính cần đạt độ chính xác cao, với hệ số xác định (R^2) lớn hơn 0,70 và sai số toàn phương trung bình (RMSE) không vượt quá 5%. Do đó, sơ đồ phân bố TSI_{Chla} sẽ được thành lập bằng công cụ địa thống kê trong phần mềm ArcGIS 10.5 khi đáp ứng các điều kiện trên. Đồng thời, các đặc trưng cơ bản của dữ liệu, như giá trị lớn nhất (GTLN), giá trị nhỏ nhất (GTNN), giá trị trung bình (GTTB) và biểu đồ hộp, được phân tích thông qua phần mềm IBM SPSS 26 dựa trên dữ liệu thu thập từ các đợt khảo sát.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiện trạng phú dưỡng nước hồ

Kết quả thống kê hàm lượng Chla và TSI_{Chla} thu được từ 6 đợt khảo sát trong nước cụm hồ điều hòa Yên Sở và Hồ Tây được thể hiện ở Hình 3.

Theo đó, Chla trong nước hồ Yên Sở dao động từ 137,97 $\mu\text{g/L}$ đến 906,6 $\mu\text{g/L}$; trung bình đạt 380,23 $\mu\text{g/L}$ ngày 29/11/2021; 625,49 $\mu\text{g/L}$ ngày 03/04/2022 và 227,53 $\mu\text{g/L}$ ngày 14/12/2023 (Hình 3A). Trong khi đó, hàm lượng Chla trong



Hình 3. Biến thiên hàm lượng Chla của hồ Yên Sở (A), Hồ Tây (B) và giá trị TSI_{Chla} tương ứng của hồ Yên Sở (C), Hồ Tây (D) trong các đợt khảo sát.

nước Hồ Tây có xu hướng thấp hơn, dao động từ 75,35 $\mu\text{g/L}$ đến 294 $\mu\text{g/L}$; trung bình đạt 141,91 $\mu\text{g/L}$ ngày 04/12/2021; 154,74 $\mu\text{g/L}$ ngày 18/1/2022; 210,25 $\mu\text{g/L}$ ngày 07/07/2023 (Hình 3B). Kết quả đo trong nghiên cứu này cho thấy mật độ tảo trong nước của hai hồ rất cao và biến động mạnh giữa mùa mưa (tháng 4÷7) và mùa khô (tháng 1÷12). Đặc biệt, vào tháng 12, khi nhiệt độ và cường độ ánh sáng mặt trời giảm đáng kể so với các tháng khác trong năm, quá trình quang hợp của tảo bị hạn chế, kéo theo sự suy giảm hàm lượng Chla trong nước. Từ tháng 4÷7, các hồ tiếp nhận một lượng lớn dinh dưỡng, khiến mật độ tảo gia tăng đáng kể. Hàm lượng tảo tại các điểm đo đều vượt ngưỡng 155 $\mu\text{g/L}$ - mức mà theo Carlson và Simpson (1996), tảo có xu hướng hình thành các lớp váng (algal scum) nổi trên bề mặt nước. Đây chính là nguyên nhân gây ra hiện tượng tảo nở hoa, dẫn đến tình trạng ô nhiễm môi trường và hiện tượng cá chết hàng loạt thường xảy ra tại hai hồ trong các mùa hè gần đây.

