

面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法研究——以黑龙江省哈尔滨市为例

Study on Carbon Accounting Methods in Urban Built-up Areas Using Spatial Activity Data: A Case Study of Harbin, Heilongjiang Province

冷红 肇禹然 袁青 LENG Hong, ZHAO Yuran, YUAN Qing

摘要 气候变化是全世界正在面对的重大威胁,实现碳达峰、碳中和目标已成为中国重要的城市发展战略。碳核算是监测城市碳排放情况,调控低碳城市建设的重要技术手段。以城市建成区为碳核算范围,并将城市碳核算方法与城市空间要素相衔接,这对于实现城市“双碳”目标发展具有极强的现实意义。以黑龙江省哈尔滨市为研究对象,总结分析其15年间的能源活动数据与空间使用活动数据,构建城市建成区碳核算体系与面向城市空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法,并将核算结果与能源使用碳核算结果进行对比,验证核算方法的准确性。在此基础上,提出构建城市碳中和路径预测、开展低碳城市建设专项评估等碳核算方法应用路径,为国土空间规划助力“双碳”目标的实施提供技术支撑。

Abstract As climate change emerges as a significant global threat, achieving the goal of carbon peak and carbon neutrality has become a crucial strategy for urban development in China. Carbon accounting serves as a vital technical tool for monitoring urban carbon emissions and regulating low-carbon urban construction. Focusing on the urban built-up area, this study integrates urban carbon accounting methods with urban spatial elements, holding great practical significance for realizing the development goals of "dual carbon" cities. Taking Harbin City, Heilongjiang Province, as the research object, this paper summarizes and analyzes fifteen years of energy activity data and spatial usage activity data to establish an urban built-up area carbon accounting system. Furthermore, it develops a method for urban built-up area carbon accounting based on urban spatial usage activities and compares the accounting results with those of energy usage carbon accounting to validate the accuracy of the accounting method. Based on these findings, pathways for urban carbon neutrality prediction and specialized assessments for low-carbon urban construction are proposed, providing technical support for the implementation of the "dual carbon" goals in national territory spatial planning.

关键词 碳达峰碳中和;建成区;空间使用活动数据;碳核算;应用路径

Key words carbon peak and carbon neutrality; built-up area; spatial usage activity data; carbon accounting; application pathways

文章编号 1673-8985 (2024) 04-0009-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240402

作者简介

冷红

哈尔滨工业大学建筑与设计学院

自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复

重点实验室

博士,教授,博士生导师, hitlaura@126.com

肇禹然

哈尔滨工业大学建筑与设计学院

自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复

重点实验室 博士研究生

袁青

哈尔滨工业大学建筑与设计学院

自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复

重点实验室 博士,教授,博士生导师

0 引言

为有效应对气候变化为全球带来的风险,中国在第七十五届联合国大会上正式提出“2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和”的庄严承诺。城市作为人类生产生活的聚集地,是高能耗高碳排放的主要场所,其温室气

体排放量占全球80%以上^[1-2]。已有研究表明,城市空间要素的合理布局与高效统筹是降低区域碳排放的有效方法^[3-4]。因此,建立低碳可持续发展的城市发展路径是实现“双碳”目标的重要技术方法。

随着我国国土空间规划的全面实施,助力“双碳”目标、实现城市低碳化发展已成为城市建设的重要方向^[5-6]。目前,城市碳核算方法已成为低碳城市规划研究领域重要的技术手段^[7-9]。但受到核算方法与路径的限制,现阶段常用的碳核算方法存在与空间要素的耦合性不足、城市碳核算范围与中心城区层面国土空间总体规划范围不一致等问题。为提升城市碳核算方法对国土空间总体规划的助力与技术支持,本文依据“核算体系—基准制定—方法构建—结果核校”的技术传导路径,构建面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法,并以黑龙江省哈尔滨市为研究对象验证核算精度。在此基础上,提出这一碳核算方法在国土空间规划中的应用路径。

1 城市碳核算方法特征与问题

现阶段,城市碳核算方法主要分为以能源使用数据为依据的生产端碳核算法(PBA),以及以经济投入产出数据为依据的消费端碳核算法(CBA)^[10-12]。其中,《IPCC国家温室气体清单》作为世界气象组织(WMO)和联合国环境规划署(UNEP)共同建立的政府间气候变化专门委员会发布的生产端碳核算模型,是世界各国与城市建立温室气体排放清单过程中较为权威的方法^[13]。此方法将区域碳排放划分为能源活动、工业过程和产品使用、农林业和其他土地利用、废弃物处理4类部门,利用能源活动数据核算各部门碳排放量并逐级汇总,最终计算区域温室气体排放情况。由于其在全球范围内气候监测报告中的广泛应用,许多城市及地区均依据能源活动数据对城市碳排放量进行核算,并编制城市温室气体排放清单。城市决策者与相关研究人员可以依据核算结果,清晰判断城市中各类能源使用活动变化对于碳排放量的影响,监测城市碳排

放结构的变化情况。因此,这一方法也成为城市规划领域最为常用的城市碳核算技术^[14-16]。虽然面向能源活动数据的碳核算方法有诸多优点,但在城市空间建设与研究领域,这一核算体系与城市空间要素的耦合性不足,核算结果与空间要素的关联性较低,对国土空间规划的反馈、互动与支撑不足^[17]。

