

ỨNG DỤNG DỮ LIỆU SENTINEL-5P TROPOMI TRÊN NỀN TẢNG GOOGLE EARTH ENGINE TRONG THEO DÕI Ô NHIỄM KHÔNG KHÍ TẠI THÀNH PHỐ THÁI NGUYÊN

Lưu Thị Diệu Chinh^a, Hà Thị Hằng^{b,*}, Bùi Duy Quỳnh^b

^a*Khoa Công Trình Thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

^b*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 20/4/2023, Sửa xong 12/5/2023, Chấp nhận đăng 19/5/2023

Tóm tắt

Ô nhiễm không khí tại các thành phố lớn đã và đang là một mối đe dọa nghiêm trọng tới sức khỏe con người cũng như tới sự phát triển lâu dài của thành phố. Ngày nay, nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-5P TROPOMI được lưu trữ và chia sẻ trong công nghệ điện toán đám mây cho phép giám sát và đánh giá mức độ ô nhiễm không khí tại những khu vực rộng lớn một cách hiệu quả, nhanh chóng, chính xác, với độ phân giải không gian cao và đa thời gian. Chính vì vậy, nghiên cứu này trình bày việc ứng dụng dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI trong giám sát và đánh giá mức độ ô nhiễm khí thải SO₂, NO₂, CO trong không khí tại thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021. Kết quả của nghiên cứu này cũng được kiểm chứng với các báo cáo đánh giá ô nhiễm không khí từ các cơ quan chức năng trên địa bàn thành phố để xác nhận tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của công nghệ mới này.

Từ khóa: ô nhiễm không khí; viễn thám; Sentinel-5P TROPOMI; Google Earth Engine; thành phố Thái Nguyên.

APPLICATION OF SENTINEL-5P TROPOMI OF GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORM IN MONITORING AND ASSESSING THE AIR POLLUTION IN THAI NGUYEN CITY

Abstract

Air pollution in big cities is a significant threat to both human health and the long-term development of these urban areas. Nowadays, the storage and sharing of Sentinel-5P TROPOMI satellite imagery through the Google Earth Engine platform have facilitated efficient monitoring and assessment of air pollution levels in large regions with speed and accuracy. Consequently, this study uses Sentinel-5P TROPOMI data to monitor and evaluate the emissions of SO₂, NO₂, and CO in the air of Thai Nguyen city during the years 2019, 2020, and 2021. The study's findings are further validated by comparing them with air pollution assessment reports from relevant authorities to establish the effectiveness and practicality of this innovative technology.

Keywords: air pollution; remote sensing; Sentinel-5P TROPOMI; Google Earth Engine; Thai Nguyen city.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(2V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(2V)-06) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Ô nhiễm không khí hiện đang là một trong những mối đe dọa lớn nhất toàn cầu đến sức khỏe con người. Theo Tổ chức y tế thế giới WHO (World Health Organization) có hơn 7 triệu người chết mỗi năm vì ô nhiễm không khí [1]. Đặc biệt, sự gia tăng dân số, tiến trình đô thị hóa quá nhanh, sự tiêu

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hanght@huce.edu.vn (Hằng, H. T.)

thụ năng lượng, giao thông vận tải, quá trình khai thác chế biến khoáng sản, ... là những nguyên nhân góp phần làm gia tăng mức độ ô nhiễm không khí ở các quốc gia và các đô thị lớn trên thế giới [2]. Các trạm quan trắc không khí trên mặt đất thường được sử dụng trong theo dõi, giám sát và đánh giá mức độ ô nhiễm không khí với độ chính xác cao, để lắp đặt, tuy nhiên, quy mô đánh giá thường chỉ chính xác trong phạm vi hẹp, chi phí tương đối lớn nếu triển khai lắp đặt rộng rãi.

Bụi mịn (Particulate Matter – PM), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃), cacbon monoxide (CO) và carbon dioxide (CO₂) được xem là những chất gây ô nhiễm không khí lớn nhất trong cuộc sống hàng ngày của con người [3]. Đặc biệt, các chất SO₂, NO₂ và CO nồng độ cao trong không khí có thể gây ra các vấn đề sức khỏe nghiêm trọng, như bệnh phổi và bệnh tim mạch, bệnh về đường hô hấp, bệnh ung thư [4]. Trong đó, NO₂ là một trong những thành phần lớn nhất trong không khí bị ô nhiễm và là tiền thân của O₃, PM và mưa axit [5]. Nguồn phát thải khí NO₂, SO₂ đến từ việc đốt cháy nhiên liệu hóa thạch, còn NO₂ hình thành từ khí thải từ ô tô, xe tải và xe buýt, nhà máy điện và các phương tiện giao thông [6]. Trong khi đó, CO là sản phẩm của quá trình đốt cháy không hoàn toàn, từ ô tô, xe tải và các phương tiện hoặc máy móc khác đốt nhiên liệu hóa thạch, hoặc từ ống khói, lò nung, khói thuốc lá, rác thải và bếp gas bị rò rỉ [7]. Quan sát chất lượng không khí từ vệ tinh đã được nghiên cứu và ứng dụng trong hơn bốn thập kỷ qua với sự ra đời của các hệ thống giám sát tầng ozone, như TOMS (Total Ozone Monitoring Instrument) vào năm 1978, GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) vào năm 1995, OMI (Ozone Monitoring Instrument) vào năm 2004, và Sentinel-5 Precursor Tropospheric Monitoring Instrument (Sentinel-5P TROPOMI) vào năm 2017 [8]. Những vệ tinh này được thiết kế nhằm quan sát và đánh giá một số khí trên Trái đất ở tầng bình lưu và tầng đối lưu [5]. Trong đó, vệ tinh Sentinel-5P là vệ tinh quỹ đạo tầm thấp, được trang bị máy quang phổ TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) cho phép theo dõi ozone (O₃), methane (CH₄), formaldehyde (HCHO), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂) và sulfur dioxide (SO₂) [9]. Dữ liệu viễn thám Sentinel được tích hợp toàn bộ vào hệ thống cơ sở dữ liệu của nền tảng điện toán đám mây Google Earth Engine (GEE), đặc biệt, dữ liệu viễn thám Sentinel-1A, 1B, 5P được cung cấp hoàn toàn miễn phí và công nghệ GEE cho phép người dùng thực hiện các phân tích đánh giá thông số, khí tượng ở các quy mô khác nhau trên phạm vi toàn cầu dựa trên hạ tầng đã được tối ưu hóa [10]. Chính vì vậy, trong những năm gần đây, có rất nhiều nghiên cứu ứng dụng dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI trên nền tảng GEE trong theo dõi, giám sát chất lượng không khí ở khắp các vùng, các quốc gia và vùng lãnh thổ trên toàn thế giới [5, 8, 9, 11–23].

Magro et al. tập trung vào theo dõi khí CO và CH₄ trong các sự kiện cháy rừng ở Monchique năm 2018 và Vila de Rei/Mação năm 2019 (Bồ Đào Nha) nhằm xác định xu hướng lan rộng của đám cháy [14]. Kaplan & Avdan theo dõi và đánh giá mối quan hệ giữa khí NO₂ và CO trong không khí với dữ liệu nhân khẩu học tại nước Cộng hòa Bắc Macedonia trong thời gian 6 tháng [8]. Kaplan et al. thì đánh giá mối tương quan giữa khí NO₂ với mật độ dân số tại Thổ Nhĩ Kỳ trong thời gian từ 07/2018 đến 01/2019 [5]. Behera et al. thì đánh giá nhanh 7 chỉ tiêu NO₂, SO₂, HCHO, CH₄, CO, UVAI (Ultraviolet Aerosol Index), và O₃ tại đồng bằng sông Hằng (Ấn Độ) vào thời điểm trước và sau phong tỏa do dịch Covid-19, tương ứng năm 2020 và năm 2021, kết quả của nghiên cứu này cho thấy các khí NO₂, SO₂, HCHO và CO tăng cao sau khi người dân được dỡ phong tỏa [9]. Ganbat et al. phân tích nồng độ các khí NO₂, SO₂, PM₁₀, và PM_{2.5} trong không khí tại khu vực Ulaanbaatar (Mông Cổ) trước và sau phong tỏa dịch bệnh Covid-19, kết quả của nghiên cứu này cho thấy tỷ lệ phần trăm vượt mức tiêu chuẩn quốc gia đối với NO₂, PM₁₀ và PM_{2.5} lần lượt là 23%, 50% và 67% trong thời gian phong tỏa và đạt 89%, 84% và 91% sau khi dỡ lệnh phong tỏa [21]. Bodah et al. thực hiện phân tích khí NO₂ and CO để đánh giá chất lượng không khí tại khu vực phía bắc bang Rio Grande do Sul (Brazil) từ cuối năm 2020 đến đầu năm 2021 [19]. Maurya et al. đã đánh giá nồng độ các khí