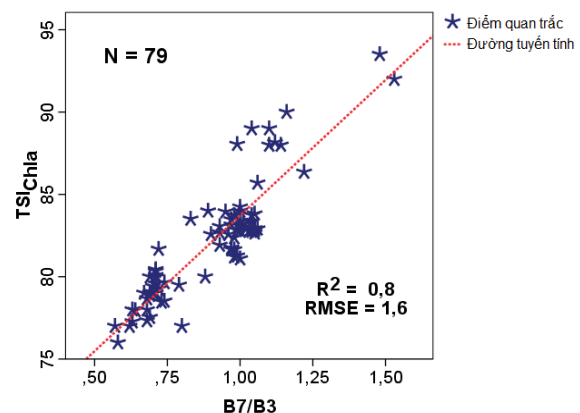
Kết quả tính toán TSI_{Chla} dựa trên hàm lượng Chla từ 6 đợt khảo sát ở hai hồ được thể hiện trong Hình 3C-D. Theo đó, giá trị TSI_{Chla} thực tế của nước hồ Yên Sở dao động từ 78,93 đến 97,37; trung bình đạt 88,15 (Hình 3C), trong khi giá trị TSI_{Chla} thực tế của nước Hồ Tây dao động từ 73 đến 85,7; trung bình đạt 79,35 (Hình 3D). Như vậy, dựa theo thang đánh giá mức độ phú dưỡng của hồ đề xuất bởi Carlson và Simpson (1996) thì cả 2 hồ tại những điểm đo ở các thời điểm khác nhau đều ứng với mức siêu phú dưỡng - mức phú dưỡng cao nhất, nhạy cảm với hiện tượng tảo nở hoa (Carlson và Simpson, 1996).

3.2. Thông số ảnh phù hợp cho mô hình hóa phân bố TSI_{Chla}

Nhiều nghiên cứu trước đây đã khẳng định rằng thông tin từ ảnh vệ tinh đóng vai trò quan trọng như một nguồn dữ liệu hỗ trợ trong mô hình hóa không gian (Ha và nnk., 2013; Usowicz và nnk., 2021). Với ưu điểm cung cấp dữ liệu không gian liên tục dưới dạng điểm ảnh (pixel), phương pháp này tận dụng mối quan hệ giữa các thông số trích xuất từ ảnh vệ tinh và thông số cần khảo sát để ước tính giá trị tại các vị trí chưa được đo đạc trực tiếp. Trong nghiên cứu này, nếu chỉ sử dụng kết quả đo thực tế từ 23 điểm đo trên mặt nước cụm hồ Yên Sở (diện tích 132,8 ha), thì ước tính khoảng 5,8 ha mới có một thông tin đầu vào cho

mô hình. Ngược lại, sử dụng dữ liệu từ ảnh S2 chụp cùng ngày cho phép khai thác tới 9.000 điểm ảnh chất lượng, tương ứng với 9.000 thông tin đầu vào trên toàn bộ bề mặt hồ. Do đó, việc ước tính giá trị TSI_{Chla} tại các khu vực chưa khảo sát sẽ được thực hiện dựa trên sự kết hợp giữa dữ liệu đo thực tế và thông tin từ các điểm ảnh vệ tinh còn lại, đảm bảo độ bao phủ và tính chính xác cao hơn.

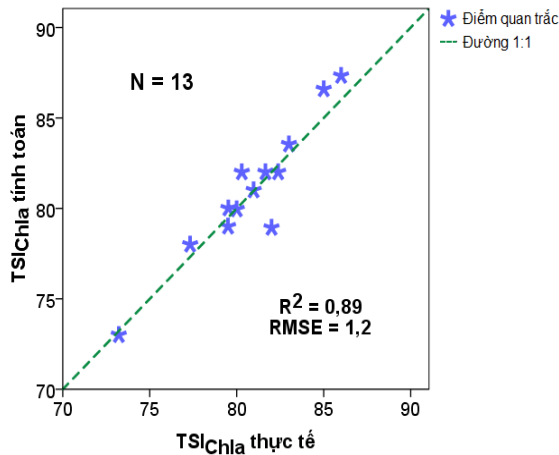
Các tỷ số kênh phổ thường hay được sử dụng cho các mô hình tính toán TSI_{Chla} như tỷ số kênh xanh lục trên kênh đỏ, tỷ số kênh NIR trên kênh đỏ hay tỷ số kênh xanh lục trên kênh xanh lam (Gholizadeh và nnk., 2016) đều được phân tích và đánh giá dựa trên dữ liệu của 79 điểm đo ngày 29/11/2021, 03/04/2022 trên hồ Yên Sở và ngày 04/12/2021, ngày 18/01/2022 trên hồ Tây. Kết quả cho thấy, TSI_{Chla} trong nước hồ Yên Sở và hồ Tây có tương quan cao nhất với tỷ số kênh NIR (B7) trên kênh xanh lục (B3) của ảnh S2, cụ thể hệ số xác định, $R^2 = 0,8$ và giá trị sai số, $RMSE = 1,6$ (Hình 4). Kết quả nghiên cứu cũng một lần nữa khẳng định sự phù hợp của tỷ số kênh NIR trên kênh xanh lục trong giám sát mức độ phú dưỡng các hồ đô thị tại Hà Nội như Vinh và nnk. (2022) đã đề xuất.



