



토지이용 변화의 이산화탄소배출량 영향에 대한 분석 연구 : 중국 베이징시를 대상으로*

Empirical Analysis of the Impact of Land Use Changes on CO₂ Emissions : A Case Study of Beijing, China

이월통** · 이승일***

Li, Yue-Tong · Lee, Seung-Il

Abstract

This study investigates the moderating effect of dispersed layouts of various functional land uses on construction land CO₂ emissions in Beijing, with a focus on the balance between centralized and dispersed layouts. Using land cover and POI data from street-level administrative regions in Beijing, we estimated the density and spatiotemporal evolution of different land uses. Spatial carbon emissions were calculated using top-down ODIAC open CO₂ emissions data. To analyze the decoupling degree between CO₂ emission changes and various functional construction lands, the Tapio decoupling coefficient was employed, and the driving factors were further explored. The decoupling analysis reveals that the relationship between urban land use and CO₂ emissions has transitioned from a non-ideal to a more ideal state. However, a strong negative decoupling relationship persists in employment and public land. The Spatial Durbin Model (SDM) was applied to assess the impact of land use layouts on CO₂ emissions. Results indicate that the high density and dispersed expansion of employment and public land increase CO₂ emissions, while the dispersion of residential land reduces them. Consequently, it is crucial to incorporate refined CO₂ emission management strategies into functional land use layouts, balancing the compactness and functionality of construction layouts between central and new urban areas to alleviate CO₂ emission burdens.

주제어 이산화탄소배출량, 토지이용 유형, Tapio 디커플링 모델, SDM공간더빈모델, 공간구조계획

Keywords CO₂ Emissions, Land Use Types, Tapio Decoupling Model, Spatial Durbin Model (SDM), Spatial Structure Planning

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

전 세계 기후 변화가 심화됨에 따라 도시 지역은 전 세계 에너지의 2/3 이상을 소비하고 70% 이상의 이산화탄소(CO₂)(이하 탄소)를 배출하고 있다(Wang and Han, 2019). 각국에서 도시지역의 탄소배출량 감축은 시급히 해결해야 할 과제가 되었다. 중국은 파리 협정 이행을 위해 청정에너지를 적극 개발하고 있으며 이

에 관해 세계적으로 선도적인 위치를 차지하고 있다. 특히 중국 내에서도 베이징시는 수도이자 전 세계적인 메가시티로, 도시개발과 교통수요의 급격한 증가로 인해 탄소배출량 증가가 심각한 문제로 대두되고 있다. 최근 중국 정부는 베이징시 14차 5개년 계획 기간 「에너지 시스템 계획」 및 「베이징시 탄소배출 정점 실시 방안」과 같은 일련의 정책을 시행하여 도시공간구조를 최적화하고 토지이용의 효율성을 높이며 탄소배출을 감축하기 위한 목표를 수립했다(이재천, 2023; 유정원, 2023). 그러나 이러한 노력에도 불구하고 2023년에도 베이징시의 탄소배출은 계속 증가하는

* 본 논문은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업)으로 지원된 연구임

** Ph.D. Candidate, Department of Urban Planning & Design, University of Seoul (First Author: G20223614@uos.ac.kr)

*** Professor, Department of Urban Planning & Design, University of Seoul (Corresponding Author: silee@uos.ac.kr)

추세이다. 코로나 19가 종식됨에 따라 중국 내의 도시개발 수요가 점차 회복되는 것이 현재의 탄소배출 증가의 주요 원인 중 하나로 작용하고 있다(Raimi et al., 2023).

나아가 도시개발을 실행하는 데 있어서 토지이용과 도시기능의 배치는 탄소배출에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 토지이용에 대한 공간구조를 합리적으로 계획하는 것은 저탄소 도시를 실현하기 위한 중요한 수단이다. ‘압축도시이론(Compact City Theory)’에 따르면, 고밀도의 혼합적인 토지이용 방식은 교통수요와 에너지소비를 줄여 탄소배출을 감소시키는 데 도움이 된다(송기욱·남진, 2009). 한편, ‘다핵도시권이론(Polycentric Urban Region)’에 따르면 적절한 토지이용의 분산이 도심지역의 압력을 완화하고 주거환경과 삶의 질을 개선하여, 탄소배출 최적화에 기여할 수 있다(이중서, 2024).

그러나 실제 도시계획상에서는 토지이용계획 수립 시, 완전히 콤팩트(압축 도시 이론)하거나 분산된 개발방식(다핵 도시권 이론)을 구현하는 것은 쉽지 않다. 또한 무분별한 도시기능의 확산 혹은 압축은 토지이용 형태의 불균형한 변화를 초래할 수 있으며, 탄소배출량과 흡수량의 변동을 초래(Tan et al., 2023)해 탄소배출에 미치는 부정적 영향을 더욱 악화시킬 가능성도 있다(Wang and Xiao, 2022). 따라서 토지이용의 유형별 분산과 집적의 정도가 도시개발과 탄소배출에 어떠한 영향을 미치는지 이해할 필요가 있으며, 이를 기반으로 토지이용계획 및 도시기능의 분산정도를 적절히 조정하여 도시의 지속가능한 개발을 도모하여야 한다.

이와 같은 배경에 따라 이 연구의 목적은 베이징시를 대상으로 토지이용 유형에 따른 도시기능의 집적과 분산의 정도가 도시개발과 탄소배출과의 관계에 미치는 영향을 규명하는 데 있다. 이를 위해서 이 연구에서는 우선 관련 선행연구를 검토하여 탄소배출

에 영향을 미치는 중요한 공간요소와 분석지표를 도출한다. 이를 이용하여 2017년~2021년까지 구축된 탄소배출량 데이터와 토지이용도 데이터를 이용하여 토지이용도의 형태와 분산 정도가 탄소배출에 미치는 영향을 실증적으로 분석한다.

실증분석은 크게 두 단계로 진행된다(그림 1) 참조). 첫 번째 실증분석 단계는 현재 베이징시의 토지이용 유형별 공간구조와 탄소배출량 간의 현황을 분석하는 단계로, ODIAC(Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂) 데이터를 이용하여 탄소배출량 지도를 구축하여 토지이용별 탄소배출의 시공간 변화를 분석한다. 그리고 디커플링 모델을 활용하여 현재 베이징의 토지이용과 탄소배출 간의 디커플링 관계를 분석한다. 두 번째 실증분석 단계는 토지이용의 분산 정도와 탄소배출량 간의 관계를 분석하는 단계로, 탄소배출량의 공간자기상관을 분석하고, 공간더빈 모델을 이용하여 토지이용 유형별 분산 정도의 조절효과를 분석한다. 이를 통해 이 연구는 탄소중립도시 구현을 위한 토지이용 계획 방향을 위한 제안을 도출한다. 연구의 결과는 중국뿐만 아니라 급속한 도시화가 진행되고 있는 도시에도 지속가능한 도시 개발을 위한 유의미한 참고자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

II. 이론과 선행연구 고찰

1. 토지이용 유형의 공간구조와 탄소배출에 대한 이론

구체적인 정책이 시행되기 전에 도시의 탄소배출을 정밀하게 조절하는 것은 각국 정부에게 중요한 요구 사항이다. 정밀조절의 목표는 전체 탄소배출량을 이해하는 것뿐만 아니라, 각 토지이용별 탄소배출의 디커플링 관계를 세밀하게 분석하는 것이다. 공간계량모델을 통해 탄소배출의 고배출 핫스팟 지역과 주요 구동요

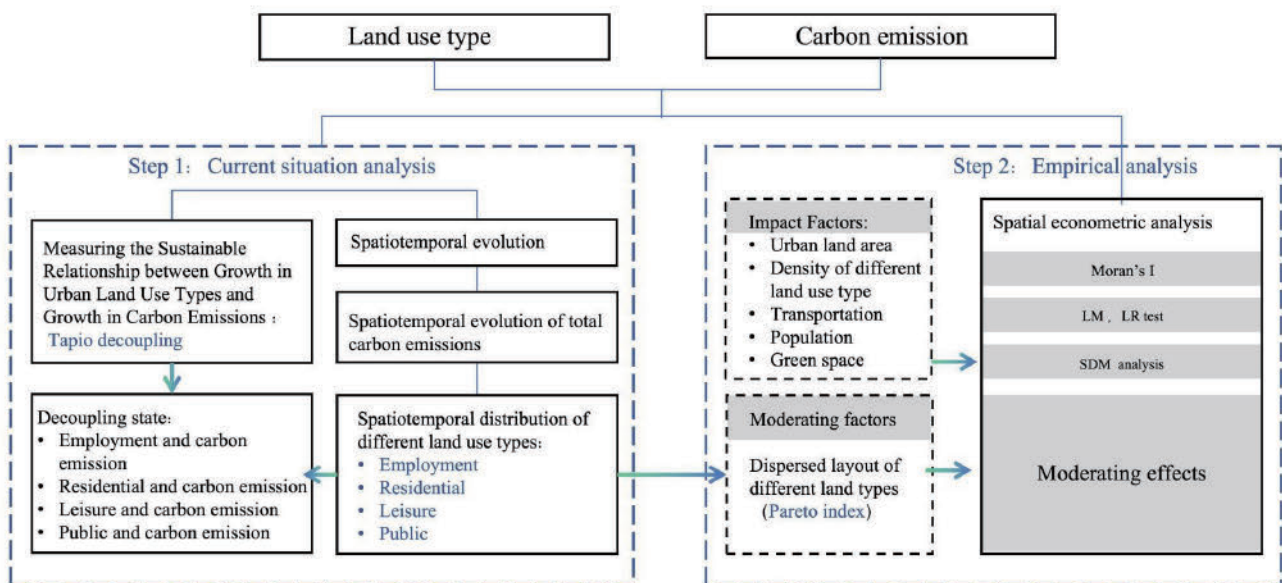


Figure 1. Research framework

인을 식별하면, 보다 구체적인 감축 조치를 수립하는 데 도움이 될 것이다(Wang et al., 2022a). 예를 들어, 상업·업무 지역의 에너지 사용효율 최적화, 주거지역의 녹색건축 비율 향상, 공공시설의 에너지 관리 개선 등이 있다. 지속적인 모니터링과 동적 토지이용 및 기능 배치 조정을 통해 도시의 유연성과 적응성을 유지하고, 탄소배출 통제 조치의 효과성과 지속성을 확보하여 도시의 지속가능한 발전을 촉진할 수 있다(Dong et al., 2020).

도시화과정에서 토지이용의 변화는 탄소배출에 깊은 영향을 미치고 있다(여관현·유선철, 2024). 도시공간구조 패턴은 주로 분산형(다핵)과 집중형(단핵)의 도시발전 모델로 대별된다. 집중형 모델은 도시기능이 소수의 핵심지역에 집중되는 경우를 말하며, 이는 높은 밀도의 경제활동으로 인해 상대적으로 높은 탄소배출을 초래할 수 있다(Chen et al., 2021). 그러나 양희진·최막중(2011)은 압축도시가 통행거리를 줄여 대기오염을 줄이는 데 긍정적인 영향을 미친다고 주장했다. 반면, 분산형 모델은 도시 외곽이나 여러 부도심에 경제 및 주거 기능을 분포시켜 핵심지역의 부담을 덜어주기 때문에, 많은 국가에서 다핵발전모델이 탄소배출 완화에 유효한 방법으로 간주되고 있다(Halbert, 2006; Ouwehand et al., 2022; Zhu et al., 2022). 그러나 일부연구는 과도한 도시기능의 분산배치가 더 많은 교통에너지소비와 탄소배출증가를 초래할 수 있다고 지적하고 있다(Cirilli and Veneri, 2014). 따라서 두 모델은 상호보완적이면서도 상호제약적이다.