为增强碳核算结果与空间要素的相关性,探究如何构建基于城市空间要素的碳核算方法成为重要的研究方向^[18]。部分学者利用夜间灯光数据探究城市碳排放的时间演化规律与空间分布特征,初步建立了城市空间要素与碳排放的耦合性关系^[19-22]。随着城乡空间发展的减排机制相关研究逐步深入,有学者基于城乡用地分类、城市温室气体排放清单部门划分和城市空间减排路径,建立“土地利用—碳排放”关联框架,构建以用地规模为主要要素的城市碳核算方法,并先后在北京、上海等城市进行实践性研究^[23-25]。这一阶段的研究涉及的城市空间要素较为单一,主要运用各类用地规模、地均活动水平等数据,且部分关键活动数据获取难度较大。为进一步构建具有普适性的城市空间要素碳核算方法,学者们提出以国家温室气体清单框架为基础,将能源消费部门拆解,转化为承载能源消费活动的相关城市用地使用数据,并构建“空间布局—用地类型—部门划分—模型方法”的研究框架,聚焦于工业、建筑、交通、碳汇领域,依据城市空间中的活动数据建立了国土空间总体规划碳核算方法^[26]。在此基础上,有学者利用这一技术路线,面向自然资源全要素,构建市级国土空间总体规划碳评估计算框架,并以武汉市为例进行计算验证^[27]。现阶段,面向城市空间要素碳核算方法的探索已取得一定进展,但此类研究大多以市域为核算范围,反映国土空间全要素的现状碳排放情况。此方法在建设用地规模较大、建设强度较高的城市区域适用性较好,但对于农业型与矿产资源型城市的核算结果误差较大,核算结果也无法清晰反映城市的发展建设水平,对中心城区层面的国土空间总体规划的指导性较弱。

综上所述,现阶段面向能源活动数据的城市碳核算方法已取得广泛应用,但这一核算方法与空间要素的耦合性不足,核算结果对空间规划的支撑作用较弱。在城市规划领域,许多学者逐步探索城市空间要素碳核算体系,并取得一定进展。然而,目前多数研究的城市碳核算范围与中心城区层面国土空间总体规划范围不一致,导致其在部分资源型城市中的核算结果误差较大,且对于城市建设用地空间变化的指导与反馈不足。因此,建立以城市空间使用活动要素为基础,与市级国土空间规划建成区范围相匹配的城市碳核算方法尤为重要。

2 建立城市建成区碳核算体系与基准数据

为增强城市碳核算结果与中心城区层面国土空间总体规划间的适配性与支持性,应构建具有普适性的城市建成区碳核算方法。在这一过程中,需要建立适宜城市建成区范围的碳核算体系,并利用能源活动数据对案例城市建成区碳排放量进行核算,以定义基准数据,为后文中核算方法的建立奠定基础,为核算结果的验证提供标准。

2.1 建立城市建成区碳核算体系

《IPCC国家温室气体清单》作为各国温室气体排放清单编制过程中所运用的主要方法,具有较高的权威性与科学性。其作为市级及更大边界范围的碳排放核算方法,核算部门的划分具有全面性与概括性。但对于城市建成区这一较小的核算范围,这一划分方式导致能源活动和废弃物处理领域的碳核算范围包含农林业等非建成区碳排放,且部分数据获取难度较大。为此,本文以《IPCC国家温室气体清单》中所描述的碳核算方法为基础,根据城市建成区碳排放特征与研究需求,将碳排放部门重新划分,建立适用于城市建成区的碳核算体系(见图1)。由于核算范围的变化,城市建成区的碳核算体系与《IPCC国家温室气体清单》存在一定的不同。其中,

城市建成区范围内的电力碳排放被分配至各领域电力使用过程中,为避免重复计算,需要排除工矿业部门中的电力生产碳排放。除此之外,由于城市建成区中不包含农业用地,因此核算清单中不包含农业碳排放。通过核算体系的转译,将面向城市建成区的碳核算体系与《IPCC国家温室气体清单》相衔接,为

后续构建碳核算方法奠定基础。

2.2 案例城市概况

研究选取黑龙江省哈尔滨市作为案例城市,收集并整理其能源活动数据与空间使用活动数据,探究城市建成区范围内的碳核算方法。为此,本文依据统计年鉴数据与遥

感数据,提取2017—2021年哈尔滨市建成区范围,并识别其变化情况,如图2所示,其为具有代表性的年份建成区范围示意图。依据哈尔滨市统计年鉴,其市区范围涵盖九区,建成区面积逐年增长。其中,城市中心区涵盖的六区始终呈扩张趋势,尤其南、北两个区域扩张最为明显。而外围三区中,位于西南侧的双城区与东南侧的阿城区呈先收缩后增长的趋势。

2.3 基于能源活动数据制定城市建成区碳核算基准数据

为建立精准的城市建成区碳排放量核算过程基准数据,应当依托现阶段最为常用的能源活动数据,对城市建成区内各碳排放部门进行详细计算。而由于核算主体的变化,具体的核算过程同样需要进行调整。为此,本文以城市建成区核算体系为基础,利用IPCC模型对城市建成区内各领域碳排放量进行核算,进而构建面向能源活动数据的城市建成区碳核算方法(见表1)。通过此方法,可以查阅城市统计年鉴、城市能源统计年鉴等文件,获取城市建成区范围内的能源活动数据。在这一过程中,相关数据收集主要依据统计年鉴中市区范围的能源使用情况,并剔除农业活动相关数据,最终汇总为建成区能源活动数据。再根据各类能源折算标准煤参考系数表,将部分难以计算的能源消耗数据(如原煤、焦炭、汽油、柴油等)转化为标准煤消耗量。在此基础上,根据省级温室气体清单编制指南、国家温室气体清单等碳核算指南内容,获取电力、标准煤等能源活动碳排放系数,构建适宜城市建成区的碳核算方法。

根据上文中所总结的城市建成区碳核算方法,研究依据哈尔滨市2007—2021年建成区能源活动数据,对城市建成区各部门碳排放进行核算,并作为基准数据(见图3)。依据核算结果,哈尔滨市建成区的碳排放总量整体呈上升趋势。其中工矿业部门碳排放占比最高,占总量的50%以上,且呈波动式上升趋势。但随着城市发展与产业转型,其占总量比

