

非首都功能疏解政策下北京四大功能区碳排放 时空演化及区域异质性影响研究

杨 曦, 孟椿雨, 林竞立, 王佳豪

摘 要: 本文聚焦近年备受关注的北京市“非首都功能疏解”政策, 分析该行政政策对于空间碳排放和北京市各区域发展的影响。选取北京市四大功能区工业能源碳排放为研究样本, 基于各功能区域的异质性及其对碳排放的综合影响, 提出北京市各区域差异化发展的具体政策建议。主要研究结果有: 从空间上看, 北京四大功能区的工业能源碳排放从高到低依次为: 城市功能拓展区、城市发展新区、生态涵养发展区、首都功能核心区。从历史时间上看, 2008—2010 年北京四大功能区总体的工业能源碳排放不断增加, 2010—2012 年基本持平, 从 2013 年开始, 各功能区工业能源碳排放不断减少。从政策减排效果看, 城市发展新区的工业能源碳排放降低幅度最大, 年均降幅达 21.76%; 首都功能核心区却在 2016 年不降反增, 出现了 15.59% 的增长。进一步分析区域异质性的综合影响, 发现首都功能核心区和城市功能拓展区仍需加强工业管理并提升城镇劳动生产率; 城市发展新区更需要关注工业能源使用情况并提升城镇就业水平; 生态涵养发展区的城镇劳动生产率和城镇就业水平的提高对降低工业能源碳排放的影响更为显著; 而城市功能拓展区和城市发展新区的工业环境治理已步入完备阶段。最后结合区域政策给出了各区具体的分析结果和政策建议, 为首都城市规划和区域差异化发展提供参考。

关键词: 非首都功能疏解政策; 功能区; 碳排放; 区域异质性

中图分类号: D922.682 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2021)02-0077-14

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2021.02.008

一、引 言

北京作为全国政治、经济、文化、国际交往与科技创新中心, 承担多项重要功能, 合理有效的资源分配与发展方式对推动首都地区可持续发展具有重要意义。过密的人口、高污染企业、高耗能产业等严重阻碍了首都经济结构与空间结构的调整与优化。疏解非首都功能、缓解首都人口压力, 符合首都现代化建设的目标; 推动生态环境保护与产业升级, 是提升首都国际影响力的必然要求。

疏解非首都功能工作重点着力于疏散人口, 关停或转移高耗能、高污染、高排放企业, 实现制造业产业布局优化, 促进资源节约与生态环境保护。而碳排放水平下降一定程度反映人口密集程度的缩小与高耗能企业的减少, 可视为疏解非首都功能工作的标志。本文主要聚焦和分析疏解“非首

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“实现碳减排和空气质量改善协同双控”(71704187); 北京市社会科学基金资助项目“北京市推广新能源车的环境健康协同效益和政策成本有效性研究”(17GL045)

作者简介: 杨曦, 中国石油大学(北京)经济管理学院副教授, yangxi@cup.edu.cn (北京 102249); 孟椿雨, 中国石油大学(北京)经济管理学院; 林竞立, 对外经济贸易大学国际经济贸易学院(北京 100029); 王佳豪, 中国石油大学(北京)经济管理学院

都功能”政策推行的工作效果,并进一步分析四大功能区的区域异质性对碳排放的综合影响。

研究显示,2020年北京市二氧化碳排放总量达到历史峰值,且在达峰后未来碳排放体量仍然较大^[1],面临着艰巨的节能减排任务。与此同时,北京市能耗总量仍将保持持续增长的势头,预计到2035年能源消费总量将达到8800万吨标煤左右^[2],实现深度节能减碳尚有较大的潜力空间。城市本身的发展和合理的城市规划较大程度地影响到碳排放水平,并被认为是气候变化政策成功实施的关键^[3]。区域减排从来不是一个孤立的问题,直接受到区域经济发展、城市规划、人口分布等因素的综合影响。2015年以来,伴随着城市副中心的建立、北京市政府的迁移和环北京一小时通勤圈的修建等措施,非首都功能疏解在交通、生态环保、产业发展等领域已初见成效。北京四大功能区,即首都功能核心区(包括东城、西城)、城市功能拓展区(朝阳、海淀、丰台、石景山)、城市发展新区(通州、顺义、大兴、昌平、房山)、生态涵养发展区(门头沟、平谷、怀柔、密云、延庆),也根据各自定位协调发展。但目前城市规划仍存在经济发展粗放、各区域规划不协调和人口增长压力较大的问题,如水资源等资源支撑压力、大气污染物排放总量超过环境容量、生态用地不断被挤占和蚕食^[4],都极大制约着北京市二氧化碳减排。鉴于北京各区在区域经济发展水平和管理能力、应对气候变化能力、企业技术水平等各方面均存在较大差距,本文将研究方向集中于北京市四大功能区的工业能源排放的时空分布与演化,并尝试分析其背后的影响因素和作用机理。

二、研究现状与特点

目前中国城市层面的节能减排研究,主要围绕碳减排约束下城市发展和推动城市或区域碳减排展开。大量研究表明,碳排放与城市发展相互约束,城市化进程增大了碳排放,碳排放增长制约了城市发展,但随着环境保护与生态发展观念的提出,近年来多数城市探索低碳发展模式,在经济增长的同时减少城市碳排放。如技术进步和进口增大对上海减少碳足迹起到很大作用^[5];碳补偿在促进广东省区域协调发展方面发挥了显著作用^[6];福建省内城市尺度的碳排放空间差异和分布模式有助于碳交易和生态补偿机制方面的决策^[7];工业改造使北京市经济增长达到了政府的计划增长率^[8];研发效率、能源强度和产业结构对江西能源消耗和碳排放有明显的缓解作用^[9];能源效率提升可以有效抑制广西碳排放增长^[10]等。据此初步推断,北京市区县碳减排的可能发展路径为技术进步、产业结构改造、区域间碳补偿等,本文将基于此展开研究,并探讨适宜各区域及区域间的联动碳减排发展模式。