CH₄, SO₂, CO và sol khí và nhận thấy rằng nồng độ các khí này tăng đáng kể trong những tháng đột gồc ra tại Ấn Độ từ năm 2018 đến năm 2021, kết quả của nghiên cứu này cũng được kiểm chứng với dữ liệu của các trạm quan trắc không khí mặt đất [17] hoặc kiểm chứng kết quả đánh giá sự phân bố của khí NO₂ từ dữ liệu Sentinel-5P TROPOMI với các trạm quan trắc không khí mặt đất tại Iran [20] hoặc kiểm chứng với các mạng quan trắc không khí toàn cầu NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS và Pandonia [11–13]. Trong khi đó, Kanniah et al. chỉ đánh giá mỗi sự phân bố theo không gian và thời gian của khí NO₂ tại Malaysia vào năm 2019, 2020 [16]. Nghiên cứu mới đây nhất đánh giá sự thay đổi hàng năm của lượng khí thải nitơ oxit (NO_x) tại Ba Lan và các khu vực biên giới Ba Lan từ tháng 05/2018 đến tháng 11/2020 nhằm ước tính thời gian tồn tại và tổng lượng phát thải của NO_x, kết quả cho thấy, lượng phát thải NO_x còn phụ thuộc vào tốc độ gió và có nồng độ cao hơn vào mùa đông, thấp hơn vào mùa hè [22] hoặc chỉ đánh giá đơn thuần sự phân bố theo không gian – thời gian của khí NO₂ tại vành đai sông Dương Tử (Trung Quốc) từ năm 2019 đến năm 2020 [15].

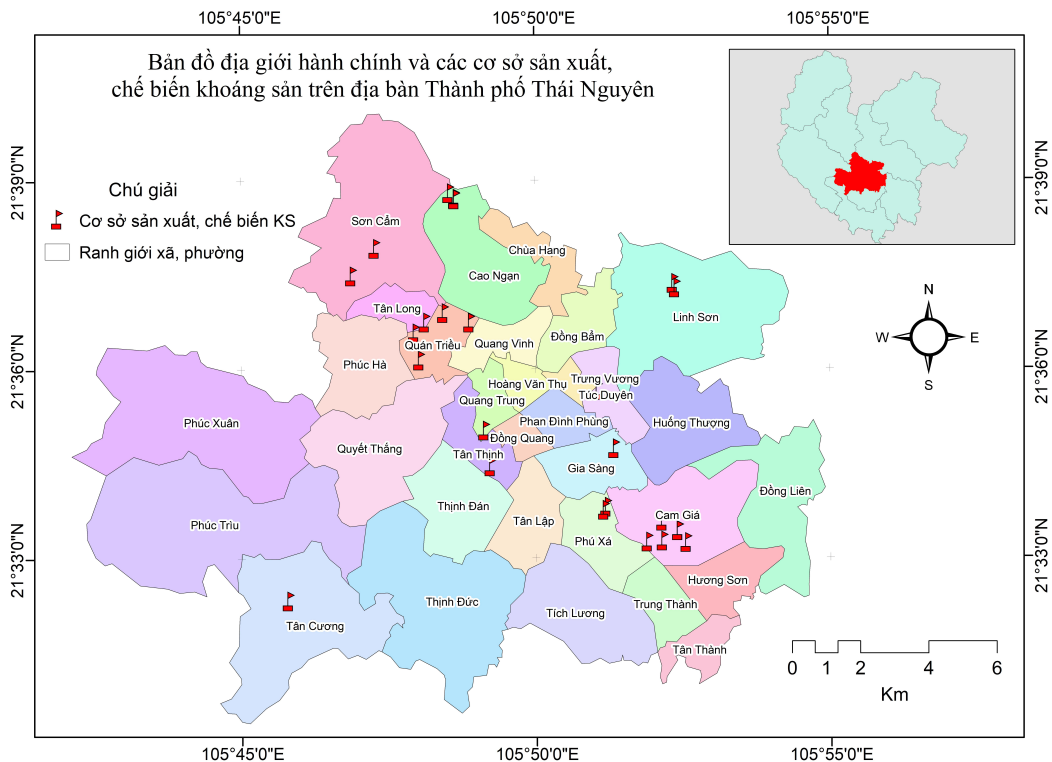
Ở Việt Nam, mới chỉ có một số ít nghiên cứu ứng dụng dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI trên nền tảng GEE trong theo dõi, giám sát chất lượng không khí trong những năm gần đây. Có nghiên cứu chỉ đánh giá sự phân bố theo không gian của khí NO₂, SO₂ vào năm 2021 tại thành phố Hà Nội dựa trên việc tải và xử lý dữ liệu viễn thám Sentinel-5P trên máy tính cá nhân [24] hoặc đánh giá sự phân bố của các khí CO, NO₂, SO₂ tại các mỏ đất đắp tại xã Quảng Nghĩa, thành phố Móng Cái, tỉnh Quảng Ninh vào các năm 2020, 2021 và 02/2022 với phạm vi khá hẹp [25]. Nhìn chung, hầu hết các nghiên cứu này đều khẳng định tính hiệu quả của dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI trên nền tảng GEE trong việc theo dõi, đánh giá tình trạng ô nhiễm không khí thông qua kết quả đánh giá sự tương quan với dữ liệu quan trắc không khí mặt đất hoặc với các trạm quan trắc không khí toàn cầu. Tuy nhiên, việc đánh giá và xác định nguyên nhân phát thải, việc so sánh với các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia còn chưa được quan tâm nhiều trong các nghiên cứu này, bên cạnh đó, có những nghiên cứu đánh giá mức độ ô nhiễm không khí trong phạm vi khá nhỏ, khó có thể khẳng định hết hiệu quả của công nghệ này.

Tỉnh Thái Nguyên có vị trí chiến lược vô cùng quan trọng, nằm trong quy hoạch vùng của Thủ đô Hà Nội giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn 2050, còn TP Thái Nguyên được xem là trung tâm công nghiệp giữ vai trò động lực phát triển của cả vùng trung du và miền núi phía Bắc. Trong những năm gần đây, cùng với sự tăng trưởng về phát triển kinh tế, sản xuất công nghiệp, khai thác khoáng sản, vật liệu xây dựng, TP Thái Nguyên còn phải đối mặt với tình trạng ô nhiễm không khí kéo dài do tiến trình đô thị hóa khá nhanh. Trong khi đó, số lượng các trạm quan trắc không khí trên địa bàn thành phố không nhiều, phạm vi đánh giá khó bao quát hết toàn thành phố. Chính vì vậy, nghiên cứu này trình bày việc ứng dụng dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI trong giám sát và đánh giá mức độ ô nhiễm khí thải SO₂, NO₂, CO trong không khí tại thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021. Kết quả của nghiên cứu này được so sánh với các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia và kiểm chứng thêm với các báo cáo đánh giá ô nhiễm không khí từ các cơ quan chức năng trên địa bàn thành phố.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Thành phố Thái Nguyên là đô thị loại I trực thuộc tỉnh Thái Nguyên, đồng thời, là trung tâm chính trị - kinh tế - văn hóa xã hội của cả tỉnh. Thành phố Thái Nguyên có tọa độ địa lý từ 21° đến 22°27' vĩ độ Bắc; 105°25' đến 106°14' kinh độ Đông, nằm cách trung tâm Hà Nội 80 km về phía Bắc, phía đông giáp huyện Đồng Hỷ và huyện Phú Bình, phía tây giáp huyện Đại Từ, phía nam giáp thành phố Sông Công và thành phố Phổ Yên, phía bắc giáp huyện Phú Lương (Hình 1).



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và các cơ sở sản xuất, chế biến khoáng sản trên địa bàn

Thành phố Thái Nguyên có vị trí chiến lược, quan trọng trong việc phát triển kinh tế xã hội của tỉnh Thái Nguyên và các tỉnh miền núi phía Bắc. Thành phố cũng là nơi tập trung số lượng cụm công nghiệp nhiều nhất trong tỉnh với tổng diện tích 337,5 ha, vừa là nguồn thu hút vốn đầu tư nước ngoài hàng năm, vừa đem lại sinh kế cho hàng nghìn người dân trên địa bàn và các tỉnh lân cận. Tuy vậy, ô nhiễm không khí từ các cụm công nghiệp này cũng đang là mối đe dọa rất lớn đến chất lượng cuộc sống của người dân [26]. Chính vì vậy, theo định hướng phát triển giai đoạn 2021-2030 tầm nhìn 2050, Thành phố có kế hoạch chuyển đổi chức năng và cắt giảm quy mô của một số cụm công nghiệp nhằm giảm thiểu ô nhiễm không khí, đảm bảo chất lượng cuộc sống.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

a. Công nghệ Google Earth Engine

Sau khi một loạt dữ liệu vệ tinh Landsat được cung cấp miễn phí vào năm 2008, Google đã lưu trữ tất cả các bộ dữ liệu viễn thám và liên kết chúng với công cụ điện toán đám mây để phục vụ sử dụng nguồn mở [27]. Google Earth Engine (GEE) là một nền tảng điện toán đám mây được thiết kế để lưu trữ và xử lý các tập dữ liệu khổng lồ ở quy mô hàng trăm petabyte, kho lưu trữ hiện tại của GEE bao gồm dữ liệu từ các vệ tinh khác nhau và hoàn toàn miễn phí của Cơ quan Hàng không Vũ trụ Mỹ (NASA), Cục Địa chất liên bang Hoa Kỳ (USGS), Cơ quan hàng không vũ trụ Châu Âu (ESA) và các dữ liệu khác [28].

