

城市尺度碳排放核算体系及其应用的研究

辛莉¹ 韩东梅² 杨奕晨¹ 马伟芳^{1*}

1 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083

2 北京节能环保中心, 北京 101160

[摘要]城市碳排放核算作为了解城市碳减排潜力的第一步, 已经初步形成框架清晰、方法成熟的完整系统, 其应用逐步多元化, 并上升到影响低碳发展转型的战略高度。此文系统分析了核算体系中指标清单及范围、数学方法模型、数据获取方式等环节实施方法, 探讨了碳核算对于城市碳排放特征评估、驱动因素识别、减排措施及路径制定等方面应用的影响。研究表明: 指标交互性、数据质量是影响核算准确性的重要因素, 未来发展趋势将是多种模型的融合及系统性的碳平衡验证。

[关键词]城市碳核算; 核算模型; 数据收集; 评估框架

DOI: 10.33142/nsr.v1i1.12359

中图分类号: X196

文献标识码: A

Research on Urban Scale Carbon Emission Accounting System and Its Application

XIN Li¹, HAN Dongmei², YANG Yichen¹, MA Weifang^{1*}

1 College of Environmental Science & Engineering, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China

2 Beijing Energy Conservation and Environmental Protection Center, Beijing, 101160, China

Abstract: As the first step to understand the potential of urban carbon reduction, urban carbon emission accounting has initially formed a clear framework and mature methods for a complete system. Its application is gradually diversified and has risen to a strategic height that affects low-carbon development and transformation. This article systematically analyzes the implementation methods of indicator lists and ranges, mathematical methods and models, data acquisition methods and other links in the accounting system, and explores the impact of carbon accounting on the evaluation of urban carbon emission characteristics, identification of driving factors, emission reduction measures and path formulation. Research shows that indicator interactivity and data quality are important factors affecting the accuracy of accounting, and the future development trend will be the integration of multiple models and systematic carbon balance verification.

Keywords: urban carbon accounting; accounting models; data collection; evaluation framework

城市低碳转型迫切需要将气候变化政策与城市发展规划结合起来。大多数国家计划到 2050—2070 年实现碳中和, 即相对“零排放”^[1]。我国作为全球排放量最大的发展中国家, 处于能源消耗、碳排放量的上升期, 随着快速城市化过程推进, 城市碳排放量占比达 60%~80%^[2]。城市作为人类生产生活的主要中心, 不仅是能源消费和碳排放的主要空间载体, 也是实现碳中和的最重要的舞台。因此城市碳排放核算, 即量化表述碳排放变化趋势对于实现碳中和具有重要意义。

摸清城市碳排放底数是开展城市低碳转型工作的基础。从全球看, 城市碳核算研究可以划分为三个时期, 初始期(1988—2006 年)主要关注实地监测、遥感等碳排放检测方法, 集中在交通领域; 新兴期(2007—2014 年)基于检测技术、能源消费量建立的碳排放核算模型得到广泛应用, 大多数用于行业碳足迹分析; 繁荣期(2015 年至今)研究增长点在于城市碳排放核算及其驱动因素, 以及在城市政策规划制定方面的应用^[3]。我国 2011 年编制了《省级温室气体清单编制指南(试行)》, 并且陆续颁布

了近 30 个国家省部级的行业碳排放标准, 而城市层面的核算指南至今尚未出台。核算结果差异会影响城市低碳规划制定、增大了减排目标分解落实难度^[4]。国务院发布了《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》(发改环资〔2022〕622 号), 要求完善统一规范的碳排放统计核算体系。而且考虑到当今城市减少碳排放的策略已经从技术减排上升到低碳发展转型的战略性高度^[5-6], 亟须开展城市尺度碳排放核算体系及其应用的研究。

本研究围绕城市碳排放核算体系的各个环节, 及其在城市碳排放特征评估、驱动因素识别、减排措施及路径制定等方面应用展开讨论, 旨在辨析城市碳核算体系的各种观点及未来发展趋势, 一起推进中国城市碳排放的核算工作。

1 碳排放核算体系

本研究系统梳理了城市碳排放核算体系的各个环节, 即核算的清单范围边界、方法模型、数据收集等三部分内容(见图 1)。

1.1 核算清单、范围及边界

核算清单、范围及边界是从不同角度描述核算体的碳

排放情况。政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的清单方法学指南是各国碳排放核算范式与框架构建的重要参考^[7]。《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》（以下简称《IPCC 指南》）清单中将经济部门划分为能源、工业过程和产品使用、农业、林业和其他土地利用、废弃物等 5 大部分。世界资源研究所/世界可持续发展工商理事会（WRI/WBCSD）在清单基础上对排放源进行的界定和描述、将城市温室气体排放划分为三个范围，其中范围 1 包括天然气、液化石油气等固定燃烧，汽油、柴油等移动燃烧，矿井甲烷、空调氢氟碳化物等无组织排放，以及工业过程和现场制造过程中释放的二氧化碳等四类产生的直接温室气体排放；范围 2 指电力、热力产生的间接温室气体排放；范围 3 为运输、废弃物处理等其他间接温室气体排放。地方政府永续发展理事会（ICLEI）发布的《ICLEI 城市温室气体清单指南》，从排放源的管理角度提出核算边界，即在城市碳核算中所设定的界限或边界，如行政边界、经济边界或其他界定方式，用于界定哪些碳排放源和活动应纳入到核算中。IPCC、ICLEI、WRI/WBCSD 的分类方法得到机构和学者的广泛认可。从组成要素看，核算的清单、范围及边界这三者所属的核算主体是一致的，通过清单编制、范围确定、边界划分来确定碳排放指标。三者之间的区别在于：清单是对城市各个行业、部门或活动的碳排放情况记录和统计，范围决定了哪些行业或部门纳入到核算中，边界则是用来界定核算的范围和边界。除这三类主流方法外，文献研究中还有内部排放、核心外部排放和非核心排放，内部过程排放、上游过程排放和下游过程排放等多种分类方法^[4]。在实际应用中，并不会刻意强调这些概念的不同，而是根据核算目的，选择合适碳排放主体的清单、范围及边界。

