

# 生命周期视角下城市碳足迹核算及 实现碳中和的路径建议 ——以深圳市为例<sup>\*</sup>

孟凡鑫<sup>1)†</sup> 樊兆宇<sup>1)</sup> 王东方<sup>1)</sup> 郭文卿<sup>1)</sup> 刘耕源<sup>1)</sup> 蔡博峰<sup>2)</sup> 杨志峰<sup>1,3)</sup>

(1)北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,100875,北京;

2)生态环境部环境规划院,100012,北京; 3)广东工业大学生态环境与资源学院,大湾区

城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室,510006,广东广州)

**摘要** 基于生命周期视角构建了城市碳足迹核算框架及方法学模型,系统地核算及追溯了碳排放在开放的城市“自然-经济-社会复合生态系统”中的足迹,主要涵盖城市地域边界内的直接生产碳排放以及跨境间接碳排放(主要包括城市所需的关键支撑物质、排放的主要废弃物,以及跨境交通分别在上游、下游产生的间接碳排放),并选取深圳市作为案例进行分析。结果表明,2015年深圳市碳足迹总量为6566.19万t CO<sub>2e</sub>,具体为:1)城市内主要产业部门及居民消费的能源活动及非能源活动引起的直接碳排放量(Scope 1)为3282.38万t CO<sub>2e</sub>,占深圳市碳足迹总量的49.99%,其中工业能源部门占比最大,为36.95%;2)城市外调电力消费引起的间接碳排放(Scope 2)占城市碳足迹总量的18.89%;3)跨境运输、关键支撑物质的上游产业链以及废弃物在下游处理过程中隐含的间接碳排放(Scope 3)占城市碳足迹总量的31.12%,其中5.37%来自跨境交通,22.26%来自主要物质上游供应链,3.49%来自下游废弃物处理。由此可知,2015年深圳市在城市上下游跨边界的间接碳排放量与城市内部的直接排放量相当,不容忽视。研究结果可为厘清城市自身碳排放现状及应对碳中和战略提供政策建议及管理启示。

**关键词** 碳中和;碳足迹;城市;混合生命周期

**中图分类号** TL812+.2

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021280

## 0 引言

2020年9月,习近平总书记在第75届联合国大会上提出,中国将力争于2030年前达到碳排放峰值,努力在2060年前实现碳中和。碳中和战略是实现社会经济转型的重要推手,城市作为主要的政策调控单元,已成为全球碳减排的关键阵地,在碳中和战略推进中承担着引领者的角色。城市以不足3%的陆地面积容纳了全球56%以上的人口,据联合国报道,2050年世界城市化率将增长到66%<sup>[1]</sup>。城市消耗了全球67%~76%的能源,排放了75%的温室气体<sup>[2]</sup>。在过去30年中,中国城市人口从不足2亿增加到7亿。目前,超过一半的中国人口生活在城市区域,中国大规模的城市化和工业化过程,带来了快速的城市扩张以及基础设施建设,需要大量的资源、能源及其他产品的投入,以满足城市的发展需求。随着城市人口的快

速增加及居民收入水平的提高,城市居民消费大量增长,且逐渐向高能耗与高碳排放的生活方式转变。在当今完全开放的全球市场经济中,城市的功能性及消费型属性决定了城市需要通过国内调入及进口贸易,满足城市所需的商品和服务等功能需求,这就造成了生产和消费的地理分离,导致了大量间接碳排放隐含在消费产品及服务的供应链中,在城市与区域间进行转移。这种由于城市需求引发的碳排放核算及足迹追踪(碳足迹),有利于城市摸清自身碳排放现状及溯源,规避城市的碳泄漏。而当前的城市碳排放治理政策多是从生产视角出发,较少考虑由城市当地消费或者需求驱动的碳排放,而在“碳达峰、碳中和”全国一盘棋的指导方针下,显然当前的城市碳治理策略有待调整。因此,从不同研究视角厘清城市碳排放现状及界定相关碳减排责任,已成为应对全球碳中和战略的

<sup>\*</sup> 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020NTST15);国家社科基金重点资助项目(22AZD094);广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2019A1515110816)

<sup>†</sup> 通信作者:孟凡鑫,副教授,博士生导师。研究方向:城市生态规划与管理。E-mail:fanxin.meng@bnu.edu.cn

收稿日期:2021-10-18

研究热点及难点。本研究从生命周期视角出发, 构建城市碳足迹核算框架及方法学模型, 核算并追溯碳排放在城市“自然-经济-社会复合生态系统”中的足迹, 以深圳市作为案例进行分析, 研究结果可为厘清城市自身碳排放现状及应对碳中和战略提出政策建议及管理启示。