另一方面,有研究显示,碳排放会加速生态创新,对环境监管也有积极影响^[11]。这对利用碳减排促进区域发展扩展了新思路。在研究城市和区域碳减排影响因素和机理方面,多数研究将碳排放分解为经济规模、产业结构、能源效率和土地类型^{[12][13]}。而人口因素引起本文关注,北京作为中国的首都地区,吸引了越来越多的外来人口,煤炭消费量较大,人均碳排放量相对较高^[14]。在聚焦北京市碳减排的相关研究中,现有研究主要关注整体碳排放容量和减排现存问题,如北京市碳排放及其密度持续增加,碳排放分析结果反映出北京市在碳循环方面的生态环境压力有持续增大的趋势^[15];人均GDP、能耗结构、产业结构等是驱动碳排放增长的主要因素^[16]。而在规划目标与发展路线差异化背景下,对各城区的独特性分析较少。本文将研究目标细化至北京市各城区,基于上述研究扩展碳排放分解变量,丰富了相关研究。

方法论层面上,国内的碳排放研究集中运用投入产出法、生命周期分析法和过程分析法等。由于因素分解法可较为系统全面地分析影响碳排放的驱动因素,并使各区域可进行对比,综合考虑数据可得性及区域特点,我们采用因素分解法进行碳排放分析。在运用因素分解法进行碳排放影响的研究中,人口规模、财富水平、温室气体排放强度和能源强度等都是影响排放的最主要因素^{[17][18]},

这为本研究确定碳排放影响因素提供了参考变量, 同时在此基础上进行了变量更新与拓展。此外, 本研究还借鉴了一种基于 GIS 技术和开放数据的综合碳排放估算框架^[19], 展示北京城区间的碳排放差异。

综上, 本文从市辖下各区域层面进一步丰富了对北京市区域碳排放的研究, 运用因素分解法, 选取人口规模、城镇就业水平、技术水平、能源利用效率、工业碳排放强度和工业化水平等变量, 分别估算北京市四大功能区 2008—2017 年间的碳排放容量, 并基于《北京城市总体规划(2016 年—2035 年)》, 对各区域未来政策提出针对性建议。

三、模型方法

(一) 北京四大功能区工业能源碳排放测算

本文基于北京市四大功能区数据, 以及北京市十个行政区划区域的数据, 通过 IPCC 计算法对北京市四大功能区的工业能源碳排放变化情况进行测算。

$$CO_2 = \sum B_i * T_i \quad (1)$$

其中, CO_2 表示工业能源碳排放量总量, B_i 为第 i 种工业能源的标准煤使用量, T 为其对应标准煤的碳排放系数(如表 1 所示)。

时空分析模型可以用来分析具有时间属性并在三维空间中具有绝对位置和相对位置的数据。

本文将测算出的工业能源碳排放数据带入时空分析模型, 并对结果进行分析, 在地理信息系统(GIS)中进行可视化。

(二) 北京四大功能区工业能源碳排放影响因素模型

本文依据因素分解法思想, 根据 Dietz 等(1994)提出的模型进行改进。标准形式如下:

$$I_i = aP_i^b A_i^c T_i^d e_i \quad (2)$$

等号两边取对数得到:

$$\ln I_i = a + b(\ln P_i) + c(\ln A_i) + d(\ln T_i) + \ln e_i \quad (3)$$

基于此, 对工业影响因素进行如下分解:

$$\ln CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 \ln P_{it} + \beta_2 \ln Ure_{it} + \beta_3 \ln Lap_{it} + \beta_4 \ln EnE_{it} + \beta_5 \ln CO_{2lit} + \beta_6 \ln Ind_{it} + u_{it} \quad (4)$$

其中, CO_2 为工业碳排放量, P 为地区人口规模, Ure 为城镇就业水平, Lap 为技术水平, EnE 为能源利用效率, CO_{2I} 为工业碳排放强度, Ind 为工业化水平。

在选取的变量中, 人口规模、城镇就业水平、工业能源利用效率、工业化水平等对工业碳排放的影响已经被广泛证明。除此之外, 本文使用城镇劳动生产率来衡量技术水平, 使用能源利用效率反映能源综合利用效率, 使用碳排放强度反映工业能源利用的碳排放效率。使用双重差分(DID)具体量化分析“非首都功能疏解”政策的影响。

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 Treat_i + \beta_2 After_t + \beta_3 Treat_i * After_t + u_{it} \quad (5)$$

其中, $Treat_i$ 对首都功能拓展区取 1, 对城市发展新区和生态涵养发展区取 0。 $After_t$ 对 2015—2018 年取 1, 对 2008—2014 年取 0。交叉项 $Treat_i * After_t$ 的系数即为“非首都功能疏解”政策对北京市工业能源碳排放的冲击效应。

表 1 主要燃料碳排放转换系数

燃料类型	排放系数
原煤系数 (吨 CO_2 / 吨)	0.7559
煤油系数 (吨 CO_2 / 吨)	0.5714
汽油系数 (吨 CO_2 / 吨)	0.5538
柴油系数 (吨 CO_2 / 吨)	0.5921
天然气系数 (吨 CO_2 / 万立方米)	3.2161
液化石油气系数 (吨 CO_2 / 吨)	0.5041

数据来源: IPCC, 《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》。

（三）数据来源

综合考虑数据可得性及研究价值，最终从北京市 16 个行政区中选取东城区、西城区、朝阳区、昌平区、大兴区、房山区、通州区、怀柔区、密云区、延庆区、顺义区 11 个区，以其区域统计年鉴中 2008—2018 年的分品种工业能源消费和宏观经济数据为样本，再依据北京市功能区域划分标准将 11 个城区划分为四大功能区，其中首都功能核心区包括东城区和西城区，城市功能拓展区包括朝阳区，城市发展新区包括昌平区、大兴区、房山区、顺义区和通州区，生态涵养发展区包括怀柔区、密云区和延庆区。样本区域的工业碳排放量在 2008 年占北京市工业碳排放总量的 96.1%，2017 年约占 87.6%，基本能代表北京市工业碳排放的情况。

在工业能源碳排放测算中，依据二氧化碳排放来源以及数据可获得性，选取原煤（吨）、煤油（吨）、汽油（吨）、柴油（吨）、天然气（万立方米）和液化石油气（吨）6 个指标；在工业能源碳排放驱动因素分析中，选取人口规模、城镇就业水平、技术水平、能源利用效率、碳排放强度和工业化水平 6 个自变量，因变量工业能源碳排放量由前述测算得出。

