

“双碳”目标下碳核算方法在国土空间规划中的应用路径研究

Research on the Application Path of Carbon Accounting Method in Spatial Planning Under the Goal of “Carbon Emissions Peak and Carbon Neutrality”

冷红 肇禹然 袁青

LENG Hong, ZHAO Yuran, YUAN Qing

摘要：在中国承诺“碳达峰、碳中和”目标的背景下，城市作为低碳发展的重要载体，其作用愈发凸显。现阶段世界各国对于低碳城市建设的研究更加注重科学减碳方法，从碳核算角度出发，可以更加科学和系统地指导低碳视角下国土空间规划的编制。明确碳核算方法在国土空间规划的编制和实施过程中的应用路径，对于辅助“双碳”目标的实施具有极强的现实意义。笔者总结了国内外主流的城市碳核算边界和方法特征，梳理了碳核算方法在国土空间规划中的应用现状与存在问题，介绍了东京、纽约、伦敦在城市规划编制和实施过程中对于碳核算的应用方式，进而从基于国土空间要素的碳核算分析与情景预测和基于碳核算分析开展低碳城市专项评估与动态监测两方面，提出适宜国土空间规划体系的碳核算应用路径。

Abstract: Against the backdrop of China's commitment to achieving its “carbon peak and carbon neutrality” goals, cities, as key drivers of low-carbon development, are playing increasingly prominent roles. At present, research on Low-Carbon City construction in various countries around the world pays more attention to scientific carbon reduction methods, and from the perspective of carbon accounting, it can more scientifically and systematically guide the preparation of land and spatial planning from the perspective of low-carbon. It is of great practical significance to clarify the application path of carbon accounting methods in the preparation and implementation of spatial planning. This paper summarizes the boundary and method characteristics of mainstream urban carbon accounting at home and abroad, sorts out the application status and existing problems of carbon accounting methods in spatial planning, and introduces the application methods of carbon accounting in the preparation and implementation of urban planning in Tokyo, New York and London, and then proposes a carbon accounting application path suitable for the spatial planning system from two aspects. One is carbon accounting analysis and scenario prediction based on spatial elements, and the other is special assessment and dynamic monitoring of Low-Carbon Cities based on carbon accounting analysis.

关键词：碳核算；国土空间规划；情景预测；低碳评估；应用路径；国际经验

Keywords: Carbon Accounting; Spatial Planning; Scenario Prediction; Low Carbon Assessment; Application Path; International Experience

十三五国家重点研发计划 (2018YFC0704705)

作者：冷红，博士，哈尔滨工业大学建筑学院，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，教授，博士生导师。hitlaura@126.com
肇禹然，哈尔滨工业大学建筑学院，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。zhaoyuran2013@163.com
袁青（通信作者），博士，哈尔滨工业大学建筑学院，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，教授，博士生导师。hityq@126.com

引言

根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 于 2021 年发布的第六次评估报告第一工作组报告《气候变化 2021：自然科学基础》，目前全球地表平均气温较工业化前高出约 1℃，到 2040 年这一数据将达到 1.5℃^[1]。为积极有效地应对气候变化，中国在第 75 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”（下称“双碳”）的庄严承诺。城市作为高能耗、高碳排放的集中地，低碳可持续的城市发展是实现“双碳”目标的重要路径。

已有研究表明，碳排放变化过程与城市化进程高度相关，城市空间规划的合理布局 and 高效统筹能够有效降低区域碳排放量^[2,3]。随着我国国土空间规划的逐步完善和推进，助力“双碳”目标，实现城市低碳发展已成为重要方向^[4,5]。当前，城市低碳发展研究已经逐步从定性分析过渡到定量分析，碳核算方法被广泛应用。然而，在我国的规划实践过程中，对于碳核算方法的应用路径存在国土空间规划与碳核算方法耦合性不足，碳核算方法助力国土空间规划技术路线不明确等问题。因此，笔者总结了国内外主流的城市碳核算范围和方法特征，总结了碳核算在国土空间规划中的应用现状和存在问题，并介绍了东京、纽约、伦敦在城市规划编制和实施过程中对于碳核算的不同应用方式。综合研究现状和国际城市规划经验，提出在国土空间规划体系下城市碳核算方法应用路径的优化方案。

1 城市碳核算理论研究

1.1 城市碳核算范围

确定城市碳核算的范围是研究城市碳排放的重要基础。目前较为常用的是由世界资源研究所（WRI: The World Resources Institute）和世界可持续发展工商理事会（WBCSD: World Business Council for Sustainable Development）联合发布的、在地方级别组织各种碳核算系统边界的分类标准。如图1所示，此标准将城市碳排放分为3个范围：范围1是指在城市边界内的燃料燃烧或工业过程的排放；范围2是指向城市提供的电力、热力、取暖或者制冷的能源使用所产生的排放；范围3是指城市从外部购买的产品和服务等在城市内部使用而在城市外部产生的排放。以此为基础，目前世界各国的碳核算主流方法大致分为两类：基于“范围1”的生产端碳核算方法（PBA: Production-based Accounting），基于“范围1+范围2+范围3”的消费端碳核算方法（CBA: Consumption-based Accounting）。

1.2 碳核算方法特征解析

1.2.1 生产端碳核算方法特征解析

目前应用最广泛的碳核算方法是生产端碳核算方法，它将生产过程中包括出口在内的区域内生产碳排放作为核算范围^[6,7]。这一方法可以描述生产部门的碳排放情况，准确计算其能源使用效率。目前生产端碳核算方法较多，具有一定权威性和普适性的相关核算计量标准大多基于国家或区域层面，其中《国家温室气体清单》作为世界气象组织（WMO: World Meteorological Organization）和联合国环境规划署（UNEP: United Nations Environment Programme）共同建立的政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的碳核算方法，是世界各国建立温室气体排放清单过程中较为权威的方法。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个部门，通过能源活动数据核算各级部门碳排放量并逐级汇总后，计算得到温室气体排放情况。由于生产端碳核算方法在全球气候变化协议中被广泛应用，许多城市基于生产端对城市碳排放进行核算，

并编制城市温室气体排放清单。此方法与国家层面的全域碳核算方法保持一致，有利于城市之间的横向比较。以温室气体排放清单为依据，城市管理者可以准确监测城市的碳排放结构及其变化情况，并根据不同能源使用部门的碳排放特点制定相应的减碳规划策略。