## 1 文献综述

近年来, 城市系统碳排放核算的研究虽然众多, 但至今尚未形成统一的城市碳排放核算框架及方法学体系。当前应用较为广泛且被学者普遍接受的3种城市碳排放核算视角<sup>[2]</sup>, 如表1所示。

表1 3种城市碳核算视角及其应用举例

核算视角	核算边界	核算方法	代表性研究
基于地域或生产	城市地理行政边界内所有能源及非能源活动直接产生的碳排放(Scope 1)	过程分析法/清单法	Cai等 <sup>[3]</sup> ; 孟凡鑫等 <sup>[4]</sup> ; Shan等 <sup>[5]</sup>
基于地域和供应链	除地域排放外, 还包括以外调电力及热量、主要消费材料等为代表的活动在上游供应链引发的间接排放(Scope 1+2+3)	混合分析法(过程分析+投入产出分析)	林剑艺等 <sup>[6]</sup> ; 陈绍晴等 <sup>[7]</sup> ; Ramaswami等 <sup>[8]</sup>
基于消费	由城市边界内最终消费活动(政府消费、居民消费、库存增加、资本形成等)驱动的在全球价值链中产生的所有直接碳排放和间接碳排放(Scope 1(不包含国内调出及出口)+所有Scope 3)	投入产出分析	Mi等 <sup>[9]</sup> ; Meng等 <sup>[10]</sup> ; Chen等 <sup>[11]</sup>

地域或生产视角的城市碳排放清单数据, 当前较为权威且应用广泛的是由作者团队参与创建的中国城市温室气体工作组, 基于大量的现场走访及调研建立的较为可靠、长时间序列、全口径、全覆盖的中国城市碳排放数据集<sup>[12-13]</sup>, 以及开发的中国产品全生命周期温室气体排放系数库<sup>[14]</sup>, 为相关学者开展城市碳排放特征及减排路径研究提供了数据支撑<sup>[3-4]</sup>。此外, Shan等<sup>[5]</sup>开发了城市碳排放清单核算模型, 且构建了中国部分城市细分产业部门的碳排放清单, 该数据能够很好地与投入产出模型进行对接, 在CEADs<sup>[15]</sup>数据库可公开获取。

对于地域和供应链视角的城市碳排放核算, Ramaswami等<sup>[8]</sup>首次考虑了城市跨边界活动产生的间接碳排放, 构建的以需求为中心的混合生命周期分析模型, 得到广泛应用<sup>[16-17]</sup>。林剑艺等<sup>[6]</sup>改进该模型且率先应用在国内城市(厦门市)的碳足迹核算中, 通过与发达国家的城市碳足迹对比, 发现厦门市属于相对低碳的城市, 但由关键支撑物质引起的范围三碳排放占总碳足迹的26%, 在一定程度上证实了发展中国家城市在快速的城市化过程中会消耗更多的基础材料, 开展范围三碳排放核算与管理极具重要性及必要性, 尤其是城市关键支撑物质在上游供应链中关键节点的识别及结构分析, 有利于推动绿色材料的供应链管理及清洁生产, 促进城市及区域协同推动碳减排及可持续发展<sup>[18]</sup>。

基于消费视角的城市碳排放核算, 主要是借用投入产出模型, 核算城市的最终需求驱动的直接及间接碳排放。Mi等<sup>[9]</sup>采用城市单区域投入产出模型, 识别了中国13个典型城市的碳排放模式: 生产主导型(例

如唐山、哈尔滨等)或者消费主导型(例如北京、上海等), 可对城市与区域开展协同减排以共同应对气候变化提供了科学依据。Meng等<sup>[10]</sup>克服了单区域投入产出方法的局限, 充分考虑城市系统的开放性、进口产品及服务的异质性, 通过投入产出表链接技术, 构建了城市-国家-全球多级嵌套投入产出模型, 更为精准地核算及追溯了不同视角下城市碳排放在全球区域格局上的流动, 可为厘清及合理分配城市碳排放责任提供新思路及政策启示。

由此可见, 学者们试图从不同视角厘清城市碳排放现状来界定相应的减排责任, 而对于城市碳排放的核算尚未形成统一的框架和核算体系。因此, 本研究从生命周期视角出发, 基于作者团队以往的研究基础, 构建了一套城市碳足迹核算框架及方法学体系, 并选取深圳市作为案例进行分析。深圳作为国家首批低碳试点城市、碳排放权交易试点城市、“无废城市”试点以及可持续发展议程创新示范区, 已初步形成具有深圳特色的低碳发展模式。《中共深圳市委关于制定深圳市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》明确提出, 深圳市要“以先行示范标准完成国家碳排放达峰行动任务”。因此, 深圳市是开展城市碳足迹系统核算的良好案例, 厘清城市的碳排放现状及模式, 可为深圳市开展且引领城市碳排放综合治理及推动碳中和战略的实施提供科学基础。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 研究边界 城市作为“自然-经济-社会复合生态