四、北京市四大功能区碳排放时空分布

（一）北京四大功能区的工业能源碳排放测算

总体而言，2008—2018 年北京四大功能区的工业能源碳排放都经历了先增后减的过程，尤其以城市发展新区变化最为明显。

表 2、图 1 显示了 2008—2018 年北京四大功能区工业能源碳排放情况。从表 2 可知，北京四大

表 2 2008—2018 年北京四大功能区工业能源碳排放表 (单位：万吨)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
首都功能核心区	4.53	4.83	25.04	25.11	23.32	21.35	20.28	18.53	20.84	19.95	17.81
城市功能拓展区	376.28	388.56	398.15	405.05	409.26	378.17	350.97	299.05	272.34	193.15	227.64
城市发展新区	318.02	302.66	303.89	294.08	276.10	265.09	233.59	221.14	179.98	138.10	109.64
生态涵养发展区	60.68	64.67	67.38	52.18	53.36	50.34	47.94	35.96	36.86	29.55	18.97

数据来源：模型构建，北京市各区统计年鉴。

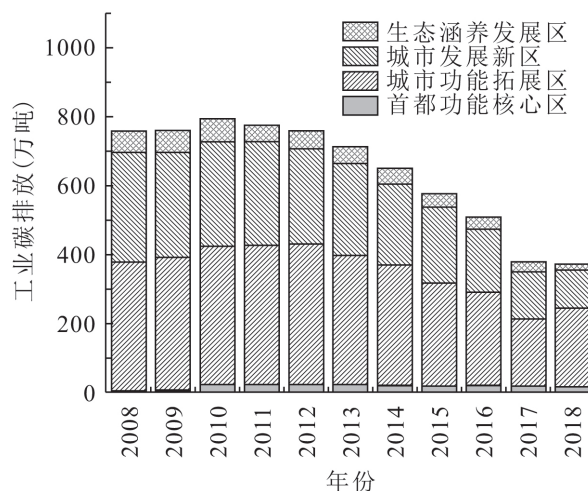


图 1 2008—2018 年北京四大功能区工业能源碳排放图

数据来源：模型构建，北京市各区统计年鉴。

功能区碳排放的总量从高到低依次为: 城市功能拓展区、城市发展新区、生态涵养发展区、首都功能核心区。其中, 在 2008—2010 年, 各地区碳排放总量不断增加; 从 2011 年开始, 各区碳排放强度不断减弱, 特别是 2013 年起, 减排幅度较前两年更明显。从减排效果来看, 城市功能拓展区和城市发展新区的降低幅度最大。但在 2016 年, 首都功能核心区却出现了不降反增的情况。分析各区能源使用情况发现, 从 2010 年起, 北京市推广天然气使用, 天然气消费量大大增加。尽管天然气相较煤炭是一种清洁的化石能源, 但前者的单位碳排放系数却是后者的四倍。

在地图中对其进行时空演化, 形成 GIS 时空分布。根据数据结果, 本文选取两个关键时间节点 (2010 年北京工业能源碳排放最高点和 2018 年最新数据) 显示其空间分布变化 (如图 2 所示)。