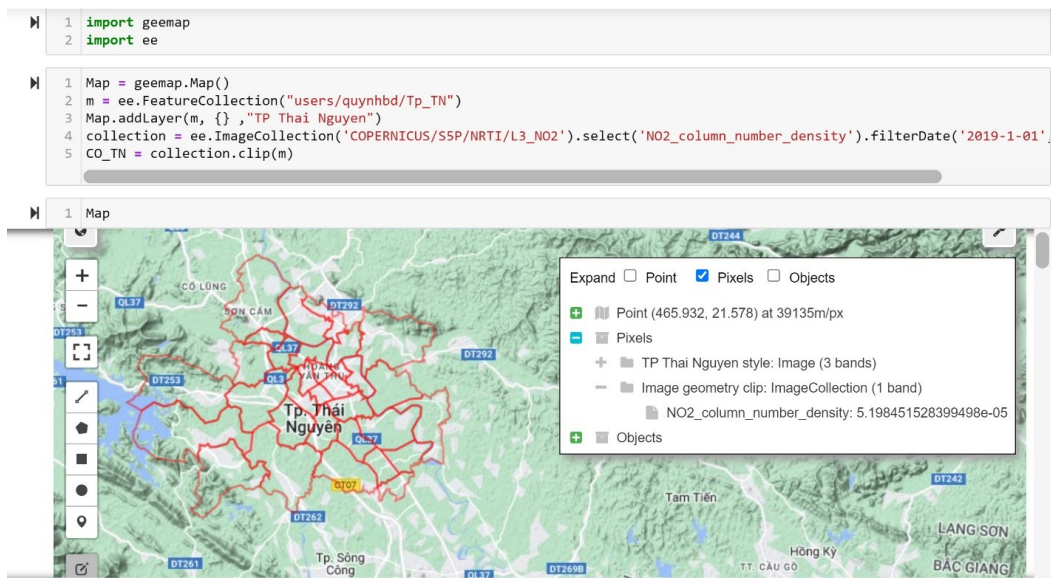
Trên nền tảng GEE, người dùng có thể truy cập, quản lý dữ liệu thông qua giao diện lập trình ứng dụng dựa trên internet API (Application Programming Interface) và một môi trường phát triển tương tác dựa trên web IDE (Interactive Development Environment), đồng thời kho lưu trữ của GEE cho

phép người dùng có thể sử dụng nguồn dữ liệu viễn thám khổng lồ cũng như tận dụng tài nguyên đám mây của Google để thực hiện tất cả các quá trình xử lý một cách nhanh chóng [27]. Ngoài ra, GEE cũng cho phép người dùng có thể thêm và phát triển các thuật toán của riêng mình bằng cách sử dụng các ngôn ngữ lập trình thông dụng như Python, JavaScript, ... [10].

Bảng 1. Một số thông số chính của dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI [29]

Kênh phổ	Bước sóng (nm)	Độ phân giải phổ (nm)	Độ phân giải thời gian	Độ phân giải không gian (km ²)	Chiều rộng dải quét (km)
Tia tử ngoại (Ultraviolet - UV)	1 270 - 320 2	0,49	Hàng ngày	7 × 28 7 × 3,5	~2600
Vùng nhìn thấy (Visible - VIS)	3 320 - 495 4	0,54	Hàng ngày	7 × 3,5 7 × 3,5	~2600
Vùng cận hồng ngoại (Near-Infrared – NIR)	5 675 - 775 6	0,38	Hàng ngày	7 × 3,5 7 × 3,5	~2600
Vùng hồng ngoại sóng ngắn (Short-wave Infrared – SWIR)	7 2305 - 2385	0,25	Hàng ngày	7 × 7	~2600

Trong nghiên cứu này, sử dụng ngôn ngữ lập trình Python để chiết tách thông tin ô nhiễm không khí khu vực Thành phố Thái Nguyên trên giao diện API của công nghệ GEE (Hình 2).



Hình 2. Chiết tách thông tin ô nhiễm không khí khu vực TP Thái Nguyên trên nền tảng GEE

b. Dữ liệu sử dụng

Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh radar Sentinel-5P TROPOMI thu thập liên tục trong suốt 3 năm liên tục từ 2019 đến 2021, nhằm phục vụ theo dõi, đánh giá và phân tích mức độ ô nhiễm không khí trên địa bàn thành phố Thái Nguyên đối với các loại khí thải NO₂, SO₂, và CO.

Trong nghiên cứu này, dữ liệu ảnh vệ tinh radar Sentinel-5P TROPOMI đã được xử lý ở mức độ L3 bằng công cụ harpconvertbin_spatial trên nền tảng GEE nhằm loại bỏ các điểm ảnh (pixel) có giá trị QA nhỏ hơn 80% đối với Sol khí AER_AI, 75% mật độ tầng đối lưu của NO₂ và 50% cho tất cả các dữ liệu khác ngoại trừ O₃ và SO₂ (Bảng 2).

Bảng 2. Dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI sử dụng trong nghiên cứu

Loại	Mức độ chi tiết	Độ phân giải thời gian	Độ phân giải không gian (km ²)	Định dạng	Nguồn
Khí Nitrogen Dioxide (NO ₂)	L3	Hàng ngày	7 × 3,5	Raster	[30]
Khí Sulphur Dioxide (SO ₂)	L3	Hàng ngày	7 × 3,5	Raster	[31]
Khí Cacbon Monoxide (CO)	L3	Hàng ngày	7 × 3,5	Raster	[32]

c. Tiêu chuẩn đánh giá

Các kết quả đánh giá ô nhiễm không khí từ dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI trong nghiên cứu này được so sánh, kiểm chứng với các giá trị giới hạn của các thông số cơ bản trong không khí xung quanh được quy định tại quy chuẩn QCVN 05:2013 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh [33]. Số liệu dùng để so sánh là trung bình năm, trong đó, trung bình năm là giá trị trung bình của các giá trị đo được trong khoảng thời gian một năm (Bảng 3).

Bảng 3. Giá trị giới hạn các thông số cơ bản trong không khí xung quanh (QCVN 05:2013)

Đơn vị tính: Microgam trên mét khối (µg/m ³)					
TT	Thông số	Trung bình 1 giờ	Trung bình 8 giờ	Trung bình 24 giờ	Trung bình năm
1	SO ₂	350	-	125	50
2	CO	30000	10000	-	-
3	NO ₂	200	-	100	40
4	O ₃	300	120	-	-
5	Tổng bụi lơ lửng (TSP)	-	-	200	100
6	Bụi PM10	-	-	150	50
7	Bụi PM2,5	-	-	50	25
8	Pb	-	-	1,5	0,5

Ghi chú: dấu (-) là không quy định.

