

Phân tích biến động không gian - thời gian của hiệu ứng Đảo nhiệt công nghiệp do sự phát triển các khu công nghiệp tại tỉnh Bắc Ninh giai đoạn 2006 – 2026

Vũ Thanh Truyên¹, Nguyễn Phương Bắc¹, Vũ Phương Lan*¹

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

Email tác giả liên hệ: vuphuonglan@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21071278>

Tóm tắt:

Tại các địa phương có tốc độ công nghiệp hóa nhanh, các khu công nghiệp (KCN) đóng vai trò động lực kinh tế nhưng đồng thời gây ra suy thoái môi trường nhiệt. Nghiên cứu này tập trung phân tích biến động không gian - thời gian của lớp phủ (LULC) và tác động nhiệt tại tỉnh Bắc Ninh trong giai đoạn 2006–2026. Tổng cộng 12 KCN trọng điểm được xác định và phân tích dựa trên các liên kết không gian đặc thù. Sử dụng dữ liệu vệ tinh Landsat đa thời gian, nghiên cứu đánh giá mô hình phát triển quỹ đất và phản ứng nhiệt trên hai quy mô: tổng thể (toàn tỉnh) và cục bộ (KCN). Kết quả chỉ ra quá trình chuyển đổi từ đất nông nghiệp sang đất công nghiệp là nguyên nhân chủ đạo làm gia tăng nhiệt độ bề mặt (LST). Sự hình thành và mở rộng của các "đảo nhiệt công nghiệp" mới tại các vùng ven đã tái cấu trúc đáng kể môi trường nhiệt của tỉnh theo thời gian. Những phát hiện này cung cấp bằng chứng khoa học quan trọng, hỗ trợ các nhà quản lý trong việc ra quyết định và định hướng quy hoạch đô thị - công nghiệp bền vững, góp phần kiểm soát hiệu ứng đảo nhiệt và nâng cao chất lượng môi trường sống tại Bắc Ninh.

Từ khóa: Đảo nhiệt công nghiệp, Nhiệt độ bề mặt, Viễn thám, Khu công nghiệp, tỉnh Bắc Ninh
Ngày nhận bài: 24/05/2026 Ngày sửa lại: 17/06/2026 Ngày chấp nhận đăng: 25/06/2026 Ngày xuất bản: 30/06/2026

Spatiotemporal Analysis of the Industrial Heat Island Effect Driven by Industrial Zone Development in Bac Ninh Province (2006–2026)

Thanh Truyen Vu¹, Phuong Bac Nguyen¹, Phuong Lan Vu*¹

¹Faculty of Geography, VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Ha Noi, Vietnam

Corresponding Author Email: vuphuonglan@hus.edu.vn

Abstract:

In rapidly industrializing regions, industrial zones (IZs) serve as key economic drivers but simultaneously induce thermal environmental degradation. This study analyzes the spatiotemporal dynamics of land use/land cover (LULC) changes and their thermal impacts in Bac Ninh Province over the 2006–2026 period. A total of 12 key IZs were identified and analyzed based on their specific spatial configurations. Utilizing multi-temporal Landsat satellite imagery, the research evaluates land development patterns and thermal responses at both macro (province-wide) and micro (IZ-specific) scales. The results indicate that the conversion of agricultural land to industrial land is the primary driver of rising land surface temperatures (LST). Furthermore, the emergence and expansion of new peripheral "industrial heat islands" have significantly restructured the province's thermal environment over time. These findings provide crucial scientific evidence to support policymakers in urban-industrial planning decisions, contributing to effective urban heat island (UHI) mitigation and sustainable living environments in Bac Ninh.

Keywords: Industrial heat island (IHI), Low Surface Temperature (LST), Remote Sensing, Industrial Zone, Bac Ninh Province

Submission received: 24/05/2026

Revised: 17/06/2026

Accepted: 25/06/2026

Published: 30/06/2026

1. Giới thiệu

Quá trình chuyển dịch cơ cấu từ kinh tế nông nghiệp sang công nghiệp hóa và hiện đại hóa là động lực cốt lõi thúc đẩy sự tăng trưởng vượt bậc của các quốc gia đang phát triển [1-2]. Sự phát triển này thường gắn liền với sự hình thành tập trung của các khu công nghiệp (KCN), khu chế xuất quy mô lớn nhằm thu hút vốn đầu tư nước ngoài (FDI) và lực lượng lao động trình độ [3]. Tuy nhiên, bên cạnh những bước đột phá về kinh tế và cơ sở hạ tầng sự chuyển đổi mạnh mẽ từ các lớp phủ tự nhiên như đất nông nghiệp, mặt nước sang các bề mặt nhân tạo phục vụ sản xuất đã gây ra những hệ lụy lớn cho môi trường [4]. Một trong những tác động tiêu cực và rõ nét nhất của quá trình công nghiệp hóa đối với môi trường địa phương là sự hình thành hiệu ứng Đảo nhiệt công nghiệp (IHI) [5-6]. Hiệu ứng đảo nhiệt công nghiệp là hiện tượng các khu vực tập trung nhà máy, xưởng sản xuất có nhiệt độ bề mặt và nhiệt độ không khí cao hơn rõ rệt so với vùng nông thôn hoặc vùng đô thị lân cận [7-8].

Cơ chế vật lý thúc đẩy sự hình thành IHI phức tạp hơn so với đảo nhiệt đô thị thông thường (UHI). Trong các KCN, thảm thực vật tự nhiên bị thay thế bằng hệ thống nhà xưởng có cấu trúc mái tôn, mái kim loại diện tích lớn và các bề mặt bê tông hóa [6]. Các vật liệu nhân tạo này có khả năng tích tụ nhiệt cao, làm suy giảm nghiêm trọng quá trình bốc thoát hơi nước tự nhiên [10]. Lượng nhiệt nhân sinh phát thải trực tiếp từ hoạt động đốt nhiên liệu, máy móc vận hành, khói thải và hệ thống làm mát công nghiệp công suất lớn mới là nhân tố chính khuếch đại cường độ IHI, biến các KCN thành các lõi nhiệt cực đoan trên bản đồ nhiệt độ bề mặt [8-9]. Sự hình thành các lõi nhiệt công nghiệp tác động tiêu cực từ nhà xưởng đến hệ sinh thái khu vực. Tình trạng nền nhiệt tăng cao quá mức trong không gian sản xuất khép kín dẫn đến hiện tượng quá tải nhiệt nghiêm trọng, đe dọa trực tiếp đến sức khỏe của lực lượng lao động và làm sụt giảm năng suất, khiến cho các hệ thống làm mát công nghiệp phải vận hành quá tải, làm tăng chi phí điện năng và lượng phát thải carbon [13-14]. Do đó, việc phân tích động thái không gian - thời gian của IHI là cơ sở để xây dựng các giải pháp giảm thiểu như quy hoạch hành lang xanh công nghiệp hay phát triển mô hình KCN sinh thái bền vững [15-16].

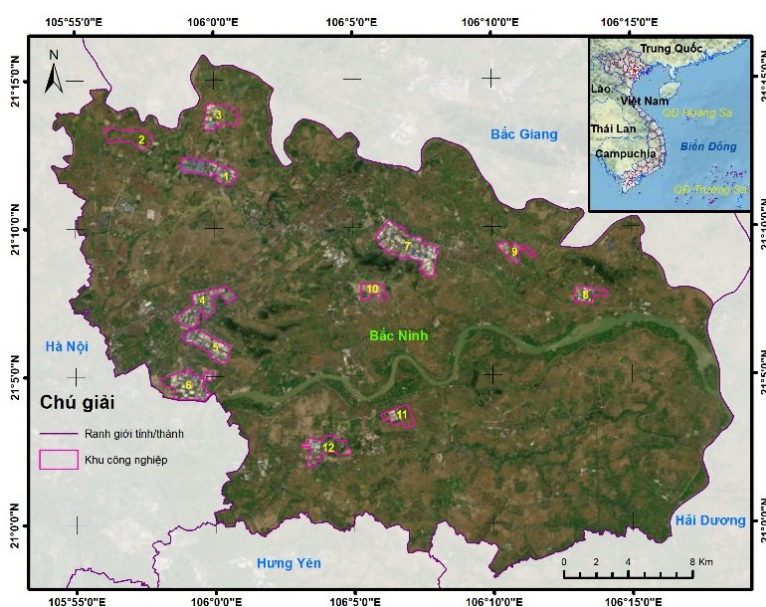
Để giám sát và đánh giá môi trường nhiệt trên diện rộng, các tiến bộ trong công nghệ viễn thám và Hệ thống thông tin địa lý (GIS) đã trở thành công cụ đột phá và tối ưu nhất, thay thế cho các phương pháp quan trắc mặt đất vốn bị giới hạn về không gian [17-18], [19]. Viễn thám cho phép ước tính giá trị Nhiệt độ bề mặt đất (LST) dựa trên các kênh hồng ngoại nhiệt (TIR), đồng thời theo dõi sự biến động của hiện trạng sử dụng đất và lớp phủ mặt đất (LULC) [20-22]. Trên thế giới, việc khai thác chuỗi dữ liệu đa thời gian từ các hệ thống vệ tinh Landsat và MODIS cho phép phân tích các xu hướng dài hạn, định vị chính xác các điểm nóng và mô hình hóa sự biến đổi cấu trúc nhiệt dưới tác động của sự mở rộng KCN thông qua hàm hồi quy tuyến tính thuận giữa LST với chỉ số xây dựng khác biệt chuẩn hóa (NDBI) và mối quan hệ tuyến tính nghịch với chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) [23], [24], [25]. Tại Việt Nam, cách tiếp cận định lượng không gian này cũng đã được áp dụng để đánh giá UHI tại các đô thị lớn như Hà Nội và TP.HCM [26], [27]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay mới chỉ tiếp cận đất xây dựng dưới góc độ đô thị hóa dân cư nói chung, chưa phân tách chuyên sâu đặc trưng nhiệt của