不同城市具有明显异质性，通常根据产业结构、地理资源禀赋、经济发展程度、居民消费习惯等城市特征，开展研究具有倾向性的核算。这是由于细致、全面的核算意味着程序复杂、数据量大，特别是在碳排放数据不齐全的情况下，全面核算实施具有一定难度。以厦门为例，核算了长途汽车（客货）、铁路、海运、航空等跨境运输，城市主要进口材料（燃料、水泥、水和食品），工业流程和产品（只涉及玻璃生产和电子行业的排放），农业活动（粪肥管理、肠道发酵、水稻栽培和种植土壤）中范围 1 和范围 2 的排放量，以及跨界交通和城市主要进口材料的范围 3 的排放量^[8]。同样是基于 IPCC 范围 1+2+3 的核算，美国丹佛、阿瓦达等 8 个城市的工业指标只是考虑了水泥的生产^[9]。对于上海城市碳排放研究，分为两大类，一是工业、交通、第三产业、居民生活及其他，共 5 个类别的人为活动中能源消费产生的直接碳排放；二是范围 3 中住宅、非住宅、铁路、道路、水管和煤气管道等 6 种基础设施，以及 10 种建筑材料的隐含碳排放^[10]。美国西雅图从行业角

度，考虑了交通（客运货运使用的汽油和柴油）、建筑（建筑物直接使用天然气供暖和热水）和垃圾处理领域等三类碳排放^[11]。伊朗开发的排放清单包括车辆、住宅、商业和公共服务、加油站、工业、能源转换行业（发电厂、炼油厂和石化企业）、公交终点站、机场和铁路、工业和燃料站等重点碳排放行业^[12]。这些研究核算内容存在差异，但通常核算主涵盖了 80% 以上的碳排放。因此，这种具有城市倾向性的核算，对于城市特征识别是有效的，而不能直接用于不同城市间碳排放量的对比。

相对于清单和范围的清晰，当前城市核算边界也在进一步细化。通常称之为“碳泄露”或称为跨区域碳排放活动的核算。城市作为资源交汇地，大量消耗能源的生产活动发生在城市外界、而产品的消费活动发生在城市内部。对美国 8 个城市碳排放评估表明，受行政边界的限制，对于城市材料和能源的碳排放量总体影响低估了 47%^[9]。当前已经有研究尝试将地理边界和运营控制设定城市边界，如电网跨省市供电、将飞机燃料碳排放量分配给到达地、离港地各 50%^[9]。关于明确城市间的碳排放权责分配，学者基本都持双方分摊的观点，然而差异在于分摊的多少。

为了能有效对比，通常会选用相同指标对城市群进行分析。这类碳排放核算主体往往具有普适性，从清单看，以能源、交通、建筑、和工业为主；范围通常包括直接、间接碳排放；核算边界以行政边界为主，通常采用人均碳排放量、单位 GDP 碳排放量等指标衡量。因此，核算清单、范围及边界作为核算主体的识别，对于碳核算结果有直接的影响；城市间的碳排放责任需要进一步清晰界定。

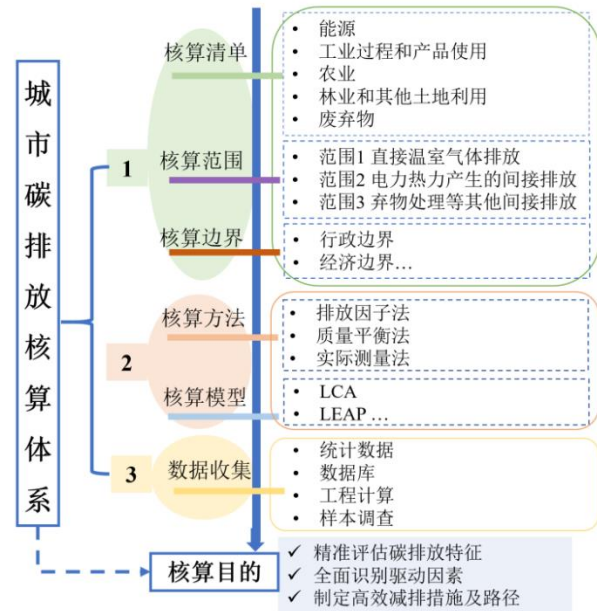


图 1 城市碳排放核算体系示意图

1.2 核算方法及数学模型

对于碳排放主体的核算方法可归纳为排放因子法

(Emission-Factor Approach)、质量平衡法(Mass-Balance Approach)、实际测量法(Experiment Approach)等3类,通常采用数学模型进行不同尺度大规模且复杂的碳排放核算(图2)。