Để so sánh với giới hạn các thông số cơ bản được quy định theo quy chuẩn QCVN 05:2013 - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh, nồng độ khí thải NO₂ từ đơn vị mol/m² có thể tính chuyển về đơn vị µg/m³ theo công thức sau [34]:

$$C = \frac{C_{column}}{H} MA \quad (1)$$

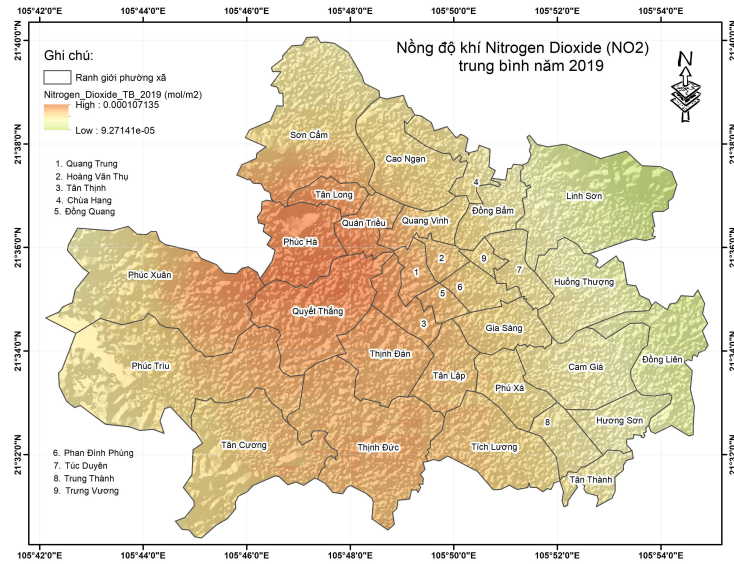
trong đó: C là nồng độ khí thải đã được tính chuyển về đơn vị µg/m³; C_{column} là nồng độ khí thải tính được từ dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI ở đơn vị mol/m²; H là chiều cao tầng khí quyển, tính theo đơn vị mét ($H = 10000$ m); M là khối lượng phân tử khí, tính theo đơn vị g/mol ($M_{NO_2} =$

46,0055 g/mol; $M_{SO_2} = 64,0648$ g/mol; $M_{CO} = 44,0098$ g/mol); A là hằng số chuyển đổi từ đơn vị g/m³ sang đơn vị $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ($A = 1000000$);

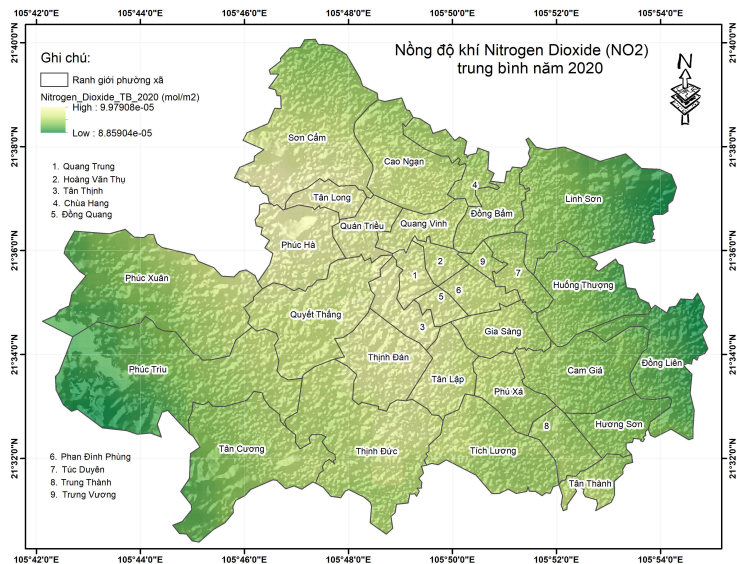
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả theo dõi mức độ ô nhiễm khí Nitrogen Dioxide (NO₂)

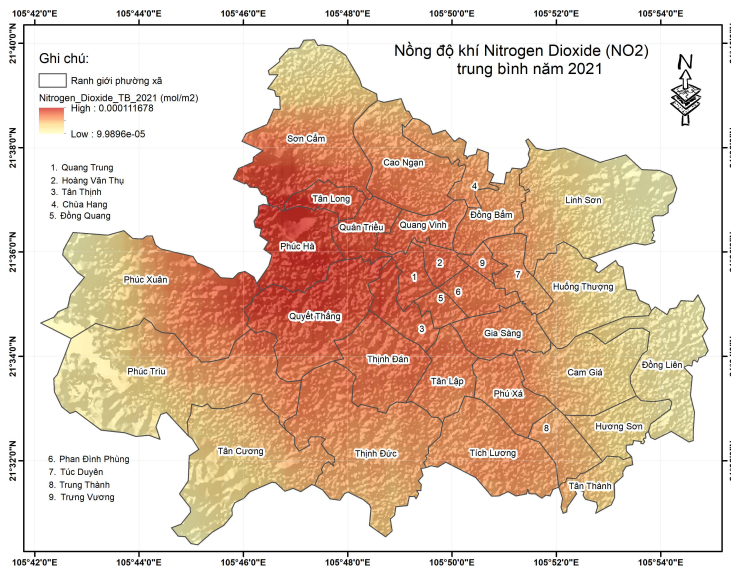
Trên cơ sở kết quả thu thập và phân tích dữ liệu ảnh vệ tinh radar Sentinel-5P TROPOMI, xây dựng được bản đồ đánh giá mức độ ô nhiễm khí Nitrogen Dioxide (NO₂) trung bình năm cho toàn bộ thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021 (Hình 3).



(a) 2019



(b) 2020



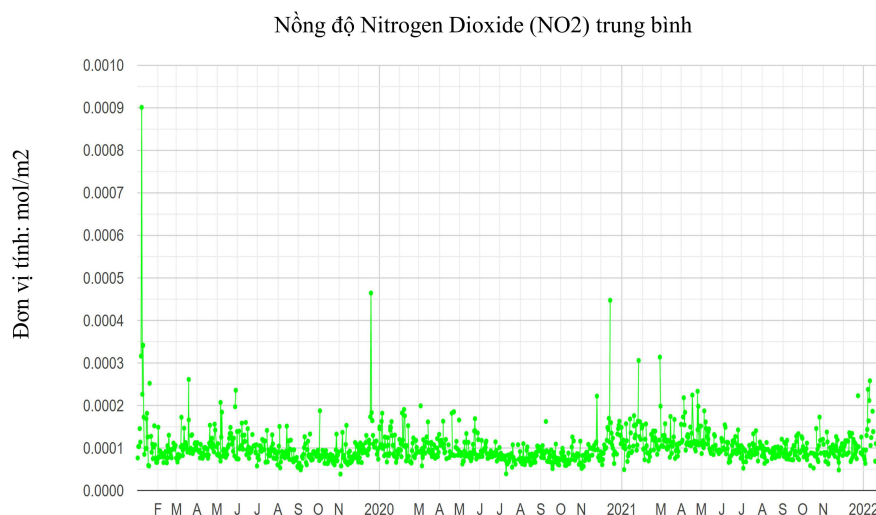
(c) 2021

Hình 3. Bản đồ thể hiện sự phân bố nồng độ khí Nitrogen Dioxide (NO₂) trung bình năm khu vực thành phố Thái Nguyên trong các năm 2019, 2020 và 2021

Khí Nitrogen Dioxide (NO₂) được hình thành bởi khí Nitơ và oxy trong không khí kết hợp với nhau trong điều kiện nhiệt độ cao, do vậy, khí NO₂ thường gặp ở các khu công nghiệp và các khu đô thị lớn. Dựa trên các bản đồ đánh giá mức độ ô nhiễm khí Nitrogen Dioxide (NO₂) trung bình năm cho toàn bộ thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021, có thể thấy, trong cả 3 năm 2019, 2020 và 2021, các xã/phường Phúc Hà, Quyết Thắng, Quán Triều, Tân Long và Sơn Cẩm trên địa bàn TP thường xuyên có nồng độ ô nhiễm khí Nitrogen Dioxide (NO₂) ở mức cao. Tiến hành đối soát với số liệu Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2016-2020 và Báo cáo Kết quả thực hiện Đề án tăng cường công tác quản lý tài nguyên khoáng sản và bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2017-2020 của UBND TP Thái Nguyên, nhận thấy các xã/phường Quán Triều, Tân Long là những xã có mật độ đất đô thị tương đối lớn, ngoài ra, đây còn là địa bàn của một số cơ sở sản xuất như: nhà máy giấy Hoàng Văn Thụ, công ty nhiệt điện Cao Ngạn, mỏ than Khánh Hòa. Bên cạnh đó, các xã Thịnh Đức, Thịnh Đán, Tân Lập, Tích Lương có nồng độ khí thải NO₂ giảm dần theo thời gian, đây là những xã không có nhiều các hoạt động khai thác khoáng sản, việc bị ô nhiễm khí thải NO₂ trên địa bàn những xã này trong những năm qua có thể do tác động của gió làm phát tán khí thải tới các xã xung quanh. Còn lại các xã/phường Phúc Hà, Sơn Cẩm, Quyết Thắng lại là những xã có diện tích đất phi nông nghiệp khá lớn, mặc dù không có các hoạt động khai thác khoáng sản song lại là địa bàn tập trung các hoạt động sản xuất nhỏ lẻ, các hoạt động xây dựng trên địa bàn tương đối nhiều. Đây được xem là nguyên nhân chính dẫn tới sự ô nhiễm khí thải NO₂ kéo dài trên địa bàn 05 xã/phường này trong các năm 2019, 2020, 2021.