Hình 4. Mối quan hệ giữa TSI_{Chla} và tỷ số phổ phản xạ của kênh 7 trên kênh 3 của ảnh S2.

Đồng thời, để kiểm chứng mối quan hệ này, tập dữ liệu của 13 điểm đo thực tế thu vào ngày khảo sát 18/01/2022 và 14/12/2023 được đưa vào đánh giá độ lệch chuẩn của kết quả tính toán (Hình 5). Kết quả cho thấy giá trị TSI_{Chla} tính toán từ ảnh và giá trị đo thực tế có tương quan cao ($R^2 = 0,89$) và sai số 1,2 (dưới 5% giá trị trung bình của chuỗi số, Hình 5). Điều này chứng tỏ rằng tỷ số kênh 7 trên kênh 3 của ảnh S2 có thể được sử dụng

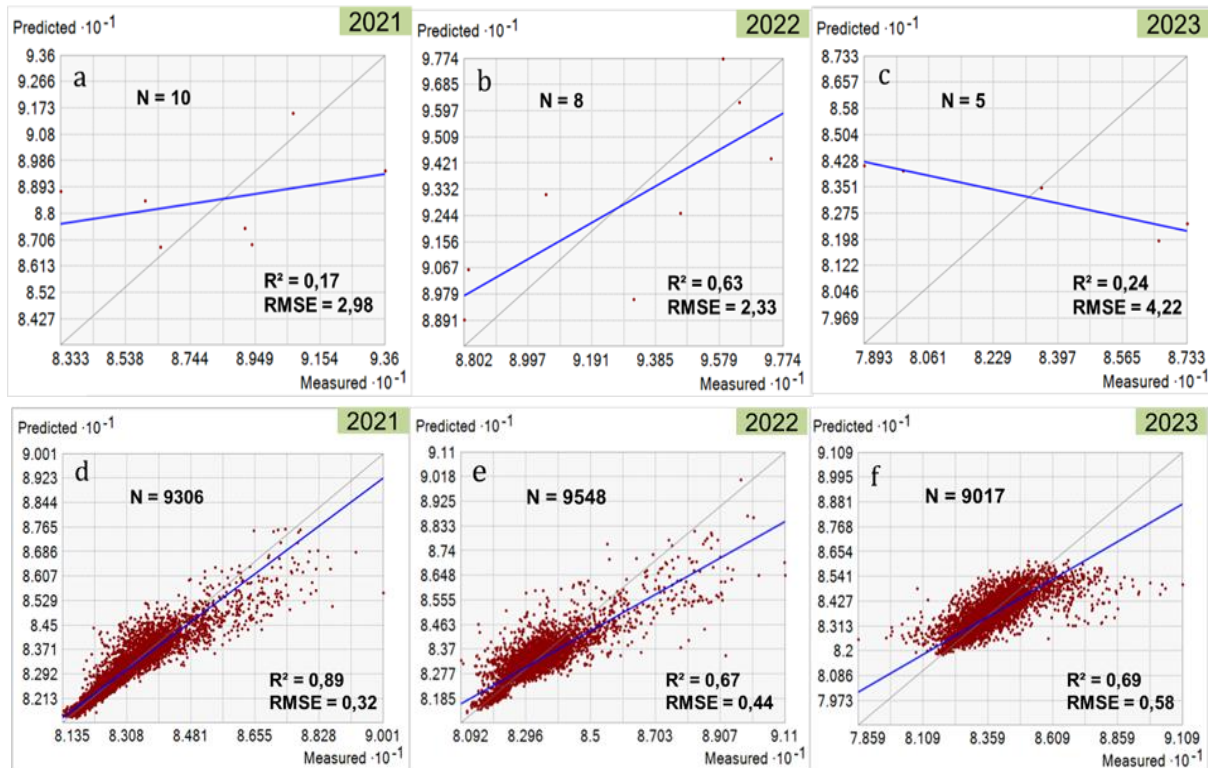
hiệu quả như một nguồn thông tin hỗ trợ trong việc mô hình hóa sự phân bố không gian của TSI_{Chla} trong nước hồ. Sự thay đổi của tỷ số này trong các pixel chưa khảo sát góp phần nâng cao độ chính