các khu sản xuất công nghiệp tập trung vốn có cấu trúc bề mặt đậm đặc thù. Các tài liệu đánh giá định lượng, mang tính hệ thống về tác động của các loại hình nhà xưởng, mật độ xây dựng KCN và hướng dịch chuyển không gian của lõi nhiệt công nghiệp tại các tỉnh vệ tinh có tốc độ công nghiệp hóa nhanh hầu như chưa được thực hiện đầy đủ.

Tỉnh Bắc Ninh (cũ) là một trong những trung tâm công nghiệp hàng đầu của Việt Nam và khu vực phía Bắc. Giai đoạn 2006 – 2026 đánh dấu bước chuyển mình thần tốc của địa phương từ một tỉnh thuần nông thành một thủ phủ công nghiệp công nghệ cao với mạng lưới các KCN quy mô lớn (như Yên Phong, Quế Võ, Tiên Sơn, VSIP...) phân bố dày đặc. Sự phát triển của hạ tầng công nghiệp và mật độ dân số tăng nhanh trong hai thập kỷ qua đã làm thay đổi hình thái bề mặt đậm và cấu trúc nhiệt độ của tỉnh, kéo theo những biến động bất thường về nhiệt độ bề mặt trên phạm vi toàn vùng. Nhằm giải quyết các khoảng trống khoa học và thực tiễn nêu trên, bài báo này ứng dụng dữ liệu vệ tinh Landsat đa thời gian giai đoạn 2006 – 2026 tại tỉnh Bắc Ninh nhằm hướng tới ba mục tiêu cốt lõi: (i) Đánh giá thực trạng diện tích đất xây dựng gắn liền với quá trình mở rộng các KCN; (ii) Phân tích mối liên hệ không gian giữa lớp phủ sử dụng đất tác động đến hiệu ứng đảo nhiệt công nghiệp; (iii) Xác định mối liên hệ tương quan giữa các chỉ số có liên quan đến hiệu ứng đảo nhiệt công nghiệp. Kết quả nghiên cứu không chỉ làm rõ quy luật phát triển, cường độ và xu hướng dịch chuyển không gian của các lõi nhiệt công nghiệp dưới tác động của làn sóng FDI, mà còn cung cấp luận cứ khoa học quan trọng hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách tối ưu hóa quy hoạch không gian xanh, hướng tới phát triển công nghiệp bền vững và bảo vệ môi trường sinh thái tại tỉnh Bắc Ninh.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu



Hình 1. Vị trí khu vực nghiên cứu

Tỉnh Bắc Ninh (cũ) nằm ở cửa ngõ phía Đông Bắc của thủ đô Hà Nội, là cầu nối tam giác trọng điểm kinh tế Hà Nội – Hải Phòng – Quảng Ninh, tọa độ địa lý từ $20^{\circ}58'$ đến $21^{\circ}16'$ vĩ độ Bắc và $105^{\circ}54'$ đến $106^{\circ}19'$ kinh độ Đông (Hình 1). Với diện tích tự nhiên khoảng $822,7 \text{ km}^2$, Bắc Ninh là tỉnh có diện tích nhỏ nhất Việt Nam nhưng sở hữu mật độ dân số và tốc độ công nghiệp hóa

thuộc hàng cao nhất cả nước. Địa hình của tỉnh tương đối bằng phẳng, chủ yếu là đồng bằng có hướng dốc từ Bắc xuống Nam và từ Tây sang Đông, với khí hậu nhiệt đới gió mùa có sự phân hóa rõ rệt giữa mùa hè nóng ẩm và mùa đông khô lạnh.

Điểm đặc trưng nhất của khu vực nghiên cứu là mạng lưới các KCN tập trung quy mô lớn. Kể từ khi bắt đầu đẩy mạnh chính sách thu hút đầu tư, Bắc Ninh đã hình thành các KCN tập trung được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt với tổng diện tích quy hoạch hơn 6.300 ha (Bảng 1). Các KCN tiêu biểu như Yên Phong (I và II), Quế Võ (I, II và III), Tiên Sơn, VSIP Bắc Ninh... không chỉ là những trung tâm sản xuất công nghệ cao (điển hình là tổ hợp Samsung, Foxconn, Canon) mà còn là những vùng có tốc độ bê tông hóa bề mặt diễn ra dồn dập nhất. Sự tập trung các nhà xưởng có cấu trúc mái tôn diện tích lớn và hệ thống hạ tầng giao thông nội khu dày đặc đã làm thay đổi hoàn toàn đặc tính nhiệt của lớp phủ bề mặt tại đây. Việc lựa chọn tỉnh Bắc Ninh làm khu vực nghiên cứu cho phép đánh giá một cách toàn diện tác động của quá trình chuyển đổi mục đích sử dụng đất với sự hình thành và biến đổi của hiệu ứng Đảo nhiệt công nghiệp (IHI) trong suốt hai thập kỷ qua.

Bảng 1. Danh sách các Khu công nghiệp tại tỉnh Bắc Ninh

TT	Tên Khu/Cụm công nghiệp	Năm khởi công	Quy mô (ha)	Sản xuất chính
1	KCN Yên Phong I	2005	658,7	Thiết bị điện tử thông minh, linh kiện bán dẫn
2	KCN Yên Phong II	2019	1.000	Công nghệ cao, sản xuất chip và bảng mạch
3	KCN Yên Phong mở rộng	2016	314,0	Công nghiệp hỗ trợ, linh kiện điện tử
4	KCN Tiên Sơn	1998	449,0	Thiết bị điện, cơ khí và vật liệu xây dựng
5	KCN Đại Đồng – Hoàn Sơn	2005	382,6	Linh kiện điện tử, kho bãi và logistics
6	KCN VSIP	2007	700,0	Thực phẩm, đồ uống và điện tử dân dụng
7	KCN Quế Võ I	2002	600,0	Thiết bị viễn thông, máy văn phòng
8	KCN Quế Võ II	2007	569,4	Thủy tinh kỹ thuật, linh kiện quang học
9	KCN Quế Võ III	2008	598,0	Cơ khí chính xác và chế tạo phụ tùng
10	KCN Nam Sơn – Hạp Lĩnh	2020	1.000	Thiết bị âm thanh, linh kiện máy tính
11	KCN Thuận Thành II	2009	304,4	Phụ tùng ô tô, thiết bị điện gia dụng
12	KCN Thuận Thành III	2012	300,9	Chế biến nông sản, dệt may và cơ khí nhẹ

2.2. Dữ liệu sử dụng

Dữ liệu chính được sử dụng trong nghiên cứu là chuỗi ảnh vệ tinh Landsat từ năm 2006 đến 2026. Bộ dữ liệu bao gồm các thế hệ cảm biến: Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS và Landsat 9 OLI-2/TIRS-2. Các cảnh ảnh được lựa chọn ưu tiên dựa trên các tiêu chí: độ che phủ mây dưới 10%, chất lượng bức xạ cao và thời điểm thu nhận vào mùa hè (từ tháng 4 đến tháng 7) để bộc lộ rõ nét nhất các đặc trưng của đảo nhiệt công nghiệp. Chi tiết dữ liệu chuỗi ảnh vệ tinh được tổng hợp trong *Bảng 2*.