Theo biểu đồ giá trị trung bình nồng độ khí NO₂ của các tháng trong năm trên Hình 4 cho thấy, nồng độ khí thải NO₂ trung bình qua các năm 2019, 2020, và 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên biến động khá đều, trong đó, 5 tháng đầu năm (từ tháng 1 đến tháng 5) và 2 tháng cuối năm (tháng 11, tháng 12) là những tháng mà nồng độ khí thải NO₂ có xu hướng tăng cao hơn so với các tháng khác trong năm. Điều này có thể lý giải là do khí hậu TP. Thái Nguyên chia làm 2 mùa rõ rệt, trong đó,

mùa mưa thường bắt đầu từ tháng 5 đến tháng 10 trong năm, mùa khô bắt đầu từ tháng 10 năm trước đến tháng 5 năm sau, như vậy có thể thấy, nồng độ khí thải NO_2 tại khu vực nghiên cứu có xu hướng giảm vào mùa mưa.



Hình 4. Biểu đồ giá trị trung bình nồng độ khí Nitrogen Dioxide (NO_2) cho các tháng trong các năm 2019, 2020, 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên

Nhìn chung, nồng độ khí thải NO_2 trung bình qua các năm 2019, 2020, và 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên dao động khá đều, cụ thể như sau:

- Năm 2019: nồng độ khí NO_2 trung bình dao động xung quanh khoảng từ 0,0000927 – 0,000107 (mol/m^2), tương ứng với 0,43 – 0,49 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Năm 2020: mật độ khí NO_2 trung bình dao động xung quanh khoảng từ 0,0000886 – 0,0000998 (mol/m^2), tương ứng với 0,41 – 0,46 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Năm 2021: mật độ khí NO_2 trung bình dao động xung quanh khoảng từ 0,0000999 – 0,000112 (mol/m^2), tương ứng với 0,46 – 0,52 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

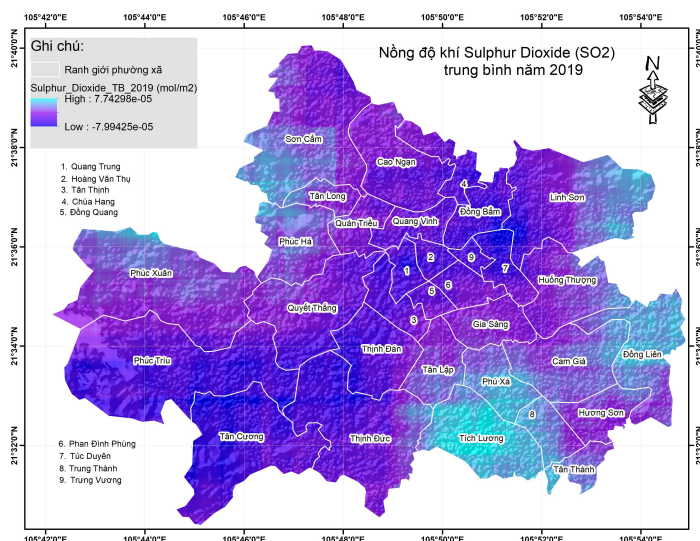
Khi so sánh với giá trị giới hạn của các thông số cơ bản được quy định trong quy chuẩn QCVN 05:2013 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh nhận thấy, nồng độ khí thải NO_2 trung bình năm trên địa bàn TP Thái Nguyên trong suốt các năm 2019, 2020, 2021 dao động khá đều và không vượt quá giá trị giới hạn cho phép.

3.2. Kết quả theo dõi mức độ ô nhiễm khí Sulphur Dioxide (SO_2)

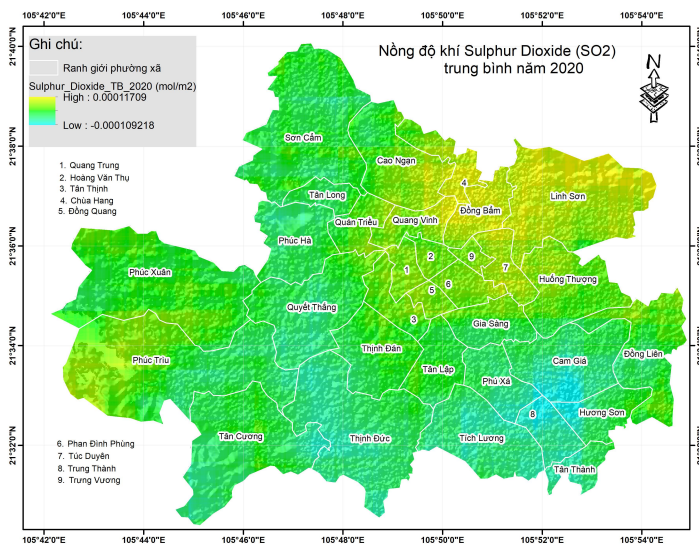
Căn cứ vào dữ liệu viễn thám Sentinel-5P TROPOMI thu thập được, tiến hành phân tích và xây dựng được bản đồ theo dõi mức độ ô nhiễm khí Sulphur Dioxide (SO_2) trung bình năm cho toàn bộ thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021 (Hình 5).

Dựa trên các bản đồ đánh giá mức độ ô nhiễm khí Sulphur Dioxide (SO_2) trung bình năm cho toàn bộ thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021, có thể thấy, trong năm 2019, toàn thành phố có phường Tích Lương có nồng độ ô nhiễm khí Sulphur Dioxide (SO_2) cao nhất, tiếp theo là các phường Lưu Xá, Đồng Liên. Đến năm 2020, có 3 xã/phường là Đồng Bầm, Chùa Hang và Linh Sơn có nồng độ ô nhiễm khí Sulphur Dioxide (SO_2) cao nhất trong phạm vi toàn thành phố. Sang đến năm 2021, thành phố có 3 xã/phường là Đồng Liên, Cam Giá, Huông Thượng có nồng độ ô nhiễm khí Sulphur Dioxide (SO_2) ở mức cao nhất. Thông thường, khí SO_2 là khí thải đặc trưng của các ngành

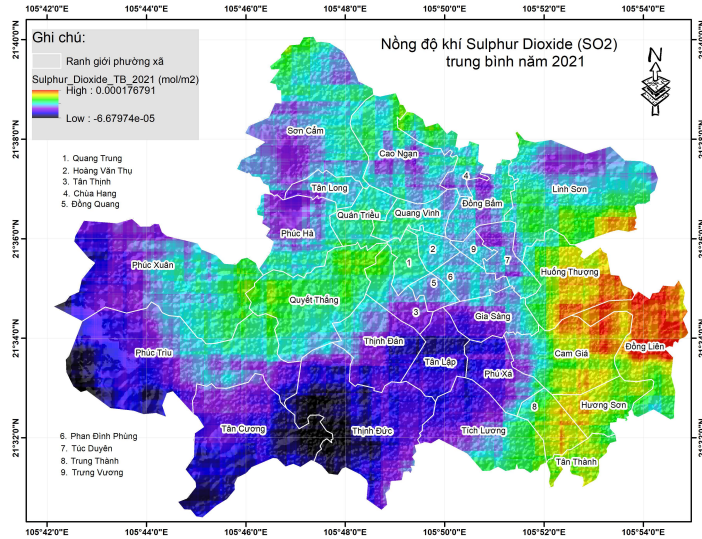
công nghiệp sản xuất, cụ thể hơn là hoạt động đốt nhiên liệu hoá thạch tại lò luyện kim, ngoài ra, một số loại hình sản xuất khác cũng có thể tạo ra khí SO₂ như: xăng dầu, phương tiện vận chuyển,... Qua tiến hành đối sánh và phân tích từ Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2016-2020 và Báo cáo Kết quả thực hiện Đề án tăng cường công tác quản lý tài nguyên khoáng sản và bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2017-2020 của UBND TP Thái Nguyên, nhận thấy số lượng các xã/phường trên địa bàn TP có nồng độ khí SO₂ cao không nhiều, chỉ dao động từ 1-3 xã/phường nằm gần các cơ sở sản xuất xi măng, cán thép, các cơ sở khai thác sắt, cát sỏi, cụ thể là nhà máy cán thép Lưu Xá, nhà máy luyện kim Cốc Hóa (phường Cam Giá), nhà máy xi măng Lưu Xá (phường Phú Xá), mỏ đá Núi Voi, mỏ sắt Tiến Bộ (phường Linh Sơn). Có thể nói các hoạt động từ các cơ sở khai thác này là nguyên nhân chính dẫn tới sự ô nhiễm khí thải SO₂ phân bố tập trung tại một số xã/phường trên địa bàn thành phố trong các năm 2019, 2020, 2021.