Hình 5. Sai số giữa TSI_{Chla} tính toán từ phương trình hình 4 và giá trị đo thực tế vào ngày 18/01/2022 và ngày 14/12/2023.

xác khi ước lượng giá trị TSI_{Chla} tại những khu vực không có dữ liệu đo thực tế.

Hình 6a-c biểu diễn kết quả mô hình hóa không gian sự phân bố TSI_{Chla} trong nước hồ Yên Sở qua ba đợt khảo sát, trong đó mô hình được xây dựng mà không sử dụng bất kỳ thông tin bổ trợ nào, chỉ dựa trên mối tương quan giữa các giá trị TSI_{Chla} đo được cùng ngày. Kết quả cho thấy ước tính của mô hình phân bố TSI_{Chla} có sai số lớn ($R^2 = 0,17 - 0,63$; $RMSE = 2,33 - 4,22$). Điều này cho thấy rằng việc ước tính giá trị TSI_{Chla} tại các vị trí không khảo sát có thể không phản ánh chính xác sự biến đổi thực tế của thông số này trong không gian. Đặc biệt, với số lượng điểm tại mỗi đợt khảo sát chỉ từ 5÷10 điểm thì không thể áp dụng các phương pháp địa thống kê để mô hình hóa không gian. Vì vậy, kết quả mô hình hóa sự phân bố không gian TSI_{Chla} từ các mô hình này không đạt yêu cầu. Nói cách khác, nếu chỉ sử dụng các thông số đo thực tế tại các điểm đo ở các đợt khảo sát, việc đánh giá hiện trạng phú dưỡng nước hồ sẽ chỉ giới hạn ở những vị trí khảo sát mà không thể đưa ra nhận định toàn diện về sự biến đổi không gian của tình trạng phú dưỡng trên toàn bộ hồ.



Hình 6. So sánh kết quả ước tính của mô hình khi sử dụng các số liệu đo thực tế TSI_{Chla} (d-f) và khi sử dụng kết hợp tỷ số B7/B2 từ ảnh S2 và TSI_{Chla} thực tế (a-c) của 3 đợt khảo sát.

Hình 6d-f biểu diễn sự cải thiện đáng kể của kết quả mô hình khi sử dụng thông số bổ trợ từ ảnh S2. Cụ thể, giá trị TSI_{Chla} được tính toán từ ba cảnh ảnh chụp cùng ngày được sử dụng làm biến đầu vào cho mô hình co-kriging, nhằm ước tính sự phân bố không gian của TSI_{Chla} một cách chính xác hơn. Kết quả cho thấy hệ số xác định R^2 (độ chính xác) của mô hình đã tăng lên đáng kể: từ $R^2 = 0,17 \div 0,63$ lên đến $R^2 = 0,67 \div 0,89$. Sai số của các giá trị TSI_{Chla} ước tính trung bình trong không gian trong các ngày cũng giảm xuống: từ $RMSE = 2,33 \div 4,22$ xuống còn $RMSE = 0,32 \div 0,58$. Điều này khẳng định rõ sự hiệu quả của việc sử dụng thông tin bổ trợ từ ảnh S2 trong thành lập bản đồ phân bố không gian của TSI_{Chla} .