系统”,碳排放以实体及虚拟(隐含)的二维形式,流经了城市的“三元子系统”,即自然生态子系统、经济生产子系统以及社会消费子系统,形成了城市碳排放在城市内部及跨区域流动的空间格局。

1)经济生产子系统.城市境内所有能源活动及非能源活动引起的直接碳排放,主要来源于农村生活、服务业、城镇生活、农业、工业能源、工业过程以及境内交通7个部门.其中境内交通包括私家车、公交车、出租车以及轨道交通.为避免重复计算,工业部门不包括电力、热力的生产和供应业,电力及热力产生的间接碳排放根据电热力消耗的终端原则分配到各个部门.对于非能源活动引起的碳排放,主要考虑垃圾填埋场、污水处理厂、秸秆燃烧、动物肠道、动物粪便管理、水稻种植及煤矿开采等活动产生的 $\text{CH}_4$ 排放、总 $\text{N}_2\text{O}$ 气体以及含氟气体等.这部分城市境内产生的直接碳排放,通常是范围一排放(Scope 1).

2)社会消费子系统.城市系统正常运转所需的大量材料、资源及能源投入,例如电力、食物、能源、钢铁、水泥等,大部分都是来自城市边界外的供给,而这些产品在上游的生产-加工-运输-分配等供应链过程中均产生碳排放,最终以隐含碳排放的形式内嵌在产品和服务中,这属于城市上游间接碳排放.此外,城市系统不断向环境排放的废弃物中,有很大一部分

超出了城市系统自身的消纳处理能力,需要运输到边界外进行处理,在此过程中产生的碳排放属于城市下游间接碳排放.可见,城市的跨境碳排放主要包括:①城市建设和运行所需的最终产品和服务在上游供应链产生的间接碳排放,包含外调电力;②城市系统产生的废弃物,由于城市自身处理能力不足而运输到城市下游周边腹地处置所产生的间接碳排放;③城市与其他地区间的跨境交通(铁路、航空、水运、长途道路)引起的间接碳排放.其中,涵盖了范围二排放(Scope 2:外调电力引发上游产业链的间接碳排放)和范围三排放(Scope 3:未被范围二包括的其他上游及下游的间接碳排放).

3)自然生态子系统.城市自然生态子系统包含森林、湿地、海洋与城市绿地等蓝绿空间,具有巨大的碳排放吸收及储存能力,属于城市的自然碳汇.本研究只考虑了城市的森林碳汇.

基于以上,本文定义“城市碳足迹”:城市系统为了维持自身的发展及良好运行,在城市地理边界内开展的能源及非能源活动产生的直接碳排放与发生在城市边界外的间接碳排放之和,碳排放包括 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 以及 $\text{CF}_4$ 等含氟气体,并以二氧化碳当量( $\text{CO}_2\text{e}$ )表示.从生命周期视角构建了涵盖上游生产、直接使用、下游处置的城市碳足迹核算框架,如图1所示.