尽管生产端碳核算方法具有明显优势，但这一方法在核算过程中并不考虑能源使用行为所产生的商品或服务的最终消费者和目的地^[8]。随着城市区域协同发展的不断推进，在通过产业再分配促进城市间经济流动的同时，商品或服务的生产部门与消费部门会在地理上分离，进而导致城市间碳排放转移^[9-10]。由于生产端碳核算范围中并不包括城市中的间接碳排放，因此，在此核算体系下，许多低生产、高消费的城市通常被认为是低碳城市，而许多资源输出型城市承受巨大的碳减排压力^[11-12]。这导致城市碳减排分配的不公平，进一步影响区域的碳减排效率。在此背景下，碳核算由生产端向消费端的转变逐渐受到学者们的关注^[13-15]。

1.2.2 消费端碳核算方法特征解析

消费端碳核算范围包括进口在内的最终产品碳排放总量，其中碳排放的主体由消费者承担^[16]。它描述了人类消费行为对区域碳排放变化的影响。现阶段关于消费端碳核算方法较为单一，其中利用世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会联合发布的温室气体核算体系所构建的经济投入产出—生命周期评价模型（EIO-LCA: Economic Input-Output-Life Cycle Assessment）是最具代表性的方法之一^[17-19]。该模型由投入产出模型（EIO: Economic Input-Output Model）衍生而来，以投入产出表为依据，根据产品的直接消耗系数和碳排放系数计算直接碳排放量和间接碳排放量。在此基础上，融入全生命周期分析方法（LCA: Life Cycle Assessment），揭示产品从生产到消费各个阶段的温室气体排放情况和各消费部门碳排放量间关系。该方法的主要优势是在核算过程中包含了城市内的间接碳排放量，核算范围更加全面，基于消费端的人均碳排放量数据能更真实地反映城市居民的碳排放情况。基于消费端碳核算体系可以准确衡量城市中各消费部门的碳排放情况，不仅有助于探究城市间经济流动对区域碳排放量的影响，而且为公平合理分配责任、分析碳转移在全球气候治理中的作用提供了重要的理论依据^[20-22]。

虽然消费端碳核算结果更加全面，但其核算过程较为复杂。同时，由于这一模型是依据货币价值与碳排放间联系建立的，相同货币价值产品在生产和使用过程中产生的碳排放量可能差别较大，由此造成核算结果可能存在一定误差。

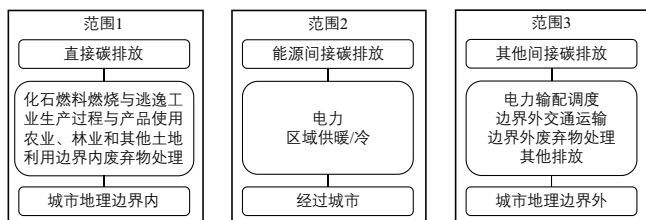


图1 城市碳核算的3个范围

1.3 碳核算在国土空间规划中的意义

2022年,我国9部门联合印发了《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》,明确我国“碳达峰、碳中和”标准计量体系工作总体安排。该文件着重强调了加强碳计量政策研究和计量技术规范制度修订,加快制定城市碳排放时空反演方法。同时,根据不同核算领域,探究多种碳排放计量体系,以提升碳排放计量监测能力和水平。城市碳核算结果已成为衡量城市低碳发展水平的重要指标,探索不同体系下的碳核算方法也成为重要的研究方向。

为实现“双碳”目标,国土空间规划在推进城市低碳可持续发展领域具有重要意义。由于城市低碳发展涉及领域较为广泛,国土空间规划的编制要兼顾城市发展需求和低碳发展目标,不仅包含能源利用与储存,还涉及土地利用、城市形态、综合交通系统布局、公共设施分布等多种要素^[45]。在这一过程中,需要从城市的生产端或消费端对城市的碳排放水平进行准确核算。以碳核算结果为基础,通过量化数据可以清楚衡量现有规划的减碳效果,并确定低碳发展目标,将碳排放的约束纳入国土空间规划的实施和管理。现阶段,许多城市和地区在低碳城市发展过程中都以城市碳核算结果为依据,提供更加具有针对性和实效性的低碳优化策略。

2 碳核算方法在国土空间规划中的应用和存在的问题

2.1 碳核算方法与国土空间规划耦合性不足

当前,世界各国对于低碳城市发展理念的日益重视,随着低碳城市相关研究的不断深入,碳核算方法已经成为低碳城市建设和规划过程的重要支撑。现阶段对于城市碳核算研究多以能源活动数据或城市投入产出等经济数据为基础,对市域范围内的碳排放总量进行核算。我国的城市碳核算大多应用生产端碳核算方法,基于IPCC模型构建温室气体排放清单,以监测城市碳排放的变化情况。这一核算体系在能源活动领域具有较高的准确性和权威性。但基于IPCC模型的城市碳核算体系与城市空间要素结合不够紧密,核算结果无法直观反映空间变化对于城市碳排放的影响,对国土空间规划的反馈、互动和支撑不足^[2,23-24]。

随着遥感技术的进步和普及,越来越多的学者探究如何运用空间要素对城市碳排放进行核算,以实现核算结果对空间规划的支撑^[25]。许多学者利用夜间灯光数据探究城市碳排放的时空演化特征,进而总结城市碳排放的空间相关性要素,初步建立了碳核算结果与空间要素的耦合关系^[26-29]。在此基础上,学者们对建筑、交通等城市重要碳排放领域的空间要素碳核算方法进行探索,通过对相关领域空间要素的筛选,构建了建筑全生命周期碳核算模型和城市道路交通碳核