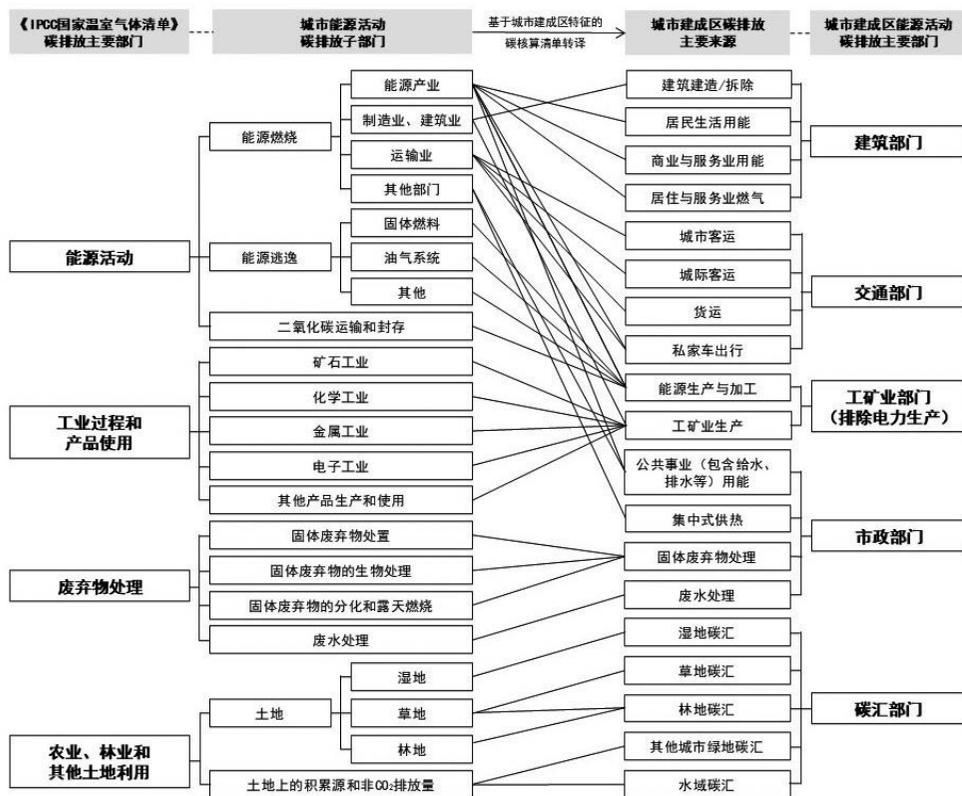


图1 城市建成区碳核算体系
Fig.1 Carbon accounting system in urban built-up areas

资料来源:笔者自绘。

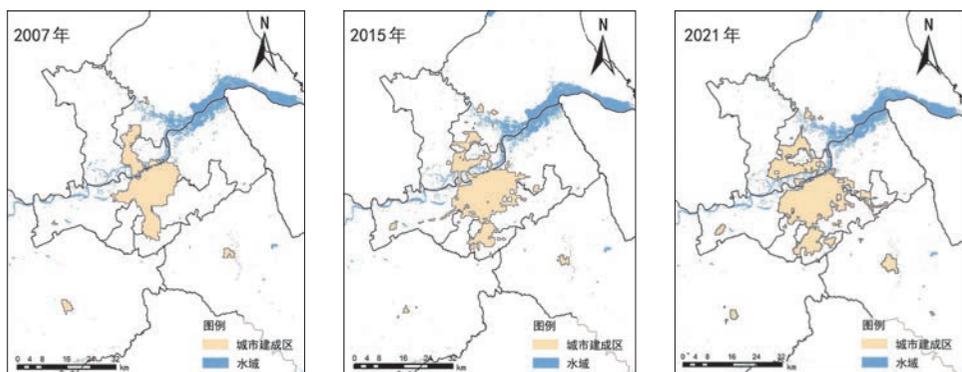


图2 哈尔滨市建成区空间变化图
Fig.2 Spatial change map of built-up areas in Harbin

资料来源:笔者自绘。

表1 面向能源活动数据的城市建成区碳核算方法

Tab.1 Carbon accounting methods for urban built-up areas based on energy activity data

部门	城市能源活动数据	碳排放计算相关数据	数据来源	计算公式
建筑部门	城市居民居住用电量、商业与服务用电量、居住与服务燃气用量、新建建筑建造过程能源消耗、老旧建筑维护能源消耗	电力碳排放系数、天然气碳排放系数、液化石油气碳排放系数、单位标准煤能源消耗碳排放系数	城市统计年鉴、城市能源统计年鉴、省级温室气体清单编制指南、国家温室气体清单指南	$C_b^c = \sum E_{electricity}^i \times f_{electricity} + \sum E_{gas}^i \times k_{gas}^{tce} \times f_{tce} + \sum E_{LPG}^i \times k_{LPG}^{tce} \times f_{tce} + (E_{tce}^{construction} + E_{tce}^{maintenance}) \times f_{tce}$
工矿业部门	除电力生产外工业生产用能(包括原煤、焦炭、天然气、汽油、原油、煤油、柴油、电力)	各类型能源折算标准煤系数、单位标准煤能源消耗碳排放系数	城市能源统计年鉴、各类能源折算标准煤参考系数表、国家温室气体清单指南	$C_i^c = \sum E_i^{industry} \times k_i^{tce} \times f_{tce}$
市政部门	公共事业用电量、生活废弃物处理量、生活污水处理量、供热蒸汽热量、供热热水热量	电力碳排放系数、单位垃圾处理用电量、单位污水处理用电量、热能折算标准煤系数、单位标准煤能源消耗碳排放系数	城市统计年鉴、城市能源统计年鉴、各类能源折算标准煤参考系数表、省级温室气体清单编制指南、国家温室气体清单指南	$C_m^c = E_{electricity}^{public\ utilities} \times f_{electricity} + (V_{waste} \times k_{waste}^{electricity} + V_{sewage} \times k_{sewage}^{electricity}) \times f_{electricity} + (V_{steam}^{central\ heating} + V_{hot\ water}^{central\ heating}) \times k_{heat}^{tce} \times f_{tce}$
交通部门	交通用电量、交通汽油量、交通柴油量、交通煤油量、交通天然气量	各类型能源折算标准煤系数、单位标准煤能源消耗碳排放系数	城市统计年鉴、城市能源统计年鉴、各类能源折算标准煤参考系数表、省级温室气体清单编制指南、国家温室气体清单指南	$C_t^c = \sum E_i^{traffic} \times k_i^{tce} \times f_{tce}$
碳汇部门	林地、草地、湿地、城市绿地用地面积、水域面积	林地、草地、湿地、城市绿地、水域碳汇系数	城市统计年鉴、省级温室气体清单编制指南	$C_c^c = \sum A_i \times c_i$