토지이용 유형을 고려할 때, 상업활동이 고도로 집중된 단핵 모델에서는 교통혼잡으로 인해 통근시간이 연장되면서 실제로 더 많은 탄소배출량이 발생한다(Jung et al., 2022). 반면, 여러 부도심에 상업과 고용 기능을 분산시키면 CBD의 에너지 부하를 줄여 탄소배출을 감소시킬 수 있다(Shi et al., 2023). Park(2013)은 주거용지의 확장이 상업 배치와 함께 고밀도 주택 개발을 유도하여 건물에너지 수요를 증가시키지만, 통근거리를 줄이는 데 긍정적인 영향을 미친다고 지적했다. 고승욱 외(2023)는 다핵공간구조에서 기능 배치가 균형 잡힌 다중심으로의 전환은 직주근접을 촉진하여 교통에너지 소비를 줄이는 데 유리하다고 주장했다. 그러나 다중심 구조가 통근거리를 증가시키고 에너지 효율을 낮출 수 있다는 반대 의견도 있다(Jung et al., 2022). 이러한 상반된 연구 결과는 다중심구조에 대한 이해와 측정 방식의 차이에서 비롯될 수 있다(Bartosiewicz and Marcińczak, 2020).

한편, 공공용지에서는 특히 탄소흡수 기능을 가진 녹지와 공원 등의 토지이용 유형이 탄소배출을 줄이는 데 잠재력을 가지고 있다. 그러나 녹지면적의 규모는 탄소저장 능력에 영향을 미치며, 더 완전하고 집중된 생태계가 탄소흡수 기능을 강화하는 데 유리하다(Chen et al., 2021). 공공시설 용지는 탄소배출에 이중적인 영향을 미친다. 집중형 도시에서는 공공시설의 집중적인 건설이 인프라 건설과 운영 중에 탄소배출을 증가시킬 수 있다. 그러나 대중교통시스템과 인프라의 친환경화를 최적화하면 전체 탄소배

출을 크게 줄일 수 있다(Lei et al., 2023). 반면, 공공시설의 건설이 확대되면 초기에는 건설과 운영으로 인해 탄소배출이 다량 발생할 수 있지만, 이후 인구와 산업의 최적화는 중심지역의 탄소배출과 열 환경을 완화하는 데 유리하다(박준, 2014). 따라서 압축도시, 다중심 공간구조와 스마트 성장(Smart Growth) 개념이 발전하게 되었다. 이는 도시확장과 함께 단일구조의 도시권이 중심고용 성장을 확산시키고 주변 주거지역 및 지원시설의 공간 확장이 계획적이고 효율적으로 이루어져야 한다는 것을 의미한다.

2. 국내외 관련 연구

국내외의 탄소배출 관련 연구는 계산방법, 영향요인, 결합관계 등 세 가지 측면에서 정리할 수 있다. 토지이용과 탄소배출에 관한 연구는 주로 토지이용 탄소배출량 계산 및 기제 연구(Houghton et al., 2012; Lubowski et al., 2006), 토지이용 탄소배출의 공간적 차이와 영향요인(Li et al., 2019; 이경기·조진희, 2014), 그리고 토지이용의 저탄소화 연구(이재훈 등, 2010; Li et al., 2022) 등의 분야에 집중되어 있다.

탄소배출 계산방법 측면에서 볼 때, 현재 탄소배출량 및 변화 추세를 평가하는 방법으로는 정부 간 기후변화전문가위원회(IPCC)의 인벤토리법(Kurz et al., 2009), Logarithmic Mean Divisia Index(LMDI)(Donglan et al., 2010) 등이 있다. 이들 방법은 일반적으로 거시적 스케일(예: 전 세계, 국가, 지역 수준)을 기반으로 하며, 인구, 화석 에너지 소비 및 물질 수요 등의 데이터를 활용해 통계를 작성한다(Yan et al., 2022). 따라서 기존연구는 대부분 국가, 시 등과 같은 큰 스케일에서 진행되었다. 그러나 전통적인 연구방법과 스케일은 도시탄소배출의 공간적 이질성과 작은 지역 내 탄소배출의 정밀한 통계를 무시하는 경향이 있어 "대략적인" 탄소배출 관리로 이어질 수 있다. 탄소배출 영향요인 연구방법에서는 현재 LMDI 방법(Donglan et al., 2010; Wang, 2015), 회색관계분석(gray relational degree)(Ding et al., 2020), 공간계량모델(Lin et al., 2021) 등이 주로 사용되고 있다. 초기 연구에서는 주로 선형모델과 회색관계모델 등을 사용해 토지이용 탄소배출을 정량화하였다. 회색관계분석은 요소 간의 관계 정도를 통해 요인의 중요성을 결정하는 방법으로, 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이다(Ding et al., 2020). 또한, LMDI 방법은 탄소배출량의 영향요인을 곱셈으로 분해하고, 가중치를 통해 요인의 중요성을 계산하지만, 이러한 모델과 방법은 연구단위 간의 상호영향을 충분히 고려하지 못했다. 최근 몇 년간 원격탐사기술의 지속적인 발전으로 인해 학자들은 더욱 정밀한 데이터를 사용해 탄소배출 특성을 분석하기 시작했다. 이를 통해 지리가중회귀(GWR)(Wang et al., 2022b)와 공간계량모델(Lin et al., 2021) 등의 방법을 통해 지리적 관점에서 공간적 연관성을 고려하고 있다. 예를 들어, Zhang et al.(2023)은 공간두빈모델(SDM)을 사용하여 토

지이용 변화가 탄소배출에 미치는 공간적 파급효과를 분석하였으며, 건설용지 면적이 탄소배출에 긍정적인 파급효과가 있는 반면, 임야 면적은 탄소배출에 부정적인 파급효과가 있음을 강조하였다. 동시에 일부 학자들은 결합개념을 통해 사회경제와 생태환경 간의 결합관계를 구축하고, 다양한 탄소배출 시나리오에 따른 생태적 영향을 시뮬레이션하고 예측하였다(Fu et al., 2017).

따라서 지리적 관점에서 인접단위 간의 공간적 연관성과 상관성을 고려하는 것은 연구단위 간의 상호영향을 효과적으로 보완할 수 있다. 그러나 전통적인 GWR 모델은 횡단면 데이터만을 사용하기 때문에 설명의 안정성이 표본 크기의 제한을 받으며, 이는 모델 매개변수의 정확한 추정을 저해할 수 있다. 이에 비해 지리시간가중회귀(GTWR) 모델은 GWR의 확장으로, 시간 차원을 결합하여 공간과 시간의 이질성을 동시에 분석할 수 있어 지리적 위치와 시간변화가 탄소배출에 미치는 영향을 연구하는 데 적합하다(He and Yang, 2023). 그러나 GTWR 모델은 주로 국부적 이질성에 초점을 맞추기 때문에 전역 공간의존성과 공간자기상관을 처리하는 데 한계가 있다. 이러한 점을 고려하여, 이 연구는 최종적으로 공간계량모델을 사용해 분석을 진행하였다. 공간계량 모델은 다양한 연구단위 간의 공간적 상호작용과 영향, 특히 서로 다른 토지이용 유형의 공간적 파급효과를 보다 포괄적으로 포착할 수 있다.

3. 연구의 차별성

관련 이론과 선행연구의 고찰을 바탕으로, 이 연구는 탄소배출과 공간구조의 관계를 세분화하여 연구하기 위해 다음과 같은 차별성을 제시한다. 첫째, 연구규모에 있어서 토지이용 배치 형태의 규모, 복잡성 및 밀도를 다양한 스케일로 표현했다. 이 주제 관련 선행연구에서는 주로 전통적인 도시통계데이터를 기반으로 삼아, 배출계수법(Emission Factor Method)을 사용하여 추정한다(Stechemesser and Guenther, 2012; Shi et al., 2023). 그러나 데이터의 한계로 인해, 이러한 탄소배출목록은 주로 국가, 지역, 도시 차원의 시계열 변화에 집중하며, 탄소배출의 공간적 특성을 충분히 반영하지 못한다(Luo et al., 2023). 이러한 부족함을 보완하기 위해, 이 연구에서는 더 세밀한 스케일의 탄소배출 추정방법을 채택하여 내부 격자공간의 탄소배출목록을 작성함으로써 탄소배출지도의 정밀도와 해상도를 향상시켰다. 구체적으로, 이 연구에서는 인간활동으로 인한 탄소공개데이터목록(ODIAC), POI 데이터 및 토지이용도 등 다양한 데이터를 활용하고, QGIS 분석도구를 결합하여 탄소배출을 1km×1km하고 세밀하게 처리하였다. 이러한 방법은 더 정교한 데이터 차원에서 토지이용과 탄소배출량 간의 관계를 연구할 수 있게 하며, 다양한 토지이용 유형에서 탄소배출 분포 특성을 보완적으로 밝힐 수 있다.

둘째, 지속적인 연구들은 토지이용의 확장, 특히 상업·주거와

같은 기능적 토지밀도의 증가가 탄소배출의 증가를 초래한다는 것을 입증하고 있다(Chen et al., 2020; Li et al., 2021). 따라서 대부분의 연구는 전체 토지밀도를 조정하거나 토지이용 복합정도를 높이는 것을 통해 탄소배출을 줄이는 목표를 달성하려고 하였다(진태영, 김진수, 2017; 김민주 외, 2010). 그러나 이러한 연구들은 도시발전의 불가역적인 확장 속에서, 각각의 토지이용 유형의 분산정도를 조정하여 도시확장으로 인한 탄소배출증가를 완화할 수 있는 잠재력을 간과하고 있다는 점에서 한계가 있다. 이 연구는 압축도시이론과 다중심도시구조이론을 기반으로, 토지이용 유형별의 최적 배치 전략을 탐구하였다. 이를 통해 도시의 지속가능한 발전을 촉진하면서도 탄소배출을 효과적으로 통제하여 감소시킬 수 있도록 하였다.

III. 연구의 설계

1. 연구의 범위와 데이터 구축

1) 연구의 범위

이 연구의 공간적 범위는 베이징 대도시권으로, 각 도시 구역과 교외 지역을 포함한다. 베이징의 행정 면적은 16,410제곱킬로미터이다. 연구의 행정 구역은 중국 베이징의 최소 행정 구역인 '가도(街道)'를 기준으로 한다. '가도'는 기본 행정 구역이자 정부 공개 데이터 보고서의 가장 상세한 지리적 단위이다(〈그림 2〉 참조). 따라서 이 연구는 구역 이하(가도)를 베이징의 기본 지리단위로 사용하여 더 세분화된 분석척도를 제공한다. 2017년 중국 행정구역 통계데이터에 따르면, 이 연구의 공간적 범위 내에는 총 331개의 지역이 있으며, 이 중 150개는 가도, 143개는 읍, 33개는 촌, 5개는 민족촌으로 구성된다(중국 민정부, 2018). 연구의 시간적 범위는 데이터 구축이 가능한 2017-2021년을 대상으로 한다.

2) 데이터 구축

먼저 이 연구는 앞서 검토한 선행연구를 바탕으로 탄소배출에

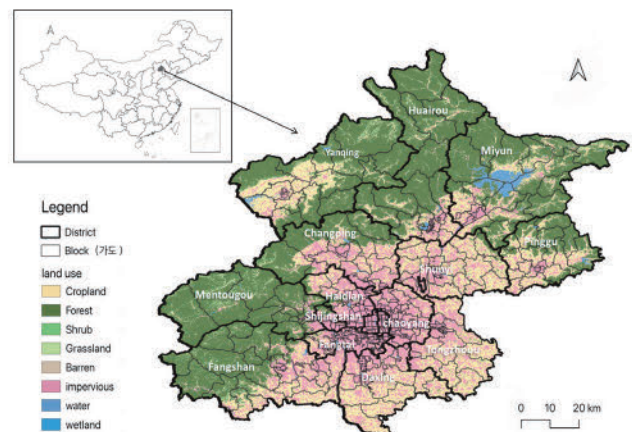


Figure 2. Location of the study area

영향을 미치는 주요 공간요소를 도출하여 분석지표를 구성하였다(〈표 1〉 참조). 선행연구 및 관련 데이터 조사결과, 탄소배출에 영향을 미칠 것으로 예상되는 중요한 요소는 토지이용, 생태환경, 인구밀도, 교통 등이다. 따라서 이 연구는 관련 설명 변수의 구성을 설계하고 관련 데이터 출처를 제공하였다.