算清单^[30-31]。此外,随着基于激光雷达技术(LiDAR: Light Detection And Ranging)的相关探索成为城市碳排放研究领域的新趋势,采用该技术可以收集具有极高精度的遥感数据,使得提取城市碳排放空间影响要素更加科学,在碳汇核算等领域发挥了重要作用^[32]。随着国土空间规划的全面实施,国内学者开始聚焦国土空间要素与城市碳排放的关联性研究。有学者率先提出了“土地利用—碳排放”关联框架,采用自上而下和自下而上相结合的方法,构建以“人地规模+人地碳排放强度+次级影响因子”为主体的碳核算指标体系,并在北京和上海等地进行了实践^[33-35]。这一阶段的研究所涉及的空间要素较少,主要利用人口、GDP、人均建设用地等数据。随着相关研究的逐步推进,为使碳核算与规划策略、城市空间活动相关联,学者们提出以IPCC碳排放清单框架为基础,将能源消费数据拆分、重组,并转化为承载能源消费活动的规划用地分类相关数据,进而构建“碳排放—规划要素—终端活动”的关联性框架^[36]。在此基础上,有学者构建了“空间布局—用地类型—部门划分—模型方法”的研究框架,聚焦工业、建筑、交通、碳汇领域,依据在城市中的活动数据建立了国土空间总体规划碳核算方法^[37]。现阶段对于国土空间要素和城市碳排放的研究已可初步应用于实践,但所涉及的领域无法涵盖城市碳排放的所有部门,进一步探索普适性的基于城市空间活动要素的城市碳核算方法是重要的研究方向。

2.2 碳核算方法助力国土空间规划技术路径不明确

碳核算方法在城市规划领域的应用历经了长期探索,其主要应用路径是以碳核算数据作为支撑,在城市空间的不同尺度层面提出具有针对性的低碳城市规划技术方法和策略^[38]。在街区尺度,相关研究主要针对城市住宅和商业建筑、工业生产、交通系统、绿地碳汇等维度进行核算。通过对各领域碳排放量的变化情况进行统计和分析,针对碳排放量较大或增长速度较快的领域,提出绿色建筑改造、居住建筑布局优化等城市减碳技术方法^[39-40]。而在城市尺度,多从能源活动碳排放、工业过程碳排放、废弃物处理碳排放等维度进行核算,根据城市碳排放结构特征,提出城市产业结构调整方案和土地利用优化策略^[17,34,41]。以碳核算方法为基础,部分学者运用机器学习等技术方法构建了城市碳排放预测模型,对建筑、交通等重点领域的碳排放情况进行情景预测,根据预测结果分析对城市碳排放具有显著影响的能源活动和空间要素,并提出具有针对性的城市碳中和发展路径^[42-44]。但受到碳核算方法和预测技术的限制,研究大多侧重对工程减碳技术的探索,针对城市的主要能源活动特点提出相应的城市建设优化方案,缺乏对于城市空间领域减碳技术的直接指导。

且这一过程中碳核算仅作为辅助的研究方法,未被纳入城市建设和规划体系。

随着国土空间规划的全面实施,碳核算要素和方法作为城市体检评估过程中重要的监测手段,被广泛应用于城市体检评估指标体系的构建过程中。现阶段城市评估指标体系主要包括《国土空间规划城市体检评估规程(试行)》和《2022年城市体检指标体系》,其中与低碳城市建设相关指标共有35项^[45-46]。这些指标涉及能源燃烧、工业生产过程、产品使用、废弃物处理、农业和林业等多个城市碳排放部门,涵盖城市土地利用和开发强度、建设用地比例和布局、交通模式、绿地空间布局、绿色建筑比例、垃圾回收方式、可再生能源应用比例等多个方面。现行指标体系旨在评价城市的综合发展建设状况,缺少对城市建筑、交通、工业等重要领域碳排放的监测性指标,无法对城市低碳发展进行准确评估。同时,国土空间规划体系中缺少针对“双碳”目标或低碳城市建设的专项评估体系,导致无法准确衡量各项减碳策略的落实情况和效果。因此,进一步探索城市碳核算在国土空间规划体系中的应用方式尤为重要。

3 国际经验借鉴

现阶段,碳核算方法在各国的城市规划体系中所起的作用各不相同,东京、纽约、伦敦作为在应对气候变化方面已经取得显著成效的城市,其规划过程中的实践经验尤为重要^[3,47-49]。笔者选取东京、纽约、伦敦3座城市作为案例,着重介绍其在低碳城市规划中对于碳核算的不同应用方式,以期为我国“双碳”目标下国土空间规划编制和实施提供经验借鉴。

3.1 日本东京:构建面向城市消费部门的碳核算体系

东京市环境局于2021年发布《创建可持续发展城市——东京的环境政策》(環境先進都市・東京に向けて)报告,报告介绍了自2019年开始实施的面向城市能源最终消费部门的碳核算体系^[50-51]。由于东京市温室气体排放清单的编制以IPCC模型为依据,其部门的划分基于温室气体的生产部门,无法直接与城市空间中的能源消费部门建立联系,对城市规划减碳政策缺乏指导意义。为保证减碳政策的制定更加科学高效,东京市环境局提出面向城市空间的最终能源消费和温室气体排放量核算体系。该核算体系采用城市生产端碳核算方法,以IPCC模型为基础,将模型中的能源活动部门转译为城市空间内的消费部门,核算所需的数据仍为生产端能源活动数据,而核算结果可以与城市空间中的能源消费部门直接相关联。依据城市能源使用特点,碳排放部门被重新划分为5级主要部门和20级子类部门(图2)。在这

一核算框架下,碳核算范围由东京都缩小至中心城区内,消除了非城镇要素对碳排放总量的影响,能够精确描述城市建成区空间变化对城市碳排放的影响情况,评估各类城市活动导致的碳排放变化情况,以及城市活动与碳排放结构的关系。但这一核算体系不包含绿地碳汇和电力等能源传输运输过程中损耗所产生的碳排放,无法将该方法直接应用于其他城市中。以碳核算结果为基础,东京市政府根据各部门碳排放特点制定具有针对性的减碳策略。

3.2 美国纽约:基于碳核算方法构建低碳城市多情景预测模型

2021年纽约市可持续发展办公室与美国国家电网合作发布了《纽约碳中和路径》(Pathways to Carbon-Neutral NYC)报告。报告中依据碳核算结果,首次对纽约未来低碳建设路径进行预测,提出不同低碳路径下的城市低碳发展方式。预测的过程以IPCC模型为基础,将碳排放部门重新划分为建筑和工业部门、交通运输部门、区域能源部门(包括电力部门、天然气部门)和废弃物处理部门。根据各部门碳排放量核算结果,共提出3条低碳建设路径——“电气化”路径、“低碳燃料”路径和“多样化”路径。根据低碳建设情景预测结果,报告进一步提出不同路径下的核心减碳策略,涉及建筑领域、交通领域、工业领域和废弃物领域,并对其减碳效果进行预测评估^[52](图3)。根据碳排放预测结果和城市低碳发展要素分析,纽约市政府可以更加具有针对性地对城市未来发展路径提出指导和设计,并利用预测技术验证低碳建设路径的减碳效果和可行性。