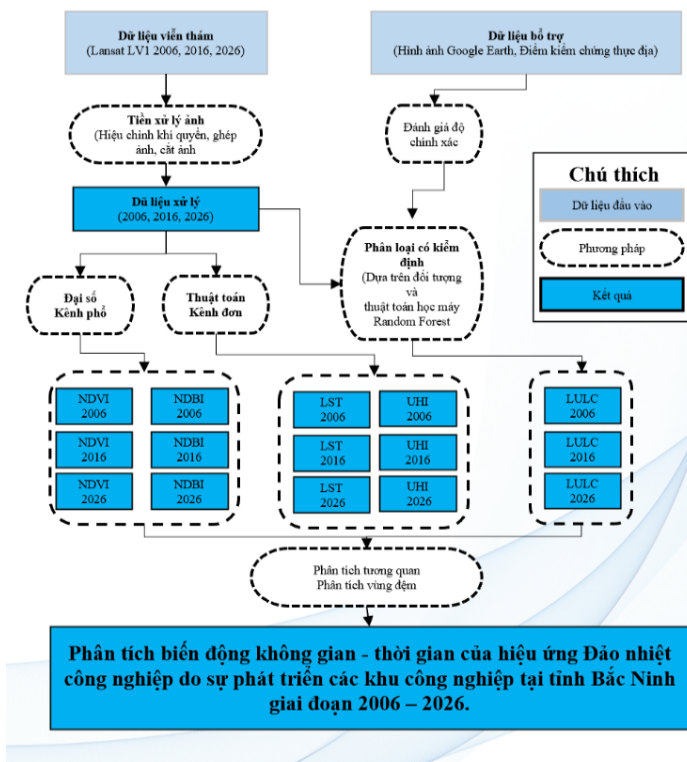
Bảng 2. Dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian

Bộ cảm biến	Mã cảnh ảnh (Path/Row)	Ngày thu nhận	Độ phân giải (Kênh phổ thường/ Kênh nhiệt)
Landsat 5 TM	127/045	27/07/2006	30m/120m
Landsat 8 OLI/TIRS	127/045	01/06/2016	30m/100m
Landsat 8 OLI/TIRS	126/045	26/06/2016	30m/100m
Landsat 8 OLI/TIRS	127/045	12/04/2026	30m/100m
Landsat 9 OLI/TIRS	126/045	13/04/2026	30m/100m

Nhằm kiểm chứng tính chính xác của kết quả phân loại lớp phủ (LULC) và nhiệt độ bề mặt (LST) chiết xuất từ ảnh vệ tinh, nhóm nghiên cứu đã tiến hành khảo sát và lấy mẫu đối soát thực địa. Quá trình thu thập dữ liệu được thực hiện thông qua máy định vị GPS cầm tay và thiết bị đo nhiệt độ bề mặt. Các điểm lấy mẫu được bố trí tập trung chủ yếu tại khu vực bên trong và vùng đệm xung quanh các khu công nghiệp trọng điểm của tỉnh. Tập dữ liệu thực tế này không chỉ giúp đánh giá độ tin cậy của thuật toán phân loại ảnh, mà còn cung cấp cơ sở trực quan để đối chiếu sự chênh lệch nhiệt độ thực tế giữa bề mặt hạ tầng sản xuất và môi trường sinh thái lân cận.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu cũng tích hợp các nguồn dữ liệu phụ trợ để đối soát và phân tích không gian như: ảnh lịch sử từ Google Earth, cùng các bản đồ quy hoạch sử dụng đất và ranh giới, vị trí các KCN tỉnh Bắc Ninh.



Quy trình nghiên cứu bao gồm 4 công đoạn chính (Hình 2):

- Tiền xử lý ảnh
- Phân loại lớp phủ sử dụng đất và đánh giá độ chính xác
- Tính các chỉ số NDVI, NDBI, LST
- Lập bản đồ hiệu ứng đảo nhiệt và phân tích biến động

2.3.1. Tiền xử lý ảnh

Trước khi tiến hành phân tích, tiền xử lý ảnh luôn là bước bắt

Hình 2. Sơ đồ quy trình nghiên cứu

buộc để làm sạch các sai số quang học, đảm bảo độ chính xác cho dữ liệu phổ bề mặt. Do ảnh sử dụng là sản phẩm đã được nắn chỉnh hình học sẵn, công việc ban đầu tập trung vào ghép các mảnh ảnh tư liệu rồi cắt gọn theo đúng đường ranh giới hành chính của tỉnh Bắc Ninh. Quá trình lọc nhiễu khí quyển và hiệu chỉnh bức xạ giúp loại bỏ tác động của sương mù hay mây mỏng, đưa các giá trị độ sáng thô về đúng giá trị phản xạ thực tế của bề mặt đất. Toàn bộ dữ liệu ảnh được đưa về chung hệ tọa độ VN2000 để phục vụ cho các bước phân tích không gian.

2.3.2 Phân loại lớp phủ sử dụng đất và đánh giá độ chính xác

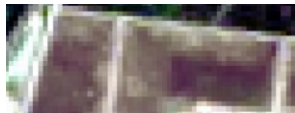
Nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật phân tích ảnh dựa trên đối tượng địa lý để tiến hành phân loại các lớp phủ bề mặt tại Bắc Ninh. So với phương pháp phân tích điểm ảnh truyền thống vốn dễ gây ra các lỗi chồng chéo phổ, việc tiếp cận theo đối tượng giúp gom cụm các pixel có tính chất tương đồng dựa trên các tiêu chí về hình dạng, tỷ lệ và độ chặt. Các đối tượng sau khi bóc tách trực tiếp từ tư liệu viễn thám sẽ được tích hợp vào hệ thống thông tin địa lý nhằm đảm bảo tính đồng nhất về mặt không gian. Toàn bộ quy trình thực hiện trên phần mềm PCI Geomatica Focus theo các giai đoạn liên kết chặt chẽ.

Đầu tiên là phân đoạn ảnh dựa trên tổ hợp các kênh phổ gồm Blue, Green, Red, Near-Infrared. Qua nhiều lần chạy thử nghiệm thực tế với khu vực nghiên cứu có độ mạnh mún cao, các thông số tối ưu để thiết lập thuật toán được xác định với chỉ số tỷ lệ bằng 25, hình dạng đạt 0,85 và độ chặt là 0,65.

Sau khi phân đoạn, một hệ thống tập mẫu đại diện cho năm loại hình lớp phủ chính gồm đất xây dựng, nông nghiệp, thực vật mặt nước và đất khác được xây dựng riêng cho từng giai đoạn (Bảng 3). Số lượng mẫu được lựa chọn theo các năm với 710 mẫu cho năm 2006, 740 mẫu cho năm 2016 và 760 mẫu cho năm 2026. Lượng dữ liệu này được phân chia theo tỷ lệ tương ứng với 70% số mẫu dùng huấn luyện mô hình và 30% số mẫu giữ lại phục vụ công tác kiểm chứng trong mỗi tập mẫu riêng của từng loại lớp phủ.

Bảng 3. Hệ thống phân loại và đặc trưng các lớp phủ sử dụng đất.

Lớp phủ sử dụng đất	Đối tượng	Ảnh vệ tinh
Đất xây dựng	Dân cư, giao thông, nhà máy,...	
Nông nghiệp	Đất trồng lúa, hoa màu	
Thực vật	Cây thân gỗ	

Mặt nước	Sông, ao, hồ,...	
Đất khác	Đất trống, đất giải phóng mặt bằng	

Quá trình phân loại tự động lớp phủ sử dụng đất trên toàn tỉnh Bắc Ninh được thực hiện thông qua thuật toán Random Forest (RF) vận hành trên các tập dữ liệu đã chuẩn hóa. Kết quả sau khi hoàn thiện sẽ bước vào giai đoạn kiểm định với sai số thống kê tổng thể và hệ số Kappa đóng vai trò là hai thước đo cốt lõi để xác thực, đánh giá độ tin cậy và mức độ chính xác của toàn bộ quá trình phân loại [28].

2.3.3. Tính toán các chỉ số NDVI, NDBI và LST

Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) là chỉ số phổ biến nhất được sử dụng trên toàn cầu để định lượng mật độ và sức khỏe thảm thực vật và được tính theo công thức (1) [29]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Trong đó, *NIR* tương ứng với Băng 4 (Landsat 5 TM) và Băng 5 (Landsat 8/9); *RED* tương ứng với Băng 3 (Landsat 5 TM) và Băng 4 (Landsat 8/9).

Giá trị NDVI dao động trong khoảng từ -1 đến +1, trong đó thảm thực vật xanh thường đạt giá trị từ 0,2 đến 0,8 tùy thuộc vào mật độ che phủ thực tế trên mặt đất.

Chỉ số xây dựng khác biệt chuẩn hóa (NDBI) được sử dụng để nhận diện các bề mặt không thấm nước và khu vực đô thị hóa theo phương trình (2) [30]:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (2)$$

Trong đó, *SWIR* tương ứng với Băng 5 (Landsat 5 TM) và Băng 6 (Landsat 8/9); *NIR* tương ứng với Băng 4 (Landsat 5 TM) và Băng 5 (Landsat 8/9).