이 연구의 대상지인 베이징의 행정단위는 ‘가도’이지만, 구축할 수 있는 공개된 정부 데이터는 행정구역 이상의 단위에서 제공된다. 따라서 탄소배출 데이터는 ODIAC(Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂)에서 제공하는 국가 수준의 탄소배출 데이터를 사용하였다. 이 데이터는 야간조명데이터(Night time light, NTL)와 발전소(화석 연료, 원자력, 수력 및 기타 재생 에너지 발전소) 데이터를 사용하여 비점 및 점 배출을

각각 매월 1km×1km 픽셀로 분해한다(Oda et al., 2018). 도시화 면적은 연간 중국 토지피복 데이터 세트(Annual China Land Cover Dataset)를 사용하며, 이는 현재 공개적으로 얻을 수 있는 30m 해상도의 장기 시계열 연간 토지피복 면적데이터이다. 토지이용 유형 지표는 POI 데이터의 세부분류와 연구목표에 따라 고용, 주거, 여가, 공공의 4대 기능 분류로 나누었다(〈표 1〉 참조). 공간데이터의 규모 일치를 보장하기 위해 이 연구에서는 QGIS의 지역통계처리도구를 사용하여 모든 공간 데이터를 1km×1km 격자로 통일하고, 이를 기본 분석단위로 설정하였다. POI 데이터는 커널밀도 추정(Kernel Density Estimation) 방법을 사용하여 래스터데이터로 변환하였다. 데이터의 공간범위를 일치시키기 위해 래스터데이터를 지역 통계 처리하였으며, 모든 공간데이

Table 1. Variables

Category	Variables	Contents	Reference		
Dependent variable	CO ₂ emission	DN value of ODIAC (CE_mean)	Description of CO ₂ emission data for the study methodology https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/		
Moderator variable	Dispersion layout of land use	Commercial dispersion index (EDI)	Using Kernel Density, calculate the density values of POI data for each functional category within a 1km × 1km grid, generating corresponding density rasters. Finally, apply the Pareto Index formula to assess the land use dispersion of each region	https://www.resdc.cn/Default.aspx	
		Residential dispersion index (RDI)			
		Leisure dispersion index (LDI)			
		Public dispersion index (PDI)			
Independent variable	Urban land area	Industrial dispersion index (IDI)	The China Land Cover Dataset (CLCD) at a 30-meter resolution includes impervious surface data, which is quantified using Arc GIS	https://zenodo.org/records/4417810	
		Impervious surface area (LU)			
	Type of land use	Employment density (ED)			Poi data based on categorization of corporate enterprises, government offices
		Residential density (RD)			Poi data based on categorization of residential neighborhoods, commercial residential, dormitories
		Leisure density (LD)			Poi data based on categorization of scenic points, parks and squares, sports facilities
		Public density (PD)			Poi data based on categorization of educational institutions, scientific research institutions, public facilities, transportation facilities
Ecological	Industrial density (ID)	Poi data based on categorization of industrial and manufacturing	https://zenodo.org/records/4417810		
	Green space ratio (Green)	Area of forest, shrub, cropland and grassland data in the source CLCD through Arc GIS statistics			
Population	Population density (Pop)	Estimated population density per grid cell, based on population estimates prepared by the Population Division of the United Nations Department	https://hub.worldpop.org/		
Transportation	Road network density (Road)	Road network area/urban area	https://www.openstreetmap.org/		

터를 1km×1km 격자로 설정하였다. ODIAC 데이터는 위성야간조명 데이터와 전 세계 발전소의 배출강도 및 위치정보를 기반으로 통계분석을 통해 생성된 것이며, 1km×1km 해상도의 래스터데이터 형태로 제공된다. 해상도가 30m인 DEM 데이터는 다른 데이터의 공간규모에 맞추기 위해 Resample 도구를 사용하여 1km 해상도로 변환하였다. 또한, 자르기 도구를 사용하여 연구지역 경계에 맞게 모든 데이터를 잘라내어 공간분석의 정확성과 일관성을 확보하였다.

이 연구는 모델의 정확성을 높이기 위해 생태환경, 인구밀도와 도로밀도 변수를 추가로 통제하였다. 생태환경은 녹지율(Green Space Ratio)로 표현되며, 중국 토지피복 데이터를 기반으로 산림, 관목지, 농경지, 초지 토지유형에 대한 래스터 데이터를 추출하였다. QGIS를 통해 계산하여 녹지율을 도출하였다. 인구밀도는 유엔인구국(WorldPop)이 제공하는 1km×1km 해상도의 래스터 인구데이터를 사용하였으며, 이를 연구지역의 그리드와 공간적으로 중첩시켜 연구대상지의 인구밀도를 추정하였다. 이를 통해 인간활동 강도가 탄소배출에 미치는 영향을 정량화하였다. 도로밀도는 교통요인의 측정지표로서, OpenStreetMap을 기반으로 베이징시의 도로망 데이터를 수집하였다. 도로 총연장과 토지면적의 비율을 계산하여 도로밀도를 도출하였으며, 이를 통해 교통 인프라가 탄소배출에 미치는 영향을 평가하였다. 이상의 데이터 출처는 <표 1>에 상세히 나와 있다.

2. 연구 방법

1) 탄소배출량 지도구축

공간분산정도와 탄소배출 간의 관계와 상호작용을 탐구하기 위해, 표준화된 도구와 방법을 사용하여 지역규모에서 고해상도로 신뢰할 수 있는 탄소배출량을 측정해야 한다. 고해상도 배출 목록의 배출량 산정은 일반적으로 IPCC 방법론 체계를 채택하여 CO₂ 등 온실가스를 산정한다. 탄소배출량의 공간분배는 일반적으로 두 가지 분배경로를 통해 이루어진다. 첫째, 상향식 방법(bottom-up)을 주로 사용하여 온실가스 배출원을 에너지, 산업 공정, 제품사용 등 부문으로 구분하고, 산업 또는 기업 수준에서 배출량을 계산 및 집계하여 최종적으로 배출총량을 산출한다. 계산 정밀도를 높이기 위해 배출인자의 획득 경로를 '계층'으로 표시하며, 방법의 복잡성과 정밀성도 단계적으로 증가하지만, 많은 배출세부정보가 포함되어 있어 데이터 획득 및 업데이트가 어려운 한계가 있다(Chen et al., 2020). 둘째, 하향식(top-down) 방법은 인구밀도 데이터, 야간조도 데이터 등의 대체변수를 분배인자로 공간분배를 수행한다. 화석에너지를 연구 대상으로 분류하고, 각 종류의 연료의 길보기 소비량, 단위 발열량, 탄소함량, 고정 탄소량, 연소장비의 평균산화율 등의 매개변수를 종합계산하여 최종적으로 온실가스의 총배출량을 집계한다. 이 방법은 단

순하고 데이터 접근이 용이하지만, 결과에 일정한 편차가 있다(Gaughan et al., 2019).

ODIAC는 야간조도 데이터와 발전소 데이터를 기반으로 글로벌 규모의 인위적 CO₂배출량을 1km×1km의 고해상도 격자로 분배한다. 현재 상향식 부문 방법은 이러한 공간 분해능을 달성하지 못하고 있다. 따라서, ODIAC는 중국 에너지 통계데이터의 공간적 제한을 고려할 때, 탄소배출을 신속하게 추정하는 수단으로 활용될 수 있으며, 지역 탄소배출 모니터링 및 평가에 데이터 지원을 제공할 수 있다. 현재까지의 문헌을 보면, ODIAC 배출 데이터 제품은 국제 연구계에서 다양한 연구 응용(예: 탄소플렉스반전, 도시배출추정 및 관측시스템실험)에 널리 사용되고 있다(Oda et al., 2018; Pan et al., 2021). Gaughan et al.(2019) 및 Chen et al.(2020) 등의 연구에서는 다양한 국가에서의 서로 다른 탄소배출 데이터의 잠재적 오차와 불확실성을 평가하였으며, 이를 통해 ODIAC 데이터가 도시 탄소배출 통계에 있어서 높은 적용성을 가지고 있음을 추가적으로 입증하였다.

ODIAC의 공간분해는 두 단계로 이루어졌다. 먼저, 글로벌 발전소 데이터베이스에서 얻은 발전소 배출 추정치와 지리적 위치를 활용하여 점 소스의 배출량을 추정하고 지도화했다. 나머지 배출량(국가 총량에서 점 소스 배출량을 뺀 비점 소스 배출량)은 위성 관측 야간조명강도의 공간분포를 사용하여 분배되었다. 이를 위해 NOAA 지구관측그룹이 개발한 국방 기상위성프로그램(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)의 보정된 방사 NTL 데이터를 사용하여, 비점 소스 배출량을 1km×1km 공간 해상도로 분해했다(Oda et al., 2018). 따라서 ODIAC 데이터는 NTL 분석결과와 발전소 정보(배출 강도 및 지리적 위치) 통계 결과를 바탕으로 얻어진 것이며, 이 데이터는 1km×1km의 해상도를 가진 격자지도 형태로 제공됐다(<그림 3> 참조). 이 연구에서는 QGIS의 격자계산기도구를 사용하여 탄소배출량을 추정하

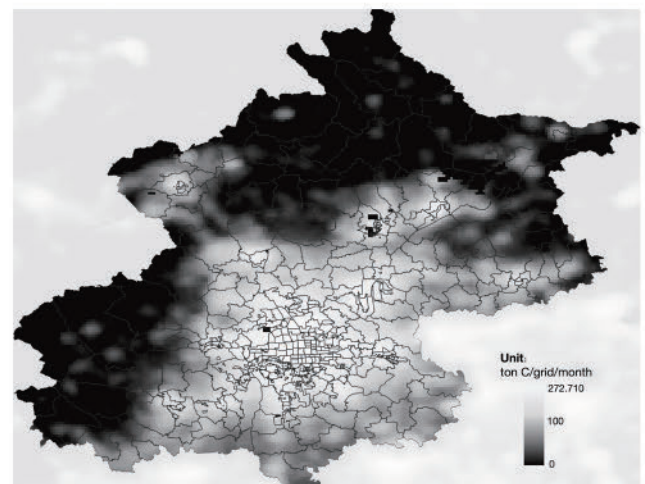


Figure 3. Spatial distribution of CO₂ emissions from ODIAC (This graph is created directly from the 1 km×1 km ODIAC dataset.)

였다. 그리고 데이터의 일관성을 보장하기 위해 매년 1월의 데이터를 연구 데이터로 선택하여 분석하였다.

2) Tapio decoupling 모델

이 연구에서 탄소배출의 디커플링은 도시토지확장과 탄소배출 간의 관계가 지속적으로 약화되어 결국 소멸되는 이상적인 과정이며, 이는 경제성장에 기반하여 탄소배출량이 점진적으로 감소하는 것을 의미한다. 20세기 60년대, Carter(1966)는 ‘Decoupling(디커플링)’이론을 제시하여 경제발전과 자원소비 간의 관계를 측정하였다. 경제성장과 자원소비 간의 관계 및 그 비동기적 변동 정도와 추세를 설명하기 위해 경제협력개발기구(OECD)는 디커플링(탈동조화) 개념을 제안하였다. 디커플링 이론은 유엔환경계획(UNEP)을 포함한 많은 기관에서 널리 사용되고 있다(Huang et al., 2023). Tapio(2005)는 디커플링 모델을 통해 경제 변화가 자원 소비 증가 또는 감소에 미치는 영향을 백분율로 계산하고, 보다 완전한 디커플링 평가 프레임워크를 구축하였다. 이 프레임워크에 따르면 디커플링 관계는 여덟 가지 상태로 세분화되었다. 이와 같은 이론에 따라 이 논문은 Tapio 디커플링 모델을 활용하여 탄소배출과 토지확장 간의 관계를 도출하고, 이를 바탕으로 탄소중립을 실현하기 위한 도시공간모형을 탐구한다. 한편, 디커플링 모델을 다양한 토지이용의 시공간변화와 결합하여 지리적 관점에서 탄소배출 탈동조화에 대한 공간 이질성의 영향과 변화를 분석한다. 상업·업무와 주거용지에서 디커플링을 실현하는 핵심은 건물에너지 효율을 높이고 교통에너지 소비를 줄이는 것이다. 여가·공공시설 용지는 탄소흡수를 증가시키고 청정 에너지 전환을 최적화함으로써 탄소배출의 디커플링을 더욱 촉진한다(김윤경 외, 2024).