3.3 英国伦敦:利用碳核算结果构建低碳规划评估指标体系

伦敦市政府颁布《大伦敦规划2021》(The London Plan 2021),将2050年实现“零碳城市”的目标作为低碳城市发展目标^[53]。为保证“零碳城市”目标顺利实现,伦

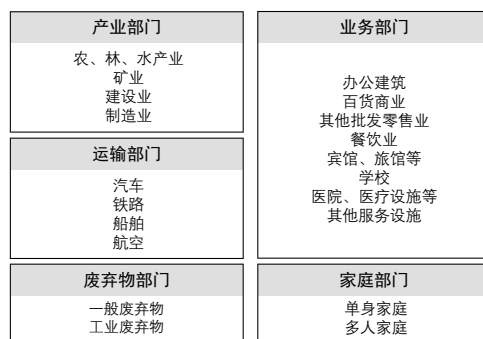


图2 东京市消费部门碳核算框架

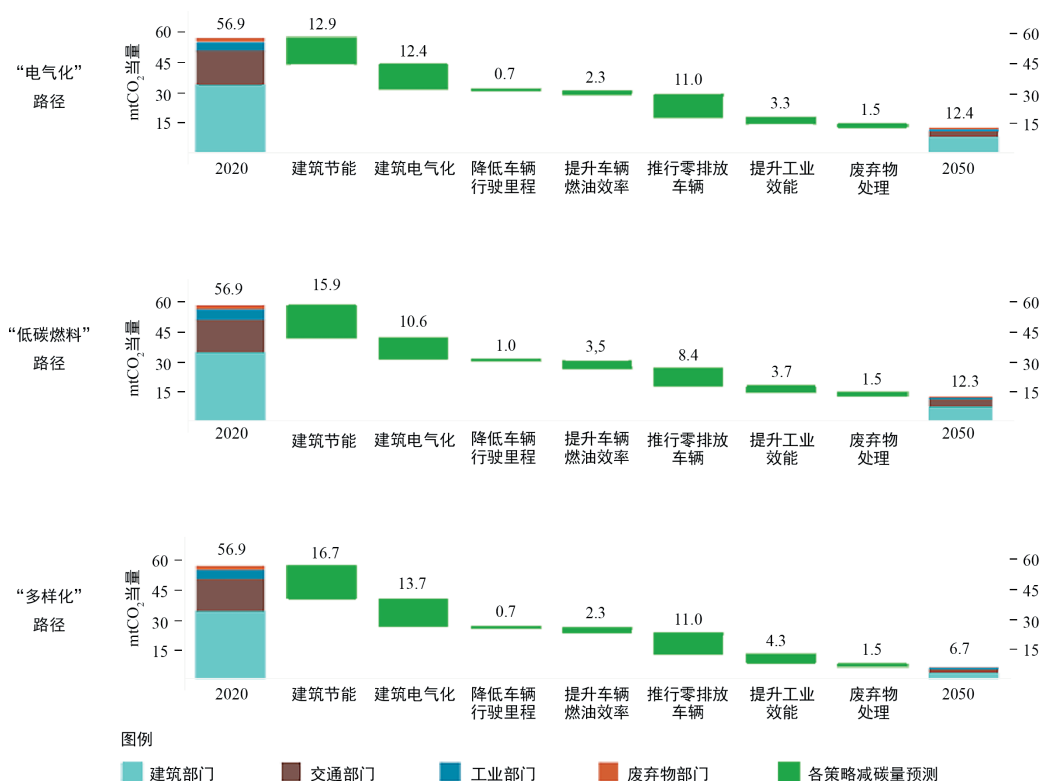


图3 纽约市低碳建设路径碳减排措施和减排量预测

敦市政府在规划的实施过程中充分利用碳核算方法，对规划内容进行指导和补充的同时，对规划的实施性进行监测，并构建了大伦敦地区的空间规划实践框架体系（图4）。这一框架体系首先通过规划导则提出具有针对性的补充条文，并规范化部分部门和行业的碳核算方法；在此基础上，伦敦市政府通过制定温室气体排放清单，以年度监测报告的形式反馈规划实施效果和各部门碳排放的变化情况。通过这种动态监测的方式，保证《大伦敦规划2021》及其下位地方规划的实施效果，并根据报告结果对规划进行动态修订。

在年度监测报告的编制过程中，伦敦市政府将《大伦敦规划2021》中提出24项关键绩效指标（KPI: Key Performance Indicator）作为论证规划实施情况和政策可行性的重要依据。如表1所示，其中与应对气候变化相关的指标共有8项，主要涉及建设用地布局、蓝绿空间规模、能源利用、建筑碳排放和废弃物处理5个领域。为衡量城市低碳建设实施效果，伦敦市政府采用了基于经济投入产出一生命周期评价模型的消费端碳核算方法，利用投入产出数据对建筑等领域碳排放进行精确计算。通过将重要领域的碳核算数据作为低碳建设评估中的绩效指标，能够准确衡量低碳规划的可行性，并指导关键领域的低碳建设路径。

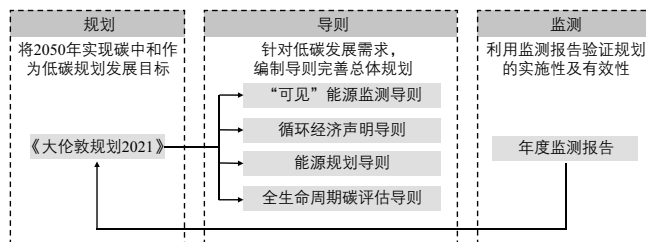


图4 面向“零碳城市”目标的伦敦市空间规划实践框架

3.4 经验启示

通过对国际低碳城市规划经验的总结和梳理，许多国家和地区都将碳核算作为城市规划中重要的一环，并通过不同的方式将其应用于规划的编制及实施过程中。其中东京市作为率先将IPCC模型根据城市需求进行优化并应用于规划过程中的城市，其城市碳核算框架的构建方法有较强的借鉴价值，其中碳核算部门划分方式与各部门核算方法为探究城市空间活动碳核算体系奠定了重要基础。纽约市规划部门则将碳核算方法应用于城市规划的编制过程中，在最新的政府报告中创新性的利用碳核算数据对未来低碳规划路径进行预测。这一实践经验和方法具有一定普适性，可以与我国国土空间规划相结合，预测并构建适用于中国的“碳中和”实施