Giá trị NDBI nằm trong khoảng từ -1 đến +1, với các giá trị dương đại diện cho các khu vực đã phát triển và hạ tầng xây dựng, trong khi giá trị âm thường tương ứng với các vùng nước hoặc thảm thực vật.

Chỉ số nhiệt độ bề mặt đất (LST) được chiết tách từ kênh nhiệt của vệ tinh Landsat thông qua quy trình chuẩn hóa từ giá trị bức xạ phổ đến nhiệt độ thực tế. Đầu tiên, giá trị số (DN) của kênh nhiệt (Băng 10 đối với Landsat-8/9 và Băng 6 đối với Landsat-5) được chuyển đổi sang bức xạ phổ ở đỉnh khí quyển (*TOA*) theo phương trình:

$$TOA(L) = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

Trong đó, M_L và A_L lần lượt là hệ số nhân và hệ số cộng được trích xuất từ tệp siêu dữ liệu (Metadata) của từng cảnh ảnh. Tiếp theo, giá trị bức xạ phổ được chuyển đổi sang nhiệt độ độ chói (BT) tại cảm biến (đơn vị $^{\circ}C$) theo công thức:

$$BT = \left(\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{TOA} + 1\right)} \right) - 273.15 \quad (4)$$

Với K_1 , K_2 là các hằng số nhiệt lượng đặc thù của bộ cảm biến. Để thu được nhiệt độ bề mặt thực tế, cần thực hiện hiệu chỉnh độ phát xạ bề mặt (ε). Độ phát xạ này được ước tính thông qua tỷ lệ thảm thực vật (P_v), một thông số phụ thuộc trực tiếp vào chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa ($NDVI$):

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0.004 \times P_v + 0.986 \quad (6)$$

Cuối cùng, nhiệt độ bề mặt đất (LST) được tính toán bằng cách kết hợp nhiệt độ độ chói và độ phát xạ bề mặt theo phương trình Plank cải tiến:

$$LST = \frac{BT}{1 + \frac{\lambda \times BT}{\rho} \times \ln \varepsilon} \quad (7)$$

Trong đó, λ là bước sóng hiệu dụng của kênh nhiệt ($\lambda = 10.89 \mu m$ cho Băng 10 của Landsat-8/9) và $\rho \approx 1.4388 \times 10^{-2} m.K$ là hằng số vật lý liên quan đến vận tốc ánh sáng và hằng số Boltzmann.

2.3.4. Lập bản đồ hiệu ứng đảo nhiệt và phân tích biến động

Hiệu ứng đảo nhiệt UHI được định lượng dựa trên sự phân hóa giá trị nhiệt độ bề mặt đất (LST) trên toàn khu vực nghiên cứu. Chỉ số UHI giúp chuẩn hóa các giá trị nhiệt độ, cho phép so sánh sự khác biệt về cường độ nhiệt giữa các khu vực đô thị, khu công nghiệp và vùng nông thôn lân cận theo phương trình [31]:

$$UHI = \frac{T - T_{min}}{T_{min}} \quad (8)$$

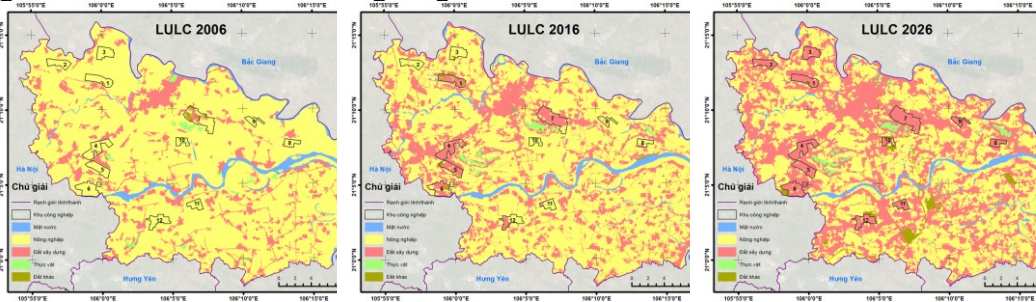
Trong đó: T là giá trị nhiệt độ tại một điểm pixel trên ảnh LST ; T_{min} là giá trị nhiệt độ bề mặt tối thiểu được ghi nhận trong khu vực nghiên cứu. Kết quả thu được là một bản đồ phân vùng cường độ nhiệt, làm cơ sở để xác định các điểm nóng (hotspots) tại các khu công nghiệp tập trung của tỉnh Bắc Ninh.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Biến động lớp phủ sử dụng đất giai đoạn 2006 – 2026

Kết quả phân loại lớp phủ sử dụng đất tại tỉnh Bắc Ninh được chia thành 5 loại lớp phủ: Mặt nước, Nông nghiệp, Đất xây dựng, Thực vật và Đất khác cho 3 năm 2006, 2016 và 2026 (Hình 3). Đáng chú ý, diện tích nông nghiệp giảm mạnh từ 80,29% năm 2006 xuống còn 67,40% năm 2016 và 54,24% năm 2026, trong khi đó diện tích đất xây dựng tăng từ 13,5% năm 2006 lên đến 26,64% năm 2016 và

29,19% năm 2026 (Bảng 4). Các loại lớp phủ khác không có sự thay đổi đáng kể, ngoại trừ đất khác có biến động tăng nhẹ: 0,36% năm 2006 lên 1,22% năm 2026.



Hình 3. Bản đồ lớp phủ sử dụng đất tỉnh Bắc Ninh năm 2006, 2016 và 2026

Bảng 4. Tỷ lệ phần trăm lớp phủ sử dụng đất tỉnh Bắc Ninh năm 2006, 2016 và 2026

Lớp phủ sử dụng đất	2006	2016	2026
Nông nghiệp	80,29 %	67,40 %	54,24 %
Đất xây dựng	13,50 %	26,64 %	39,19 %
Mặt nước	4,38 %	4,01 %	3,89 %
Thực vật	1,46 %	1,46 %	1,46 %
Đất khác	0,36 %	0,49 %	1,22 %

Bảng 5. Ma trận nhầm lẫn phân loại lớp phủ sử dụng đất năm 2006

2006	Mặt nước	Nông nghiệp	Đất xây dựng	Thực vật	Đất khác	Tổng hàng	UA (%)
Mặt nước	112	3	2	0	3	120	93.33
Nông nghiệp	2	155	6	12	5	180	86.11
Đất xây dựng	1	4	142	1	12	160	88.75
Thực vật	1	13	1	122	3	140	87.14
Đất khác	1	4	7	2	96	110	87.27
Tổng cột	117	179	158	137	119	710	
PA (%)	95.73	86.59	89.87	89.05	80.67		
Overall Accuracy (OA)							88.3%
Kappa Statistic							0.85

Bảng 6. Ma trận nhầm lẫn phân loại lớp phủ sử dụng đất năm 2016

2016	Mặt nước	Nông nghiệp	Đất xây dựng	Thực vật	Đất khác	Tổng hàng	UA (%)
Mặt nước	118	3	2	1	1	125	94.40
Nông nghiệp	2	164	6	9	4	185	88.65
Đất xây dựng	1	3	146	2	13	165	88.48
Thực vật	1	11	2	132	4	150	88.00
Đất khác	1	6	9	4	95	115	82.61
Tổng cột	123	187	165	148	117	740	
PA (%)	95.93	87.70	88.48	89.19	81.20		
Overall Accuracy (OA)							88.5%
Kappa Statistic							0.855

Bảng 7. Ma trận nhầm lẫn phân loại lớp phủ sử dụng đất năm 2026

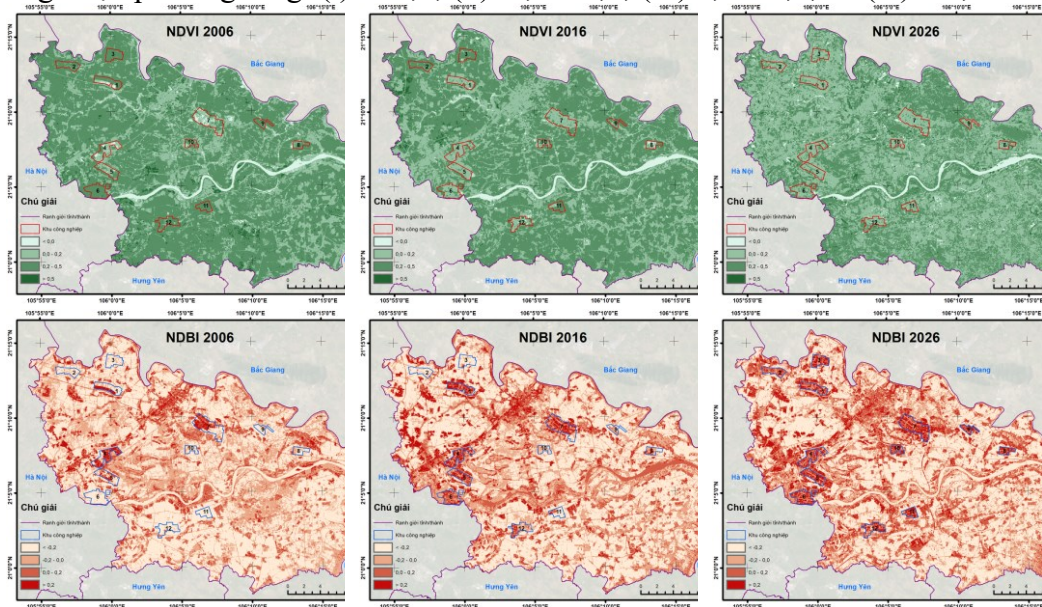
2026	Mặt nước	Nông nghiệp	Đất xây dựng	Thực vật	Đất khác	Tổng hàng	UA (%)
Mặt nước	122	2	2	1	3	130	93.85