(a) 2019



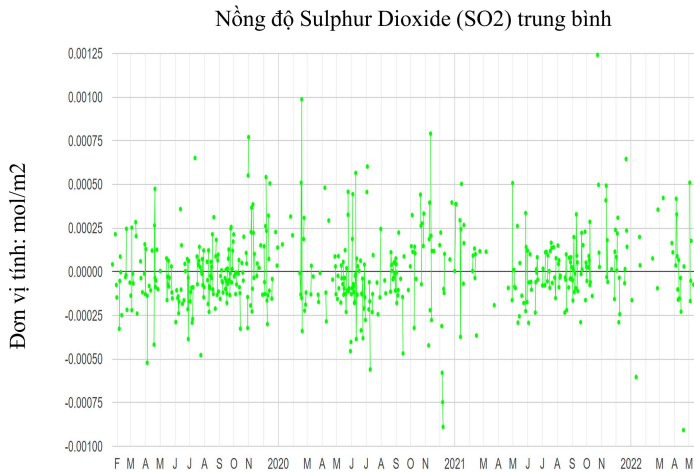
(b) 2020



(c) 2021

Hình 5. Bản đồ thể hiện sự phân bố nồng độ khí Sulphur Dioxide (SO₂) trung bình năm khu vực thành phố Thái Nguyên trong các năm 2019, 2020 và 2021

Theo biểu đồ giá trị trung bình nồng độ khí SO₂ của các tháng trong năm trên Hình 6 cho thấy, cũng tương tự như nồng độ khí thải NO₂, nồng độ khí thải SO₂ trung bình qua các năm 2019, 2020, và 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên cũng có xu hướng tăng cao trong 5 tháng đầu năm và 2 tháng cuối năm, vào các tháng mùa mưa trong năm, nồng độ khí thải SO₂ có xu hướng giảm nhiều hơn.



Hình 6. Biểu đồ giá trị trung bình nồng độ khí Sulphur Dioxide (SO₂) cho các tháng trong các năm 2019, 2020, 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên

Nhìn chung, nồng độ khí thải SO₂ trung bình qua các năm 2019, 2020, và 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên biến đổi và chênh lệch khá nhiều, cụ thể như sau:

- Năm 2019: nồng độ khí SO₂ trung bình dao động xung quanh khoảng từ $(-0,0000799) - 0,0000774$ (mol/m²), tương ứng với $(-0,51) - 0,50$ (µg/m³).

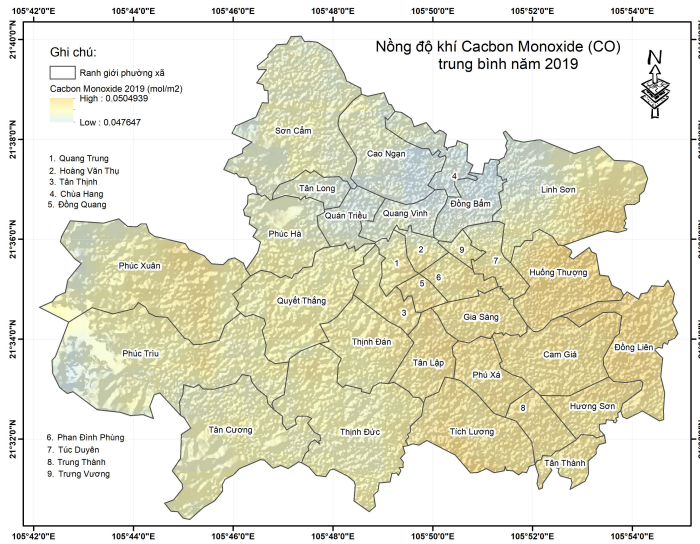
- Năm 2020: mật độ khí SO₂ trung bình dao động xung quanh khoảng từ $(-0,000109) - 0,000117$ (mol/m²), tương ứng với $(-0,70) - 0,75$ (µg/m³).

- Năm 2021: mật độ khí SO_2 trung bình dao động xung quanh khoảng từ $(-0,0000668) - 0,000178$ (mol/m^2), tương ứng với $(-0,43) - 1,14$ ($\mu g/m^3$).

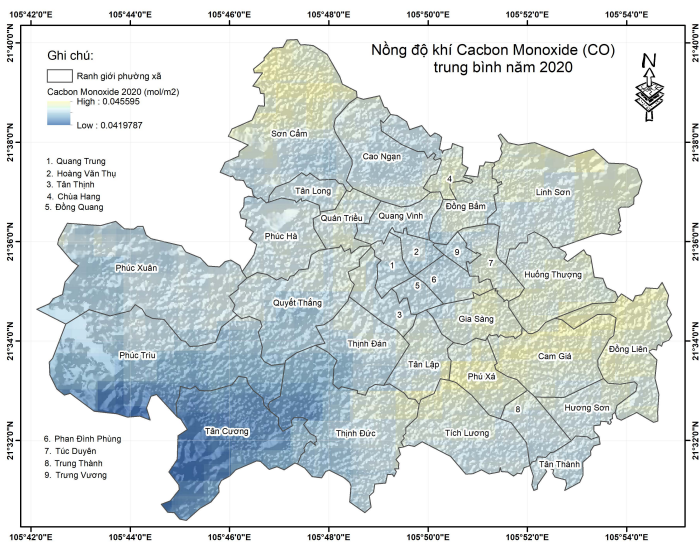
Khi so sánh với giá trị giới hạn của các thông số cơ bản được quy định trong quy chuẩn QCVN 05:2013 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh nhận thấy, nồng độ khí thải SO_2 trung bình năm trên địa bàn TP Thái Nguyên trong suốt các năm 2019, 2020, 2021 đều đảm bảo không vượt quá giá trị giới hạn cho phép.

3.3. Kết quả theo dõi mức độ ô nhiễm khí Cacbon Monoxide (CO)

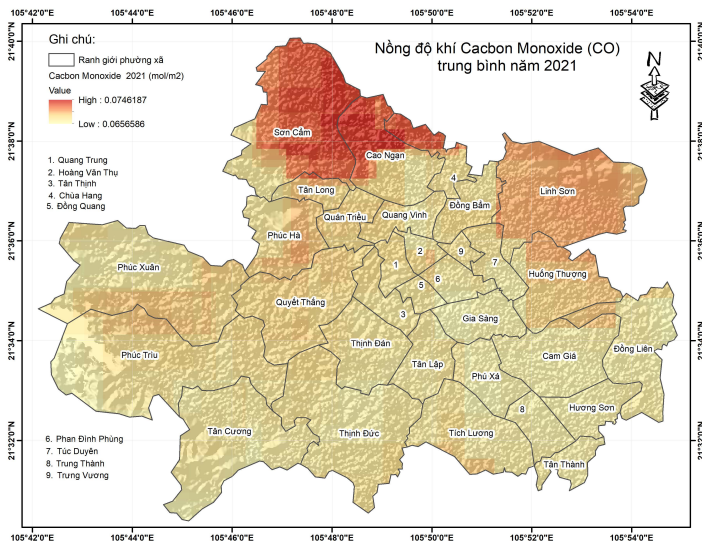
Trên cơ sở kết quả thu thập và phân tích dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-5P TROPOMI, xây dựng được bản đồ đánh giá mức độ ô nhiễm khí Cacbon Monoxide CO cho toàn thành phố Thái Nguyên trong các năm 2019, 2020 và 2021 (Hình 7).



(a) 2019



(b) 2020



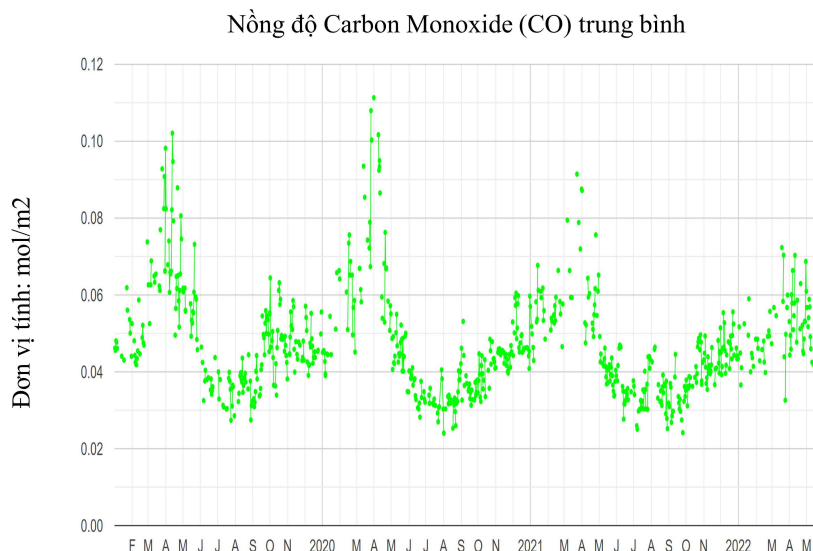
(c) 2021

Hình 7. Bản đồ thể hiện sự phân bố nồng độ khí Cacbon Monoxide (CO) trung bình năm khu vực thành phố Thái Nguyên trong các năm 2019, 2020 và 2021

Dựa trên các bản đồ đánh giá mức độ ô nhiễm khí Cacbon Monoxide (CO) trung bình năm cho toàn bộ thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021, có thể thấy, trong năm 2019, các xã/phường có mức độ ô nhiễm khí CO cao là các xã Linh Sơn, Huống Thượng, Đồng Liên, Tích Lương. Năm 2020, các xã/phường có mức độ ô nhiễm khí CO cao là các xã Sơn Cẩm, Linh Sơn, Đồng Liên, Cam Giá, Phú Xá, Tích Lương. Sang đến năm 2021, chỉ còn 3 xã/phường có mức độ ô nhiễm khí CO cao là các xã Hương Sơn, Tân Thành, Trung Thành.