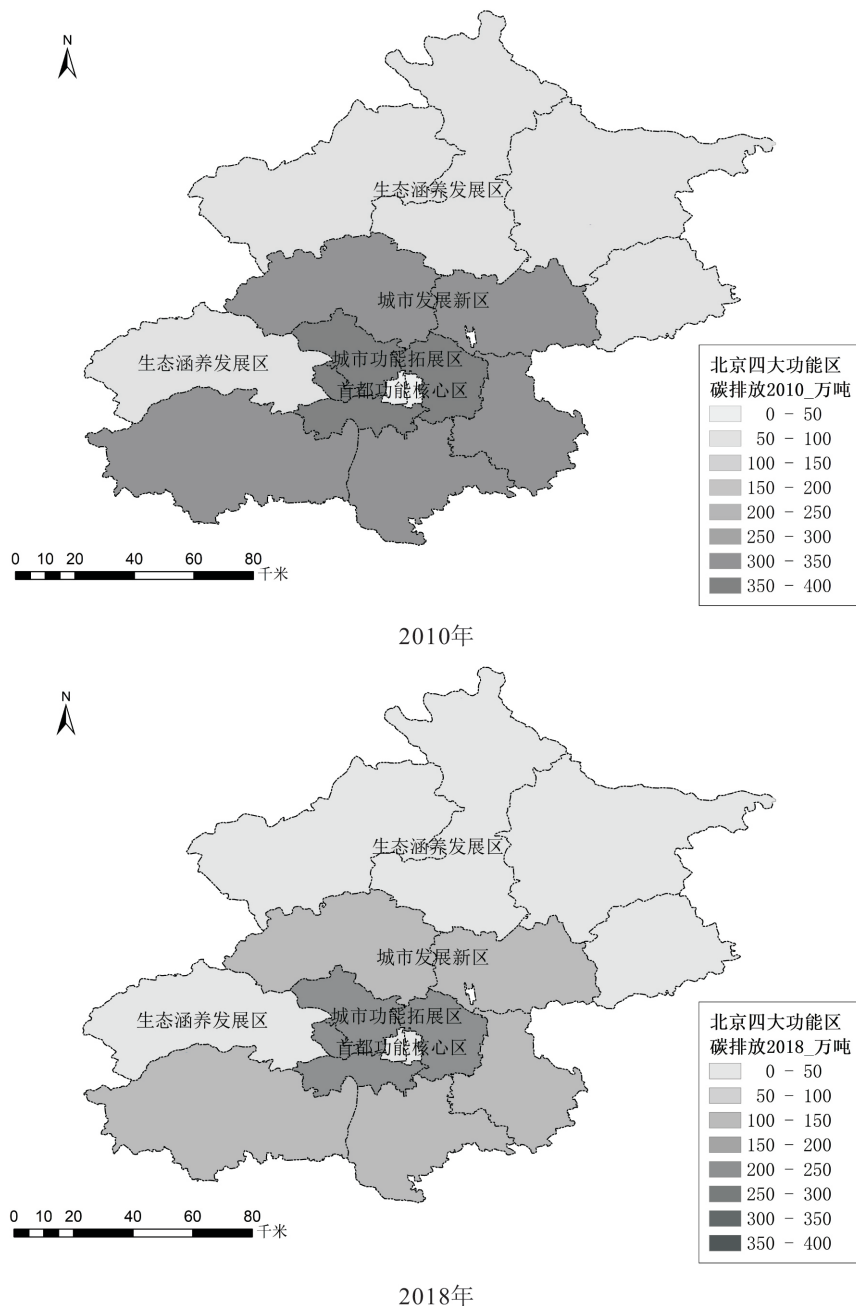


图2 2010年、2018年北京各区工业能源碳排放分布图

数据来源: 模型构建, 北京市各区统计年鉴。

可以看出,北京各区工业能源碳排放呈现北高南低、西高东低的趋势,客观反映了北京工业发展的现实情况。首都功能核心区和城市发展新区碳排放减弱强度明显,原因可能在于该区域内高污染、高耗能企业较少,多为住宅区与商业区,疏解政策落实迅速、效果显著。城市功能拓展区碳排放仍然保持增长,可能是由于该区域工厂集中,关停或转移企业后的就业与用地解决问题较为复杂,疏解政策落实缓慢,具有滞后性,碳排放保持增长。生态涵养发展区碳排放较为稳定,可能是由于该区域在疏解政策实施前碳排放量较少、碳排放水平较低,政策实施后碳排放有下降但并不明显。

(二) 北京四大功能区工业能源碳排放关键影响变量测算

为了进一步分析影响政策执行效果的关键变量,进行建模测算。为降低模型的不确定性,本文构建了五类模型,分别对北京市 11 个区的工业能源碳排放面板数据进行回归,结果如表 3 所示。

表 3 工业碳排放面板数据回归结果

变量	模型 1 11 个区	模型 2 首都功能核心区	模型 3 城市功能拓展区	模型 4 城市发展新区	模型 5 生态涵养发展区
常数项	1.4535*	1.6126*	3.0876*	1.3798**	-0.8452*
地区人口规模	0.6215*	0.5970*	0.1115*	0.7745*	0.9430*
城镇就业水平	0.3350*	0.6731*	0.0695	0.2021*	0.1972**
城镇劳动生产率	0.6222*	1.0905*	1.1383*	0.4201*	0.8306*
能源利用效率	-0.6505*	-0.9716*	-0.7733*	-0.8053*	-0.7559*
工业碳排放强度	0.9487*	1.0176*	0.9954*	0.9379*	0.9691*
工业化水平	-0.0924**	0.0624**	-0.0151	-0.2375**	-0.0271**
R ²	0.9806	0.9997	0.9974	0.9853	0.9866

注: * 和 ** 分别表示在 1% 和 10% 的水平上显著,拓展首都功能区包括首都功能核心区和城市功能拓展区。

五个模型中,全部六个自变量都通过了显著性检验。模型 1 中,能源利用效率和工业化水平的系数为负,表明其增加将降低工业碳排放,特别是通过改造工厂设备、提升工业生产效率,可以减少碳排放。北京市工业碳排放的主要驱动因素是工业碳排放强度、城镇劳动生产率、地区人口规模、城镇就业水平。现阶段各区的高人口密度、高就业密度在一定程度上仍然给深度碳减排造成较大压力。常住人口的增长将产生更多能源消费,导致碳排放增加;而城镇劳动生产率已经较高,持续增长将以增加碳排放为代价;城镇就业水平的提高仍将带来碳排放的增加。

在模型 2 和模型 3 中,首都功能核心区和城市功能拓展区主要碳排放驱动因素为工业碳排放强度和城镇劳动生产率,其次为城镇就业水平及人口规模,这四个变量水平的提高均会引起工业碳排放的增加。一种可能的解释是,首都功能核心区经济发展起步较早,发展速度较快,人口增长与城镇化水平已形成一定规模,在此情况下,工业碳排放强度对工业碳排放影响相较其他模型较大。模型 2 中,城镇工业化的系数为正值,而在其他模型中为负值,原因可能是首都功能核心区的环境治理力度较大,工业转型升级更加快速和完备,不断外迁耗能产业,使其工业发展的环境更加有限。

模型 4 中,城市发展新区的主要碳排放驱动因素为工业碳排放强度和地区人口规模,其次为城镇劳动生产率和城镇就业水平,这四个变量水平的提高均引起工业碳排放的增加。新区的经济发展

潜力较大, 城镇就业率以及城镇劳动生产率的增长是经济发展的主要动力, 同时也会带动工业碳排放的显著增长, 这符合城市发展新区的发展规律。模型 5 中, 生态涵养发展区的主要碳排放驱动因素为城镇劳动生产率和城镇就业水平, 其次为工业碳排放强度和地区人口规模, 这四个变量水平的提高均引起工业碳排放的增加。这说明生态涵养发展区的工业碳排放受到人口、碳排放强度、经济增长等多方面因素的影响。

本文对回归结果进行协整检验, 结果显示: 协整检验的 p 值小于 1%, 说明可以拒绝不存在协整关系的原假设, 直接使用经典线性回归且避免伪回归问题 (如表 4 所示)。分别对被解释变量 LnCO_2 、6 个解释变量 LnP 、 LnUre 、 LnLap 、 LnEnE 、 LnCO_{21} 以及 LnInd 进行格兰杰因果关系检验 (如表 5 所示)。从表 5 的结果看, 在 5% 的显著性水平下, 可以推断出: 除城镇就业水平外, 地区人口规模、城镇劳动生产率、工业碳排放强度、能源利用效率以及工业化水平均是工业能源碳排放量的格兰杰原因。

表 4 协整检验结果

协整检验类型	协整检验 t 统计量	协整检验 P 值
Modified Dickey-Fuller	-3.0410	0.0012
Dickey-Fuller	-3.9327	0.0000
Augmented Dickey-Fuller	-3.1394	0.0008
Unadjusted Modified Dickey-Fuller	-3.3811	0.0004
Unadjusted Dickey-Fuller	-4.0497	0.0000

表 5 格兰杰因果关系检验结果

因果方向	Z-bar 统计量	检验 P 值
$\text{LnP} \rightarrow \text{LnCO}_2$	6.6702	0.0000
$\text{LnUre} \rightarrow \text{LnCO}_2$	0.5097	0.6102
$\text{LnLap} \rightarrow \text{LnCO}_2$	6.0874	0.0000
$\text{LnEnE} \rightarrow \text{LnCO}_2$	3.8864	0.0001
$\text{LnCO}_{21} \rightarrow \text{LnCO}_2$	3.3808	0.0008
$\text{LnInd} \rightarrow \text{LnCO}_2$	6.9613	0.0000