Nông nghiệp	2	170	5	8	5	190	89.47
Đất xây dựng	1	3	152	2	12	170	89.41
Thực vật	1	10	2	138	4	155	89.03
Đất khác	1	6	10	5	98	120	81.67
Tổng cột	127	191	171	154	122	765	
PA (%)	96.06	89.01	88.89	89.61	80.33		
Overall Accuracy (OA)							88.8%
Kappa Statistic							0.86

Độ chính xác của kết quả phân loại lớp phủ sử dụng đất được đánh giá bằng cả ma trận nhầm lẫn. Sau khi tính toán chỉ số OA (Overall Accuracy) của lần lượt 3 năm là 88,3%, 88,5% và 88,8%, chỉ số Kappa của 3 năm lần lượt là 0,85; 0,855 và 0,86 (Bảng 5, 6, 7). Các chỉ số này cho thấy độ chính xác của kết quả phân loại và mức độ tin cậy của thuật toán Random Forest.

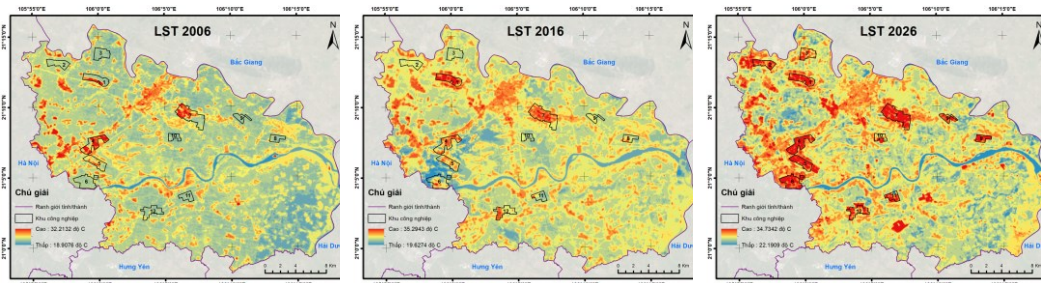
3.2. Kết quả tính toán các chỉ số

Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa (NDVI) được phân ngưỡng thành bốn lớp khác nhau: (i) $<0,0$; (ii) $0,0-0,2$; (iii) $0,2-0,5$; và (iv) $>0,5$ để đánh giá chỉ số thực vật trong khu vực nghiên cứu (hình 4). Chỉ số xây dựng khác biệt chuẩn hóa cũng được phân ngưỡng: (i) $<-0,2$; (ii) $-0,2 \div 0,0$; (iii) $0,0 \div 0,2$; và (iv) $>0,2$.



Hình 4. Bản đồ chỉ số NDVI và NDBI năm 2006, 2016 và 2026.

Kết quả tính toán LST tại 3 thời điểm 2006, 2016 và 2026 (Hình 5) đều vào mùa hè nên nhiệt độ bề mặt mặt bằng chung dao động ở mức cao, đặc biệt nổi bật tại các khu công nghiệp, tuy nhiên LST lại chỉ mang tính thời điểm và ảnh hưởng nhiều bởi thời tiết tại lúc thu nhận ảnh. Do đó, thay vì so sánh trực tiếp các giá trị nhiệt độ tuyệt đối, nghiên cứu đã áp dụng phép chuẩn hóa thống kê để chuyển đổi LST sang chỉ số lệch nhiệt độ UHI. Bước xử lý này giúp triệt tiêu hoàn toàn sự khác biệt về nền nhiệt khí tượng giữa các ngày chụp, đồng nhất hệ quy chiếu trường nhiệt qua các năm.

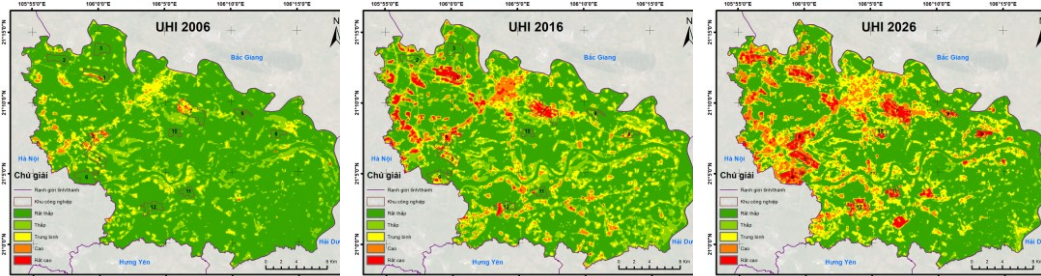


Hình 5. Bản đồ nhiệt độ bề mặt tỉnh Bắc Ninh năm 2006, 2016 và 2026.

3.3. Xác định hiệu ứng đảo nhiệt đô thị và hiệu ứng đảo nhiệt công nghiệp

3.3.1. Quy mô tổng thể

Hiệu ứng đảo nhiệt đô thị được chia thành 5 cấp độ khác nhau: Rất thấp, Thấp, Trung bình, Cao và Rất cao tương ứng với 3 năm 2006, 2016 và 2026. Phần trăm diện tích của 5 cấp độ này có xu hướng chuyển dịch từ đảo nhiệt Rất thấp và Thấp sang đảo nhiệt Rất cao và Cao. Cụ thể diện tích cũng đảo nhiệt Rất thấp giảm từ 64,64% xuống 53,78% và Thấp giảm từ 22,29% xuống 17,45% ngược lại diện tích phần đảo nhiệt Cao tăng từ 2,96% lên 10,68% và Rất cao tăng từ 2,16% lên 4,30% (hình 6, Bảng 8).



Hình 6. Bản đồ hiệu ứng đảo nhiệt đô thị năm 2006, 2016 và 2026.

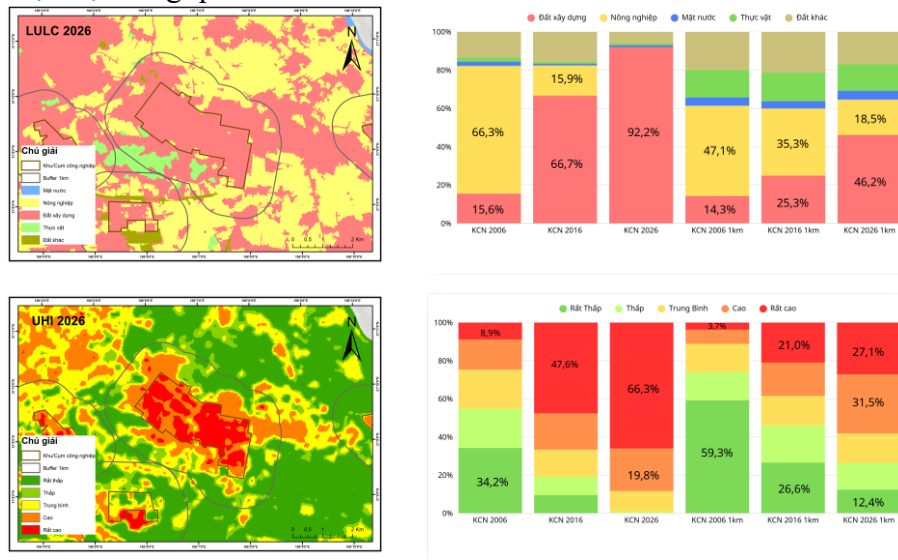
Bảng 8. Tỷ lệ phần trăm diện tích theo phân cấp đảo nhiệt đô thị tỉnh Bắc Ninh năm 2006, 2016 và 2026