〈그림 4〉에 따르면, Tapio 모델은 도시토지확장과 탄소배출 간의 관계를 8가지 유형으로 구분한다. 먼저, ‘강한 디커플링’(Strong Decoupling)은 가장 이상적인 상태로, 도시용지의 증가가 적은 탄소배출과 함께 이루어짐을 나타낸다. ‘약한 디커플링’(Weak Decoupling)은 도시토지확장과 탄소배출 증가 사이에 상대적인 분리가 나타나지만, 환경 압력이 여전히 증가하고 있음을 보여준다. 한편, ‘확장 부정적 디커플링’(Expansive Negative Decoupling)과 ‘강한 부정적 디커플링’(Strong Negative Decoupling)은 도시토지확장이 더 큰 탄소배출 압력을 초래함을 나타낸다. 즉, 자원소비와 탄소배출의 증가속도가 도시토지 확장속도를 훨씬 초과한다. 특히, 강한 부정적 디커플링은 경제 구조의 불균형과 오염산업에 대한 과도한 의존을 나타내며, 이는 도시발전과 탄소배출 관리 간의 심각한 단절을 반영한다(Shang and Luo, 2021). ‘약한 부정적 디커플링’(Weak Negative Decoupling)은 도시토지개발이 둔화될 때 발생하며, 탄소배출도 감소하지만 그 감소속도가 경제 수축보다 느리다. ‘쇠퇴 디커플링’(Recessive Decoupling)은 토지개발의 둔화와 탄소배출감소 간의 연관성을 나타내며, 환경 압력은 줄어들지만, 이는 경제 활동의 감소를 동반한다. 이러한 현상은 수동적인 것이며, 지속 가능한 발전의 이상적인 상태는 아니다. 또한, ‘확장 커플링’(Expansive Coupling)과 ‘쇠퇴 커플링’(Recessive Coupling)은 도시토지의 확장 또는 둔화와 탄소배출량의 증가 또는 감소 간의 동시성을 보여준다. 이는 경제구조가 환경에 크게 의존하고 있음을 나타낸다(Huang et al., 2023). Tapio 디커플링 모델은 저탄소 전환전략을 수립하고 감축정책의 효과를 평가하는 데 중요한 이론적 근거를 제공한다.

Tapio 디커플링 모델(Wang and Xiao, 2022)을 사용하여 디커플링 지수를 측정하였으며, 방법은 다음과 같다:

$$T = \frac{\Delta CE}{\Delta LC} = \frac{(CE_t - CE_{t-1})/CE_{t-1}}{(LC_t - LC_{t-1})/LC_{t-1}} \quad (1)$$

식에서 t와 t-1은 각각 말기와 기준기를 나타내며, T는 말기 기준기에 비해 도시용지 성장과 탄소배출의 탈동조화 지수이다. ΔCE는 탄소배출 증가량을 나타내고, ΔLC는 도시용지 증가량을 나타낸다.

식에서 t와 t-1은 각각 말기와 기준기를 나타내며, T는 말기 기준기에 비해 도시용지 성장과 탄소배출의 탈동조화 지수이다. ΔCE는 탄소배출 증가량을 나타내고, ΔLC는 도시용지 증가량을 나타낸다.

3) 공간분산 지수

도시공간구조의 분산측정은 주로 순위규모분포의 기울기(Meijers and Burger, 2010), 부도심과 중심지역의 비율(Herfindahl-Hirschman Index)(Lee, 2007; Veneri, 2010), 그리고 도시 관련성(Social Network Method)(Wang et al., 2024) 세 가지 방법에 집중되어 있다. 파레토지수 <Pareto>는 순위규모분포의 기울기 방법에 기반하여, 지역규모 분포의 로그-로그 그래프를 분석하고, 지역 순위와 그 규모 사이의 기울기를 계산함으로써 지역 규모의 집중정도를 판단한다. 가파른 기울기는 높은 집중도를 나타내며, 이는 적은 수의 큰 규모 지역이 많은 건설용지를 포함하고 있음을 의미한다. 반면, 완만한 기울기는 더 균일한 분포를 나타낸다. 다른 두 가지 방법과 비교했을 때, 계층적 규모에 따른 파

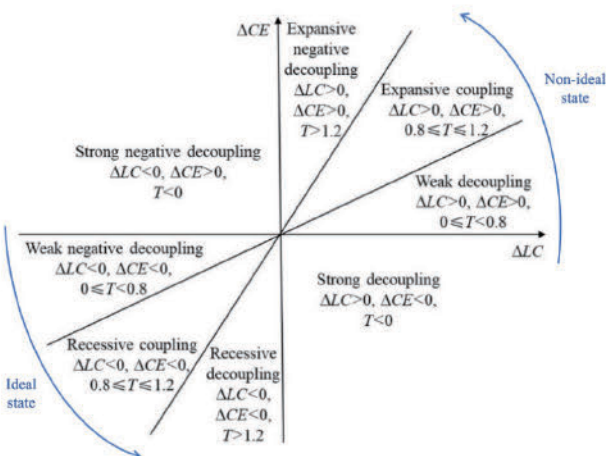


Figure 4. Decoupling state and decoupling index

레토지수는 도시지역의 다양한 기능유형 용지분포패턴을 판단하는 데 유용하다. 즉, 도심에 집중된 콤팩트형 모델인지 아니면 도심 외부에 분산된 다중심 모델인지를 평가할 수 있다. 이 방법은 많은 연구에서 널리 사용되고 있으며, 연구의 주요목표와도 부합한다. 파레토지수의 계산공식은 다음과 같다:

$$\ln(R_i - 0.5) = C - P \ln N_i \quad (2)$$

식(2)에서 P는 파레토지수로, 값이 클수록 분산정도가 높음을 의미한다. $R_i - 0.5$ 는 각 계층에서 0.5를 뺀 값으로, 이는 작은 표본과 두꺼운 꼬리분포의 편차를 효과적으로 줄일 수 있다. N_i 은 건설용지 밀도이다. C는 상수이다.

4) 공간자기상관

이 연구에서는 전역 공간자기상관 지수(Moran's I)를 사용하여 탄소배출의 공간집적 특성을 분석하였다. 전역 공간자기상관 지수는 각 가도와 인접한 구역 간의 탄소배출 연관성을 밝히고, 탄소배출이 공간적으로 집적되어 있는지 여부를 조사하는 데 사용된다. Moran's I 지수는 다음과 같이 계산된다:

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

I은 Moran's I 지수로, 0보다 크면 양의 상관관계를 나타내며, 인접한 지역 간의 탄소배출이 집적되어 있음을 의미한다. N은 총 관측치의 개수, X_i 은 구역i의 평균 탄소배출량이다. \bar{X} 은 모든 구역의 평균 탄소배출량이다. W_{ij} 은 공간가중치행렬이다.

5) 공간회귀모형

공간회귀모형은 지리적 공간데이터에서 변수들 간의 상호 의존관계를 분석하고 설명하는 데 목적이 있다. 전통적인 회귀모델과 달리, 공간회귀모형은 공간자기상관과 공간이질성을 고려한다. 공간자기상관은 인접한 지역의 변수 값이 유사한 경향을 나타내는 것을 의미하며, 공간이질성은 서로 다른 지역의 특성과 관계가 다를 수 있음을 의미한다(문한솔 외, 2023). 탄소배출은 기후와 관련된 데이터로, 공간단위에서 집계된 데이터이다. 따라서 특정 공간위치에서 발생하는 영향은 인근 지역과 관련이 있는 경우가 많다. 이러한 공간자기상관성이 존재할 때, 일반 선형회귀모형을 사용하면 매개변수의 편향이 발생할 수 있다. 공간회귀모형을 사용하면 이러한 편향을 보완할 수 있다. LM(Lagrange Multiplier)검정을 통해, 이 모형은 독립변수와 종속변수의 공간시차(spatial lag)와 공간오차효과(spatial error effect)를 동시에 포착할 수 있음을 알 수 있다. 이로 인해 공간더변모형(SDM:

Spatial Durbin Model)은 공간데이터를 분석할 때 더 높은 설명력과 유연성을 가진다. SDM 공식은 다음과 같다:

$$CE = \rho Wln(CE) + X\beta + WX\gamma + \epsilon \quad (4)$$

CE은 평균 탄소배출량, X는 외생설명변수행렬, W는 공간가중치행렬, $WX\gamma$ 는 외생설명변수의 공간지연항으로, 인접 지역의 설명변수가 해당지역의 탄소배출에 미치는 영향을 나타내는 계수이다. ρ 은 종속 변수의 공간지연계수, β 은 외생변수와 관련된 계수, ϵ 은 랜덤오차항, γ 은 설명변수 공간지연계수 등의 벡터이다.

IV. 분석결과

1. 토지이용 유형과 탄소배출량 간의 현황분석

1) 토지이용 유형별 탄소배출의 시공간 변화

이 연구에서는 2017년부터 2021년까지 베이징 각 가도의 탄소배출 시공간 변화를 분석하였다. <그림 5>에 따르면, 2017년부터 2021년까지 베이징의 탄소배출총량은 공간분포에서 뚜렷한 변화를 보였다. 전체적으로 탄소배출량이 높은 지역은 주로 베이징 시내와 남부지역에 집중되어 있으며, 시간이 지남에 따라 주변으로 확산되는 경향을 보였다. 공간분포 특성에서 고 배출지역은 주로 베이징의 핵심도심인 차오양구, 하이옌구, 펑타이구에 집중되어 있다. 이들 지역의 탄소배출량이 높은 이유는, 높은 인구밀도와 밀집된 산업활동과 관련이 있을 가능성이 크다. 중간 배출 지역은 주로 핵심도심 주변에 위치한 신도시들인 창핑구, 통저우구, 다싱구 등에 분포되어 있다. 이들 지역은 탄소배출량이 핵심도심만큼 높지는 않지만, 신도시의 계획 건설과 인구밀도의 증가로 인해 탄소배출이 증가하는 주요지역이 되었다. 저 배출지역은 주로 베이징의 외곽 구와 현에 위치한 미원구, 옌칭구, 화이러우구 등의 자연생태산지에 분포되어 있다. 이들 지역은 생태환경보호 정책요구로 인해 산업활동이 상대적으로 적어 탄소배출량이

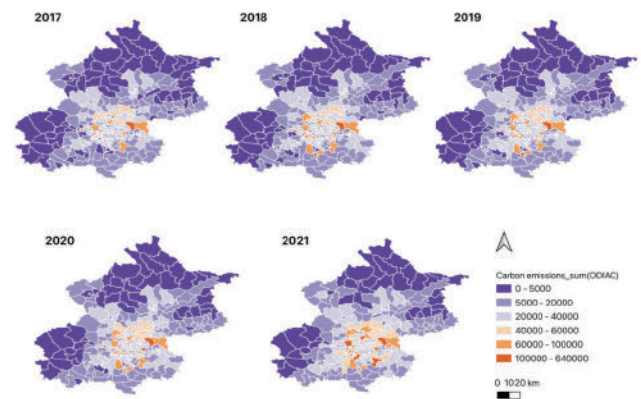


Figure 5. Spatiotemporal evolution of total carbon emissions (2017-2021)

났다. 시간적 측면에서 보면, 탄소배출총량은 매년 서서히 증가하는 경향을 보이며, 증가세는 주로 도심지역에 집중되어 있다. 2019년과 2020년의 코로나 영향으로 탄소배출 증가세가 현저히 둔화되었으나, 2021년에는 생산과 생활이 회복되면서 탄소배출 총량이 다시 증가하는 추세를 보였다.