注：式中各值均为城市建成区范围内规模与使用量。 C_b^c 为建筑部门碳排放量； $E_{electricity}^i$ 为*i*类建筑用电量，*i*表示各类城市用地建筑类型，包括住宅、商业建筑、公共服务建筑； $f_{electricity}$ 为单位电力使用碳排放系数； E_{gas}^i 为*i*类建筑天然气用量； k_{gas}^{tce} 为单位天然气折算标准煤系数； f_{tce} 为单位标准煤使用碳排放系数； E_{LPG}^i 为*i*类建筑液化石油气用量； k_{LPG}^{tce} 为单位液化石油气折算标准煤系数； $E_{tce}^{construction}$ 为新建建筑建造过程能源折算标准煤使用量； $E_{tce}^{maintenance}$ 为老旧建筑维护过程能源折算标准煤使用量； C_i^c 为工矿业部门碳排放量； $E_i^{industry}$ 为除电力生产外的规上工业生产过程*i*类能源使用量，*i*表示各能源种类，其中包括原煤、焦炭、天然气、汽油、原油、煤油、柴油、电力等； k_i^{tce} 为单位*i*类能源折算标准煤系数； C_m^c 为市政部门碳排放量； $E_{electricity}^{public\ utilities}$ 为公共事业用电量； V_{waste} 为固体废弃物排放量； $k_{waste}^{electricity}$ 为单位固体废弃物处理用电量； V_{sewage} 为污水排放量； $k_{sewage}^{electricity}$ 为单位污水处理用电量； $V_{steam}^{central\ heating}$ 为集中供热蒸汽使用量； $V_{hot\ water}^{central\ heating}$ 为集中供热热水使用量； k_{heat}^{tce} 为单位热力值折算标准煤系数； C_t^c 为交通部门碳排放量； $E_i^{traffic}$ 为交通部门*i*类能源使用量，*i*表示各能源种类，其中包括原天然气、汽油、煤油、柴油、电力等； C_c^c 为碳汇部门碳吸收量； A_i 为*i*类用地面积，*i*表示各类可提供碳汇的用地类型，其中包括林地、草地、湿地、城市绿地、水域； c_i 为各类用地碳汇系数。

资料来源：笔者自制。

例逐渐降低。根据工矿业部门能源活动特征，2016年工业生产总用能达到1 862.34万t标准煤，达到第一个用能峰值，并于2020年达到2 085.58万t标准煤。其中，金属冶炼、原油加工与食品加工制造是消耗能力最多的3类产业。在各碳排放部门中，仅有交通部门的碳排放量呈现下降的趋势。依据其能源活动数据特征，受到近年来交通工具电气化普及的影响，交通部门中汽油和柴油的使用比例逐渐降低，而电力使用比例逐年增加。尤其2018年起哈尔滨市开始实施《哈尔滨市打赢蓝天保卫战三年行动计划实施方案》，在交通领域要求推动城市建成区公交、公共服务和社会领域应用新能源车，逐步扩大公务用车新能源汽车配备比例。城市公交车、出租车应用清洁能源或新能源汽车比例需要分别达到94%、80%。因此，自2018年起建成区范围内用于交通运输的汽油与柴油消耗量快速下降。而电力能源消耗快速增长，并于2020年达到最高。

由于电力碳排放系数远低于其他化石能源，进而导致其碳排放量呈下降趋势。通过能源活动数据碳核算结果，可以清晰地揭示城市建成区范围内的碳排放变化特征，并准确分析能源使用变化情况对于碳排放量的影响，其结果受到学界普遍认可。将这一核算结果作为基准数据，可以为后文中的精度验证提供有力支撑。

3 面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法

为增强碳核算方法与城市空间要素的耦合性，研究提取城市建成区范围内的人类活动与空间使用数据。依据面向能源活动数据的城市建成区碳核算方法，利用空间使用活动数据替换各碳核算部门中的能源使用数据，最终建立基于城市空间要素的建成区碳核算方法。为证明核算方法的科学性，进一步将核算结果与基准数据对比，以验证核算精度。

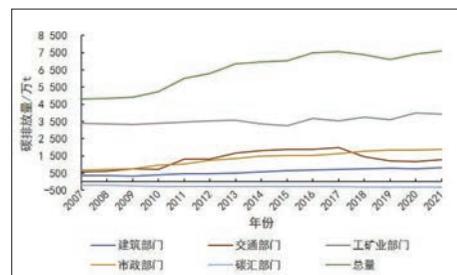


图3 面向能源活动数据的哈尔滨市建成区碳核算基准数据

Fig.3 Baseline data for carbon accounting of built-up areas in Harbin based on energy activity data

资料来源：笔者自绘。

3.1 建立面向空间使用活动数据的城市建成区核算方法

以城市建成区碳核算体系为基础，研究利用城市空间使用活动数据对各部门碳排放量进行核算，并构建面向空间使用活动数据的城市建成区核算方法（见表2）。这一核算方法中，大部分城市空间基础数据与空间使用活动数据均可通过查阅规划图纸、文