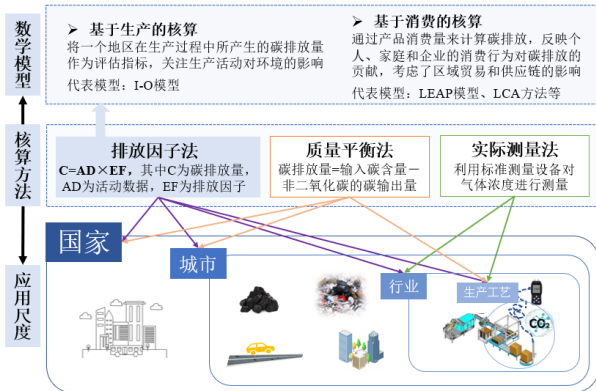


图2 城市碳排放核算基本方法及其适用范围

排放因子法具有可操作性强、数据获取难度低的优点。排放因子取值与能源类型、质量和燃烧条件相关,通常采用《IPCC 指南》、行业标准或专业机构的建议值^[13]。事实上,直接采用国家/省级清单上的缺省值可能会忽略本地特征,常采用蒙特卡罗方法计算活动数据和排放因子的不确定性。质量平衡法通过测量物料的进出量以及不同阶段的转化率计算碳排放量。该方法适用于相对独立整体的碳排放量核算和局部生产过程的核算^[14]。实际测量法利用标准测量设备对气体浓度进行测量,受样品采集和处理流程中样品代表性、测定精度等因素干扰。该方法主要针对特

定排放源的碳排放核算,如工业生产过程、交通车辆尾气、农业化肥畜禽饲养等层面^[15]。实际测量法在城市尺度应用很少、多用于获取某一参数值。综上,排放因子法是目前城市尺度碳排放核算应用最广泛的方法。

为了提升碳排放核算的准确度和自动化程度,学者们开发了多种模型提高计算效率,以满足不同的碳排放核算需求。数学模型大多以排放因子法为底层逻辑,基于生产、消费的两类视角开展计算,本研究总结了常见模型的优缺点及适用范围(表1)。生产侧核算关注生产活动对环境的影响,探讨能源部门与宏观经济之间的相互作用,不区分最终用途的能源消费。模型一般采用的变量包括宏观经济指标(国内生产总值、就业率和价格指数等)、气候条件、人口状况等,常用模型有投入产出法(input-output, I-O)。I-O法通过追踪物质和能源在经济系统中的流动,揭示不同经济部门和活动的碳排放水平^[16-18]。消费侧核算依据底层能源活动消耗量计算碳排放,反映个人、家庭和企业的消费行为对碳排放的贡献,通常划分为建筑、交通、工业、废弃物等不同维度^[19],常用模型有长期能源替代规划系统模型(Long-range Energy Alternatives Planning, LEAP)^[20-25]、生命周期算法(Life-cycle assessment, LCA)^[26-29]。由于城市间存在产品、能源的流通,因此使用基于消费的方法,可以克服与地域库存量和纯地理生产核算有关的限制。

模型的核算主体来自于核算清单、范围及边界,其精确性受到数据可获得性、数据质量的影响;本身作为核算的工具和手段,对于碳核算结果并无影响。由于计算的复杂性,越来越多的研究趋向于多方法、多模型的耦合。

表1 常用碳排放核算模型

模型	时间/开发者	计算公式	优点	缺点	应用
I-O 模型	1930s, 俄罗斯经济学家瓦西里·里昂蒂耶夫	$A = [a_{ij}], a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j}$ <p>A为直接消费系数矩阵,即a_{ij}为第i部门满足第j部门产出单位增加值的产品投入;X_{ij}是i部门到j部门的输入;X_j为部门j的总产出</p>	基于投入产出表,计算简便快捷,不存在截断偏误	无法详细说明碳排放与技术变量、能源关系;投入产出表编制时间长、更新频率低,仅测算特定年份	特征识别
LEAP 模型	1980s, 斯德哥尔摩环境研究所和波士顿大学联合开发	$E = \sum_i \sum_j A_{n,j,i} \times L_{n,j,i}$ $C = \sum_i \sum_j \sum_n A_{n,j,i} \times L_{n,j,i} \times EF_{n,j,i}$ <p>E为能源消费总量, A为活动水平, L为能耗强度, C为终端能耗产生的碳排放量, n为能源类型, i为活动部门, j为终端能耗设备, EF为碳排放系数</p>	基于消费端核算,数据结构灵活;通过“资源、转换、需求”三部分来实现能源从开发到需求的完整过程	基于现有技术和市场进行模拟和预测,忽略了新技术和政策的潜在变革	降碳措施及路径
LCA 方法	1990s, 联合国环境规划署	$C_s = \sum_{i=1}^n R_i \times EF_i$ $S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ <p>C_s为产品/材料/服务的碳排放量, R为消耗量, EF为碳排放系数, S表示全生命周期的碳排放, S₁、S₂、...S_n表示生命周期的所有阶段碳排放</p>	全面考虑具体技术对多种原材料、能源和废弃处理等过程影响	计算复杂度较高、数据获取困难	特征识别 降碳措施 路径

1.3 数据收集方法

在实际核算中，数据可得性是完成核算的重要条件。在城市尺度上，碳排放数据多来源于统计部门，统计数据具有可得性高、代表性强、操作便捷的优点，然而现有城市统计数据种类有限、很难完全满足研究需要。我国 183 个城市中一半以上的城市缺乏可公开获取的二氧化碳排放数据，只有北京、天津、上海等超大城市具有完整的能源平衡表和能源清单^[30-31]。数据来源不一致、质量低、缺乏关键信息等，为当前碳核算带来一定难度。