	2006	2016	2026
Rất thấp	64,64 %	60,10 %	53,78 %
Thấp	22,29 %	21,71 %	13,80 %
Trung bình	7,95 %	7,35 %	17,45 %
Cao	2,96 %	7,23 %	10,68 %
Rất cao	2,16 %	3,61 %	4,30 %

3.3.2. Quy mô cục bộ

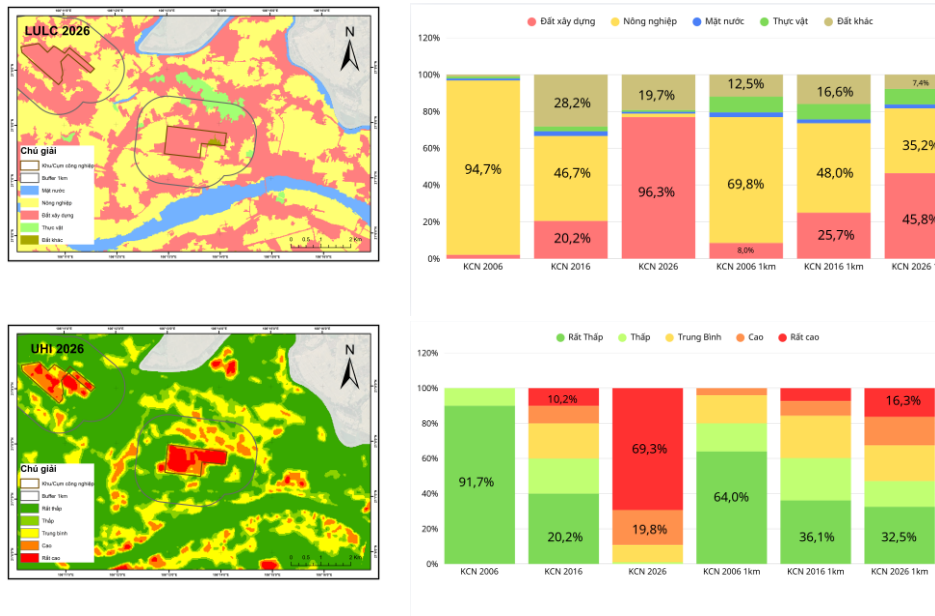
Tại KCN Quế Võ 1 và vùng đệm 1km (Hình 7), cấu trúc lớp phủ và trường nhiệt thể hiện rõ đặc trưng của một vùng công nghiệp đã phát triển ổn định và đạt độ bão hòa về hạ tầng xây dựng. Tại vùng lõi KCN, ngay từ năm 2006, khu vực này đã tồn tại các nhà xưởng sản xuất quy mô nhỏ với tỷ trọng đất xây dựng đạt 15,6 %. Giai đoạn 2016 – 2026 ghi nhận quá trình lấp đầy hạ tầng nội khu dồn dập, đẩy tỷ lệ đất xây dựng lên mức áp đảo 92,2% vào năm 2026. Sự gia tăng liên tục của bề mặt không thấm (mái tôn nhà xưởng, đường nhựa nội khu) có mối quan hệ tuyến tính thuận với sự mở rộng của các vùng nhiệt độ cực đoan. Bản đồ UHI cho thấy

các cấp đảo nhiệt Cao và Rất cao nhanh chóng bao trùm toàn bộ lõi KCN qua các năm, biến nơi đây thành một tâm tích tụ nhiệt mạnh mẽ và cố định. Tại vùng đệm bán kính 1km thể hiện một bức tranh nhiệt đa dạng hơn nhờ sự phân hóa lớp phủ rõ rệt. Diện tích đất nông nghiệp tuy bị thu hẹp đáng kể (còn 18,5% vào năm 2026) nhưng vẫn đóng vai trò là màng lọc sinh thái quan trọng, giúp duy trì các cấp đảo nhiệt Thấp và Trung bình. Tuy nhiên, do xu hướng lan tỏa hạ tầng, các khu dân cư nông thôn phụ cận nằm trong vùng đệm cũng bị đô thị hóa, khiến nhiệt độ tại các cụm dân cư này tăng cao, làm suy giảm phần nào hiệu quả làm mát tự nhiên của thảm thực vật xung quanh.



Hình 7. Biến đổi lớp phủ sử dụng đất và UHI tại KCN Quế Võ 1.

Khác biệt hoàn toàn với Quế Võ 1, KCN Quế Võ 3 đại diện cho mô hình chuyển dịch diện mạo đột ngột từ nền tảng sinh thái nông nghiệp sang công nghiệp nặng trong hai thập kỷ qua (Hình 8). Tại vùng lõi KCN, nào năm 2006, khu vực này đang ở giai đoạn tiền phát triển, quỹ đất gần như hoàn toàn là đất nông nghiệp truyền thống 94,7%; do đó, các cấp đảo nhiệt Cao và Rất cao tại thời điểm này gần như bằng 0. Bước sang giai đoạn 2016 – 2026, một làn sóng giải phóng mặt bằng và xây dựng nhà xưởng quy mô lớn diễn ra, khiến diện tích đất xây dựng bứt phá mạnh mẽ, đạt 96,3% vào năm 2026. Sự thay đổi đột ngột cấu trúc bề mặt này đã tạo ra một cú sốc nhiệt không gian: trường nhiệt độ bề mặt thay đổi hoàn toàn khi các cấp đảo nhiệt Cao và Rất cao bùng nổ, chiếm tỷ trọng chi phối toàn bộ lòng KCN chỉ trong thời gian ngắn. Tại vùng đệm bán kính 1km, điểm đặc trưng tại Quế Võ 3 là sự tồn tại của một biên giới nhiệt cực kỳ sắc nét giữa lõi và đệm. Do vùng đệm 1km xung quanh vẫn giữ được không gian sản xuất nông nghiệp thuần túy và hệ thống thảm thực vật tự nhiên rộng lớn (chiếm 46,7% diện tích vùng đệm năm 2026), nên cường độ IHI tại đây giảm xuống rất nhanh. Các mức đảo nhiệt Thấp và Rất thấp chiếm ưu thế tuyệt đối ở vùng đệm, tạo nên sự tương phản nhiệt độ gay gắt giữa một lõi công nghiệp rực đỏ tích nhiệt và một vùng đệm nông thôn xanh mát bao quanh.



Hình 8. Biến đổi lớp phủ sử dụng đất và UHI tại KCN Quế Võ 3.

3.4. Ma trận tương quan

Phân tích tương quan Pearson được sử dụng để xác định mối quan hệ giữa tất cả các biến LULC và các chỉ số NDVI, NDBI và LST khác nhau (Bảng 9). Chỉ số thực vật NDVI và chỉ số xây dựng NDBI có có mức tương quan nghịch gần như tuyệt đối -0,92. Hai chỉ số này có sự tương quan lớn với nhiệt độ bề mặt LST, với NDVI tương quan nghịch -0,78 và NDBI tương quan thuận 0,86. Các biến từ lớp phủ sử dụng đất cũng có mức tương quan lớn tới LST: Đất xây dựng 0,85, Thực vật -0,75.

Bảng 9. Ma trận tương quan giữa các loại lớp phủ đất và các chỉ số môi trường bề mặt.

	Mặt nước	Nông nghiệp	Đất xây dựng	Thực vật	Đất khác	UHI	LST	NDVI	NDBI
Mặt nước	1	-0.25	-0.35	-0.30	-0.20	0.65	0.68	-0.55	-0.60
Nông nghiệp	-0.25	1	-0.45	-0.15	-0.25	0.35	0.38	0.55	-0.40
Đất xây dựng	-0.35	-0.45	1	-0.65	-0.30	0.82	0.85	-0.78	0.88
Thực vật	-0.30	-0.15	-0.65	1	-0.25	0.72	0.75	0.85	-0.80
Đất khác	-0.20	-0.25	-0.30	-0.25	1	0.50	0.55	-0.45	0.60
UHI	-0.65	-0.35	0.82	-0.72	0.50	1	0.98	-0.75	0.84
LST	-0.68	-0.38	0.85	-0.75	0.55	0.98	1	-0.78	0.86
NDVI	-0.55	0.55	-0.78	0.85	-0.45	0.75	0.78	1	-0.92
NDBI	-0.60	-0.40	0.88	-0.80	0.60	0.84	0.86	-0.92	1