3.3. Sự thay đổi theo không gian và thời gian của TSI_{Chla}

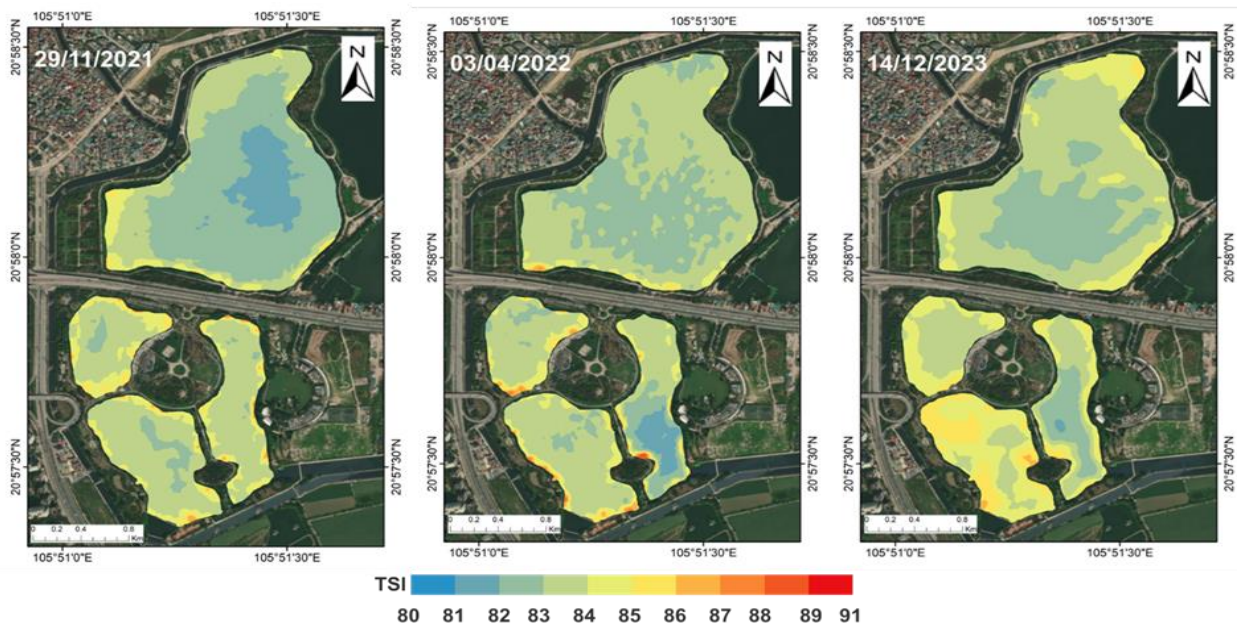
Kết quả TSI_{Chla} được mô hình hóa sử dụng sự tương quan giữa tỷ số kênh 7 trên kênh 3 của ảnh S2 và các điểm đo thực tế được thể hiện trong Hình 7. Theo đó, với giá trị TSI_{Chla} trung bình đều lớn hơn 78 cho thấy toàn bộ cụm hồ Yên Sở đang ở trạng thái siêu phú dưỡng, rất nhạy cảm với tình trạng tảo nở hoa theo thang phân loại của Carlson và Simpson (1996).

Theo không gian, giá trị TSI_{Chla} trong cụm hồ thể hiện sự phân bố không đồng đều. Ba hồ nhỏ nằm ở phía nam công viên Yên Sở được bao quanh bởi nhiều cống thoát nước có giá trị TSI_{Chla} trung

binh cao hơn khoảng 12÷15% so với phần hồ lớn phía Bắc. Điều này cho thấy tác động đáng kể của nguồn nước thải đô thị lên mức độ phú dưỡng tại các khu vực ven hồ. Ngược lại, khu vực hồ lớn phía trên là nơi tiếp nhận nước trực tiếp từ Sông Sét thông qua trạm bơm Yên Sở, giá trị TSI_{Chla} thấp hơn, nhiều khả năng do diện tích hồ lớn hơn đồng thời việc luân chuyển nước thường xuyên giúp giảm sự tích tụ của các chất dinh dưỡng và các chất hữu cơ.