为了满足核算需求，学者通过数据库、工程计算、抽样调查等方式来获得更多数据。数据库是专业部门搜集大量专业类信息设置而成。美国能源信息管理局 1977 年成立的 EIA 数据库包括石油、天然气、煤炭、核能、可再生能源等能源的生产、消费、进出口和储备等方面数据。法国环境与能源管理局 2011 年的开发 TABULA，包括建筑能耗、交通运输、服务业、产业等方面的能源消费和碳排放数据。欧盟第七框架计划 2013 年资助成立的 the EXIOBASE 数据库包括全球范围内能源使用、二氧化碳排放量、就业人口等各个经济部门的生产和消费数据等相关指标。中国碳核算数据库 (CEADs) 涵盖全球、国家、省级、城市、县级等多尺度碳核算清单及社会经济与贸易数据。此外，有些专业软件，如 BIM 软件带有自创的功能数据库涵盖行业常见组件信息^[32]。工程计算，即基于设计标准、设定运行时间、历史天气条件的理论，结合大数据挖掘和分析技术进行能耗估算^[33]。如采用随机森林模型将珠江三角洲地区 2 座建筑物的数据作为初始训练集，以找到施工阶段碳排放与设计参数之间的关系，估计建筑活动对环境的影响^[34]。然而，这种方式存在不确定性，需要人工插入参数，拟值与测量值之间存在一定范围误差^[35]。样本调查，通过收集代表性原始数据，以调查样本代表城市范围活动水平。这种方法受样本质量干扰、一定程度上忽略了个体特征差异。如通过计算单位数量建筑的碳排放量、代表城市所有建筑碳排放量^[36]，利用遥感夜间灯光影像表征人类活动强度、用于城市空间碳排放研究^[10]。这些数据的获取，一定程度弥补了由于数据缺乏所带来的研究困难。然而，仍存在不同程度的误差。因此，在丰富数据来源的同时，科学简化难以搜集、或需要实测的生产活动参数，做到内容涵盖尽量全面，不舍弃重要数据也是一项重要手段。

2 碳核算体系应用

城市碳排放核算结果应用大致可以分为三类：城市碳排放特征评估、驱动因素识别、减排措施及路径制定（图 3）。这三者之间存在相互联系与递进关系，城市碳排放特征依据核算结果进行评估，了解城市的碳排放状况进而确定低碳目标；通过识别驱动因素找到碳排放主要来源，为制定低碳策略提供科学依据；探讨减排措施及路径为政策规划制定可行性建议，指导城市的低碳发展。

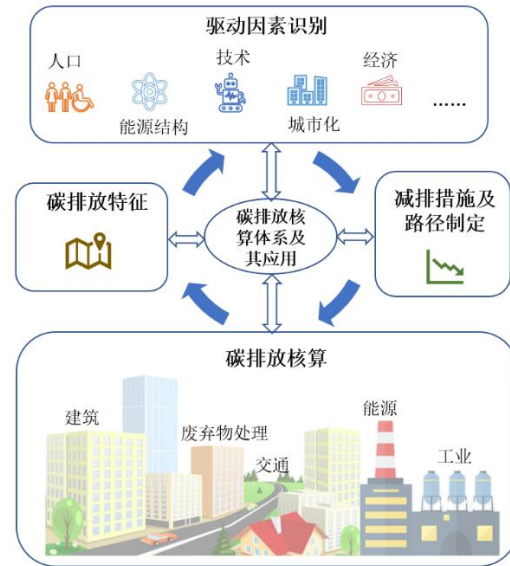


图 3 碳排放核算体系及其应用概念图

2.1 城市碳排放特征

城市碳排放特征是指城市居民、产业和交通等活动所导致的城市二氧化碳排放特点。评估城市碳排放特征可以了解不同城市的碳排放来源、及其分布特点，常进行多个城市对比评估、或单个城市特征识别。

多个城市间的比较常在同一核算清单、核算方法下完成，单个城市碳排放特征评估与核算的清单及范围紧密相关。由于城市人口、规模差异，通常采用碳排放强度、人均碳排放量、能源强度等效率指标，描述不同城市的碳排放特征。如 2016 年泰国兰芬人均碳排放量为 10.1 吨 CO₂，而布里拉姆仅为 3.8 吨^[31]。基于能源平衡表，从 47 个社会经济部门、17 种化石燃料和 9 种第一产业产品等方面评估了全国 24 个城市，结果表明以煤矿和重工业为主的城市人均碳排放量较高，如鸡西（22.84t）、呼和浩特（29.67t）、唐山（14.20t）等；位于偏远地区、处于欠发达阶段的城市如宿迁（1.18t）、南平（2.38t）、成都（2.53t）和武威（2.5t）等人均碳排放量较低^[37]。

单个城市的评估结果，由于采用了核算方法不同、数据来源不同，各类研究结果很难具有可比性。即使同一城市、结果也可能存在较大差异。同样是采用投入产出法，对北京的化石燃料、生物质、金属矿物、非金属矿物等 200 多种原料分析，结果显示建筑部门和非金属矿产占据城市的主导地位^[18]；而基于居民消费视角分析，间接排放量占大多数，特别是食住行通、教育娱乐^[38]。

当前对于城市碳排放特征评估已经拓展到空间形态。常借助于软件，如地理信息系统 (GIS) 工具分析建筑面积、人口密度、土地利用、道路结构等城市空间数据，可视化表达不同区域和空间单元的碳排放特征^[39]。