4. Thảo luận

4.1. Ảnh hưởng của lớp phủ sử dụng đất đến nhiệt độ bề mặt

Kết quả thực nghiệm từ chuỗi ảnh vệ tinh Landsat giai đoạn 2006 – 2026 tại tỉnh Bắc Ninh đã khẳng định quy luật phân hóa nhiệt độ bề mặt phụ thuộc chặt chẽ

vào cấu trúc hình thái của các loại hình lớp phủ. Quá trình công nghiệp hóa và đô thị hóa trong hai thập kỷ qua ở Bắc Ninh dẫn đến sự suy giảm nghiêm trọng quỹ đất nông nghiệp và lớp phủ thực vật [32]. Tuy nhiên, khi phân tích đặc trưng nhiệt của các KCN tập trung – mối quan hệ tương quan không gian giữa LST và các chỉ số lớp phủ (NDVI, NDBI) đã bộc lộ những dị thường nhiệt cực đoan. Sự chuyển dịch mô hình sử dụng đất từ nông nghiệp truyền thống sang các tổ hợp công nghiệp quy mô lớn đã thiết lập một cơ chế tích tụ nhiệt hoàn toàn mới. Phân tích định lượng cho thấy hàm hồi quy giữa LST và đối tượng Đất xây dựng có hệ số tương quan cao 0,85. Các hiện tượng này được giải thích bởi các vật liệu nhân tạo như mái tôn, đường nhựa có hệ số phản xạ phổ rất thấp trong dải sóng ngắn nhưng lại hấp thụ bức xạ mặt trời và giữ nhiệt cực mạnh vào ban ngày. Tại các KCN công nghệ cao có mật độ máy móc và hệ thống làm mát công nghiệp công suất lớn hoạt động liên tục, lượng nhiệt dư thừa xả thẳng vào môi trường qua hệ thống thông gió và ống khói đã tạo ra hiện tượng cộng hưởng nhiệt lượng. Ngược lại, vai trò điều hòa của lớp phủ và hệ thống thủy văn (sông Cầu, sông Đuống và hệ thống ao hồ) cũng thể hiện một quy luật không gian có tính ứng dụng cao. Nguồn nước đóng vai trò là vùng đệm tự nhiên giúp giảm nhiệt không khí tổng thể nhờ sự bay hơi. Tuy nhiên, phân tích chuỗi thời gian kéo dài 20 năm cũng cảnh báo rằng, sự mở rộng đô thị - công nghiệp thiếu kiểm soát đang liên tục thu hẹp, thay thế các không gian xanh này bằng các cơ sở hạ tầng thứ cấp. Thực trạng này đặt ra yêu cầu cấp bách cho các nhà hoạch định chính sách tại Bắc Ninh trong việc kiểm soát tỷ lệ lớp phủ bề mặt không thấm, đồng thời bắt buộc tích hợp các giải pháp hạ tầng xanh như mái nhà mát và hành lang cây xanh đa tầng trong quy hoạch các KCN sinh thái tương lai nhằm tăng cường khả năng phục hồi môi trường của địa phương.

4.2. Biến động nhiệt độ bề mặt đất dưới tác động của hiệu ứng đảo nhiệt đô thị

Biến động không gian của LST là chỉ số quan trọng để đánh giá mức độ nghiêm trọng của môi trường nhiệt thông qua hiệu ứng đảo nhiệt đô thị. Kết quả nghiên cứu tại Bắc Ninh khẳng định rằng, sự gia tăng mật độ dân số cơ học và sự chuyển đổi cấu trúc hạ tầng tại các khu vực như TP. Bắc Ninh, TX. Từ Sơn và các huyện Quế Võ, Yên Phong là nguyên nhân chính gây ra sự dao động nhiệt độ cực đoan. Thay đổi sử dụng đất không chỉ làm suy thoái môi trường cục bộ mà còn làm thay đổi bản chất của sự trao đổi năng lượng bề mặt, biến các khu vực tập trung xây dựng thành các vùng có giá trị nhiệt độ vượt trội so với vùng nông thôn lân cận.

Theo các phân tích định lượng, cường độ UHI tại các lõi công nghiệp ghi nhận sự chênh lệch từ 5°C đến 10°C so với các khu vực canh tác nông nghiệp hoặc vùng đệm thực vật. Sự mở rộng nhanh chóng của bề mặt không thấm nước và việc sử dụng các vật liệu xây dựng có khả năng tích tụ nhiệt cao đã tạo nên một hình thái Đảo nhiệt công nghiệp đặc thù tại Bắc Ninh. Khác với mô hình UHI truyền thống thường tập trung tại trung tâm đô thị, tại đây, các đảo nhiệt lại phân bố theo dạng chuỗi và dải dọc theo các KCN lớn. Các vật liệu bề mặt khác nhau trong quá trình phát triển nhà máy và hạ tầng giao thông đã đóng góp đáng kể vào việc giữ nhiệt và phát thải nhiệt dư thừa vào khí quyển, làm gia tăng sự phân bố nhiệt không đồng đều trong toàn vùng.

Có thể khẳng định rằng, sự trao đổi bức xạ và dòng nhiệt tại các bề mặt xây dựng là cơ chế thiết yếu thúc đẩy hiệu ứng đảo nhiệt và biến đổi khí hậu đô thị tại

tỉnh Bắc Ninh. Do đó, thay đổi LULC do hoạt động con người không chỉ là nhân tố tác động mà còn là động lực chính gây ra sự gia tăng nhiệt độ bức xạ bề mặt, làm suy giảm chất lượng môi trường sống và khả năng chống chịu khí hậu của khu vực.

4.3. Các xu hướng nghiên cứu hiện tại về giảm thiểu và thích ứng với hiệu ứng đảo nhiệt đô thị

Kết quả thực nghiệm tại Bắc Ninh cho thấy hiện tượng tích tụ nhiệt diễn ra mạnh nhất ở những nơi khu công nghiệp nằm sát các khu dân cư đông đúc như thành phố Bắc Ninh và thị xã Từ Sơn. Nguyên nhân là do lượng nhiệt từ máy móc, ống khói sản xuất bị cộng hưởng cùng hơi nóng tỏa ra từ nhà cửa bê tông và đường nhựa, tạo thành các lõi nhiệt có cường độ mạnh. Vùng đệm trong bán kính 1 km xung quanh các nhà máy nếu còn giữ được đất nông nghiệp và thảm thực vật thì nền nhiệt lại dịu mát hơn hẳn. Lý do khoa học là nhờ cơ chế bốc thoát hơi nước tự nhiên của cây trồng và đất. Lượng hơi nước này hấp thụ bớt nhiệt lượng dư thừa, ngăn không cho hơi nóng lan rộng vào các khu dân cư lân cận. Ngoài ra, cách phân bố không gian xanh cũng ảnh hưởng lớn đến việc lưu thông không khí. Việc chia nhỏ và trải đều các dải cây xanh dọc theo đường nội khu và các dãy nhà xưởng đem lại hiệu quả làm mát tốt hơn một công viên tập trung. Sự phân tán này tạo ra các khoảng trống thông thoáng, kích thích gió tự nhiên thổi vào từ sông Cầu và sông Đuống để cuốn bớt lượng nhiệt tích tụ ra ngoài.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng thành công công nghệ viễn thám đa thời gian của vệ tinh Landsat để phân tích định lượng biến động không gian - thời gian của hiệu ứng Đảo nhiệt công nghiệp (IHI) tại tỉnh Bắc Ninh giai đoạn 2006 – 2026. Kết quả cho thấy, sự sụt giảm nghiêm trọng của quỹ đất nông nghiệp từ 80,29% xuống 54,24%, với sự mở rộng của diện tích đất xây dựng từ 13,50% lên đến 39,19% gắn liền với hạ tầng của 12 KCN trọng điểm. Sự phân hóa trường nhiệt bề mặt với mức chênh lệch nhiệt độ từ 5°C đến 10°C giữa khu vực sản xuất và vùng nông thôn lân cận không phải là quá trình tự nhiên mà là hệ quả trực tiếp từ việc thay thế lớp phủ xanh bằng bề mặt không thấm nước có hệ số hấp thụ nhiệt cao, làm suy giảm khả năng tự điều hòa khí hậu. Từ các kết quả đó, nghiên cứu cung cấp cơ sở luận cứ khoa học quan trọng đóng góp vào việc đánh giá tác động sinh thái của hạ tầng công nghiệp, đồng thời hỗ trợ các nhà quản lý tối ưu hóa quy hoạch không gian hướng tới phát triển bền vững. Bên cạnh đó, cần quy chuẩn hóa công nghệ viễn thám vệ tinh đa thời gian thành công cụ giám sát định kỳ trường nhiệt độ bề mặt đất, từ đó chủ động xây dựng các kịch bản dự báo, ứng phó kịp thời với các dị thường nhiệt do biến đổi khí hậu, bảo vệ sức khỏe cộng đồng và tăng cường khả năng phục hồi sinh thái cho toàn khu vực.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được hoàn thành với sự tài trợ kinh phí và cung cấp dữ liệu từ Đề tài cấp cơ sở: “Ứng dụng công nghệ địa không gian trong đánh giá xu thế đảo nhiệt đô thị dưới tác động của biến đổi khí hậu”, Khoa Địa lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