表 1 伦敦年度检测报告中应对气候变化相关指标

关键绩效指标	监测目标	监测内容
充分利用存量用地	新建建筑利用存量用地开发比例不低于 96%	存量规划范围内的规划审批情况和实施规划后减少的存量空间面积
避免开放空间减少	新建开发项目不占用开放空间	开放空间内的规划审批情况和实施规划后减少的开放空间面积
保护自然生态栖息地	重要生态保护区面积不减少	自然保护区内的规划审批情况，以及实施规划后减少的绿地面积
增加废弃物资源化率；避免废弃物填埋	废弃物循环利用达到 45% 以上； 2026 年取消垃圾填埋	各类型废弃物处理方式和处理量
减少城市发展过程中的碳排放	实现住宅建筑零碳排放；实现新建项目零碳排放	建筑碳核算结果
提高可再生能源利用率	2026 年可再生能源达到 8 550 GWh	城市能源使用情况
提升城市绿化率	增加城市中心活动区屋顶绿化面积	城市遥感图像中城市中心区绿地比例
改善城市水网	恢复 25 km 河道长度	城市内河流长度

路径。除此之外,伦敦市政府颁布的《大伦敦规划 2021》中,明确提出了“规划—导则—监测”的大伦敦地区空间规划实践框架,将碳核算方法应用于规划的监测过程中。随着我国城市体检的全面开展,通过对伦敦市规划实践经验的分析,可以为我国修订面向“双碳”目标的国土空间规划评估指标体系提供参考。

4 碳核算方法在国土空间规划中的应用路径

4.1 基于国土空间要素开展碳核算分析和情景预测

4.1.1 城市空间活动碳核算框架构建

碳核算是衡量城市低碳发展水平,监测城市“双碳”实施情况的重要方法,目前主要应用于国土空间规划编制前期基础数据的收集和后期监测评估阶段。现阶段对于城市碳核算研究多以能源和经济活动数据为基础,对市域范围内的碳排放总量进行核算。但多数城市碳核算方法无法与国土空间规划基础数据直接关联,难以在规划编制中直接使用^[24]。为增强国土空间规划体系与碳核算方法的耦合性,笔者采取城市发展建设相关的空间活动量值作为基本参数,探究与国土空间规划紧密结合的城市碳核算框架构建方法。为与现行碳核算体系相衔接,明确核算方法采用城市生产端碳核算方法,核算范围涵盖城市边界内的直接碳排放与电力输配调度、区域供暖等能源活动产生的间接碳排放。在核算框架构建过程中,以国际通用的 IPCC 模型为基础,将各类能源活动与空间活动相衔接,进而转译为承载能源消费活动的国土空间相关要素(图 5)。由此,通过能源活动向空间活动的转译,完成 IPCC 温室气体排放清单与国土空间规划体系的相互衔接,为构建国土空间要素碳核算方法提供支撑。

4.1.2 基于核算框架构建国土空间要素碳核算与情景预测模型

为增强碳核算体系与国土空间规划间的耦合性,保证核算结果与国土空间规划体系直接相衔接,可以依托空间活动碳核算框架构建基于国土空间要素的碳核算模型。在这一过

程中,首先以核算转译框架为依据,提取城市空间活动碳核算主要要素(图 6)。其中常住人口规模、化石燃料燃烧碳排放系数、各类型植被碳汇系数等作为城市碳核算过程中重要的基础数据,被应用于各部门的碳核算过程中,因此并未在图中单独列出。其次,结合城市碳排放结构特征和国土空间规划的编制需要,将核算要素进一步总结为基于国土空间要素的城市碳核算因子库。最后,以城市碳核算方法为基础,叠加关键因子,构建城市各领域国土空间要素碳核算模型。利用该模型可以在城市碳核算过程中减少对于能源消耗数据的依赖,转而利用空间活动数据进行碳核算,明确承载碳排放的城市用地类型,将碳核算结果与国土空间要素直接关联,为国土空间规划的编制与评估提供支撑。但这一核算体系仅将“范围 1 + 范围 2”作为城市碳核算范围,不包括城市边界外材料生产、交通运输等能源活动所产生的其他间接碳排放。现阶段,部分城市和地区已经将这一核算体系应用于城市发展建设过程中。其中江苏省、福建省部分城市基于空间活动数据构建国土空间总体规划温室气体核算模型,涵盖建筑、工业、交通、碳汇 4 个领域,并应用于城市总体规划碳排放核算和国土空间总体规划碳达峰研究中,初步验证了模型的有效性和可行性^[23]。此外,威海市在国土空间规划编制过程中利用空间活动数据和相关用地碳排放强度数据,模拟计算出城市碳排放布局情况,清晰描述市域范围内各区域碳排放强度和变化情况。以此为依据,提出了翔实准确的“双碳”目标实施路径和空间约束关键指标^[24]。

随着规划实践的逐步深入,碳核算方法不仅作为衡量城市低碳发展水平的监测技术,还被应用于城市碳排放预测模型的构建过程中。纽约等城市利用 IPCC 模型或投入产出模型对城市碳排放情况进行情景预测,计算各减碳策略对城市碳排放的影响情况,指导低碳规划编制。但现阶段的预测方法大多以城市人口、产业、经济等要素为依据,其中部分计算方法较为复杂,数据难以获取且与国土空间关联性较弱。因此,笔者提出将面向国土空间要素的碳核算方法进一步拓