五、北京市四大功能区的区域异质性与综合影响评测

北京市四大功能区存在显著的异质性和发展模式差异。城市功能拓展区是北京市最大人口规模区域与老工业集中区, 近年来高新技术与科教产业发展迅速。由于老工业区的存在, 该区域以优化区内产业结构、推动高新技术产业发展、促进科学教育进步为目标, 实现老城区与新区的融合。城市发展新区是新开发区, 集中了北京市现代制造业与现代农业。该区域占地面积较大, 承载着人口迁移与疏散的重要任务, 以建设完善的公共基础设施与生活生产服务体系为目标, 打造功能一体化的现代化城市新区域。生态涵养发展区是北京市生态资源重点保护区域, 占地面积最广, 绿地覆盖率最高, 以推动城乡一体化和促进第三产业发展为目标, 协调生态环境保护与经济发展, 为首都生态环境优化提供保障。

本文以 2015 年为“非首都功能疏解”政策的实施起始年份, 以首都功能拓展区 (包含首都功能核心区和城市功能拓展区) 为“非首都功能疏解”政策的实施对象, 进行 DID 回归, 分析其对北京市工业能源碳排放的冲击效应。

从表 6 可以得出以下结论: “非首都功能

表 6 双重差分结果

变量	回归系数	t 统计量	检验 P 值
常数项	42.6781	3.64	0.000
$Treat_i$	92.1261	4.11	0.000
$After_i$	-18.6098	-0.96	0.340
$Treat_i * After_i$	-27.0858	-2.51	0.014

疏解”政策对首都功能拓展区的工业能源碳排放造成了约 27.09 万吨 CO_2 的负面冲击。这说明实施“非首都功能疏解”政策的首都功能拓展区相比较不实施“非首都功能疏解”政策的城市发展新区以及生态涵养发展区,在平行发展趋势的假定条件下,其工业能源碳排放平均减少了 27.09 万吨 CO_2 。这是基于“非首都功能疏解”政策实施的具体量化效果,印证了“非首都功能疏解”政策对减少实施区域的工业能源碳排放具有显著的作用。

(一) 各区域历史能源结构异质性与影响评估

为判断能源利用效率对工业碳排放的影响,我们将能源利用效率对四个功能区及全市分组进行回归检验。如表 3 所示,在上述五个模型中,交互项的系数均在 1% 的水平上显著,说明能源利用效率提高会降低工业碳排放水平。由实际统计数据可知,北京市外调电力始终处于能源消费第一位,且作为清洁能源不断增长。自 2015 年起,天然气成为北京市能源消费主力,煤炭在 2016 年降为主力能源第六位,在能源消费比重中已不足 10%,未来北京能源消费和能源结构会更趋于清洁高效。

近年来,北京市积极推进“煤改气”、“煤改电”、散煤治理、燃煤替代等工程,不断削减燃煤总量,坚持能源清洁化战略,努力构建以电力和天然气为主、地热能和太阳能等为辅的清洁能源体系。首都功能核心区和城市功能拓展区要实现全区无煤化,城市发展新区和生态涵养发展区要实现燃煤减量化,对于难以通气通电的乡村地区,部分区县也开展了优质燃煤替代全覆盖工程。

在城市功能拓展区的朝阳区,“无煤化”政策使得原煤使用量和碳排放量自 2012 年后逐年递减,原煤使用量自 2015 年后少于碳排放量,且减少趋势逐渐扩大,表明碳排放源结构由于“无煤化”措施及工厂外迁、设备升级等有所调整,煤炭所贡献的碳排放量逐渐减少。在城市发展新区,“煤改电”政策直接带来了农村居民生产生活的“无煤化”。农村地区上游原材料生产部分的煤炭使用直接被降为零,而下游的加工制造业与上游密切相关,一旦上游开始向清洁电力能源转型,考虑到“煤改电”的规模效应和政策导向,会带来全部工业部门的电力化大生产,从而提高能源利用效率,降低工业碳排放强度,进而引起整个城市发展新区工业碳排放水平的降低。

(二) 各区域高耗能工业布局差异与综合影响评估

高耗能工业的向外转移将推动城市空间格局的改变,城市核心区域产业结构发生调整,以制造业为主的第二产业逐渐郊区化,为金融、贸易、服务业为主的第三产业腾出空间。一方面,伴随着工业郊区化的是人口外迁,传统制造业就业人员随着工业外迁而向外扩散,郊区人口集聚形成新的住宅区与商业区。另一方面,城市中心新产业的崛起将吸引高效人才资本流入,为产业发展提供动力支持。但新产业的发展速度较工业外迁速度相对缓慢,短期内反映为城区内人口增长速度下降,人口向外扩散,城区内就业水平增长速度下降,高耗能工业外迁地区就业水平快速上升,生产率快速提高。因此,工业布局一定程度上影响人口集聚规模,进而影响城镇就业水平,而人口的集聚会产生碳排放,提高碳排放水平。

本文选取城镇就业水平和城镇劳动生产率分别对四个功能区及全市分组进行回归检验。如表 3 所示,在上述五个模型中,交互项的系数均在 1% 的水平上显著,说明城镇就业水平和城镇劳动生产率提升反映了人口规模的扩张和工业集聚,进而增大工业碳排放。

目前,北京全市严禁发展一般性制造业,推动传统产业转型升级。首都功能核心区全部腾退污染企业,城市功能拓展区园区转型,城市发展新区鼓励工厂外迁,生态涵养发展区未来的发展方向

也是禁止新建扩建制造业企业, 带动就业人口转移, 减少城市碳排放。尽管已实施以上政策, 但从各区工业总产值变动来看, 2015 年受到政策冲击最严重的生态涵养发展区工业总产值年增速为 -12.65%, 其次为城市功能拓展区 (-7.04%) 和城市发展新区 (-6.96%)。意外的是, 强调所有制造业、工厂、低端市场全部腾退的首都功能核心区似乎并未受到政策冲击, 仍维持在 12.66% 的增速幅度, 是四大功能区里唯一保持正向增长的功能区 (如图 3 所示)。一个可能的解释是, 首都功能核心区多数规模以上企业仅参与产品设计环节而不处于生产制造环节, 实际因企业强制迁出而降低的工业总产值少于其他各区。在首都功能核心区, 得益于能源设备改造升级, 能源使用效率不断提升, 碳排放强度不断减弱, 而工业化水平的波动较大, 工业增加值占 GDP 比重阶段性增长; 但 2015 年后急剧下降, 基本符合该区域第三产业尤其金融业快速兴起的情况, 疏解非首都功能效果显著。