Khí Cacbon Monoxide CO là sản phẩm chính của quá trình đốt cháy nhiên liệu trong môi trường không đủ oxy, như đốt rác, củi, than, máy phát điện, lò nung, khói thuốc lá, khí thải từ các phương tiện tham gia giao thông,... Theo số liệu từ Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2016-2020 và Báo cáo Kết quả thực hiện Đề án tăng cường công tác quản lý tài nguyên khoáng sản và bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2017-2020 của UBND TP Thái Nguyên, mặc dù các hoạt động khai thác khoáng sản, xử lý chất thải rắn,... diễn ra trên địa bàn các xã/phường khác song khí thải CO vẫn có thể phát tán theo gió, gây ô nhiễm không khí tới các xã/phường xung quanh. Một số cơ sở sản xuất, khai thác luyện kim, xi măng, xử lý chất thải rắn trên địa bàn TP như: mỏ than Khánh Hòa (phường Quán Triều), khu liên hợp xử lý chất thải rắn Đá Mài (xã Tân Cương), mỏ than Bá Sơn (xã Sơn Cẩm), nhà máy cán thép Lưu Xá, nhà máy luyện kim Cốc Hóa (phường Cam Giá), nhà máy giấy Hoàng Văn Thụ, nhà máy nhiệt điện Cao Ngạn (phường Quán Triều), nhà máy xi măng Lưu Xá (phường Phú Xá), mỏ cát sỏi xã Cao Ngạn (xã Cao Ngạn), mỏ cát sỏi xã Đồng Bầm (xã Đồng Bầm), mỏ sắt Tiến Bộ (xã Linh Sơn), mỏ đá Núi Voi (phường Chùa Hang), mỏ đá Núi Hột (xã Linh Sơn).

Theo biểu đồ giá trị trung bình nồng độ khí CO của các tháng trong năm trên Hình 8 cho thấy, nồng độ khí thải CO trung bình qua các năm 2019, 2020, và 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên biến động khá đều và có tính chu kỳ, trong đó, tháng 6 đến tháng 9 là khoảng thời gian mà nồng độ khí CO giảm nhiều hơn so với các tháng khác trong năm, tháng 3 đến tháng 5 là khoảng thời gian mà nồng độ khí CO đạt giá trị lớn nhất trong năm, đây cũng trùng với thời điểm mùa khô trong năm. Nhìn chung,



Hình 8. Biểu đồ giá trị trung bình nồng độ khí Cacbon Monoxide (CO) cho các tháng trong các năm 2019, 2020, 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên

nồng độ khí CO trung bình qua các năm 2019, 2020, 2021 trên địa bàn TP Thái Nguyên dao động khá đều quanh các mức như sau:

- Năm 2019: nồng độ khí CO trung bình dao động xung quanh khoảng từ 0,047647 – 0,0504938 (mol/m²), tương ứng với 209,69 – 222,22 (µg/m³).
- Năm 2020: mật độ khí CO trung bình dao động xung quanh khoảng từ 0,0419787 – 0,045595 (mol/m²), tương ứng với 184,75 – 200,66 (µg/m³).
- Năm 2021: mật độ khí CO trung bình dao động xung quanh khoảng từ 0,0413941 – 0,0437519 (mol/m²), tương ứng với 182,17 – 192,53 (µg/m³).

Mặc dù trong quy chuẩn QCVN 05:2013 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh, không quy định giá trị giới hạn khí CO trung bình năm song có thể nhận thấy, nồng độ khí thải CO trung bình năm trên địa bàn TP Thái Nguyên trong suốt các năm 2019, 2020, 2021 đã được giảm thiểu đáng kể, điều này cũng cho thấy những nỗ lực giảm thiểu ô nhiễm không khí từ chính quyền thành phố trong những năm qua.

3.4. Kết quả kiểm chứng ô nhiễm không khí tại khu vực nghiên cứu

Các kết quả đánh giá mức độ ô nhiễm khí thải từ dữ liệu ảnh vệ tinh có thể kiểm chứng thông qua số liệu từ các trạm quan trắc không khí mặt đất hoặc thông qua dữ liệu lịch sử [11–13, 17, 20]. Trong nghiên cứu này, kết quả xây dựng bản đồ đánh giá mức độ ô nhiễm khí thải SO₂, NO₂, CO trong không khí tại thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021 trên cơ sở ứng dụng dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-5P TROPOMI được kiểm chứng thông qua dữ liệu lịch sử (Hình 9) và các Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2016-2020, Báo cáo Kết quả thực hiện Đề án tăng cường công tác quản lý tài nguyên khoáng sản và bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2017-2020 của UBND TP Thái Nguyên [35, 36].



(a) Ô nhiễm không khí tại xóm Quyết Thắng, xã Cao Ngạn, thành phố Thái Nguyên, ngày 31/07/2020 [37]



(b) Ô nhiễm không khí do khai thác khoáng sản trên địa bàn TP Thái Nguyên, ngày 01/10/2021 [38]

Hình 9. Kết quả kiểm chứng ô nhiễm không khí tại TP Thái Nguyên

4. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày việc ứng dụng dữ liệu viễn thám radar Sentinel-5P TROPOMI đa thời gian trong giám sát và đánh giá chất lượng không khí mức độ ô nhiễm khí thải SO_2 , NO_2 , CO trong không khí trên địa bàn thành phố Thái Nguyên vào các năm 2019, 2020 và 2021. Kết quả của nghiên cứu này được kiểm chứng với Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2016-2020 và Báo cáo Kết quả thực hiện Đề án tăng cường công tác quản lý tài nguyên khoáng sản và bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2017-2020 của UBND TP Thái Nguyên và so sánh với các giá trị giới hạn của các thông số cơ bản trong không khí xung quanh được quy định tại quy chuẩn QCVN 05:2013 Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh, qua đó, cho thấy kết quả của nghiên cứu này cùng phù hợp với những nhận định được đưa ra trong các báo cáo này.

Bên cạnh đó, các sản phẩm bản đồ thu nhận được trong nghiên cứu này còn cho phép các cơ quan chức năng đánh giá, phân vùng mức độ ô nhiễm cũng như dễ dàng xác định các nguồn phát khí thải trên địa bàn thành phố. Với phạm vi quan sát và đánh giá rộng lớn, kết quả của nghiên cứu này cho thấy dữ liệu viễn thám radar Sentinel-5P TROPOMI đa thời gian trên nền tảng GEE thực sự là một giải pháp giám sát và đánh giá ô nhiễm không khí tin cậy, hiệu quả, và có chi phí thấp.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây Dựng Hà Nội đối với Nhóm nghiên cứu “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ GIS & RS trong phân tích, đánh giá rủi ro thiên tai nhằm thích ứng với biến đổi khí hậu”.

Tài liệu tham khảo

- [1] Kuehn, B. M. (2014). WHO: More Than 7 Million Air Pollution Deaths Each Year. *JAMA*, 311(15):1486.
- [2] Ukaogo, P. O., Ewuzie, U., Onwuka, C. V. (2020). Environmental pollution: causes, effects, and the remedies. *Microorganisms for Sustainable Environment and Health*, Elsevier, 419–429.
- [3] Kunii, O., Kanagawa, S., Yajima, I., Hisamatsu, Y., Yamamura, S., Amagai, T., Ismail, I. T. S. (2002). The 1997 Haze Disaster in Indonesia: Its Air Quality and Health Effects. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 57(1):16–22.