Đáng chú ý, tình trạng ô nhiễm nước hồ đang có sự gia tăng theo thời gian. Cụ thể, TSI_{Chla} trung bình toàn hồ tăng từ 83,5 (tháng 11/2021) lên 87,5 (tháng 12/2023), tương ứng với mức tăng 4,8%. Nguyên nhân chính có thể bắt nguồn từ việc nguồn nước thải sinh hoạt đô thị tiếp tục được xả trực tiếp vào hồ, trong khi các biện pháp cải tạo hiện có như nạo vét bùn đáy hay chắn rác chủ yếu mang tính chất tạm thời. Bên cạnh đó, điều kiện thời tiết cũng có thể góp phần làm gia tăng mức độ phú dưỡng. Theo Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia (2024), nhiệt độ trung bình tháng 12/2023 tại khu vực Hà Nội cao hơn trung bình nhiều năm từ 1÷2°C. Sự gia tăng nhiệt độ có thể thúc đẩy quá trình quang hợp của tảo, làm tăng mật độ tảo trong nước hồ, từ đó gia tăng mức độ phú dưỡng (Carey và nnk., 2012).

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy, với khoảng 81% diện tích mặt nước có $TSI_{Chla} > 85$, mức độ phú dưỡng của hồ Yên Sở khá tương đồng với các hồ trong khu vực nội thành Hà Nội - nơi chịu tác



Hình 7. Phân bố giá trị TSI_{Chla} của nước Hồ Yên Sở trong 3 đợt khảo sát.

động mạnh mẽ của nguồn thải nhân sinh và hầu hết ở mức siêu phú dưỡng như hồ Hoàn Kiếm ($TSI_{Chla} \sim 77 \div 85$, (Thảo và nnk., 2021)), hồ Linh Đàm ($TSI \sim 70 \div 80$, (Linh và nnk., 2019)), hồ Bảy Mẫu ($TSI = 90$, (Đỗ và Đoàn, 2023)). Tuy nhiên, nếu so với các hồ ở khu vực ngoại thành - nơi hoạt động sản xuất nông nghiệp là hoạt động chính trong vùng, ít chịu tác động từ nước thải sinh hoạt đô thị như hồ Quan Sơn ($TSI \sim 65$, (Thảo và nnk., 2023)), hồ Suối Hai ($TSI \sim 60 \div 72$ (Linh và nnk., 2021)), thì mức độ phú dưỡng của các hồ Yên Sở cao hơn rất nhiều. Như vậy, có thể thấy sự phân hóa rõ ràng giữa mức độ phú dưỡng và đặc điểm sử dụng đất xung quanh hồ, đặc biệt là mức độ đô thị hóa. Việc theo dõi và phân tích xu hướng này trong các nghiên cứu tiếp theo sẽ góp phần cung cấp luận cứ khoa học cần thiết cho không chỉ công tác phân vùng nguy cơ phú dưỡng theo không gian, mà còn gợi mở hướng tiếp cận tích hợp giữa quy hoạch đô thị, quản lý thoát nước và giám sát môi trường trong kiểm soát ô nhiễm hồ đô thị