2.2 碳排放驱动因素识别

城市碳排放驱动因素的识别是在碳排放核算及特征

评估的基础上,解析碳排放影响因素的差异性。产生碳排放的能源消费活动受地域、经济、人口、技术、土地利用变化等外部环境的影响,常用 IPAT 模型、STIRPAT 模型、LMDI 模型、Kaya 等式等数学模型识别驱动因素(表 2)。

IPAT 模型用于识别人口、财富、技术等三大类因素对于城市碳排放的影响,可以扩展为 STIRPAT 模型,从城市化率、人均居住面积、居民消费水平、服务水平、能源强度、能源结构等更加具体的因素进行分析。STIRPAT 模型评估能源结构升级和能效提升是北京减排的关键驱动因素,即清洁能源消费比重每增加 1%、碳排放总量减少 0.54%,而能源强度每降低 1%,碳排放总量减少 0.53%^[40]。Kaya 等式主要用于识别社会、经济、能源等宏观影响因素对于碳排放的影响及其贡献。解析能源结构、能源强度、

经济产出、产业结构和人口等因素在城市演化过程中的表现^[45]。Kaya 等式可以进一步扩展为 LMDI 方法,将能源消费/污染物排放总量变化分解为各个因素贡献,并分析其相互作用。采用 LMDI 方法对 2000—2016 年中国 41 个行业碳排放的驱动因素分析,结果表明能源强度是降低 CO2 排放的主要指标,而碳强度、能源结构和产业结构的影响相对较小^[46]。LMDI 模型用于识别中国建筑业未来发展的主要驱动因素,估计发电、建筑存量调节和居住行为的贡献分别为 47.85%、14.24%和 13.68%^[47]。这些模型在描述排放特征方面具有明显的优势,但无法为低碳/零碳路径制定提供更具体的信息。

在实际应用中,不存在某一种驱动力分析方法绝对最优,需要根据实际情况进行选择。虽然这些模型描述了城

表 2 碳排放驱动因素识别模型

核算方法	定义	时间/开发者	计算原理与公式	优点	缺点	应用对象	文献
IPAT 框架 (Impact = Population × wealthy × technology)	揭示人口、富裕和技术三种不同驱动因素对环境的影响	1971, 美国斯坦福大学人口学家 Ehrlich 和 Holden	$I = PAT$ I 为环境压力, 一般用污染物排放或资源消耗来表示; P 表示种群大小; A 为经济财富因子; T 代表广义上的技术进步	简单易懂、可比性强	以影响因子与环境指标之间具有比例关系为前提, 不适用于驱动因素造成的非比例效应, 用于有限因素核算	国家, 城市	[18]
人口、富裕和技术的回归随机影响方法 (the method of stochastic impact by regression on population, affluence and technology, STIRPAT)	通过对 IPAT 模型取自然对数得到的多变量非线性方程	1994, 美国社会学家 Thomas Dietz 和 Eugene A. Rosa	$\ln I = a + b_1 \ln P + b_2 \ln A + b_3 \ln T + \ln e$ I、P、A、T 的含义同 IPAT 模型且可扩展为多个因素, a 为常熟项, b、c、d 分别为各因素的弹性系数, e 为随机扰动项	方便加入新指标和变量、进行多种方式变形, 探索社会经济和技术因素与能源消费之间的关系	只能反映变量对整体碳排放趋势的影响, 而无法区分各个因素的具体贡献	城市	[18, 40]
卡亚恒等式 (Kaya Identity, Kaya)	用社会、经济、能源等宏观影响因素之间关系以简单数学关系描述碳排放量变化	1989 年, 日本教授 Yoichi Kaya	$C = \frac{C}{F} \times \frac{F}{E} \times \frac{E}{G} \times \frac{G}{P} \times P$ C 为碳排放量, F 为化石燃料消耗量, E 为总能耗, G 为国内生产总值, P 为人口数量	数学形式简单、参数少、分解无残差, 计算简单, 以多因子形式清晰表达	只能解释碳排放量流量变化、无法解释存量变化, 得出政策建议具有模糊性和非理性	国家, 城市	[41]
对数平均迪氏指数 (Logarithmic Mean Divisia Index method, LMDI)	基于扩展的 Kaya 等式, 将能源消费/污染物排放总量变化分解为各个因素贡献, 并分析其相互作用	2004 年, 新加坡教授 B. W. Ang	(1) 加法分解法: $\Delta X_j = \sum_i [(Q_i^t - Q_i^0) / (\ln Q_i^t - \ln Q_i^0)] \cdot (\ln x_{ji}^t - \ln x_{ji}^0)$ (2) 乘法分解法: $D = \exp \left\{ \sum_i \frac{(Q_i^t - Q_i^0) / (\ln Q_i^t - \ln Q_i^0)}{(Q_i^t - Q_i^0) / (\ln Q_i^t - \ln Q_i^0)} \cdot (\ln x_{ji}^t - \ln x_{ji}^0) \right\}$ Q ^t 为 t 时间碳排放量; X _{ji} ^t 代表驱动分解因素; i 为主体所包含的部门或类型	乘法分解和加法分解可以相互转化, 细部门效应与总效应一致, 结果表达准确、无残差项	分析结果受数据质量和分解方案的影响较大; 无法考虑系统复杂度的变化	国家, 城市	[41-43]
灰色关联模型 (GRA 法)	由灰色系统理论发展而来的一个分支, 对受多个复杂因素影响的事物或者对象从系统观念出发做出综合分析和评价	中国教授邓聚龙	设定目标矩阵, 建立影响因子矩阵, 并进行标准化, 根据关联系数计算模型得到关联度计算模型 $R = (R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_m)^T, i = 1, 2, \dots, m$ $R_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}(j), i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ R 为关联度, m 为样本个数, n 为影响因子个数	对样本量大小、样本有无规律都同样适用, 不会出现量化结果与定性分析不符的情况	基于一定前提假设, 如关联序列的平稳性和关联度的均匀分布等, 若假设在实际应用中不成立, 可能会影响模型的有效性	国家, 城市	[10, 44],