〈그림 6〉은 2017년과 2021년 각 기능유형의 POI 핫스팟 분포 상황을 비교한 것이다. 2017년에는 고용 핫스팟이 주로 베이징 도심, 특히 상업·산업 집중지역인 CBD와 중관촌 하이테크 파크에 집중되었다. 이러한 지역은 많은 기업과 사무실이 밀집되어 있어 탄소배출량이 많다. 2021년에는 핵심도심이 여전히 고용 핫스팟이지만, 고용 핫스팟이 신도시로 확장되며 고용 분포가 점차 분산되고 있다. 이러한 다중심 분산화 추세는 핵심도심의 탄소배출 압력을 완화하는 데 도움이 되지만, 동시에 신도시의 탄소배출 부담을 증가시켜 핵심도심을 둘러싼 고 배출지역을 형성한다. 주거 핫스팟 배치는 고용용지 확산패턴과 유사하지만, 확산속도는 상대적으로 느리며 여전히 중심 도시지역에 집중되어 있다. 2021년까지 주거 핫스팟은 외곽으로 크게 확장되었으며, 신도시 확장과 인구가 외곽으로 이동하는 추세가 나타났다. 여가·공공 지역의 핫스팟은 주로 도심의 공원, 문화시설 및 공공광장 등에 집중되어 있다. 이러한 지역은 도시생활의 질을 구성하는 중요한 요소이며, 이들 시설의 유지 및 운영에 필요한 에너지가 주요 탄소배출 원인이다. 2021년까지 이러한 핫스팟 분포는 더 분산되었으며, 외곽과 근교 지역에서 현저하게 증가했다. 특히 공공용지의 확산속도가 가장 두드러졌으며, 이는 외곽지역 주민의 생활 질을 향상시키기 위한 도시공공시설의 균형 배치 강화를 나타낸다. 그러나 분산된 배치는 더 많은 교통과 에너지소비를 의미하며, 이는 탄소배출 증가로 이어질 수 있다. 고용·주거지역의 탈중심화 추세는 핵심도심의 배출압력을 완화시키지만, 외곽지역의 탄소배출을 증가시킨다.

2017년과 2021년 베이징의 산업 핫스팟 분포를 비교한 결과, 베이징의 산업배치가 점차 이전되고 감소하는 추세를 보이고 있다. 베이징시의 '제13차 5개년 계획(2016-2020)' 기간 동안 산업 구조 조정계획(베이징 민정부, 2016)에 따라, 산업 구조조정과 이전을 추진하기 위해 베이징시는 주요 기업 및 관련 원료 공급망을 차례로 톈진과 허베이로 이전하여 징진지(京津冀, 베이징-톈진-허베이) 지역의 통합적 협력을 촉진했다. 또한, 베이징은 건축 자재, 화학, 기계 등 고오염, 고에너지소비 및 고수요 산업을 퇴출시켰다. 2020년까지 시내의 산업단지와 폐기된 공장의 정리 및 이전 작업이 거의 완료되었다. 또한, 통계자료에 따르면 2017년부터 2021년까지 산업 POI데이터의 비율이 각각 1.84%, 1.30%, 0.67%, 0.80%, 0.54%로 나타나며, 해마다 감소하는 추세를 보였다. 이 추세는 베이징 내 산업배치가 점차 줄어들고 있음을 입증한다. 현재 베이징의 '제14차 5개년 계획(2021-2025)' 기간 동안, 베이징은 첨단 산업의 연구개발에 주력할 계획이다(중국 민정부, 2021). 〈그림 6〉 따르면, 베이징의 산업이 전체 연구에서 차지하는 비율이 크게 축소되었고, 대부분의 고오염 공장이 베이징에서 이전되었기 때문에, 이 연구에서 산업을 독립적인 연구 대상 카테고리로 삼는 것은 별 의미가 없다. 따라서 이후 연구에서는 산업과 기업을 '고용'으로 통합하여 분석한다.

2) 토지이용 유형별과 탄소배출의 디커플링 분석

중국이 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 도시의 지속 가능한 저탄소발전을 실현하고, 도시확장과 탄소배출의 탈동조화를 이루기 위해 노력해야 한다. 따라서 도시용지성장과 탄소배출의 디커플링 관계를 평가하는 것은 도시의 지속 가능한 발전과 동시에 배출감축을 실현할 수 있는 실현 가능한 경로를 모색하는 데 도움이 된다. Tapio 디커플링 모델을 사용하여 토지확장밀도와 탄소배출 간의 디커플링 관계를 추가로 연구하였다. 〈그림 7〉의

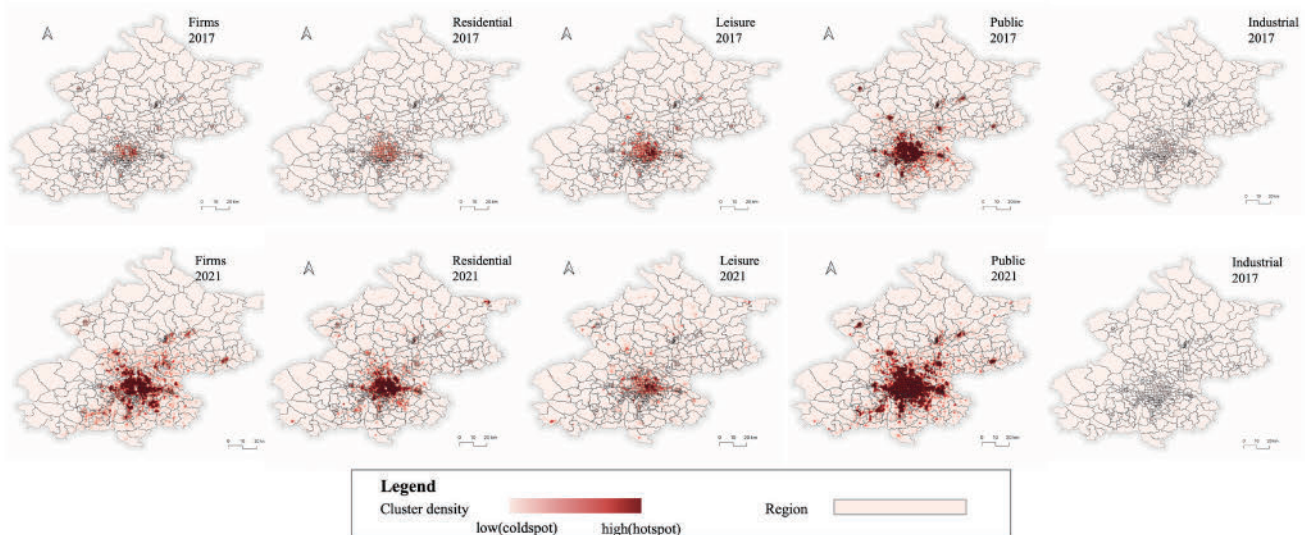


Figure 6. Hotspot distribution of land use types in 2017 and 2021



Figure 7. Decoupling of land use types from carbon emissions in different periods during (a) 2017-2018, (b) 2018-2019, (c) 2019-2020, (d) 2020-2021

결과에 따르면, 4개의 시간대에 걸쳐 주요 디커플링 유형은 각각 확장 부정적 디커플링, 강한 부정적 디커플링, 쇠퇴 디커플링, 강한 디커플링순으로 나타났으며, 전체적인 상태는 비이상적 상태에서 이상적 상태로 전환되는 경향을 보였다. 2017년부터 2018년까지 다양한 용지유형은 시내와 신도시에서 주로 확장 부정적 디커플링 현상을 보였다. 이는 탄소배출증가 속도가 주거, 상업, 여가 및 생활 서비스용지의 확장속도보다 빠르다는 것을 의미하며, 도시건설의 산발적인 확장경향을 나타냈다. 반면, 일부 외곽 산지지역은 강한 디커플링을 보여주며, 생태환경보호 지역이 탄소배출 완화에 효과적임을 나타냈다. 2018년부터 2019년까지 도시건설이 축소되면서 기존의 확장 부정적 디커플링 지역은 점차 강

한 부정적 디커플링으로 전환되었고, 탄소배출 증가율이 용지 증가율을 초과하여 매우 불균형한 비이상적 상태에 도달했다. 특히 업무·공공용지의 강한 부정적 디커플링 관계 변화가 가장 두드러지며, 이는 해당지역에서 사람들의 교통과 상업활동이 더욱 빈번해져서 탄소배출 증가 속도를 크게 가속화하고 있음을 나타낸다. 2019년부터 2020년까지는 코로나19가 발생하면서 주거·여가용지에서 쇠퇴 디커플링 현상이 일반적으로 나타났다. 팬데믹 동안 생산과 생활에 대한 제한으로 인해 탄소배출이 크게 감소했다. 공공용지와 상업용지도 외출제한의 영향을 받아 도시중심지역의 확장 부정적 디커플링이 약화되었으나, 주변지역에서 중심도시로 향하는 강한 디커플링 경향이 나타났다. 2020년부터 2021년까

지는 생산과 생활이 점차 회복되면서 다양한 토지유형의 디커플링 관계가 더욱 개선되었으며, 강한 디커플링 지역이 크게 확대되었다.

디커플링 효과의 진화 추세에서, 다양한 유형의 도시기능 토지 확장과 탄소배출 사이의 관계는 시간적 동태성과 공간적 이질성을 가지고 있음을 알 수 있다. 확장 부정적 디커플링과 강한 부정적 디커플링 현상은 주로 도심과 신도시에서 나타난다. 이는 초기 단계에서 자원과 에너지의 집약적 사용이 급속한 도시확장 수요를 충족하기에 충분하지 않다는 것을 보여준다. 특히, 공공·업무용지의 확장 과정에서 도시계획이 효과적인 저탄소 관리메커니즘을 갖추지 못해 탄소배출과 경제 성장이 강하게 연계되어 있다. 이 시기의 도시성장은 '고배출, 고소비'의 특징을 띤다. 강한 디커플링 효과는 코로나19 충격 이후 회복기 동안 점차 나타나기 시작한다. 이 기간 동안 도시는 점진적으로 생산과 생활을 회복했으나, 탄소배출증가가 토지확장속도와 일치하지 않는다. 이 과정에서 정부 주도의 환경정책, 기술혁신, 공공건강 사건이 경제활동을 제약하며 어느 정도 탄소배출과 경제성장의 디커플링을 촉진했다. 특히, 코로나19와 같은 외부 사건의 개입으로 인해 발생한 디커플링은 수동적이지만 경제활동 감소가 환경에 미치는 깊은 영향을 드러낸다. 그러나 이는 또한 현재 베이징이 강한 디커플링 목표를 달성하는 데 여전히 큰 도전에 직면해 있음을 보여준다.

2. 분산정도와 탄소배출량 간의 관계분석

1) 공간자기상관 분석과 검증

공간자기상관 분석결과는 <표 2>와 같다. 2017년부터 2021년 까지 모든 연도에서 유의성 검정을 통과했으며, Moran's I 값이 모두 0보다 큰 것으로 나타났다. 이는 베이징의 평균 탄소배출 강도가 유의미한 양(+)의 공간상관성을 가지고 있음을 의미한다. 즉, 고 배출지역과 고 배출지역(저 배출지역과 저 배출지역)은 공간적으로 함께 집합하는 경향이 있다. Moran's I 결과에 따르면, 베이징 각 공간의 탄소배출 간에는 공간적 자기 상관성이 존재하며, 이는 일반최소자승법(OLS)이 공간 패널데이터 모델에 적합하지 않을 수 있음을 의미한다.