本或各级统计年鉴获取,而私家车年均出行距离则需要依靠城市交通调查报告或发放问卷的方式获取。在本研究中,私家车年均出行距离相关数据主要依据高德交通《中国主要城市交通分析报告》与《滴滴出行城市交通出行报告》。但此报告中具有详细交通出行数据的城市较少,其他城市的相关数据则需要依靠发放居民出行调查问卷等方式获取。与基于能源数据的碳核算方法相比,此方法可以在城市建成区碳核算过程中摆脱对能源数据的依赖,转而利用空间活动相关数据,让碳核算结果更具时效性。核算结果也可以清晰反映城市空间发展与空间活动变化对于城市碳排放的影响情况,为低碳城市空间规划提供支持与助力。

3.2 面向空间使用活动数据的哈尔滨市建成区碳核算结果与精度验证

依据空间使用活动碳核算方法,研究筛

选各级统计年鉴、交通调查报告等文件,获取哈尔滨市空间基础数据与空间活动数据,对建成区碳排放总量及各部门碳排放量进行核算,并将核算结果与能源使用活动碳核算结果进行对比(见图4)。核算结果整体与能源数据核算结果较为接近。其中,建筑部门整体变化趋势相同,但数值存在一定差异。而交通部门在2013—2017年间的核算结果差异较大,主要由于这一时期的私家车出行数据仅能依靠统计年鉴中的人均出行支出与临近年份的交通调查报告结果进行估算,导致误差较大。其余年份则可以使用城市交通调查报告相关数据,核算结果差异较小。依据核算结果,可以清晰反映城市空间变化对于碳排放的影响情况。其中,2015年起建成区范围内工矿仓储用地快速扩张,由96 km²增长至114.82 km²,工矿业部门碳排放量也随之快速增长。在建筑部门中,住宅建筑碳排放量占比由2007年的52%增长至2021年

的74.6%。住宅建筑面积的快速增长是导致这一现象的直接原因。相比之下,商业服务业设施用地面积增速则较为平缓,其碳排放量增长速度也较为缓慢。而在市政领域,随着建成区面积扩张,供水管道长度增加与集中供热面积的增长对此部门碳排放量的影响最为显著。

为更加科学验证空间活动碳核算方法的准确性,研究利用回归分析法对空间使用活动碳核算结果与能源活动碳核算结果进行精度验证。由于双方法中碳汇部门的核算方法相同,验证过程中需去除这一部门数据,将碳排放总量与其余部门的核算结果汇总并进行精度验证(见图5,表3)。根据验证结果,两种方法核算结果的相关性达99.2%,标准误差为304.3,模型显著性较好。由此可判断,空间使用活动碳核算结果的准确度较好,同能源使用碳核算结果的差异性较低,具有实践应用价值。

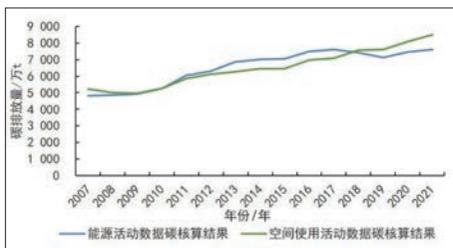
表2 面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法

Tab.2 Carbon accounting methods for urban built-up areas based on spatial activity data

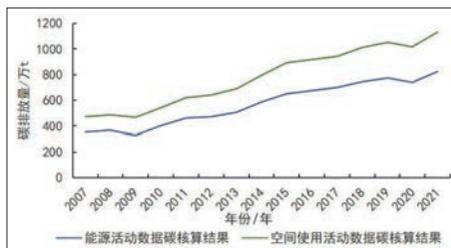
部门	城市空间基础数据	空间使用活动数据	碳排放计算相关数据	数据来源	计算公式
建筑部门	住宅建筑面积、商业服务业设施用地面积、公共管理与公共服务用地面积、新建建筑面积	住宅空置率	单位建筑面积住宅能耗系数、单位用地面积商业与服务设施能耗系数、单位建筑面积建造过程能耗系数、单位标准煤能源消耗碳排放系数	省级能源统计年鉴、城市统计年鉴、各类能源折算标准煤参考系数表、国家温室气体清单指南	$C_b^c = (S_{residence} \times r_{vacancy\ rate} \times k_{residence}^{tce} + \sum A_i \times k_i^{tce} + S_{new} \times k_{new}^{tce}) \times f_{tce}$
工矿业部门	工矿仓储用地面积	地均工业产值	单位工业GDP能耗、单位标准煤能源消耗碳排放系数	省级能源统计年鉴、城市统计年鉴、国家温室气体清单指南	$C_i^c = A_m \times p_m \times k_m^{tce} \times f_{tce}$
市政部门	供热建筑面积、供水管道长度	人口、人均垃圾清运量、垃圾无害化处理率、人均污水排放量	单位垃圾清运能耗、单位污水处理能耗、单位长度管道输水用电量、单位供热面积能耗、单位标准煤能源消耗碳排放系数、电力碳排放系数	省级能源统计年鉴、城市统计年鉴、城市能源统计年鉴、省级温室气体清单编制指南、国家温室气体清单指南	$C_m^c = L_{water} \times j_{water}^{electricity} \times f_{electricity} + (P \times \mu_{waste} \times r_{harmless} \times k_{waste}^{tce} + P \times \mu_{sewage} \times k_{sewage}^{tce} + S_{heating} \times j_{heating}^{tce}) \times f_{tce}$
交通部门	私家车年均行驶距离、货运总距离、客运总距离	私家车保有量、居民出行电气化率、货运总量、客运总人次	单位周转量能耗、单位出行距离用电量、单位出行距离新能源汽车用电量、单位出行距离燃油汽车能耗	城市交通调查报告、城市统计年鉴、城市能源统计年鉴、省级温室气体清单编制指南、国家温室气体清单指南	$C_t^c = L_{private\ car} \times C_{private\ car} \times r_{electrical} \times j_{new\ energy}^{electricity} \times f_{electricity} + L_{private\ car} \times C_{private\ car} \times (1 - r_{electrical}) \times j_{fuel}^{tce} \times f_{tce} + \sum L_i \times T_i \times k_{turnover}^{tce} \times f_{tce}$
碳汇部门	林地、草地、湿地、城市绿地用地面积、水域面积	—	林地、草地、湿地、城市绿地、水域碳汇系数	城市统计年鉴、省级温室气体清单编制指南	$C_s^c = \sum A_i \times c_i$