市碳排放驱动因素的影响程度,但并不能完全体现定量分析特征,无法提供详细信息和分析结果。需要结合其他定量分析方法,以更加准确地评估环境影响、制定有效政策。

2.3 减排措施及路径制定

减排措施及路径制定的研究基于碳排放核算结果,利用识别出的重要驱动因素作为主要变化参数,采用情景分析法预测碳排放的趋势,主要包括以下两个方面:预测不同情境下降碳措施的实施效果,探讨实现碳达峰和碳中和的路径。

预测不同情境下降碳措施的实施效果,提出不同行业的降碳贡献比。厦门利用投入产出法对 2009 年的碳排放进行核算,结果显示工业部门的贡献最大,占总排放的 55.13%;2050 年实现碳中和目标的缓解策略是提供低碳交通、提高建筑效率、增加低碳能源满足能源需求的份额^[8]。巴西圣保罗使用 LEAP 模型核算并预测了 2014 年至 2030 年的碳排放,其中城市交通(58%)、家庭(15%)、商业和服务(13%)是主要碳排放来源,通过综合考虑城市能源系统的更新,预计到 2030 年可实现碳排放较 2014 年减少 24%^[21]。运用 STIRPAT 模型和 LEAP 模型,设计了 6 个政策情景,分析北京各个部门消耗化石能源产生的碳排放,认为碳排放重点区域是电力、交通和商业部门,应该增加可再生能源在进口电力中的比例,通过利用 CCUS 实现碳中和^[40]。另外,一些研究侧重于分析某一因素对于碳排放量的影响,例如日本东京重点考察了建筑报废率^[48],上海研究了电力系统影响燃料结构改善、输电结构和输电规模^[49]。

此外,在实现双碳目标的大背景下,关于近远期目标实现的路径差异也是研究热点。不同城市对于碳达峰和碳中和的科学关注点和战略需求有明显差异^[50]。以广州为例,交通运输部门被视为减排潜力最大的部门,对于按时达到碳排放峰值目标至关重要;短期内,交通、工业和电力等领域需要采取严格的减排策略,而长远来看,建筑行业的减排策略,如提高能源效率和推广可再生能源的大规模应用对零碳目标至关重要^[51]。

综上所述,碳核算体系已初步形成一个完整的研究系统,尤其是在减排措施及路径制定这类定量研究方面,具有重要的理论意义,为实现碳中和目标提供了重要的科学支持。

3 碳核算问题分析及发展方向

城市碳排放量的科学核算是实现双碳目标的首要环节,具有重要的理论意义和应用价值。在短短的 10 多年时间里,碳排放研究已经发展成为一个范式清晰、方法成熟、使用范围广泛且与时代紧密结合的研究领域。然而,目前的碳排放研究仍存在一定的问题和不足,建议推进碳排放理论构建和方法论研究,以提升研究的精准度和参考价值。

3.1 碳排放指标交互性

在核算指标方面,亟待加强对城市内部行业关联以及城市之间商品流通所导致的碳排放指标的时空交互作用

进行解析。对于不同城市之间,城市能源和物质流动会引发跨界排放,比如外调电力、热力等跨区域流动的消费。

《IPCC 指南》不计算外购电的排放、也没有对应的评估方法。在我国,特别是北京、上海等能源输入型城市,这类二次能源带来的碳排放量已经引起重视。综合考虑生产和消费两种视角,由碳转入地和转出地共同承担的排放责任分配^[52]。从城市内部行业活动的角度来看,同一项生产活动可以划归不同的行业。目前各个行业都颁布了相应的碳排放行业标准,但是排放主体方面存在一定程度的交叉。例如,建筑材料的运输既是建筑行业全生命周期核算的一部分,也属于交通行业中货物运输的范畴。因此,在城市层面进行核算时,如何进行行业分类归属、做到全面而不重复的核算也是需要关注的问题。

3.2 数据的标准化与精细化

数据指的是活动水平和排放因子,标准化与精细化体现在三个方面,即完善碳排放数据统计制度与健全数据共享机制、细化区域排放因子数值。数据缺失是影响核算准确性的重要约束因素,直接导致核算结果的差异。因此,迫切需要完善碳排放数据的统计制度,建立健全的数据共享机制,制定城市碳排放清单的标准方法和系统的数据管理,提供可靠的基础数据来源。

现有各种数据收集方法为重点行业和环节单元的碳排放核算提供了良好的思路,但是在城市层面上,会将个性放大为共性,由此带来的较大差异。此外,加强基层数据质量的提升。如利用烟气排放连续监测系统、企业在线能源/环境直报系统等企业层面的监测技术,可以大大提高清单的精度和可验证性^[53];因此,基础性数据的标准化和归一化工作,亟须进一步完善。

城市碳排放核算以排放因子法在为主,然而,碳排放因子大多来自于《省级温室气体清单指南(试行)》中的默认值,这可能与城市自身发展特点并不一致。《IPCC 指南》不计算外购电的排放、也没有对应的评估方法。北京在 2020 年发布了《二氧化碳核算和报告要求(DB11/T 1787—2020)》一系列地方标准,提出了适用于本地的电力和热力排放因子参数的推荐值。各个城市应根据自身的自然资源禀赋、能源结构、地理条件等特点,考虑排放因子基于的特征和属性。