Cam kết của các tác giả

Tất cả các tác giả có tên trong bài báo cam kết sự đồng thuận và không có xung đột lợi ích trong công bố khoa học tại bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] D. Rodrik, “Unconditional Convergence in Manufacturing*,” *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 128, no. 1, pp. 165–204, Feb. 2013, doi: <https://doi.org/10.1093/qje/qjs047>.
- [2] M. Sarker, M. Aleen, and T. Datta, “Agricultural Transformation and its Contribution to Economic Development in South Asian and African Countries,” *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, vol. 25, pp. 19–31, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.9734/ajaar/2025/v25i1577>.
- [3] Y. Song, R. Deng, R. Liu, and Q. Peng, “Effects of Special Economic Zones on FDI in Emerging Economies: Does Institutional Quality Matter?,” *Sustainability*, vol. 12, no. 20, p. 8409, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/su12208409>.
- [4] T. H. T. Nguyen, V. T. Tran, Q. T. Bui, Q. H. Man, and T. D. V. Walter, “Socio-economic effects of agricultural land conversion for urban development: Case study of Hanoi, Vietnam,” *Land Use Policy*, vol. 54, pp. 583–592, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.032>.
- [5] A. Suprijanto, Y. Tan, M. K. Lodhi, R. D. M. Santillan, I. L. Alage, and G. R. P. Zamalloa, “Industrial heat island and carbon emissions: machine learning-based environmental impact assessment in Cilegon, Indonesia,” *Environmental Challenges*, vol. 19, p. 101141, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101141>.
- [6] W.-J. Wu, Y.-H. Li, H.-R. Yang, A.-L. Zhao, and H. Zhang, “Three-Decadal Analysis of Industrial Heat Island Effect Triggered by Industrial Blocks Development in Greater Shanghai,” *Sustainability*, vol. 17, no. 22, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/su172210199>.
- [7] M. Mohan *et al.*, “Industrial heat island: a case study of Angul-Talcher region in India,” *Theor Appl Climatol*, vol. 141, no. 1–2, pp. 229–246, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03181-9>.
- [8] M. K. Anser, A. A. Nassani, K. M. Al-Aiban, K. Zaman, and M. Haffar, “Urban heat islands and energy consumption patterns: Evaluating renewable energy strategies for a sustainable future,” *Energy Reports*, vol. 13, pp. 3760–3772, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.03.033>.
- [9] S. Ma, N. Wang, L. Zhou, J. Yu, X. Chen, and Y. Chen, “Inversion of Tidal Flat Topography Based on the Optimised Inundation Frequency Method—A Case Study of Intertidal Zone in Haizhou Bay, China,” *Remote Sensing*, vol. 16, no. 4, p. 685, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/rs16040685>.
- [10] A. M. D. Arruda, A. Lopes, and É. Masiero, “Microclimate Multivariate Analysis of Two Industrial Areas,” *Atmosphere*, vol. 14, no. 8, p. 1321, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos14081321>.
- [11] W. Jiang, Y. Wang, and M. Zhang, “Exploring the Industrial Heat Island Effects and Key Influencing Factors in the Guangzhou–Foshan Metropolitan Area,” *Sustainability*, vol. 17, no. 8, p. 3363, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/su17083363>.
- [12] C. Zhao, Y. Pan, H. Wu, and Y. Zhu, “Quantifying the contribution of industrial zones to urban heat islands: Relevance and direct impact,” *Environmental Research*, vol. 240, p. 117594, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117594>.
- [13] A. J. E. Bach *et al.*, “Retrofitting passive cooling strategies to combat heat stress in the face of climate change: A case study of a ready-made garment factory in Dhaka, Bangladesh,” *Energy and Buildings*, vol. 286, p. 112954, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112954>.
- [14] M. Sharma, M. Alam, N. Suri, and S. Kant, “Occupational heat stress under high-heat furnace work environments - a comprehensive review on developing countries,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, pp. 2068–2092, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.18186/thermal.1051603>.
- [15] P. M. Cuce, E. Cuce, and M. Santamouris, “Towards Sustainable and Climate-Resilient Cities: Mitigating Urban Heat Islands Through Green Infrastructure,” *Sustainability*, vol. 17,

- no. 3, p. 1303, Feb. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/su17031303>.
- [16] I. Hamdi, E. Albalawi, E. AbdAlmapoed, and S. Abd Elaal, “Mitigating surface industrial heat island effects in arid environments: A machine learning approach to sustainable planning,” *Energy and Buildings*, p. 117449, Apr. 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117449>.
- [17] L. Somantri and S. Himayah, “Urban Heat Island Study Based on Remote Sensing and Geographic Information System: Correlation between Land Cover and Surface Temperature,” *E3S Web Conf.*, vol. 600, p. 06001, 2024, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202460006001>.
- [18] A. Szafarczyk and O. Agbasi, “Emerging trends in GIS and remote sensing technologies for environmental monitoring: innovations, applications, and future directions,” *Geoinformatica Polonica*, vol. 24, p. 25, Dec. 2025, doi: <https://doi.org/10.4467/21995923GP.25.002.22857>.
- [19] J. M. Álvarez-Martínez *et al.*, “Four decades of remote sensing for monitoring terrestrial ecosystems: a global review and future challenges,” *Science of Remote Sensing*, vol. 13, p. 100341, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.100341>.
- [20] M. Çelik and M. Yakar, “Land Surface Temperature and Urban Heat Island Analysis Using Remote Sensing and GIS: A Case Study in Mersin,” Nov. 2023.
- [21] W. Ullah *et al.*, “Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region,” *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13322, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13322>.
- [22] G. B. Debele and K. T. Beketie, “Monitoring the dynamics of land use and land cover, and their impact on seasonal land surface temperature in the Upper Awash Basin, Central Ethiopia,” *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 4, p. 321, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06742-7>.
- [23] L. Kikon and C. Lairenjam, “Exploring the Relationship between Land use, Vegetation and Land Surface Temperature Changes using LULC, NDVI, NDBI and LST in Zunheboto District, Nagaland: India,” Jul. 2025.
- [24] L. Liu and Y. Zhang, “Urban heat island analysis using the landsat TM data and ASTER Data: A case study in Hong Kong,” *Remote Sensing*, vol. 3, pp. 1535–1552, Jul. 2011, doi: <https://doi.org/10.3390/rs3071535>.
- [25] M. Kiavarz, S. Bourbour, N. Mijani, M. Shahsavary, and M. Karimi Firozjaei, “Predicting spatial and temporal changes in surface urban heat islands using multi-temporal satellite imagery: A case study of Tehran metropolis,” *Urban Climate*, vol. 45, pp. 1–21, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101258>.
- [26] Faculty of Surveying, Mapping and Geographic Information, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam and T. Tien Nguyen, “Landsat Time-series Images-based Urban Heat Island Analysis: The Effects of Changes in Vegetation and Built-up Land on Land Surface Temperature in Summer in the Hanoi Metropolitan Area, Vietnam,” *Environ. Nat. Resour. J.*, vol. 18, no. 2, pp. 177–190, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.32526/ennrj.18.2.2020.17>.
- [27] C. C. Pham, N. T. Nguyen, Q. T. Tran, and N. N. Nguyen, “Prediction of surface urban heat island in Ho Chi Minh City, Viet Nam using remote sensing and logistic regression model,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1349, no. 1, p. 012031, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1349/1/012031>.
- [28] M. D. K. L. Gunathilaka and S. L. J. Fernando, “Accuracy Assessment of Unsupervised Land Use and Land Cover Classification Using Remote Sensing and Geographical Information Systems,” *Int. J. Environ. Eng. Educ.*, vol. 4, no. 3, pp. 76–82, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.55151/ijeedu.v4i3.73>.
- [29] L. Nill, T. Ullmann, C. Kneisel, J. Sobiech-Wolf, and R. Baumhauer, “Assessing Spatiotemporal Variations of Landsat Land Surface Temperature and Multispectral Indices in the Arctic Mackenzie Delta Region between 1985 and 2018,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 19, p. 2329, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/rs11192329>.
- [30] Y. Zha, J. Gao, and S. Ni, “Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24,



- no. 3, pp. 583–594, Jan. 2003, doi: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>.
- [31] H. K. Jabbar, M. N. Hamoodi, and A. N. Al-Hameedawi, “Urban heat islands: a review of contributing factors, effects and data,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1129, no. 1, p. 012038, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1129/1/012038>.
- [32] D. How Jin Aik, M. H. Ismail, F. M. Muharam, and M. A. Alias, “Evaluating the impacts of land use/land cover changes across topography against land surface temperature in Cameron Highlands,” *PLoS ONE*, vol. 16, no. 5, p. e0252111, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252111>.

Article © 2026 by Magazine of Geodesy - Cartography is licensed under CC BY 4.0