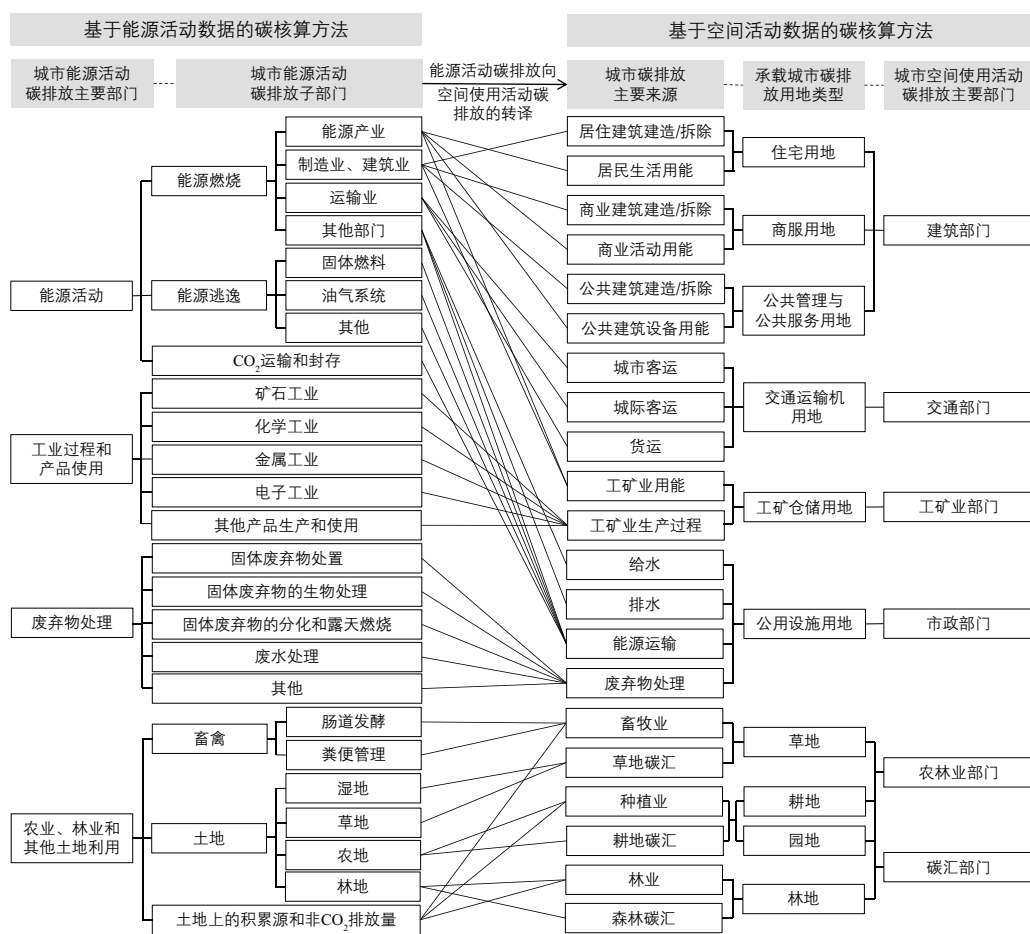


图5 基于空间活动数据的城市碳核算框架转译图

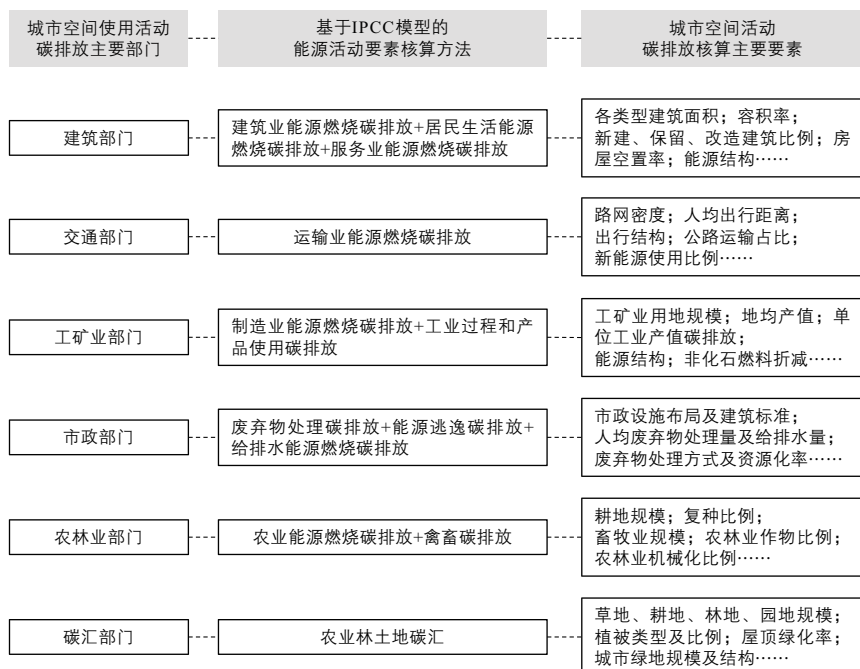


图6 基于城市空间活动的碳核算主要要素提取

展,依托神经网络等人工智能算法构建城市碳排放预测模型。这一预测模型与国土空间要素紧密衔接,能够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预测,并清晰反映城市空间规划策略在各碳排放领域的减碳效果。但城市碳排放的影响因素复杂,难以作出准确的唯一结果预测。为提升预测结果的应用性,可以根据能源结构发展情况引入多情景模拟预测技术,进行多情景下的可能结果预测。在这一过程中,首先通过城市碳排放结果特点识别关键情景要素,分析各要素驱动力;然后根据分析结果构建情景逻辑,设计各情景参数。现阶段较为常用的预测方法是将城市未来发展情景划分为基准情景、低碳情景和高碳情景,并利用情景模拟技术根据不同情景的要素变化特征预测城市各领域碳排放和碳汇变化情况,为“双碳”目标的实施路径提供参考。

4.2 基于碳核算分析开展低碳城市专项评估和动态监测
4.2.1 低碳城市专项评估指标体系构建

开展低碳城市专项评估是碳核算方法助力国土空间规划面向“双碳”目标实施的关键技术路径。低碳城市专项评估作为辅助规划决策,保障减碳策略落实的重要手段,需要以碳核算方法为基础,对城市关键部门的碳排放情况进行监测,并构建低碳城市专项评估指标体系。这一过程中以现行的指标体系为基础,筛选《国土空间规划城市体检评估规程(试