모델 선택에 앞서, 모델의 모든 독립변수는 다중공선성검정을

Table 2. Moran's I result

Variables	I	z	P-value*
CE_mean2017	0.851	25.693	0.000
CE_mean2018	0.851	25.687	0.000
CE_mean2019	0.851	25.697	0.000
CE_mean2020	0.851	25.701	0.000
CE_mean2021	0.851	25.708	0.000

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

Table 3. Pre-test for analysis

Error type	Test	Value	P-value
LM	Moran's I	30.431***	0.000
	Lagrange multiplier	896.388***	0.000
	Robust Lagrange multiplier	250.675***	0.000
	Lagrange multiplier	751.163***	0.000
	Robust Lagrange multiplier	105.450***	0.000
LR	LR-SDM/SEM	110.30***	0.000
	LR-SDM/SAR	209.64***	0.000
Wald	Wald-SDM/SEM	106.90***	0.000
	Wald-SDM/SAR	224.74***	0.000
Temporal fixed effects test	Hausman-fe/re	94.53***	0.000
	LR-both/ind	30.28***	0.035
	LR-both/time	12468.05***	0.000
Multicollinearity	Mean VIF	3.81	

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

통과하였다. 먼저 OLS회귀를 수행하고, LM검정을 이용해 사전 검정을 진행하였다. <표 3>에 따르면, LM-error와 Robust LM-error 통계량도 0.01유의수준에서 유의하다. LM-lag와 Robust LM-lag결과도 유의하다. 이는 탄소배출이 종속변수의 공간적 지체의 영향을 받으며, 동시에 모델의 오차항에서도 공간적 자기상관성이 존재함을 의미한다. 따라서 혼합패널회귀를 사용할 수 없으며, 공간터빈모델(SDM)을 초기 선택하였다. 다음으로 Hausman검정결과가 0.01유의수준을 통과하여, 이 연구에서 고정효과모형이 임의효과모형보다 더 적합함을 확인하였다. 시간 및 개체 고정효과 검정결과 역시 유의미하게 나타나, 이중고정효과를 우선적으로 선택해야 함을 보여준다. 두 번째 단계로, Wald와 LR(Likelihood Ratio) 검정을 통한 사후 견고성 검정을 진행하였다. 결과는 모두 0.01유의수준에서 나타나, SDM이 공간오차모델(SEM) 및 공간시차모델(SAR)로 단순화될 수 있다는 원 가설을 기각할 수 있었다. SDM이 통계적 및 실질적으로 다른 두 모델보다 우수함을 확인할 수 있었다.

2) SDM 분석결과

SDM 결과는 <표 4>와 같으며, 건설용지 면적의 증가가 탄소배출량에 유의미한 양(+)의 영향을 미친다는 것으로 밝혀졌다(계수: 0.307, P<0.01). 이는 건설용지가 1단위 증가할 때, 탄소배출량이 0.307단위 증가한다는 것을 의미한다. 이는 어재훈 외(2010)의 연구결과와 일치한다. 다른 통제변수 중에서는 고용용지 밀도가 탄소배출에 양(+)의 영향을 미치는 것으로 나타났으며(계수: 0.001, P<0.1), 이는 상업활동이 높은 에너지소비와 관련이 있음을 시사한다. 반면, 녹지율의 증가는 탄소배출을 유의미하게 감소

Table 4. SDM analysis result

Variables	Coefficient	Std. err.	z	P> z	VIF
Land	0.307***	0.026	11.67	0.000	2.25
ED (ln)	0.001*	0.000	1.92	0.055	3.76
RD (ln)	0.000	0.000	-0.39	0.699	4.44
LD (ln)	0.000	0.000	0.30	0.762	2.66
PD (ln)	-0.001	0.001	-1.00	0.317	6.76
Green (ln)	-0.099***	0.001	-72.37	0.000	3.17
pop	0.000	0	1.28	0.199	3.71
Road	-0.000	0.001	-0.07	0.940	3.72
Year			Yes		
Ind			Yes		
rho	0.601***	0.026	23.55	0.000	-
sigma2_e	0.000***	0.000	27.97	0.000	-

*p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

시키는 것으로 나타났다(계수: -0.099, P<0.01). 녹지율이 1단 위 증가할 때 탄소배출량은 0.099단위 감소하며, 녹지의 확장이 탄소흡수에 있어 중요한 역할을 한다는 것을 다시 한번 입증한다. 공간자기상관계수(rho)는 0.550이며, 유의 수준 0.01에서 강한 공간자기 상관성이 존재함을 나타내어 공간모델 선택의 필요성을 확인시키고 있다. 오차항 분산(sigma2_e) 또한 유의하여 모델의 오차항이 작고, 모델 적합도가 좋음을 보여준다. 이 연구는 분석 전 정규성에 대한 검정을 사전에 실시하였으며, 그 결과 정규성이 확인되었다. 회귀분석에서 독립변수 간 높은 상관관계는 다중공선성을 유발하여 모델의 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 분산팽창계수(VIF: Variance Inflation Factor)를 사용하여 다중공선성을 진단한다. 일반적으로 VIF 값이 10 이하일 경우 다중공선성 문제가 없다고 본다. 이 연구에서 사용된 변수들은 VIF 분석결과 모두 10 미만으로, 다중공선성의 문제가 없는 것으로 확인되었다(〈표 5〉 참조).

Table 5. Decomposition of the effects of urban land use on carbon emissions: direct, indirect and total effects

Variables	LR_Direct	LR_Indirect	LR_Total
LU	0.281***	-0.397***	-0.116
ED(ln)	0.001***	0.007***	0.009***
RD(ln)	-0.001	-0.008***	-0.008***
LD(ln)	0.000	0.001	0.001
PD(ln)	-0.001	0.002	0.001
Green(ln)	-0.100***	-0.007	-0.106***
pop	0.000	-0.000	-0.000
Road	-0.001	-0.007**	-0.008**

*p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

SDM에 따르면, 유의미한 공간자기상관성($\rho > 0.8$)이 존재하며, 이는 인접 지역의 탄소배출이 공간적 확산효과를 가진다는 것을 의미한다. 그러나 공간자기상관이 존재하기 때문에, SDM에서 설명변수의 계수는 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 완전히 반영하지 못하며, 이를 직접효과, 간접효과 및 총 효과로 분해하여 분석할 수 있다. 직접효과는 각 독립변수가 해당지역 내 탄소배출에 미치는 직접적인 영향을 나타낸다. 간접효과는 독립변수가 인접지역의 탄소배출에 미치는 영향을 나타내며, 이는 공간적 파급효과(Spillover Effect)를 의미한다. 총 효과는 직접효과와 간접효과의 종합적인 결과를 반영한다. 〈표 6〉의 결과에 따르면, 건설용지는 탄소배출에 대해 1% 수준에서 유의미한 양(+)의 직접효과를 가지며, 건설용지가 1단위 증가할 때 해당 지역의 탄소배출량이 0.28단위 증가한다. 이는 건설용지의 성장이 탄소배출을 유의미하게 증가시킨다는 것을 보여주며, 이는 건설활동 및 관련 에너지소비의 증가와 관련이 있을 가능성이 있다. 그러나 간접효과는 1% 수준에서 유의미한 음(-)의 값을 보여주며, 이는 건설용지의 성장이 해당 지역에서는 탄소배출을 증가시키지만, 인접지역의 개발압력을 줄여 간접적으로 주변지역의 탄소배출을 감소시킨다는 것을 의미한다. 업무용지는 직접효과, 간접효과,

Table 6. Estimation of moderating effects

Variables	(1) Employment	(2) Leisure	(3) Public	(4) Residential
LU	1.029***	1.028***	1.024***	0.981***
EDI	0.004*			
LU_EDI interaction	0.003**			
LDI		0.002		
LU_LDI interaction		0.001		
PDI			0.004**	
LU_PDI interaction			0.003**	
RDI				-0.003***
LU_RDI interaction				-0.002***
Other variables	Yes	Yes	Yes	Yes
Spatial				
rho	0.597***	0.613***	0.612***	0.595***
Variance				
sigma2_e	0.002***	0.000***	0.000***	0.000***
Year	Yes	Yes	Yes	Yes
Ind	Yes	Yes	Yes	Yes
N	1655	1655	1655	1655

t statistics in parentheses * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

총 효과 모두에서 유의미한 양(+)의 값을 나타낸다. 이는 상업용지의 확산이 이 지역뿐만 아니라 공간파급효과를 통해 인근지역의 탄소배출도 증가시킨다는 것을 의미한다. 상업활동은 일반적으로 높은 에너지소비와 높은 배출을 동반하므로, 그 밀도의 분산은 탄소배출에 직접적이고 유의미한 영향을 미친다. 주거용지의 직접효과는 유의미하지 않지만, 간접효과와 총 효과는 음(-)의 공간파급효과를 나타낸다. 이는 주거용지 밀도의 확산이 단기적으로는 탄소배출을 직접적으로 증가시키지 않지만, 더 큰 공간규모에서 주변지역의 개발밀도를 줄여 지역 전체의 탄소배출을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 의미한다. 녹지율은 직접효과와 총 효과 모두에서 유의미한 음의 값을 나타낸다. 이는 녹지율이 1단위 증가할 때, 해당 지역의 탄소배출이 0.1단위 감소함을 의미하며, 녹지율의 증가는 탄소배출을 가장 직접적이고 유의미하게 억제하는 역할을 하고 있음을 보여준다. 도로밀도는 간접효과와 총 효과는 음(-)의 공간파급효과를 나타내며, 도로밀도의 증가는 전체지역의 교통망을 개선하여 교통흐름을 원활하게 하고, 차량의 주변지역에서의 혼잡과 공회전 시간을 줄이는 데 기여한다. 도로밀도를 증가시킴으로써 이 지역에서는 탄소배출을 유의미하게 줄이지 못할 수 있으나, 교통흐름을 개선하고 주변지역의 교통압력을 감소시켜 간접적으로 탄소배출 억제를 실현할 수 있다.

종합적으로, 도시건설용지와 업무용지의 확장은 평균 탄소배출을 증가시키는 반면, 녹지의 증가는 탄소배출을 유의미하게 감소시킨다. 주거용지와 도로밀도의 합리적 배치는 간접적으로 지역의 탄소배출을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 따라서 도시계획 및 토지이용 정책은 다양한 기능용지의 탄소배출 효과를 종합적으로 고려하여 토지배치를 최적화함으로써 저탄소도시발전 목표를 달성할 수 있도록 해야 한다.

3) 토지이용 유형별 분산 배치의 조절효과 결과

〈표 6〉의 결과에 따르면, 각 기능용지의 분산배치와 건설용지가 상호작용을 통해 탄소배출량의 동태에 어떤 영향을 미치는지를 밝혀준다. 업무용지 모델에서 상호작용항은 양(+)의 효과를 나타냈다. 이는 업무용지의 집약도가 탄소배출을 직접적으로 증가시킬 뿐만 아니라, 건설용지의 집중도와 상호작용하여 인구나 물류 수요를 더욱 증가시켜 탄소배출을 더욱 악화시킨다는 것을 의미한다. 공공용지 모델에서도 상호작용항이 양(+)의 효과를 나타냈다. 이는 도시건설에서 공공시설의 과도한 집중이 탄소배출을 증가시킴을 설명한다. 공공시설의 집중은 더 많은 교통과 인구이동을 초래하여 에너지소비와 탄소배출을 증가시킨다. 주거용지 모델에서는 상호작용항이 음(-)의 효과를 나타냈다. 이는 주거용지 배치의 분산이 도시건설이 탄소배출에 미치는 영향을 억제하는데 도움이 된다는 것을 의미한다. 분산된 주거용지 배치는 집중주거로 인한 교통혼잡과 과도한 개발문제를 완화하여 지역 전체의 탄소배출을 줄이는 데 유리하다.

종합적으로, 다양한 기능유형 용지의 분산배치가 탄소배출량에 유의미한 조절 효과를 나타낸다. 업무·공공용지의 분산은 도시개발이 탄소배출을 증가시키는 영향을 더 크게 하지만, 주거용지의 분산은 이러한 영향을 억제한다. 따라서 도시계획과 정책결정 시 이러한 토지유형의 공간구조적 배치를 종합적으로 고려해야 한다. 이를 통해 도시의 기능과 편리성을 희생하지 않으면서도 탄소배출을 효과적으로 줄이고, 저탄소 지속가능한 발전을 실현할 수 있다.