注:式中各值均为城市建成区范围内规模与使用量。 C_b^c 为建筑部门碳排放量; $S_{residence}$ 为住宅建筑面积; $r_{vacancy\ rate}$ 为住宅空置率; $k_{residence}^{tce}$ 为单位住宅建筑面积能耗(以标准煤折算); A_i 为*i*类城市用地面积,包括商业服务业设施用地、公共管理与公共服务用地; k_i^{tce} 为*i*类用地中单位用地面积能耗(以标准煤折算); S_{new} 为新建建筑面积; k_{new}^{tce} 为单位新建建筑面积能耗(以标准煤折算); f_{tce} 为单位标准煤使用碳排放系数; C_i^c 为工矿业部门碳排放量; A_m 为工矿业用地面积; p_m 为地均工业产值; k_m^{tce} 为单位工业GDP能耗; C_m^c 为市政部门碳排放量; L_{water} 为供水管道长度; $j_{water}^{electricity}$ 为单位供水距离用电量; $f_{electricity}$ 为单位用电量碳排放系数; P 为人口; μ_{waste} 为人均垃圾清运量; $r_{harmless}$ 为垃圾无害化处理率; k_{waste}^{tce} 为垃圾无害化处理能耗; μ_{sewage} 为人均污水排放量; k_{sewage}^{tce} 为单位污水处理能耗; $S_{heating}$ 为集中供热建筑面积; $j_{heating}^{tce}$ 为单位供热面积能耗; C_t^c 为交通部门碳排放量; $L_{private\ car}$ 为私家车年均行驶距离; $C_{private\ car}$ 为私家车保有量; $r_{electrical}$ 为私家车电气化率; $j_{new\ energy}^{electricity}$ 为单位出行距离新能源汽车用电量; $f_{electricity}$ 为单位用电量碳排放系数; j_{fuel}^{tce} 为单位出行距离燃油汽车能耗(折算标准煤); L_i 为*i*类运输距离,*i*表示运输类型,包括客运与货运; T_i 为*i*类运输量,其中货运为货运量,客运为换算客运量; $k_{turnover}^{tce}$ 为单位周转能耗; C_s^c 为碳汇部门碳吸收量; A_i 为*i*类用地面积,*i*表示各类可提供碳汇的用地类型,其中包括林地、草地、湿地、城市绿地、水域; c_i 为各类用地碳汇系数。

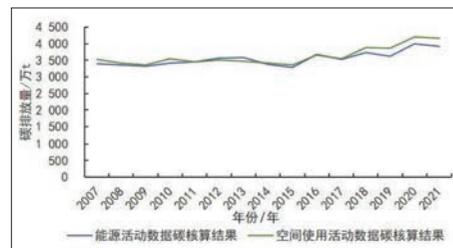
资料来源:笔者自制。



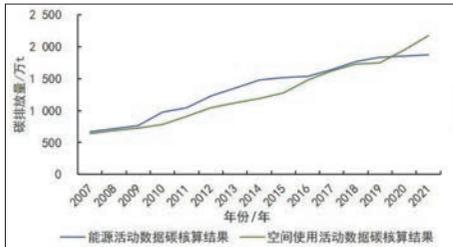
a 建成区碳排放总量



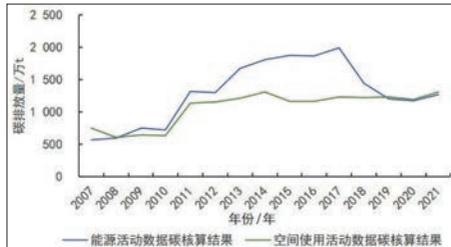
b 建筑部门碳排放量



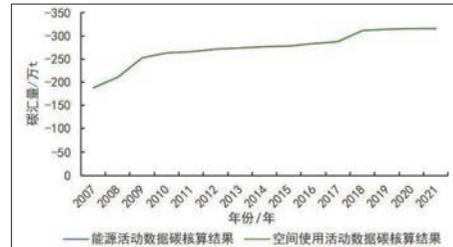
c 工矿业部门碳排放量



d 市政部门碳排放量



e 交通部门碳排放量



f 碳汇部门碳排放量

图4 双方法核算结果对比图

Fig.4 Comparison of results from the two accounting methods

资料来源:笔者自绘。

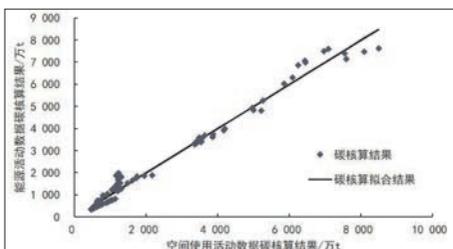


图5 双方法精度验证结果

Fig.5 Accuracy verification results of the two methods

资料来源:笔者自绘。

表3 回归模型统计表

Tab.3 Regression model statistics

R	R ²	调整后R ²	标准估算误差	显著性
0.996	0.992	0.979	304.268	0.000

资料来源:笔者自制。

为进一步验证各部门的核算方法是否准确,研究将除碳汇部门外的各部门双方法核算结果分别进行精度验证(见表4)。各部门的精度验证结果较好,双方法核算结果的相关性均在95%以上,显著性良好。其中,建筑部门的验证结果标准误差仅为6.9,这一部门核算方法的精度最高。而交通部门受到数据收集难度的影响,误差相对较大。

与能源活动碳核算方法相比,面向空间使用活动的碳核算方法可以依据城市的空间特征,对建成区范围内的碳排放量进

表4 各部门双方法精度验证回归模型统计表

Tab.4 Regression model statistics for accuracy verification of the two methods across departments

部门名称	R	R ²	调整后R ²	标准估算误差	显著性
建筑部门	0.999	0.999	0.923	6.889	0.000
工矿业部门	0.999	0.999	0.922	105.259	0.000
市政部门	0.999	0.987	0.910	168.064	0.000
交通部门	0.982	0.964	0.887	282.151	0.000