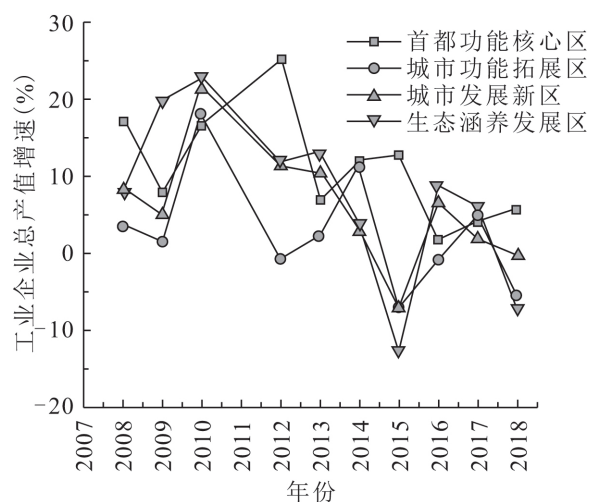


图 3 2007—2018 年北京市各功能区规模以上工业企业总产值增速图

数据来源: 北京市统计局。

(三) 各区域人口分布异质性与综合影响评估

为判断人口管控政策对工业碳排放的影响, 将地区人口规模分别对四个功能区及全市分组进行回归检验。如表 3 所示, 在上述五个模型中, 交互项的系数均在 1% 的水平上显著, 说明地区人口规模扩大会提高地区工业碳排放水平。但分别从各区来看, 若增加同等人口规模, 在城市发展新区新增人口数量对碳排放的增加最小, 而在生态涵养发展区最大。一个可能的解释是, 城市发展新区目前的规划设计需要更多的人口红利以支持其发展, 而生态涵养发展区的产业、交通等各方面还无法容纳更多人口, 导致其增加人口的碳排放成本甚至高于首都功能核心区和城市功能拓展区。

自 2010 年起, 北京实施严格的人口管控政策。根据《北京城市总体规划 (2016 年—2035 年)》, 北京市发改委明确人口总量上限为 2300 万人。其中, 首都功能核心区和城市功能拓展区的常住人口在 2014 年的基础上每年降低 2~3 个百分点; 城市发展新区和生态涵养发展区平原地区的人口规模有减有增、增减挂钩, 山区保持人口规模基本稳定, 农村人口城镇化进程加快; 首都功能核心区和城市功能拓展区的人口规模减量与其他区人口规模增量控制相衔接。

如图 4 所示, 首都功能核心区和城市功能拓展区分别在 2015 年与 2016 年后呈现负增长态势,

其中，首都功能核心区的波动较小，近年来人口发展已趋饱和，而城市功能拓展区的人口增长具有较大弹性，城市发展新区的波动同样起伏，但一直处于增长态势，与负增长的两个区呈现对称分布。北京市各区人口由核心区和拓展区进一步向外分摊到发展区和涵养区。

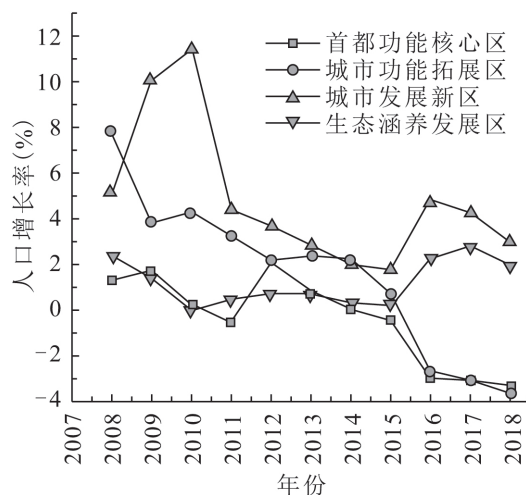


图4 2007—2018年北京各功能区人口增长率

数据来源：北京市统计局。

（四）各区域的碳减排市场化进程差异与影响评估

如图5所示，近十年来，北京市碳排放政策可分为三个阶段。

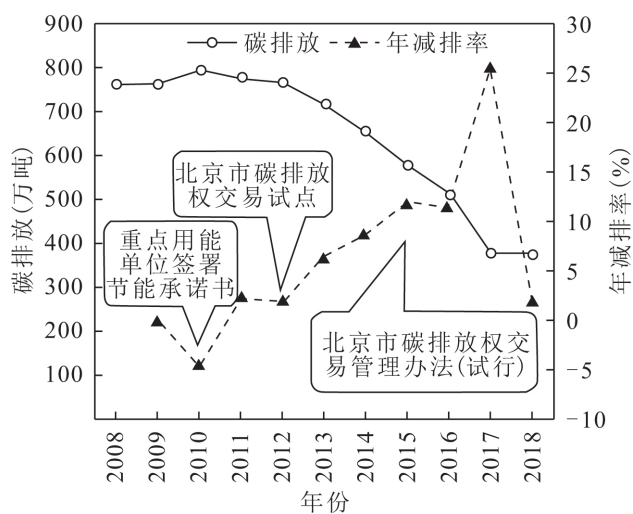


图5 2008—2018年北京市工业能源碳排放与减排率趋势图

数据来源：北京市统计局，模型构建。

第一阶段，节能任务书承诺阶段（2008—2011年）。在这一阶段，北京市对工业企业的碳排放管理方式是要求全市重点用能单位签署节能承诺书，重点用能单位根据配额，在承诺期内自行施行节能技术改革项目或加强生产管理完成节能任务。从激励角度来看，分配的配额难以调动企业的减

排积极性, 超出配额的部分企业并没有主动消除意愿。同时参与企业只有 40 家, 分配减排量少, 难以起到真正的减排促进作用。执行效果方面, 年减排率在 -0.44% 、 -2.85% 、 1.94% 、 1.21% 正负间徘徊, 总体减排效果不明显。