V. 결론

도시의 이상기후 현상이 뚜렷해짐에 따라, 탄소중립도시 구현을 위한 도시공간 구조모색에 대한 중요성이 커지고 있다. 특히, 토지이용의 형태와 분산의 정도는 탄소배출량에 중요한 영향을 미친다는 점에서 지속가능한 도시개발모델 고안에 있어서 중요하게 다뤄져야 한다. 이에 이 연구는 베이징시를 대상으로 토지이용의 분산구조에 따른 토지개발과 탄소배출량 간의 영향관계를 실증적으로 분석하여, 저탄소도시개발을 위한 방안을 제시하고자 하였다. 이 연구의 주요결론은 다음과 같다.

첫째, 베이징의 탄소배출은 공간과 시간에 따른 변화를 나타내며, 핵심도심과 신도시에서의 탄소배출 역할이 동적으로 변화하였다. 핵심도심의 높은 탄소배출은 높은 인구밀도와 밀집된 경제활동에서 기인한다. 도시가 발전함에 따라 신도시가 새로운 탄소배출 성장극이 되어 도시확장과 경제활동의 외곽 이동이 탄소배출의 주요 원동력을 나타낸다. 이러한 분산화 추세는 어느 정도 양날의 검과 같은 효과를 가지며, 공간구조 조정을 통한 탄소배출 감축 효과를 극대화하기 위해서는 안전한 도시 압축정도와 도시활동 혼잡완화 사이에서 균형이 잡힌 타협이 필요하다. 또한, 외곽지역의 탄소배출이 낮은 편인데, 이는 생태보호정책 시행 덕분이다. 따라서 도시공간구조를 조정할 때 생태환경의 완전성과 연속성을 보호하고 증진하는 데 주의를 기울여야 한다.

둘째, 도시확장과 탄소배출의 디커플링 관계가 비이상적 상태에서 이상적 상태로 전환되는 것을 발견하였다. 초기의 확장 부정적 디커플링은 경제발전의 상승과 함께 강한 부정적 디커플링으로 전환되었으며, 이는 탄소배출 증가율이 토지 증가율을 초과하는 것을 의미한다. 특히, 상업용지와 공공용지에서의 강한 부정적 디커플링 관계 변화가 두드러졌다. 코로나19 기간 동안 생산과 생활의 제한으로 인해 탄소배출이 크게 감소하여 쇠퇴 디커플링 현상이 나타났다. 이후 경제가 회복되면서 탄소배출량이 다시 증가하였으나, 강한 디커플링 영역이 확장되었다. 이는 장기적인 저탄소발전이 단순한 경제활동의 일시적 감소에 의존하기보다는 더 체계적이고 구조적인 변화가 필요함을 보여준다. 비록 이것이 단기적인 특수 현상이나, 교통·산업 활동감소가 탄소배출 저감에 미치는 잠재적 가능성을 강조하며, 원격 근무와 같은 근

로학습방식의 최적화 및 녹색제조와 같은 생산방식의 변화를 통해 장기적 저감의 실현가능성을 시사한다.

셋째, 고용 핫스팟은 점차 핵심도심에서 신도시로 확산되어 핵심도심의 탄소배출 압력을 완화하였으나, 신도시에는 새로운 고배출지역이 형성되었다. 주거용지의 확산속도는 느리지만, 점차 외곽으로 확장되어 외곽지역의 탄소배출을 증가시켰다. 그러나 공간자기상관분석과 SDM 분석결과는 베이징시의 탄소배출 강도가 고배출지역과 저배출지역에서 공간적으로 집약되는 경향을 보인다. 업무용지와 공공용지의 높은 밀도와 분산적 확장은 직접적인 효과뿐만 아니라 파급효과를 통해서도 탄소배출을 증가시키므로, 상업·업무용지의 과도한 집중이 탄소배출 급증을 유발하지 않도록 하면서도 분산으로 인한 에너지낭비를 방지하는 균형이 필요하다. 따라서 고용 중심의 압축 다중심모델이 과도기적 전환 모델로 적합할 수 있다. 주거용지의 분산은 주변지역의 개발밀도를 줄임으로써 전체 탄소배출을 간접적으로 줄이고, 고용 중심을 중심으로 다중심 주거구역 형성을 통해 도시 탄소배출의 영향을 완화하는 조절역할을 한다.

이 연구의 분석결과, 다양한 토지이용의 공간배치가 탄소배출에 미치는 조절효과가 매우 복잡하고 유의미한 것으로 나타났다. 따라서 탄소배출 부담을 완화하기 위해서는 기능 배치에 세밀한 탄소배출 관리전략을 도입하고, 구분계획 및 저탄소정책을 통해 중심구역과 신도시의 건설배치의 밀도와 기능을 조정해야 한다. 특히, 도시녹지면적의 증가와 보호를 핵심전략 중 하나로 삼아, 고 탄소배출지역과 신도시에 도시녹색네트워크를 구축하고 녹지의 탄소흡수 및 생태적 이익을 극대화해야 할 필요가 있다.

이 연구는 베이징의 탄소배출량을 분석하기 위해 ODIAC 데이터를 활용하였다. ODIAC 데이터는 야간조도 데이터와 발전소 데이터를 기반으로 에너지 부문에 한정된 CO₂ 배출량만을 포함하고 있어, 산업, 농업, 폐기물 처리 등 세부 부문의 배출원을 반영하지 못하는 한계가 있다. 현재 중국의 에너지 통계데이터는 지역별 세부정보의 제한으로 인해 IPCC의 Bottom-up 방법을 통한 고해상도 탄소배출량 지도의 구축이 어려운 상황이다. 그러나 향후 보다 상세한 데이터가 확보된다면, 향후연구에서는 고해상도 배출원 데이터의 수집 및 IPCC 방법론의 적용을 통해 탄소배출량 데이터의 정확성을 향상시키는 것이 필요하다. 그리고 향후연구에서는 다양한 지역과 기능별 용지의 디커플링 메커니즘을 더욱 세분화하고, 기술발전, 정책적 유도, 경제성장 간의 이상적인 균형을 어떻게 달성할 수 있을지에 대한 탐구가 필요하다. 또한, 이 연구는 베이징을 사례로 도시기능의 공간구조가 탄소배출에 미치는 영향을 정량적으로 평가했지만, 그 결과는 베이징뿐만 아니라 급격한 도시화와 높은 인구밀도를 특징으로 하는 다른 대도시에서도 유용하다. 다중심 발전전략을 수립할 때, 도시계획자와 정책결정자들은 각 공간규모의 고유한 특성을 고려하여 경제성장과 환경지속가능성의 균형을 이루는 것이 필요하다.

인용문헌 References

- 고승욱·신학철·이승일, 2023. "API 기반 통근통행자료를 활용한 서울시 행정동별 승용차 탄소배출량 추정: 네트워크 특성과 공간구조정책 특성을 중심으로", 「국토계획」, 58(1): 91-103.
Go, S.W., Shin, H.C., and Lee, S.I., 2023. "Estimation of Passenger Private Car Carbon Emissions by Administrative District Using API-based Commuter Data: Focusing on Network and Spatial Structure Policy Characteristics" *Journal of Korea Planning Association*, 58(1): 91-103.
- 김민주·양지청·정창무, 2010. "토지복합이용에 따른 이산화탄소 발생량 변화에 관한 연구 -서울시를 대상으로-", 「국토계획」, 45(6): 35-43.
Kim, M.J., Yang, J.C., and Jung, C.M., 2010. "A Study on the Effect of Mixed Land-Use on Carbon dioxide Emission - Focused on Seoul in Korea -", *Journal of Korea Planning Association*, 45(6): 35-43.
- 김윤경·이원경·Yu Feier, 2024. "중국의 경제성장, 이산화탄소 배출량, 재생에너지의 동태적 관계 분석", 「에너지경제연구」 23(1): 107-124.
Kim, Y.K., Lee, W.K., and Yu, F., 2024. "Analysis of the Dynamic Relationship between China's Economic Growth, CO₂ Emissions, and Renewable Energy", *Energy Economics Research*, 23(1): 107-124.
- 문한솔·염재원·정주철, 2023. "야간 위성영상 기반 도시단위 탄소배출량 추정과 영향 요인 분석", 「국토계획」, 58(5): 151-165.
Mun, H.S., Yeom, J.W., and Jung, J.C., 2023. "Estimating Carbon Emissions at Urban Scales by Nighttime Light Satellite Imagery and Analysis of Influencing Factors", *Journal of Korea Planning Association*, 58(5): 151-165.
- 박준, 2014. "도시구조와 탄소배출 간 관계에 대한 소고: 압축도시와 다핵도시 특성을 중심으로", 「부동산학연구」, 20(1): 39-56.
Park, J., 2014. "A Study on the Relationship between Urban Structure and Carbon Emissions: With an Emphasis on the Spatial Characteristics of Compact City and Polycentricity", *Journal of the Korea Real Estate Analysts Association*, 20(1): 39-56.
- 송기욱·남진, 2009. "압축형 도시특성요소가 교통에너지 소비에 미치는 영향에 관한 실증분석", 「국토계획」, 44(5): 193-206.
Song, K.W. and Nam, J., 2009. "An Analysis on the Effects of Compact City Characteristics on Transportation Energy Consumption", *Journal of Korea Planning Association*, 44(5): 193-206.
- 양희진·최막중, 2011. "압축도시의 탄소증감 효과에 관한 건물·교통·녹지 통합 모형", 「국토계획」, 46(3): 281-292.
Yang, H.J. and Choi, M.J., 2011. "Compact City and Carbon Emissions: An Integrated Approach of Building, Transport, and Greenfield", *Journal of Korea Planning Association*, 46(3): 281-292.
- 어재훈·김기태·정길섭·유환희, 2010. "저탄소 도시관리를 위한 탄소배출과 토지이용변화 분석 -진주시를 중심으로-", 「대한공간정보학회지」, 18(1): 129-134.
Eo, J.H., Kim, K.T., Jung, G.S., and Yoo, H.H., 2010. "Analysis