资料来源:笔者自制。

行核算。其中,建筑部门核算结果受到建筑空置率和单位面积能耗统计值的准确度影响较大,准确的统计数据能保证空间使用活动碳核算结果接近能源核算结果。在交通部门中,私家车出行数据对核算精度有较大影响。但统计年鉴中几乎不会对相关数据进行官方统计,只能依靠城市交通调查报告或发布统计问卷对相关数据进行整理,可能导致些许误差。而在其他部门的核算过程中,核算过程中的相关数据均可通过查阅各级统计年鉴与温室气体清单获取,核算结果准确度较高。总体而言,面向空间使用活动的碳核算方法的核算结果与能源核算结果数值上较为接近,数据获取较为简单,具有较强的普

适性。同时,由于此方法与城市空间要素关联性较强,可以根据城市建成区空间变化对核算结果进行实时调整,减少对于能源活动数据的依赖,具有更好的灵活性与可拓展性。综上所述,构建面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法,是助力“双碳”目标实施、辅助国土空间规划建立低碳城市的重要手段。

4 面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法应用路径

随着面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法的逐步建立与完善,这一核算方法可被应用于中心城区层面国土空间总体规划的编制与监测评估过程中。在编制层面,碳核算方法可用于预测规划方案的减碳水平,协助低碳城市发展建设决策。在监测评估层面,可依据碳核算方法建立低碳城市评估指标,进而构建评价低碳城市建设水平的科学技术方法。

4.1 依据城市建成区碳核算方法构建城市碳中和路径预测

城市碳排放预测是指导低碳城市建设,预测城市发展路径的有效技术方法。现阶段

的预测方法大多以城市人口、能源使用、经济发展等数据为基础,对市域范围碳排放总量的变化情况进行模拟预测。但其中部分数据获取难度较高,与城市空间要素关联性较弱,且预测结果无法根据城市建设与发展进行周期性调整。而随着面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法逐步拓展,可以依托神经网络算法建立时间序列城市建成区碳排放预测模型。这一预测模型与城市建成区空间使用活动要素紧密衔接,可以根据国土空间规划调整与城市空间变化对碳排放情况进行实时预测,并清晰反映城市空间规划策略的减碳效果。同时引入多情景模拟预测技术,设定基准情景、低碳情景与高碳情景等城市发展情景,建立多发展情景下的城市空间要素碳排放预测模型与方法。

现阶段,哈尔滨仍处于城市快速发展与建设阶段,城市新区逐步扩张。将空间要素碳排放预测方法引入中心城区国土空间总体规划的编制过程中,可以探究城市空间扩张与空间使用强度变化对于碳排放的影响情况,衡量规划策略的减碳能力。相较于传统的碳排放预测方法,基于空间要素的碳预测技术更加灵活。同时,可以依据城市建设现状与规划方案,探究城市未来建设用地扩张与变化过程。将空间变化的迭代数据带入模型,让预测结果更加准确。以预测结果为基础,可以识别城市碳中和发展过程中的关键时间节点,进而指导城市空间低碳发展与规划决策。

4.2 基于城市建成区碳核算分析开展低碳城市建设专项评估

为保证低碳城市发展与“双碳”目标实施的稳步进行,我国相继开展了多项低碳城市试点工作,并对相关工作进展进行评估。其中,低碳城市建设专项评估是辅助规划决策,保障减碳策略落实的重要手段。在基于空间使用活动数据的城市建成区碳核算框架下,可以使用LMDI分解法,通过计算各核算要素产生的碳

排放影响值变化情况,衡量各项要素的贡献度及敏感度。其中,贡献度可体现各类要素对于碳排放汇变化量及变化速度的影响,敏感度可反映各类要素减排增汇的效率与能力^[27]。通过对其中关键因子的提取,可以筛选对城市碳排放具有高影响力的空间使用活动要素,建立基于碳核算的低碳城市专项评估指标体系。指标体系的提出可以为国土空间规划监测评估过程提供量化标准,为低碳城市空间资源优化提供技术支持。

哈尔滨经济技术开发区作为碳达峰试点园区,需要哈尔滨市在保证城市建设与经济发展的同时尽快实现碳达峰碳中和目标。随着低碳城市建设专项评估体系的建立,可以将评价指标应用于国土空间规划的监测评估过程中。评估结果是科学准确衡量城市低碳建设水平,助力碳中和城市实施的重要技术手段。经济开发区作为城市发展新区与碳达峰示范区,可以在城市建成区范围的评价标准基础上,依据碳核算结果与关键因子分析制定区域范围内的评价体系,进而衡量规划的合理性,指导区域建设。

5 结语

当前,我国碳达峰、碳中和目标战略已成为国土空间规划提出了新的要求与愿景。构建衔接城市空间要素,适配中心城区国土空间总体规划的碳核算技术,是促进低碳城市建设,助力“双碳”目标实施的重要路径。为此,本文以哈尔滨市为案例城市,采用“核算体系—基准制定—方法构建—结果核验”的技术路线,构建面向空间使用活动数据的城市建成区碳核算方法。这一核算方法的建立使得城市建成区碳核算过程不再依赖能源数据,转而同城市空间要素相关联。核算结果更加清晰反映城市规划编制与城市空间变化对碳排放的影响情况。在此基础上,提出构建城市碳中和路径预测与开展低碳城市建设专项评估的碳核算方法应用路径,为面向碳中和目标的中心城区国土空间总体规划提供支持助力。