第二阶段, 碳排放交易试点阶段 (2012—2013 年)。2012 年, 北京市碳排放权交易试点正式启动, 实行重点排放二氧化碳排放权配额制度。交易范围从 40 家重点用能单位扩大到所有辖区内排放企业, 鼓励非强制市场参与者进行交易。从减排量看, 由政府分配转向市场配额交易, 对容易提高减排节能技术的企业具有比较优势; 而难以提升减排技术的企业则提高了生产成本, 倾向于加强生产节能管理, 一定程度上提高了工业生产效率。从执行效果看, 年减排率为 6.71% 和 10.22% , 相较于前一阶段逐年大幅度上升。

第三阶段, 碳排放正式交易阶段 (2014 年至今)。2014 年, 北京市政府正式印发《北京市碳排放权交易管理办法 (试行)》, 碳排放交易市场正式向所有交易主体开放, 这一阶段的减排率相较于前一阶段处于高位。

(五) 北京市四大功能区的异质性与碳减排综合影响讨论

整体而言, (1) 地区工业碳排放强度对碳排放的影响最为强烈, 因此, 提升工业效率、降低单位二氧化碳排放成本是政策的重中之重。(2) 城镇劳动生产率是影响碳排放的重要因素, 特别是在首都功能核心区和生态涵养发展区, 位居这两区影响因素之首, 且产生的人均经济收益越高, 碳排放越高。(3) 城镇就业水平与劳动生产率处在同等重要的位置, 但各区中因素的影响由外到内依次削弱。这意味着对于生态涵养发展区, 高就业率能提升人民生活水平, 对应碳排放量显著增加; 但首都功能核心区就业率对碳排放的影响仅为生态涵养发展区的一半。就碳排放的削减而言, 首都功能核心区就业率的提高对碳排放的边际贡献较弱。(4) 能源利用效率对各区均呈现负相关影响, 即单位能源能实现的经济产出越高, 碳排放越低, 符合经济价值越高的能源碳排放越低的现实情况。(5) 地区人口规模在各区中的影响总体较弱, 但各区略有不同。首都功能核心区和城市功能拓展区的影响较为一致。从城市化发展的角度看, 两区均是北京的核心地段, 越大的人口规模会带来一定程度的碳排放增加。城市发展新区人口聚集的边际效应递减为核心两区的一半; 但生态涵养发展区的边际效应为核心区的 150% 。一种可能的解释是, 生态涵养发展区的城市化水平不高, 一旦大规模人口涌入进行开发能带来更大的后发增长优势。(6) 工业化水平在各区的影响均处于最弱。但首都功能拓展区和城市发展新区却出现了工业化水平越高、碳排放水平越低的现象。一种可能的解释是, 上述两区的可利用工业资源尚未饱和, 提升其工业化占比更有利于集中生产、增加能源利用效率。

碳排放政策重点关注因素是工业碳排放强度, 尤其是如何降低单位能耗中的碳排放水平。一方面, 从技术角度, 国家出台政策, 鼓励科技创新, 进行技术攻关; 另一方面, 利用碳交易等政策调动企业碳排放管理积极性, 也能带来直接明显的效果。从能源利用效率的角度看, 能源利用的经济价值效果越高, 碳排放越低。从能源本身的价格来看, 尽管清洁能源相比传统化石能源略显昂贵, 但对碳减排的贡献也是较为明显的。目前北京市已改变原有的以煤为主的能源格局, 随着清洁能源占比的不断提高, 碳减排的效果也会更加明显。从各因素影响的排序来看, 人口规模对碳排放的贡献在六种因素中仅位列第五, 与现实中人口政策限制的执行力度有所不同。从碳排放角度来看, 对城市发展新区的人口增长空间设置应更宽松, 而对生态涵养发展区的人口上限把控应更严格。工业

化水平对碳排放的贡献位居末位，这也与现实中的各大工业企业的对外疏解政策略有差异，且各区效果不一。首都功能核心区和生态涵养发展区应降低工业化水平，向外疏解工业企业；城市功能拓展区和城市发展新区可承接疏解企业，提高自身工业化水平的同时也能降低碳排放。

综上，首都功能核心区和城市功能拓展区仍需加强工业管理并提升城镇劳动生产率；城市发展新区需要关注工业能源使用情况并提升城镇就业水平；生态涵养发展区的城镇劳动生产率和城镇就业水平的提高对降低碳排放的影响更为显著。

六、主要结论与政策建议

本文围绕北京市非首都功能疏解这一规划性行政措施展开，测算了北京四大功能区的碳排放，直观给出各区域碳排放的时空分布，结果显示，该政策在各功能区域的实际推行效果显著。本文还评估了各区的异质性以及主要因素对政策的影响，为政策的进一步有效推行提供了区域层面的具体参考。

研究结果显示：四大功能区中，城市功能拓展区和城市发展新区的工业能源碳排放较高，生态涵养发展区和首都功能核心区碳排放较低。在疏解非首都功能工作及相关配套措施落实前，即2015年以前，各区域工业能源碳排放量持续上升，尤其在2008—2010年期间，碳排放快速增长；在该政策实施后，各区工业能源碳排放开始呈降低趋势。疏解非首都功能及促进京津冀区域一体化发展等政策对加快各区工业能源碳减排起到了不可忽视的积极作用。

此外，从总体上看，北京市工业碳排放的影响驱动因素由高到低依次是工业碳排放强度、能源利用效率、劳动生产率、人口规模、就业水平和工业化水平，表明工业企业技术水平和能源合理利用极大地促进了碳减排，符合疏散非首都功能政策目标与城市发展方向。

本文研究结果对于北京市整体和区域的非首都功能疏解政策的制定有参考意义。从政策内容方面来看，具体到各功能区，首都功能核心区和城市功能拓展区主要碳排放驱动因素为工业碳排放强度和城镇劳动生产率，因此，两区应加强锅炉低氮改造和“无煤化”措施执行力度，持续减少碳排放产生的污染，并加强企业生产设备创新与技术革新。城市发展新区的主要碳排放驱动因素为工业碳排放强度和地区人口规模，因此，应注重对传统工业园区的升级转型，提高腾退空地利用率。生态涵养发展区的主要碳排放驱动因素是城镇劳动生产率和城镇就业水平，因此，应多加关注生态保护和绿色新园区建设，因地制宜促进休闲产业发展，增加绿色产业就业岗位，提高就业水平。