行)》和《2022年城市体检指标体系》中低碳建设相关指标,初步构建低碳城市专项评估基础指标。随着面向国土空间要素的碳核算方法逐步建立和完善,依据这一核算方法能够将建筑部门碳排放降低比例、工业部门碳排放降低比例、交通部门碳排放降低比例、新增城市碳汇储量、城市居民电气化率、可再生能源利用率等作为补充指标(表2)。指标体系的建立可以定量评估城市发展的减碳潜力和成本效益,平衡城市经济发展和低碳建设需求,综合评估城市低碳发展建设水平,为国土空间规划的减碳策略制定提供新的技术路径。

4.2.2 构建城市碳排放动态监测体系

低碳城市专项评估体系可以进一步被应用于城市监测过程,并通过监测数据反馈低碳城市建设情况^[54]。但现阶段的研究和实践受城市碳核算方法的限制,监测结果大多以年度温室气体排放清单的形式进行反馈,无法与空间规划直接衔接。同时,受人口、经济等数据收集周期限制,监测结果局限于对数据收集时城市碳排放情况的静态分析^[55]。为此,笔者提出以面向国土空间要素的碳核算方法为基础,建立对低碳城市评估关键指标的动态监测模型,实现城市监测理念由静态向动态的转变。在这一过程中,可以通过对国土空间要素、居民行为活动、能源活动情况等数据的监测和收集,对城市碳排放核心部门进行实时核算,并依据评估指标体系对

表2 基于碳核算的低碳城市专项评估补充指标

指标名称	解释	数据分解
建筑部门碳排放降低比例/%	市辖区内住宅建筑、商业建筑、公共服务建筑碳排放量较上一年度降低比例	(1) 城市常住人口变化情况 (2) 人均生活能源消耗量、人均商业及公共服务能源消耗量 (3) 各类型能源碳排放系数 (4) 各类型建筑面积变化情况 (5) 单位建筑面积建造碳排放量
工业部门碳排放降低比例/%	市辖区内工业能源消耗碳排放和工业生产过程碳排放总量较上一年度降低比例	(1) 一、二、三类工业用地面积变化情况 (2) 各类型工业用地单位面积能源活动碳排放量 (3) 水泥、石灰、钢铁、电石等生产部门产量变化情况 (4) 各类工业生产活动碳排放系数
交通部门碳排放降低比例/%	市辖区内城市客运、城际客运、货运碳排放量较上一年度降低比例	(1) 城市常住人口与人均出行次数变化情况 (2) 城市路网密度变化情况 (3) 单程出行距离变化情况 (4) 居民出行方式分担率变化情况 (5) 货运交通方式分担率变化情况 (6) 总货运周转量变化情况 (7) 各交通方式单位距离能耗强度和能源碳排放系数
新增城市碳汇储量/万吨	市辖区内新增加的碳汇量	(1) 市辖区内各类型绿地与植被覆盖新增面积 (2) 各类型绿地碳汇系数
城市居民家庭电气化率/%	市辖区内电气化家庭户数量占家庭户总数的百分比	(1) 城市常住人口中电气化的家庭户数量 (2) 城市常住人口的总家庭户数量
可再生能源利用率/%	市辖区内可再生能源消耗占总能源消耗量的百分比	(1) 可再生能源消耗量 (2) 总能源消耗量

低碳城市建设情况进行综合评价。同时,依据城市发展和总体规划的变化对相关数据进行调整,实现对低碳城市发展建设情况的动态监测。通过动态监测可以检验相关空间规划策略的减碳效果,缩短低碳城市评估周期,实现对国土空间规划的动态反馈和调整。

5 结语

实现“碳达峰、碳中和”是一项重要的国家发展举措,同时对国土空间规划编制提出了新的要求。碳核算方法作为城市低碳发展过程中重要的监测和调控技术,在国土空间规划体系中对该技术方法的科学应用是实现“双碳”目标的重要路径之一。笔者通过对已有文献的梳理和国际经验的分析思考,总结出构建面向城市消费部门的碳核算体系,基于碳核算方法构建低碳城市多情景预测模型,利用碳核算结果构建低碳规划评估指标体系等碳核算方法在国土空间规划中的应用路径。在此基础上,结合我国国土空间规划编制和实施特征,提出基于国土空间要素开展碳核算分析和情景预测,基于碳核算分析开展低碳城市专项评估和动态监测,以为国土空间规划助力实现“双碳”目标提供一些思考和启发。 **UPI**