参考文献 References

- [1] LYNN J, PEEVA N. Communications in the IPCC's Sixth Assessment Report cycle[J]. *Climatic Change*, 2021, 169: 18.
- [2] DHAKAL S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4208-4219.
- [3] LI Z, WANG F, KANG T, et al. Exploring differentiated impacts of socioeconomic factors and urban forms on city-level CO₂ emissions in China: spatial heterogeneity and varying importance levels[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 84: 104028.
- [4] NEWMAN P, KENWORTHY J. *Sustainability and cities: overcoming automobile dependence*[M]. Washington, DC: Island Press, 1998.
- [5] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. *城市规划学刊*, 2021 (4): 74-80.
XIONG Jian, LU Ke, JIANG Ziyang, et al. Research and thinking on the preparation of territorial spatial planning under the goal of "carbon peaking and carbon neutrality"[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(4): 74-80.
- [6] 郑德高, 罗瀛, 周梦洁, 等. 绿色城市与低碳城市: 目标、战略与行动比较[J]. *城市规划学刊*, 2022 (4): 103-110.
ZHENG Degao, LUO Ying, ZHOU Mengjie, et al. Green cities and low-carbon cities: comparison of goals, strategies and actions[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(4): 103-110.
- [7] 叶祖达. 碳排放量评估方法在低碳城市规划中的应用[J]. *现代城市研究*, 2009, 24 (11): 20-26.
YE Zuda. Application of carbon emission assessment methods in low-carbon urban planning[J]. *Modern Urban Research*, 2009, 24(11): 20-26.
- [8] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J]. *城市规划学刊*, 2021 (4): 43-50.
ZHENG Degao, WU Hao, LIN Chenhui, et al. Research on the integration of urban carbon reduction unit construction and planning technology based on carbon accounting[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(4): 43-50.
- [9] 陈可欣, 陶韦华, 方晓丽, 等. 国土空间规划中碳中和评估及规划应用路径研究[J]. *规划师*, 2022, 38 (5): 134-141.
CHEN Kexin, TAO Weihua, FANG Xiaoli, et al. Research on carbon neutrality assessment and planning application paths in territorial spatial planning[J]. *Planners*, 2022, 38(5): 134-141.
- [10] PETERS G P. From production-based to consumption-based national emission inventories[J]. *Ecological Economics*, 2008, 65(1): 13-23.
- [11] GUAN D, MENG J, REINER D, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems[J].

- Nature Geoscience, 2018, 11: 551-555.
- [12] WIEDMANN T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting[J]. Ecological Economics, 2009, 69(2): 211-222.
- [13] 陈红敏. 国际碳核算体系发展及其评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21 (9): 111-116.
CHEN Hongmin. Development and evaluation of the international carbon accounting system[J]. China Population·Resources and Environment, 2011, 21(9): 111-116.
- [14] STEININGER K, LININGER C, DROEGE S, et al. Justice and cost effectiveness of consumption-based versus production-based approaches in the case of unilateral climate policies[J]. Global Environmental Change, 2014, 24: 75-87.
- [15] LIN B, SUN C. Evaluating carbon dioxide emissions in international trade of China[J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 613-621.
- [16] CHEN G, WIEDMANN T, WANG Y, et al. Transnational city carbon footprint networks - exploring carbon links between Australian and Chinese cities[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1082-1092.
- [17] 徐一剑, 李潭峰, 徐丽丽. 国土空间总体规划温室气体核算模型[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18 (3): 355-365.
XU Yijian, LI Tanfeng, XU Lili. Greenhouse gas accounting model for territorial spatial master planning[J]. Progress in Climate Change Research, 2022, 18(3): 355-365.
- [18] SU Y X, CHEN X Z, LI Y, et al. China's 19-year city-level carbon emissions of energy consumptions, driving forces and regionalized mitigation guidelines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 231-243.
- [19] MENG X, HAN J, HUANG C. An improved vegetation adjusted nighttime light urban index and its application in quantifying spatiotemporal dynamics of carbon emissions in China[J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 829.
- [20] SHI K, CHEN Y, YU B, et al. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. Applied Energy, 2016, 168: 523-533.
- [21] LYU Q, LIU H, WANG J, et al. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO₂ emissions in China: utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134394.
- [22] 奥勇, 毋冰龙, 白召弟, 等. 基于类NPP-VIIRS夜间灯光数据的粤港澳大湾区城市建成区时空动态特征[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44 (3): 11.
AO Yong, WU Binglong, BAI Zhaodi, et al. Spatiotemporal dynamic characteristics of urban built-up areas in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on NPP-VIIRS nighttime light data[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2022, 44(3): 11.
- [23] 姜洋, 何永, 毛其智, 等. 基于空间规划视角的城市温室气体清单研究[J]. 城市规划, 2013, 37 (4): 50-56.
JIANG Yang, HE Yong, MAO Qizhi, et al. Research on urban greenhouse gas inventory based on spatial planning perspective[J]. City Planning Review, 2013, 37(4): 50-56.
- [24] 鞠鹏艳. 城市总体规划层面低碳城乡规划方法研究——以北京市延庆县规划实践为例[J]. 城市规划, 2013, 37 (8): 9-17.
JU Pengyan. Research on low-carbon urban and rural planning methods at the urban master planning level—taking the planning practice of Yanqing County, Beijing as an example[J]. City Planning Review, 2013, 37(8): 9-17.
- [25] 李毅, 任云英. 上海市城市总体规划碳排放核算方法研究[C]//2019中国城市规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
LI Yi, REN Yunying. Research on carbon emission accounting methods for Shanghai urban master planning[C]//Proceedings of 2019 China Annual National Planning Conference. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [26] 王雅捷, 何永. 基于碳排放清单编制的低碳城市规划技术方法研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25 (6): 72-80.
WANG Yajie, HE Yong. Research on low-carbon urban planning technical methods based on carbon emission inventory preparation[J]. China Population·Resources and Environment, 2015, 25(6): 72-80.
- [27] 罗文静, 汪颀, 熊伟. 国土空间规划“双碳”计算仿真模块构建及应用[J]. 城市规划学刊, 2023 (2): 47-56.
LUO Wenjing, WANG Xie, XIONG Wei. Construction and application of "double carbon" calculation simulation module for territorial spatial planning[J]. Urban Planning Forum, 2023(2): 47-56.