从政策效果的视角来看，碳排放交易政策实施后，二氧化碳年减排率从个位数骤增到30.84%，碳排放交易市场对节能减排具有重要意义。北京市腾退一般制造业政策实施对各区工业总产值的影响呈现出从外到内依次递减的情况。对比来看，越靠近核心城区的企业，布局产品设计工业而非生产制造工业的可能性越大。四大功能区在碳排放的空间分布和影响因素方面呈现异质性特点，因此，应在统筹疏解工作的同时，因地制宜，精准定位。

非首都功能疏解也面临着一系列的可能问题。当前北京决心仅仅保留和发展高精尖产业，而一般性生产制造的环节则要转移到津冀承接地区完成。一方面，对企业一刀切式的关停将大幅提高企业经营成本；另一方面，对关停企业园区腾退出的空间如何合理利用而不造成土地资源浪费，也是后续需要关注的问题。政府既要充分重视城市规划政策对于碳减排和区域环境治理的影响，又要统

筹考虑区域城市功能、产业布局、人口结构等因素,实现区域协同发展。

参考文献

- [1] 李继峰,顾阿伦,张成龙,等.“十四五”中国分省经济发展、能源需求与碳排放展望——基于 CMRCGE 模型的分析[J]. 气候变化研究进展,2019(6).
- [2] 钟良,王红梅,刘之琳.北京碳排放尽早达峰及未来路径研究[J]. 中国能源,2019(11).
- [3] Wittmayer,J.,C. Roorda,F. Van Steenberg, *Governing Urban Sustainability Transitions—Inspiring Examples*[R]. Mountain View,2014.
- [4] 王飞,石晓冬,郑皓,等.回答一个核心问题,把握十个关系——《北京城市总体规划(2016 年—2035 年)》的转型探索[J]. 城市规划,2017(11).
- [5] Shao,L.,Z. Geng,X. F. Wu,et al. Changes and driving forces of urban consumption-based carbon emissions: A case study of Shanghai[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020(118774).
- [6] Wang,W. X.,W. J. Wang,P. Xie,et al. Spatial and temporal disparities of carbon emissions and interregional carbon compensation in major function-oriented zones: A case study of Guangdong province[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020(118873).
- [7] Su,K.,D. Wei,W. Lin. Influencing factors and spatial patterns of energy-related carbon emissions at the city-scale in Fujian province,Southeastern China[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020(118840).
- [8] Zhu,B.,H. Shan. Impacts of industrial structures reconstructing on carbon emission and energy consumption: A case of Beijing[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020(118916).
- [9] Jia,J.,H. Jian,D. Xie,et al. Multi-scale decomposition of energy-related industrial carbon emission by an extended logarithmic mean Divisia index: A case study of Jiangxi,China[J]. *Energy Efficiency*,2019(8).
- [10] 张武林,王平,魏向杰,等.经济高质量增长与碳减排的协同发展分析:以广西为例[J]. 阅江学刊,2019(6).
- [11] Wang,W.,Y. Li,N. Lu,et al. Does increasing carbon emissions lead to accelerated eco-innovation? Empirical evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020(119690).
- [12] 涂正革,韩生贵.碳减排与西部地区经济的可持续发展——基于五大生产部门 CO₂ 排放量的指数分解分析[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版),2014(1).
- [13] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学,2019(12).
- [14] Qi,W.,G. Li. Residential carbon emission embedded in China’s inter-provincial population migration[J]. *Energy Policy*,2020(111065).
- [15] 赵先贵,马彩虹,肖玲,等.北京市碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. 干旱区资源与环境,2013(10).
- [16] 周国富,宫丽丽.京津冀能源消耗的碳足迹及其影响因素分析[J]. 经济问题,2014(8).
- [17] 林寿富,王善勇,D. Marinova,等. STIRPAT 模型的改进及其应用[J]. 统计与决策,2018(16).
- [18] 丁唯佳,吴先华,孙宁,等.基于 STIRPAT 模型的我国制造业碳排放影响因素研究[J]. 数理统计与管理,2012(3).
- [19] Wang,G.,Q. Han,B. De Vries. A geographic carbon emission estimating framework on the city scale[J]. *Journal of Cleaner Production*,2020(118793).

Study on the Spatiotemporal Evolution of Carbon Emissions and the Regional Heterogeneity Influences of the Four Functional Areas under Beijing Non-capital Functions Relocation Policy

YANG Xi, MENG Chun-yu, LIN Jing-li, WANG Jia-hao

Abstract: This paper focuses on Beijing's non-capital function relocation policy, which has drawn much attention in recent years, and analyzes the temporal and spatial impact of the administrative policy on space carbon emissions and the development of various regions in Beijing. The study selects the industrial energy carbon emissions (IECE) of the four major functional areas in Beijing as sample, and proposes specific policies for the differentiated development of the regions during the "14th Five-Year Plan", based on the heterogeneity of each functional area and its comprehensive impact on carbon emission. The paper analyzes the critical factors of IECE to assess the impact of capital city planning policies on CO₂ emissions and space-time environment. The results show that, first, from the spatial perspective, as for the IECE, the urban function expansion (UFE) zone ranks first, followed by the urban development pilot (UDP) zone, the ecological conservation development (ECD) zone, and the core capital function (CCF) zone. Second, the overall IECE of the four zones kept increasing from 2008 to 2010, and remained basically at the same level from 2010 to 2012. Since 2013, the IECE of each function zone kept decreasing. Besides, UDP zone's carbon emission has been reduced the most, with an average annual decrease of 21.76%. However, in 2016, the emission in CCF zone kept increasing, with a 15.59% increasing rate. Furthermore, based on the comprehensive impact assessment of regional heterogeneity, the CCF zone and the UEF zone still need to strengthen their industrial management and improve the urban labor productivity. The UDP zone needs to pay more attention to the industrial energy use and improve its urban employment. The increase of urban labor productivity and urban employment in ecological conservation development zone has a more significant impact on reducing IECE. The industrial environment management of the UFD zone and UDP zone has entered a complete stage. The paper gives specific analysis and policy recommendations at various regional levels in Beijing area, in combination with regional policies, aiming to provide a regional level reference for differentiated development for the capital city planning policies and regional low-carbon development policies during the "14th Five-Year Plan" period.

Key words: non-capital functions relocation policy; major functional zones; carbon emissions; regional heterogeneity

(责任编辑 朱 蓓)