注:文中未注明资料来源的图表均为作者绘制。

参考文献

- [1] LYNN J, PEEVA N. Communications in the IPCC's sixth assessment report cycle[J]. *Climatic change*, 2021, 169 (1): 18.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 戴星翼, 陈红敏. 基于低碳发展的城市规划[J]. *上海城市规划*, 2014(5): 8-12.
- [5] 顾朝林, 谭纵波, 刘宛, 等. 气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展[J]. *城市规划学刊*, 2009(3): 38-45.
- [6] PETERS G P. From production-based to consumption-based national emission inventories[J]. *Ecological economics*, 2008, 65(1):13-23.
- [7] GUAN D, MENG J, REINER D M, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems[J]. *Nature geoscience*, 2018, 11(8): 551-555.
- [8] 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.
- [9] LIN B, SUN C. Evaluating carbon dioxide emissions in international trade of China[J]. *Energy policy*, 2010, 38(1): 613-621.
- [10] 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.
- [11] HOORNWEG D, SUGAR L, GOMEZ C L. Cities and greenhouse gas emissions: moving forward[J]. *Environment & urbanization*, 2011, 23(1): 207-227.
- [12] FENG K, DAVIS S J, SUN L, et al. Outsourcing CO₂ within China[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2013, 110(28): 11654-11659.
- [13] YANG Z, WEI T, MOORE J C, et al. A new consumption-based accounting model for greenhouse gases from 1948 to 2012[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 133(10): 368-377.
- [14] HU Y, LIN J, CUI S, et al. Measuring urban carbon footprint from carbon flows in the global supply chain[J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(12): 6154.
- [15] MENG J, MI Z, YANG H, et al. The consumption-based black carbon emissions of China's megacities[J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 161: 1275-1282.
- [16] 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.
- [17] 张梅, 黄贤金, 揣小伟. 中国城市碳排放核算及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(9): 13-19.
- [18] 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.
- [19] 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(7): 71-78.
- [20] JAYANTHAKUMARAN K, LIU Y. Bi-lateral CO₂ emissions embodied in Australia-China trade[J]. *Energy policy*, 2016, 92: 205-213.
- [21] DU H, GUO J, MAO G, et al. CO₂ emissions embodied in China-US trade: Input-output analysis based on the emery/dollar ratio[J]. *Energy policy*, 2011, 39(10): 5980-5987.
- [22] WU R, GENG Y, DONG H, et al. Changes of CO₂ emissions embodied in China-Japan trade: drivers and implications[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 112: 4151-4158.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] SU Y, CHEN X, 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] LV 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.
- [29] LIU Q, SONG J, DAI T, et al. Spatio-temporal dynamic evolution of carbon emission intensity and the effectiveness of carbon emission reduction at county level based on nighttime light data[J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 362: 132301.
- [30] GATELY C K, HUTYRA L R, WING I S. Cities, traffic, and CO₂: a multidecadal assessment of trends, drivers, and scaling relationships[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2015, 112(16): 4999-5004.
- [31] LI X, XIE W, XU L, et al. Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM[J]. *Energy and buildings*, 2022, 266: 112136.
- [32] RACITI S M, HUTYRA L R, NEWELL J D. Mapping carbon storage in urban trees with multi-source remote sensing data: relationships between biomass, land use, and demographics in Boston neighborhoods[J]. *Science of the total environment*, 2014, 500/501: 72-83.
- [33] 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.
- [34] 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, 中国重庆, 2019.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 叶祖达. 碳排放量评估方法在低碳城市规划之应用 [J]. 现代城市研究, 2009, 24(11): 20-26.
- [39] 郭尚霖, 孙一民. 广州地区街道微气候模拟及改善策略研究 [J]. 城市规划学刊, 2016(1): 56-62.
- [40] 黄建, 罗淑湘, 史军, 等. 低碳社区碳排放核算及减排路径研究 [J]. 建筑技术, 2019, 50(8): 1018-1022.
- [41] LIU C, HUANG S, XU P, et al. Exploring an integrated urban carbon dioxide (CO₂) emission model and mitigation plan for new cities[J]. Environment and planning b: urban analytics and city science, 2018, 45(5): 821-841.
- [42] ZHANG X, YAN F, LIU H, et al. Towards low carbon cities: a machine learning method for predicting urban blocks carbon emissions (UBCE) based on built environment factors (BEF) in Changxing City, China[J]. Sustainable cities and society, 2021, 69: 102875.
- [43] HUO T, MA Y, XU L, et al. Carbon emissions in China's urban residential building sector through 2060: a dynamic scenario simulation[J]. Energy, 2022, 254: 124395.
- [44] BHATT H, DAVAWALA M, JOSHI T, et al. Forecasting and mitigation of global environmental carbon dioxide emission using machine learning techniques[J]. Cleaner chemical engineering, 2023, 5: 100095.
- [45] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022 年城市体检指标体系 [EB/OL]. (2022-07)[2022-12-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/09/content_5700178.htm.
- [46] 中华人民共和国自然资源部. 城市空间规划城市体检评估章程 (试行) [S]. 2021.
- [47] 金昱. 国际大城市交通碳排放特征及减碳策略比较研究 [J]. 国际城市规划, 2022, 37(2): 25-33. DOI: 10.19830/j.upi.2021.404.
- [48] 蔡琴, 黄婧, 齐晔. 中外低碳城市规划特征比较 [J]. 城市发展研究, 2013, 20(6): 1-7.
- [49] 白栋. 特大城市低碳空间策略的经验借鉴——以伦敦、东京、纽约为例 [J]. 南方建筑, 2013(4): 13-17.
- [50] 東京都環境局. 環境先進都市・東京に向けて [EB/OL]. (2021-11)[2022-01-03]. https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/plan/white_paper/a_sustainable_city.html.
- [51] 計画課東京都環境局気候変動対策部. 都における最終エネルギー消費及び温室効果ガス排出量総合調査 [EB/OL]. (2019-04)[2023-06-06]. https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/zenpan/emissions_tokyo.files/2019gaiyo.pdf.
- [52] City of New York. Pathways to Carbon-Neutral NYC[EB/OL]. (2021-04)[2022-01-01]. <https://www.nyc.gov/assets/sustainability/downloads/pdf/publications/Carbon-Neutral-NYC.pdf>.
- [53] London City Hall. The London Plan 2021[EB/OL]. (2021-03)[2022-01-03]. <https://www.london.gov.uk/programmes-strategies/planning/london-plan/the-london-plan-2021-table-contents>.
- [54] 鲍海君, 张瑶瑶, 吴绍华. 低碳国土空间规划: 机理、方法与路径 [J]. 中国土地科学, 2022, 36(6): 1-10.
- [55] 席广亮, 甄峰. 基于大数据的城市规划评估思路与方法探讨 [J]. 城市规划学刊, 2017(1): 56-62.
- (上接 80 页)
- Newham[D]. London: University College London, 1977.
- [24] HAMNETT C. Improvement grants as an indicator of gentrification in inner London[J]. Area, 1973, 5(4): 252-261.
- [25] HAMNETT C. Gentrification and the middle-class remaking of inner London, 1961-2001[J]. Urban studies, 2003, 40(12): 2401-2426.
- [26] LEVY D K, COMEY J, PADILLA S. In the face of gentrification: case studies of local efforts to mitigate displacement[J]. Journal of affordable housing & community development law, 2007: 238-315.
- [27] GHAFARI L, KLEIN J L, ANGULO BAUDIN W. Toward a socially acceptable gentrification: a review of strategies and practices against displacement[J]. Geography compass, 2018, 12(2): e12355.
- [28] United Nations. Global Strategy for Shelter to the Year 2000[M]. New York: United Nations General Assembly, 1988.
- [29] UN-Habitat. Enabling shelter strategies: review of experience from two decades of implementation[M]. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2006.
- [30] United Nations. Habitat agenda[M/OL]. Istanbul: United Nations Conference on Human Settlements (Habitat II). (1996)[2024-02-05]. <https://www.un.org/en/conferences/habitat/istanbul1996>.
- [31] United Nations. New urban agenda [M/OL]. Quito: United Nations Conference on Human Settlements (Habitat III). (2016)[2024-02-05]. <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda/>.
- [32] 楼继伟. 新时代中国财政体系改革和未来展望 [J]. 比较, 2023, 124: 1-10.

(本文编辑: 王枫)

(本文编辑: 王暄)