- [4] Babatola, S. S. (2018). [Global burden of diseases attributable to air pollution](#). *Journal of Public Health in Africa*, 9(3).
- [5] Kaplan, G., Avdan, Z. Y., Avdan, U. (2019). [Spaceborne Nitrogen Dioxide Observations from the Sentinel-5P TROPOMI over Turkey](#). *3rd International Electronic Conference on Remote Sensing*, MDPI.
- [6] Nowlan, C. R., Martin, R. V., Philip, S., Lamsal, L. N., Krotkov, N. A., Marais, E. A., Wang, S., Zhang, Q. (2014). [Global dry deposition of nitrogen dioxide and sulfur dioxide inferred from space-based measurements](#). *Global Biogeochemical Cycles*, 28(10):1025–1043.
- [7] Weaver, L. K. (2020). [Carbon monoxide poisoning can act as a stress test to reveal underlying coronary artery disease: case report](#). *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 151–169.
- [8] Kaplan, G., Avdan, Z. Y. (2020). [Space-borne air pollution observation from Sentinel-5p Tropomi: relationship between pollutants, geographical and demographic data](#). *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(3):130–137.
- [9] Behera, M. D., Mudi, S., Shome, P., Das, P. K., Kumar, S., Joshi, A., Rathore, A., Deep, A., Kumar, A., Sanwariya, C., Kumar, N., Chandrakar, R., Seshadri, S., Mukherjee, S., Bhattacharam, S. K., Sirivella, Z. (2021). [COVID-19 slowdown induced improvement in air quality in India: rapid assessment using Sentinel-5P TROPOMI data](#). *Geocarto International*, 37(25):8127–8147.
- [10] Chinh, L. T. D., Hằng, H. T., Linh, T. H., Quỳnh, B. D. (2022). [Đánh giá ảnh hưởng của lũ lụt khu vực tỉnh Quảng Bình sử dụng Google Earth Engine và các phân tích không gian](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXDHN*, 16(5V):101–113.
- [11] Verhoelst, T., Compornolle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H. J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A., Boersma, K. F., Bogner, K., Dehn, A., Donner, S., Elokhov, A., Gebetsberger, M., Goutail, F., de la Mora, M. G., Gruzdev, A., Gratsea, M., Hansen, G. H., Irie, H., Jepsen, N., Kanaya, Y., Karagkiozidis, D., Kivi, R., Kreher, K., Levelt, P. F., Liu, C., Müller, M., Comas, M. N., PETERS, A. J. M., Pommereau, J.-P., Portafaix, T., Prados-Roman, C., Puente-dura, O., Querel, R., Remmers, J., Richter, A., Rimmer, J., Cárdenas, C. R., de Miguel, L. S., Sinyakov, V. P., Stremme, W., Strong, K., Roozendael, M. V., Veefkind, J. P., Wagner, T., Wittrock, F., González, M. Y., Zehner, C. (2021). [Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks](#). *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1):481–510.
- [12] van Geffen, J., Eskes, H., Compornolle, S., Pinardi, G., Verhoelst, T., Lambert, J.-C., Sneep, M., ter Linden, M., Ludewig, A., Boersma, K. F., Veefkind, J. P. (2022). [Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: impact of version v2. 2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data](#). *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(7):2037–2060.
- [13] Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B.-A., Nistor, C., Dobre, R. (2020). [Nitrogen Dioxide \(NO₂\) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak](#). *Remote Sensing*, 12(21):3575.
- [14] Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O., Neng, N., Nogueira, J., Rego, F., Vieira, P. (2021). [Atmospheric Trends of CO and CH₄ from Extreme Wildfires in Portugal Using Sentinel-5P TROPOMI Level-2 Data](#). *Fire*, 4(2):25.
- [15] Liu, X., Yi, G., Zhou, X., Zhang, T., Lan, Y., Yu, D., Wen, B., Hu, J. (2021). [Atmospheric NO₂ Distribution Characteristics and Influencing Factors in Yangtze River Economic Belt: Analysis of the NO₂ Product of TROPOMI/Sentinel-5P](#). *Atmosphere*, 12(9):1142.
- [16] Kanniah, K. D., Zaman, N. A. F. K., Perumal, K. (2021). [Analysis of NO₂ Tropospheric Column amount at Airports in Malaysia Before and during COVID-19 Pandemic Using SENTINEL-5P Tropomi Data](#). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021:399–403.
- [17] Maurya, N. K., Pandey, P. C., Sarkar, S., Kumar, R., Srivastava, P. K. (2022). [Spatio-Temporal Monitoring of Atmospheric Pollutants Using Earth Observation Sentinel 5P TROPOMI Data: Impact of Stubble Burning a Case Study](#). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(5):301.
- [18] Ayoobi, A. W., Ahmadi, H., Inceoglu, M., Pekkan, E. (2021). [Seasonal impacts of buildings' energy consumption on the variation and spatial distribution of air pollutant over Kabul City: application of Sen-](#)

- tin—5P TROPOMI products. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(1):73–83.
- [19] Bodah, B. W., Neckel, A., Maculan, L. S., Milanese, C. B., Korcelski, C., Ramirez, O., Mendez-Espinosa, J. F., Bodah, E. T., Oliveira, M. L. S. (2022). [Sentinel-5P TROPOMI satellite application for NO2 and CO studies aiming at environmental valuation](#). *Journal of Cleaner Production*, 357:131960.
- [20] Rabiei-Dastjerdi, H., Mohammadi, S., Saber, M., Amini, S., McArdle, G. (2022). [Spatiotemporal Analysis of NO2 Production Using TROPOMI Time-Series Images and Google Earth Engine in a Middle Eastern Country](#). *Remote Sensing*, 14(7):1725.
- [21] Ganbat, G., Lee, H., Jo, H.-W., Jadamba, B., Karthe, D. (2022). [Assessment of COVID-19 Impacts on Air Quality in Ulaanbaatar, Mongolia, Based on Terrestrial and Sentinel-5P TROPOMI Data](#). *Aerosol and Air Quality Research*, 22(10):220196.
- [22] Godłowska, J., Hajto, M. J., Lapeta, B., Kaszowski, K. (2023). [The attempt to estimate annual variability of NOx emission in Poland using Sentinel-5P/TROPOMI data](#). *Atmospheric Environment*, 294:119482.
- [23] Judd, L. M., Al-Saadi, J. A., Szykman, J. J., Valin, L. C., Janz, S. J., Kowalewski, M. G., Eskes, H. J., Veeffkind, J. P., Cede, A., Mueller, M., Gebetsberger, M., Swap, R., Pierce, R. B., Nowlan, C. R., Abad, G. G., Nehrir, A., Williams, D. (2020). [Evaluating Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO2 column densities with airborne and Pandora spectrometers near New York City and Long Island Sound](#). *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(11):6113–6140.
- [24] Thảo, Đ. T. P., Ngô, N. V., Sơn, V. K. (2022). [Thành lập bản đồ phân bố nồng độ khí NO2, SO2 khu vực Hà nội từ dữ liệu viễn thám SENTINEL-5P](#). *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ*, (54):46–53.
- [25] Dũng, L. N., Quỳnh, B. D., Trọng, T. Đ., Dũng, N. V., Dự, T. X., An, H. T., Điệp, L. V. (2023). [Nghiên cứu giải pháp đánh giá ô nhiễm không khí khu vực khai thác mỏ đất đắp bằng dữ liệu Sentinel-5P Tropomi](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 17(1V):62–74.
- [26] Duc, D. M., Hieu, N. M., Sassa, K., Hamasaki, E., Dang, K., Miyagi, T. (2014). [Analysis of a Deep-Seated Landslide in the Phan Me Coal Mining Dump Site, Thai Nguyen Province, Vietnam](#). *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Springer International Publishing, 373–377.
- [27] DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., Lang, M. W. (2020). [Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine](#). *Remote Sensing of Environment*, 240:111664.
- [28] Bey, A., Díaz, A. S.-P., Maniatis, D., Marchi, G., Mollicone, D., Ricci, S., Bastin, J.-F., Moore, R., Federici, S., Rezende, M., Patriarca, C., Turia, R., Gamoga, G., Abe, H., Kaidong, E., Miceli, G. (2016). [Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation](#). *Remote Sensing*, 8(10):807.
- [29] The European Space Agency. [Sentinel Online](#). Accessed Mar 15, 2023.
- [30] Earth Engine Data Catalog. [Sentinel-5P NRTI NO2: Near Real-Time Nitrogen Dioxide](#). Accessed June 03, 2022.
- [31] Earth Engine Data Catalog. [Sentinel-5P OFFL SO2: Offline Sulfur Dioxide](#). Accessed June 03, 2022.
- [32] Earth Engine Data Catalog. [Sentinel-5P NRTI CO: Near Real-Time Carbon Monoxide](#). Accessed June 03, 2022.
- [33] Quy chuẩn QCVN 05:2013. [Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng không khí xung quanh](#).
- [34] Savenets, M. (2021). [Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite](#). *Időjárás*, 125(2): 271–290.
- [35] UBND Tỉnh Thái Nguyên (2020). [Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2016-2020](#).
- [36] UBND Thành phố Thái Nguyên (2020). [Báo cáo Kết quả thực hiện Đề án tăng cường công tác quản lý tài nguyên khoáng sản và bảo vệ môi trường trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên giai đoạn 2017-2020 của UBND TP Thái Nguyên](#).
- [37] Đài phát thanh - truyền hình Thái Nguyên. [Dân khổ vì ô nhiễm môi trường](#). Truy cập ngày 11/05/2023.
- [38] Đài phát thanh - truyền hình Thái Nguyên. [Thái Nguyên tăng cường kiểm soát ô nhiễm không khí](#). Truy cập ngày 11/05/2023.