3.3 碳核算的平衡校验

单一的方法或模型已经无法满足对城市复杂系统的核算需求,采用多种方法、模型的耦合运算成为当前研究的趋势。碳核算涉及众多数据源和计算方法,模型是从有限的已知数据集进行外推和/或内推的方法,存在不确定性。《IPCC 指南》建议与其他机构编制的排放或清除估算的比较,以及与完全独立评估(如大气浓度测量)推导的估算的比较。基于大气浓度(遥感测量和地面基站测量)反演温室气体排放量,从而验证传统自下而上清单结果^[53]。

在城市碳核算方面,应该尝试建立模型和数据的检查,进行核算系统的碳平衡校验。提供核算结果的可信度和可靠度,以帮助决策者评估结果的可行性和风险。

4 结论

建立科学的碳排放核算体系是建设低碳城市的首要环节。当前碳排放核算受制于清单边界不一致、测算方法不同、数据缺乏等问题,影响了碳排放核算的准确性和有效性,滞后于低碳城市的建设需要。本文从城市碳排放核算体系的清单范围、方法模型、数据收集等方面分析了其对于城市碳排放核算结果的影响,讨论了其在城市特征评估、驱动因素识别、减排措施及路径制定方面的应用,并指出了未来研究方向,以期为低碳城市建设提供理论支持。

基金项目:北京市碳中和达标体系与负碳技术解决方案研究与应用(Z211100004321001)。

[参考文献]

[1]CHEN L,MSIGWA G,YANG M,et al. Strategies to achieve a carbon neutral society a review [J]. Environmental Chemistry Letters,2022,20(4):2277-2310.

[2]王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理,2020,20(6):58-64.

[3]ZHANG Y,LI J,LIU G. Accounting For Urban Carbon Dioxide: A Review[J]. Journal of Environmental Accounting and Management,2016,4(3):339-351.

[4]丛建辉,刘学敏,赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J]. 中国人口·资源与环境,2014,4(24):19-26.

[5]SOEST H L V,ELZEN M G J D,VUUREN D P V. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement[J]. Nature Communications,2021,12(1):2140.

[6]ZHAO X,MA X,CHEN B,et al. Challenges toward carbon neutrality in China:Strategies and countermeasures[J]. Resources Conservation and Recycling,2022,176(10):105959.

[7]蔡博峰,朱松丽,于胜民. 《IPCC200 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. 环境工程,2019,7(37):10.

[8]LIN J,LIU Y,MENG F,et al. Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen City, China[J]. En Policy,2013,58(74):220-227.

[9]HILLMAN T,RAMASWAMI A. Greenhouse Gas Emission Footprints and Energy Use Benchmarks for Eight US Cities [J]. Environ Sci Technol,2010,44(6):1902-1910.

[10]黄诚. 城市碳排放的多维度评价与情景模拟[J]. 博士学位论文,2020,34(9).

[11]LAZARUS M,CHANDLER C,ERICKSON P. A core

framework and scenario for deep GHG reductions at the city scale [J]. En Policy,2013,57(10):563-574.

[12]KHAZINI L,KALAJAHI M J,RASHIDI Y,et al. Real-world and bottom-up methodology for emission inventory development and scenario design in medium-sized cities [J]. Journal of Environmental Sciences,2023,127(13):114-132.

[13]LIU Z,GUAN D,WEI W,et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China [J]. Nature,2015,524(7565):335-338.

[14]SINGH P,KANSAL A,CARLIELL-MARQUET C. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods [J]. J Environ Manage,2016,165(13):22-30.

[15]张靖. 镍冶炼废气中重金属产排污系数实测法核算[J]. 有色金属工程,2013,3(2):50-52.

[16]WEI J,HUANG K,YANG S,et al. Driving forces analysis of energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions in Beijing:an input-output structural decomposition analysis [J]. J Clean Prod,2017,163(12):58-68.

[17]CHANG Y,RIES R J,WANG Y. Life-cycle energy of residential buildings in China [J]. En Policy,2013,62(21):656-664.

[18]JIN Y,WANG H,WANG Y,et al. Material footprints of Chinese megacities [J]. Resour Conserv Recycl,2021,174(23):105758.

[19]郑德高,吴浩,林辰辉,et al. 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(2):43-50.

[20]JIANG J,YE B,SHAO S,et al. Two-tier synergic governance of greenhouse gas emissions and air pollution in China's megacity, Shenzhen: Impact evaluation and policy implication [J]. Environ Sci Technol,2021,55(11):7225-7236.

[21]COLLAÇO F M D A,DIAS L P,SIMOES S G,et al. What if São Paulo (Brazil) would like to become a renewable and endogenous energy -based megacity? [J]. Renew Energ,2019,138(14):416-433.

[22]HERNANDEZ K D,FAJARDO O A. Estimation of industrial emissions in a Latin American megacity under power matrix scenarios projected to the year 2050 implementing the LEAP model [J]. J Clean Prod,2021,303(42):126921.