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh tiềm năng của việc kết hợp dữ liệu ảnh S2 và mô hình địa thống kê Co-kriging trong đánh giá chất lượng nước tại các hồ đô thị có diện tích nhỏ và trung bình như cụm hồ Yên Sở. Kết quả nghiên cứu cho thấy, TSI_{Chla} thực tế thu được từ Hồ Yên Sở và Hồ Tây có mối tương quan cao với tỷ số kênh NIR (kênh 7) trên kênh xanh lục (kênh 3) của ảnh vệ tinh S2 ($R^2 = 0,83$). Tỷ số này được sử dụng như một thông tin bổ trợ, giúp cải thiện độ chính xác của mô hình Co-kriging trong việc lập sơ đồ phân bố không gian của TSI_{Chla} . Cụ thể, R^2 đã tăng từ $0,17 \div 0,63$ lên $0,67 \div 0,89$; RMSE giảm từ $2,33 - 4,22$ xuống còn $0,32 - 0,58$. Cụm hồ điều hòa Yên Sở đang ở trạng thái siêu phú dưỡng, với giá trị TSI_{Chla} đều lớn hơn 78 và mức độ phú dưỡng phân bố không đồng đều. Vùng nước hồ gần các khu vực cửa cống thoát nước ven hồ, đặc biệt 3 hồ nhỏ trong khuôn viên công viên Yên Sở có giá trị TSI_{Chla} cao hơn các vùng khác. Phương pháp được đề xuất trong nghiên cứu có thể mở rộng áp dụng cho các hồ đô thị khác có quy mô nhỏ đến trung bình nhằm hỗ trợ giám sát chất lượng nước theo không gian và thời gian.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Thiên Phương Thảo - xây dựng ý tưởng nghiên cứu, xử lý số liệu, viết bản thảo bài báo, chỉnh sửa bài báo; Phạm Kiều Loan - xử lý số liệu, lấy mẫu; Nguyễn Thị Thu Hà - xây dựng ý tưởng nghiên cứu, viết bản thảo bài báo, chỉnh sửa bài báo; Vũ Thị Thu Thủy - xử lý số liệu, lấy mẫu.

Tài liệu tham khảo

- Carey, C. C., Ibelings, B. W., Hoffmann, E. P., Hamilton, D. P., Brookes, J. D. (2012). Ecophysiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate. *Water Research*, 46(5), 1394-1407.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes 1. *Limnology and oceanography*, 22(2), 361-369.
- Carlson, R. E. & Simpson, J. (1996). A coordinator's guide to volunteer lake monitoring methods. *North American Lake Management Society*, 96, 305.
- Cheng, K. S., & Lei, T. C. (2001). Reservoir trophic state evaluation using Landsat TM images 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1321-1334.
- Prasad, A. D., & Siddaraju, P. (2012). Carlson's Trophic State Index for the assessment of trophic status of two Lakes in Mandya district. *Advances in Applied Science Research*, 3(5), 2992-2996.
- Do, T. N., Nguyen, D. M. T., Ghimire, J., Vu, K. C., Do Dang, L. P., Pham, S. L., & Pham, V. M. (2023). Assessing surface water pollution in Hanoi, Vietnam, using remote sensing and machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(34), 82230-82247.
- Đỗ, H. T. & Đoàn, P. A. (2023). Đánh giá mức độ phú dưỡng tại một số hồ nội thành tại quận Hai Bà Trưng, thành phố Hà Nội. *Tạp chí khí tượng thủy văn*, 754, 1-8.
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298.
- Ha, N. T. H., Dao, P. T. B., Loan, D. T., Thanh, N. N., Dinh, N., Tuan, P. T. M., & Khoa, T. D. (2015).