- of Carbon Emissions and Land Use Change for Low -Carbon Urban Management - Focused on Jinju”, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 18(1): 129-134.
9. 여관현·유선철, 2024. “서울시 토지 용도별 건물부분 온실가스의 공간적 분포 특성 연구”, 「한국측량학회지」, 42(1): 81-90.
Yeo, K.H. and Yu, S.C., 2024. “A Study on the Spatial Distribution Characteristics of Greenhouse Gases in the Building Sector by Land Use in Seoul”, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 42(1): 81-90.
 10. 유정원, 2023. “중국 에너지 정책 전환에 관한 연구 —〈에너지 발전 ‘13·5’ 规划能源发展‘十三五’规划〉과 〈‘14·5’현대 에너지 시스템 规划‘十四五’现代能源体系规划〉의 텍스트 분석을 중심으로”, 「중국학논총」, 77: 213-231.
Yu, J.W., 2023. “A Study on the Change of Energy Policy in China - A text analysis of the 13th Five-Year Development Plan for Energy Development and the 14th Five-Year Plan for Modern Energy System”, *Journal of Sinology*, 77: 213-231.
 11. 이경기·조진희, 2014. “탄소저감을 위한 신도시토지이용의 공간 단위별 연계요인 설정 연구”, 「지역정책연구」, 25(1): 121-140.
Lee K.G. and Jo, J.H., 2014. “A Study on Spacial Factor of Land Use Model for a Carbon-Reduced New City”, *Regional Policy Review*, 25(1): 121-140.
 12. 이재찬, 2023. “외국정책사례 중국 탄소 중립 정책의 동향과 베이징시의 사례” 「월간 공공정책」, 207: 69-72.
Lee, J.C., 2023. “Trends in China’s carbon neutrality policy and the case of Beijing”, *Monthly Public Policy*, 207: 69-72.
 13. 이종서, 2024. “EU 네트워크 도시의 확대: 다핵 도시권 협력 거버넌스를 중심으로”, 「유럽연구」, 42(1): 247-286.
Lee, J.S., 2024. “Expansion of the EU Network of Cities: Focusing on Cooperative Governance of Polycentric Urban Areas”, *The Journal of Contemporary European Studies*, 42(1): 247-285.
 14. 진태영·김진수, 2017. “화석연료 사용량을 고려한 탄소배출량과 도시화율의 관계에 관한 연구”, 「환경정책」, 25(3): 47-70.
Jin, T.Y. and Kim, J.S., 2017. “The Relationship between Carbon Emissions and Urbanization Considering Fossil Fuel Usage”, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(3): 47-70.
 15. Bartosiewicz, B. and Marcińczak, S., 2020. “Investigating Polycentric Urban Regions: Different Measures-Different Results”, *Cities*, 105: 102855.
 16. Carter, A.P., 1966. “The Economics of Technological Change”, *Scientific American*, 214(4): 25-31.
 17. Chen, J., Zhao, F., Zeng, N., and Oda, T., 2020. “Comparing a Global High-resolution Downscaled Fossil Fuel CO₂ Emission Dataset to Local Inventory-based Estimates over 14 Global Cities”, *Carbon Balance and Management*, 15: 1-15.
 18. Chen, X., Zhang, S., and Ruan, S., 2021. “Polycentric Structure and Carbon Dioxide Emissions: Empirical Analysis from Provincial Data in China”, *Journal of Cleaner Production*, 278: 123411.
 19. Cirilli, A. and Veneri, P., 2014. “Spatial Structure and Carbon Dioxide (CO₂) Emissions Due to Commuting: An Analysis of Italian Urban Areas”, *Regional Studies*, 48(12): 1993-2005.
 20. Ding, S., Xu, N., Ye, J., Zhou, W., and Zhang, X., 2020. “Estimating Chinese Energy-related CO₂ Emissions by Employing a Novel Discrete Grey Prediction Model”, *Journal of Cleaner Production*, 259: 120793.
 21. Dong, Y., Jin, G., and Deng, X., 2020. “Dynamic Interactive Effects of Urban Land-use Efficiency, Industrial Transformation, and Carbon Emissions”, *Journal of Cleaner Production*, 270: 122547.
 22. Donglan, Z., Dequn, Z., and Peng, Z., 2010. “Driving Forces of Residential CO₂ Emissions in Urban and Rural China: An Index Decomposition Analysis”, *Energy Policy*, 38(7): 3377-3383.
 23. Fu, B., Wu, M., Che, Y., and Yang, K., 2017. “Effects of Land-use Changes on City-level Net Carbon Emissions based on a Coupled Mode”, *Carbon Management*, 8(3): 245-262.
 24. Gaughan, A.E., Oda, T., Sorichetta, A., Stevens, F.R., Bondarenko, M., Bun, R., Krauser, L., Yetman, G., and Nghiem, S.V., 2019. “Evaluating Nighttime Lights and Population Distribution as Proxies for Mapping Anthropogenic CO₂ Emission in Vietnam, Cambodia and Laos”, *Environmental Research Communications*, 1(9): 091006.
 25. Halbert, L., 2006. “The Polycentric City Region That Never Was: the Paris Agglomeration, Bassin Parisien and Spatial Planning Strategies in France”, *Built Environment*, 32(2): 184-193.
 26. He, J. and Yang, J., 2023. “Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of Land-use Carbon Emissions: An Empirical Analysis Based on the GTWR Model”, *Land*, 12(8): 1506.
 27. Houghton, R.A., House, J.I., Pongratz, J., Van Der Werf, G.R., Defries, R.S., Hansen, M.C., Le Quééré, C., and Ramankutty, N., 2012. “Carbon Emissions from Land Use and Land-cover Change”, *Biogeosciences*, 9(12): 5125-5142.
 28. Huang, X., Huang, Y., Li, R., Cheng, W., Su, Y., Li, F., and Du, X., 2023. “Decoupling of Land-use Net Carbon Flux, Economic Growth, and Population Change in China”, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(49): 107058-107067.
 29. Jung, M.C., Kang, M., and Kim, S., 2022. “Does Polycentric Development Produce Less Transportation Carbon Emissions? Evidence from Urban form Identified by Night-time Lights across US Metropolitan Areas”, *Urban Climate*, 44: 101223.
 30. Kurz, W.A., Dymond, C.C., White, T.M., Stinson, G., Shaw, C.H., Rampley, G.J., Smyth, C., Simpson, B.N. Neilson, E.T., Trofymow, J.A., Metsaranta, J., and Apps, M.J., 2009. “CBM-CFS3: A Model of Carbon-dynamics in Forestry and Land-use Change Implementing IPCC Standards”, *Ecological modelling*, 220(4): 480-504.
 31. Lee, B., 2007. ““Edge” or “Edgeless” Cities? Urban Spatial Structure in U.S. Metropolitan Areas, 1980 to 2000”, *Journal of Regional Science*, 47(3): 479-515.
 32. Lei, H., Zeng, S., Namaiti, A., and Zeng, J., 2023. “The Impacts of Road Traffic on Urban Carbon Emissions and the Corresponding Planning Strategies”, *Land*, 12(4): 800.
 33. Li, L., Chen, Z., and Wang, S., 2022. “Optimization of Spatial Land Use Patterns with Low Carbon Target: A Case Study of Sanmenxia, China”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21): 14178.

34. Li, L., Dong, J., XU, L., and Zhang, J.F., 2019. "Spatial Variation of Land Use Carbon Budget and Carbon Compensation Zoning in Functional Areas: A Case Study of Wuhan Urban Agglomeration", *Journal of Natural Resources*, 34(5): 1003-1015.
35. Lin, Q., Zhang, L., Qiu, B., Zhao, Y., and Wei, C., 2021. "Spatiotemporal Analysis of Land Use Patterns on Carbon Emissions in China", *Land*, 10(2): 141.
36. Lubowski, R.N., Plantinga, A.J., and Stavins, R.N., 2006. "Land-use Change and Carbon Sinks: Econometric Estimation of The Carbon Sequestration Supply Function", *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(2), 135-152.
37. Luo, H., Li, Y., Gao, X., Meng, X., Yang, X., and Yan, J., 2023. "Carbon Emission Prediction Model of Prefecture-level Administrative Region: A Land-use-based Case Study of Xi'an City, China", *Applied Energy*, 348: 121488.
38. Meijers, E.J. and Burger, M.J., 2010. "Spatial Structure and Productivity in US Metropolitan Areas", *Environment and Planning A: Economy and Space*, 42(6): 1383-1402.
39. Oda, T., Maksyutov, S., and Andres, R.J., 2018. "The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, version 2016 (ODIAC2016): A Global Monthly Fossil Fuel CO₂ Gridded Emissions Data Product for Tracer Transport Simulations and Surface Flux Inversions" *Earth System Science Data*, 10(1): 87-107.
40. Ouwehand, W.M., van Oort, F.G., and Cortinovis, N., 2022. "Spatial Structure and Productivity in European Regions", *Regional Studies*, 56(1): 48-62.
41. Pan, G., Xu, Y., and Huang, B., 2021. "Evaluating National and Subnational CO₂ Mitigation Goals in China's Thirteenth Five-year Plan from Satellite Observations", *Environment International*, 156: 106771.
42. Park, J., 2013. "The Division of Spatial Housing Submarkets: A Theory and the Case of Seoul", *Environment and Planning A*, 45(3): 668-690.
43. Raimi, D., Zhu, Y., Newell, R.G., Prest, B.C., and Bergman, A., 2023. *Global Energy Outlook 2023: Sowing the Seeds of an Energy Transition*, Resources for the future.
44. Shang, M., and Luo, J., 2021. "The Tapio Decoupling Principle and Key Strategies for Changing Factors of Chinese Urban Carbon Footprint based on Cloud Computing", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4): 2101.
45. Shi, K., Liu, G., Cui, Y., and Wu, Y., 2023. "What Urban Spatial Structure Is More Conducive to Reducing Carbon Emissions? A Conditional Effect of Population Size", *Applied Geography*, 151: 102855.
46. Stechemesser, K. and Guenther, E., 2012. "Carbon Accounting: A Systematic Literature Review", *Journal of Cleaner Production*, 36: 17-38.
47. Tan, Y., Liu, Y., Chen, Y., Zhang, Z., Wu, D., Chen, H., and Han, Y., 2023. "The Impact of Urban Construction Land Change on Carbon Emissions—A Case Study of Wuhan City", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2): 922.
49. Veneri, P., 2010. "Urban Polycentricity and the Costs of Commuting: Evidence from Italian Metropolitan Areas", *Growth and Change*, 41(3): 403-429.
49. Tapio, P., 2005. "Towards a Theory of Decoupling: Degrees of Decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland between 1970 and 2001", *Transport Policy*, 12(2): 137-151.
50. Wang, C., Zhang, Y., Chen, J., Li, D., Zhu, M., and Gan, Z., 2024. "The Impact of Urban Polycentricity on Carbon Emissions: A Case Study of the Yangtze River Delta Region in China", *Journal of Cleaner Production*, 442: 141127.
51. Wang, G., and Han, Q., 2019. "Assessment of the Relation between Land Use and Carbon Emission in Eindhoven, the Netherlands", *Journal of Environmental Management*, 247: 413-424.
52. Wang, L., 2015. "Research for Decomposition Results of Impact Factors about Carbon Emission by Land Use Patterns in Yancheng City" *Ecological Science*, 34(5): 122-128.
53. Wang, M., Wang, Y., Wu, Y., Yue, X., Wang, M., and Hu, P., 2022a. "Identifying the Spatial Heterogeneity in the Effects of the Construction Land Scale on Carbon Emissions: Case Study of the Yangtze River Economic Belt, China", *Environmental Research*, 212: 113397.
54. Wang, Q., and Xiao, Y., 2022 "Has Urban Construction Land Achieved Low-carbon Sustainable Development? A Case Study of North China Plain, China", *Sustainability*, 14(15): 9434.
55. Wang, Y., Niu, Y., Li, M., Yu, Q., and Chen, W., 2022b. "Spatial Structure and Carbon Emission of Urban Agglomerations: Spatiotemporal Characteristics and Driving Forces", *Sustainable Cities and Society*, 78: 103600.
56. Yan, H., Guo, X., Zhao, S., and Yang, H., 2022. "Variation of Net Carbon Emissions from Land Use Change in the Beijing-Tianjin-Hebei Region during 1990-2020", *Land*, 11(7): 997.
57. Zhang, R., Ying, J., and Zhang, Y., 2023. "Study on the Spatial Spillover Effect of Land Use Type Change on Carbon Emissions", *Scientific Reports*, 13(1): 12197.
58. Zhu, K., Tu, M., and Li, Y., 2022. "Did Polycentric and Compact Structure Reduce Carbon Emissions? A Spatial Panel Data Analysis of 286 Chinese Cities from 2002 to 2019", *Land*, 11(2), 185.
59. 베이징 민정부, 2016.03.28. "2019, 베이징시 국민경제 및 사회발전 제13차 5개년 계획 강요", https://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/qtgh/201907/t20190701_99981.html Beijing Municipal Civil Affairs Bureau, March 28, 2016. "2019 The 13th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of Beijing Municipality", https://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/wngh/qtgh/201907/t20190701_99981.html
61. 중국 민정부, 2018.06. "2017, 중국 행정 구역 통계표", <https://www.beijing.gov.cn/> Ministry of Civil Affairs of China, June 2018. "2017 Statistical Table of China's Administrative Divisions", <https://www.beijing.gov.cn/>
62. 중국 민정부, 2021.03.13. "2021, 중화인민공화국 국민경제 및 사회발전 제14차 5개년 계획과 2035년 장기 목표 강요", <https://www.beijing.gov.cn/>

www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
Ministry of Civil Affairs of China, March 13, 2021. "The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Long-Range Objectives Through the Year 2035", https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

Date Received	2024-07-30
Reviewed(1 st)	2024-08-27
Date Revised	2024-09-24
Reviewed(2 nd)	2024-10-11
Date Accepted	2024-10-11
Final Received	2024-10-25