[23]CAI L,DUAN J,LU X,et al. Pathways for electric power industry to achieve carbon emissions peak and carbon neutrality based on LEAP model:A case study of state-owned power generation enterprise in China

- [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 170(25): 108334.
- [24] CAI L, LUO J, WANG M, et al. Pathways for municipalities to achieve carbon emission peak and carbon neutrality: A study based on the LEAP model [J]. Energy, 2023, 262(24): 125435.
- [25] ZHANG R, HANAOKA T. Cross-cutting scenarios and strategies for designing decarbonization pathways in the transport sector toward carbon neutrality [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3629.
- [26] FENNER A E, KIBERT C J, LI J, et al. Embodied, operation, and commuting emissions: A case study comparing the carbon hotspots of an educational building [J]. J Clean Prod, 2020, 268(16): 122081.
- [27] YANG X, ZHANG S, WANG K. Quantitative study of life cycle carbon emissions from 7 timber buildings in China [J]. Int J Life Cycle Assess, 2021, 26(9): 1721-1734.
- [28] WU P, SONG Y, ZHU J, et al. Analyzing the influence factors of the carbon emissions from China's building and construction industry from 2000 to 2015 [J]. J Clean Prod, 2019, 221(16): 552-566.
- [29] ZHANG Y, YAN D, HU S, et al. Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach [J]. En Policy, 2019, 134(16): 110949.
- [30] CHEN Q, CAI B, DHAKAL S, et al. CO₂ emission data for Chinese cities [J]. Resour Conserv Recycl, 2017, 126(22): 198-208.
- [31] KONGBOON R, GHEEWALA S H, SAMPATTAGUL S. Greenhouse gas emissions inventory data acquisition and analytics for low carbon cities [J]. J Clean Prod, 2022, 343(16): 130711.
- [32] REZAEI F, BULLE C, LESAGE P. Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages [J]. Build Environ, 2019, 153(12): 158-167.
- [33] ZHAN J, LIU W, WU F, et al. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of urban residential buildings in Guangzhou city [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194(23): 318-326.
- [34] FANG Y, LU X, LI H. A random forest-based model for the prediction of construction-stage carbon emissions at the early design stage [J]. J Clean Prod, 2021, 328(33): 129657.
- [35] YANG X, HU M, HEEREN N, et al. A combined GIS-archetype approach to model residential space heating energy: A case study for the Netherlands including validation [J]. Appl Energy, 2020, 280(22): 115953.
- [36] ZHANG N, LUO Z, LIU Y, et al. Towards low-carbon cities through building-stock-level carbon emission analysis: a calculating and mapping method [J]. Sustain Cities Soc, 2022, 78(17): 103633.
- [37] SHAN Y, GUAN D, LIU J, et al. Methodology and applications of city level CO₂ emission accounts in China [J]. J Clean Prod, 2017, 161(19): 1215-1225.
- [38] YIN X, HAO Y, YANG Z, et al. Changing carbon footprint of urban household consumption in Beijing: Insight from a nested input-output analysis [J]. J Clean Prod, 2020, 258(33): 120698.
- [39] LOISEAU E, ATSSANI L, LE FÉON S, et al. Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda [J]. J Clean Prod, 2018, 176(24): 474-485.
- [40] HUANG R, ZHANG S, WANG P. Key areas and pathways for carbon emissions reduction in Beijing for the "Dual Carbon" targets [J]. En Policy, 2022, 164(26): 112873.
- [41] LU Y, CUI P, LI D. Carbon emissions and policies in China's building and construction industry: Evidence from 1994 to 2012 [J]. Build Environ, 2016, 95(36): 94-103.
- [42] JIANG M, AN H, GAO X, et al. Structural decomposition analysis of global carbon emissions: The contributions of domestic and international input changes [J]. J Environ Manage, 2021, 294(42): 112942.
- [43] ANG B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? [J]. En Policy, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [44] 袁玥, 齐宇. 基于灰色关联分析的天津市碳排放驱动因素研究 [J]. 环境污染与防治, 2013, 35(20): 101-106.
- [45] SHEN L, WU Y, SHUAI C, et al. Analysis on the evolution of low carbon city from process characteristic perspective [J]. J Clean Prod, 2018, 187(31): 348-360.
- [46] ZHANG C, SU B, ZHOU K, et al. Decomposition analysis of China's CO₂ emissions (2000-2016) and scenario analysis of its carbon intensity targets in 2020 and 2030 [J]. Sci Total Environ, 2019, 668(5): 432-442.
- [47] YOU K, REN H, CAI W, et al. Modeling carbon emission trend in China's building sector to year 2060

[J]. Resour Conserv Recycl, 2023, 188(35):106679.
 [48] KAMEI M, KURISU K, HANAKI K. Evaluation of long-term urban transitions in a megacity's building sector based on alternative socioeconomic pathways [J]. Sustain Cities Soc, 2019, 47(22):101366.
 [49] WEI W, ZHANG P, YAO M, et al. Multi-scope electricity-related carbon emissions accounting: A case study of Shanghai [J]. J Clean Prod, 2020, 252(55):119789.
 [50] WEI Y M, CHEN K Y, KANG J N, et al. Policy and Management of Carbon Peaking and Carbon Neutrality: A Literature Review [J]. Engineering, 2022, 14(12):52-63.
 [51] HUANG Y, LIAO C, ZHANG J, et al. Exploring

potential pathways towards urban greenhouse gas peaks: A case study of Guangzhou, China [J]. Appl Energy, 2019, 251(45):113369.

[52] 方创琳, 梁龙武, 王振波. 京津冀城市群可持续爬升规律的定量模拟及验证 [J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(33):104-121.

[53] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读 [J]. 环境工程, 2019, 37(21):1-11.

作者简介: 辛莉(1987—), 女, 在读: 博士研究生, 研究方向: 城市碳排放核算; *通信作者: 马伟芳(1974—), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水生态修复、污染场地修复、碳中和。