- Microalgae as indicators of eutrophication in Hoan Kiem lake, Hanoi, Vietnam. *Vietnam Journal of Biotechnology*, 13(2), 355-365.
- Ha, N. T. T., Koike, K., & Nhuan, M. T. (2013). Improved accuracy of chlorophyll-a concentration estimates from MODIS imagery using a two-band ratio algorithm and geostatistics: As applied to the monitoring of eutrophication processes over Tien Yen Bay (Northern Vietnam). *Remote Sensing*, 6(1), 421-442.
- Vinh, P. Q., Ha, N. T. T., Thao, N. T. P., Linh, N. T., Oanh, L. T., Phuong, L. T., & Huyen, N. T. T. (2022). Monitoring the trophic state of shallow urban lakes using Landsat 8/OLI data: a case study of lakes in Hanoi (Vietnam). *Frontiers of Earth Science*, 1-16.
- Håkanson, L., Bryhn, A. C., & Hytteborn, J. K. (2007). On the issue of limiting nutrient and predictions of cyanobacteria in aquatic systems. *Science of the total environment*, 379(1), 89-108.
- Hoang, T. H. T., Nguyen, V. D., Van, A. D., & Nguyen, H. T. (2020). Decision tree techniques to assess the role of daily DO variation in classifying shallow eutrophicated lakes in Hanoi, Vietnam. *Water Quality Research Journal*, 55(1), 67-78.
- Journel, A. G. (1989). *Fundamentals of geostatistics in five lessons (Vol. 8)*. Washington, DC: American Geophysical Union.
- Karabork, H. (2010). Selection of appropriate sampling stations in a lake through mapping. *Environ. Monit. Assess.*, 163, 27-40.
- Linh, N. T., Ha, N. T. T., Thao, N. T. P., Pham, Q. V. (2021). Assessing trophic status of suoi hai reservoir using carlson's trophic state index. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 43(4), 509-523
- Linh, N. T., Pham, T. H. T., Luong, T. P., Vu, T. H., Nguyen, T. T. H., Pham, Q. V. (2019). Using Sentinel-2B Imagery to Estimate the Eutrophication Level of Linh Dam Lake, Hoang Mai District, Hanoi. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 35(4).
- Membrillo-Abad, A. S., Torres-Vera, M. A., Alcocer, J., Prol-Ledesma, R. M., Oseguera, L. A., Ruiz-Armenta, J. R. (2016). Trophic State Index estimation from remote sensing of lake Chapala, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(2), 183-191.
- Nguyễn Ngân. (2019, 6 tháng 8). Cá chết nổi trắng mặt hồ Yên Sở do nguồn nước bị ô nhiễm?. vov.vn. <https://vov.vn/tin-24h/ca-chet-noi-trang-mat-ho-yen-so-do-nguon-nuoc-bi-o-nhiem-946226.vov>.
- Thảo, N. T. P., Thắng, P. Đ., Hiền, T. T., Thu, N. T. (2023). Đánh giá và mô hình hóa hiện trạng phú dưỡng nước hồ Quan Sơn theo không gian và thời gian. *Tạp chí khí tượng thủy văn*, 748(4), 42-52.
- Thảo, N. T. P., Vinh, P. Q., Hà, N. T. T., Thùy, N. (2021). Giám sát biến thiên mức độ phú dưỡng của hồ Hoàn Kiếm dựa vào hàm lượng Chlorophyll-a tính toán từ ảnh Sentinel-2A. *Tạp chí Khí tượng Thủy Văn*, 721(01), 11-20.
- Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia. (2024). <https://phongchongthientai.mard.gov.vn/Pages/thang-12-mau-son-ghi-nhan-nhiet-do-thap-nhat-10-nam-qua.aspx>.
- Trung tâm nghiên cứu môi trường và cộng đồng (CECR) (2015). *Báo cáo hồ Hà Nội 2015*. Nhà xuất bản Phụ nữ, Hà Nội.
- Usowicz, B., Lipiec, J., Łukowski, M., & Słomiński, J. (2021). Improvement of spatial interpolation of precipitation distribution using cokriging incorporating rain-gauge and satellite (SMOS) soil moisture data. *Remote Sensing*, 13(5), 1039.
- Văn Yên (2022). Hà Nội: Cá chết hàng loạt ở hồ điều hòa Yên Sở. dantri.vn. <https://dantri.com.vn/xa-hoi/ha-noi-ca-chet-hang-loat-o-ho-dieu-hoa-yen-so-20220628110737363.htm>.
- Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer.
- Xiangcan, J. (2003). Analysis of eutrophication state and trend for lakes in China. *Journal of Limnology*, 62(1s), 60-66.
- Xu, Hanqiu. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(14), 3025-3033.