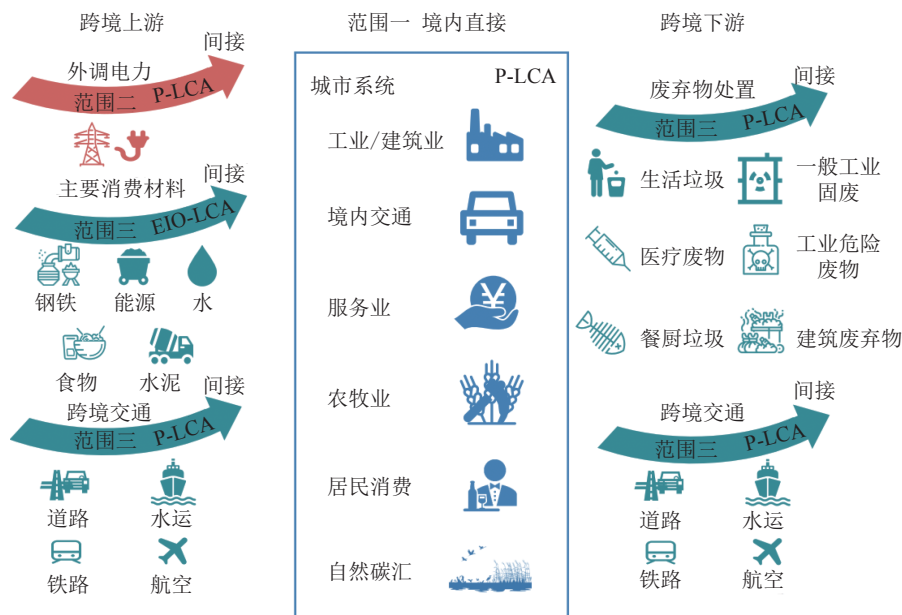


图1 城市碳足迹核算框架及方法体系

**2.2 计算方法** 基于过程的生命周期分析(P-LCA)法和基于经济投入产出的生命周期分析(EIO-LCA)法,构建深圳市混合生命周期-碳足迹评估模型.对于范围一的境内直接碳排放、范围二以及范围三中由于外调电力、跨境交通与废弃物处理的间接碳排放,

采用P-LCA方法,以保证核算数据的精确度<sup>[19]</sup>;对于范围三中主要物质在上游产业链间接产生的碳排放,运用EIO-LCA方法,以避免截断偏误<sup>[18]</sup>.

**2.2.1 P-LCA方法** 范围一及范围二的碳排放数据主要来自作者团队参与编制的《中国城市温室气体数

据集》,具体核算方法及数据参见文献[4, 12, 20]. 在该数据集中,交通部门未区分境内和跨境交通,本研究采用不同境内交通类型的交通工具保有量及对应的行驶里程,推算出能源消耗引起的碳排放<sup>[21]</sup>,从道路运输碳排放中剥离出了境内交通碳排放. 对于跨境交通隐含排放的责任分配方式,一般采用车辆行驶里程(VMT)方法,即对于中国其他城市到达深圳市的VMT和从深圳市出发到达中国其他城市的VMT,由于相关数据缺失,本研究采取各占一半的分配原则<sup>[6, 8, 22]</sup>.

对于城市废弃物在下游处理过程中的碳排放,根据6种不同类型废弃物在本地的处理缺口及相应的碳排放系数计算,具体公式为

$$m_i = n_i \times y_i \times k_i, \quad (1)$$

式中: $m_i$ 为*i*类型废弃物下游处理过程中的碳排放量; $n_i$ 为该类废弃物产生的总量; $y_i$ 为2015年深圳市对该类废弃物的处置缺口; $k_i$ 为该类废弃物的碳排放系数;*i*对应不同的废弃物类型,即生活垃圾、一般工业固废、工业危险废物、医疗废物、餐厨垃圾及建筑废弃物.

**2.2.2 EIO-LCA 方法** 假设2015年深圳市食物、钢铁、能源、水泥及水的进口量完全从中国其他地区调入(未考虑国际地区碳强度的异质性),利用EIO-LCA方法,对2015年深圳市范围三中主要材料上游产业链隐含碳排放进行计算<sup>[18]</sup>.

基本的投入产出模型为

$$\mathbf{x}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{y}_i, \quad (2)$$

式中:列向量 $\mathbf{x}$ 为生产链各部门产品的总产出量; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\mathbf{A}$ 为直接消耗系数矩阵;列向量 $\mathbf{y}$ 为对各部门产品进口量的价值; $(\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ 为Leontief逆矩阵;*i*为所研究的材料对应生产部门.

生产链中各部门的碳排放量为

$$b_i = \mathbf{R} \mathbf{x}_i, \quad (3)$$

式中: $b_i$ 表示为了满足最终需求 $\mathbf{y}_i$ 而在生产中排放的 $\text{CO}_2\text{e}$ 量; $\mathbf{R}$ 是一确定的行向量,其元素对应各部门单位货币产出所直接排放的 $\text{CO}_2\text{e}$ 量,元素值为

$$R_i = c_i / x_i, \quad (4)$$

式中: $R_i$ 为部门*i*的直接排放系数, $c_i$ 为该部门的直接碳排放量, $x_i$ 为该部门的总产出.

**2.3 数据来源** 所需的数据主要通过统计资料、官方网站、参考文献、数据库以及政府部门调研的方式获取,具体如下:范围一和范围二的碳排放数据,主要

参考《中国城市温室气体排放数据集(2015)》及中国高空间分辨率网格数据(CHRED),其中交通运输部门的排放,主要基于部门调研及《深圳地铁集团有限公司2015年年度报告》,划分为不同交通类型的境内排放与跨境排放;范围三的碳排放核算过程中,模型所需数据主要来自《2015年中国投入产出表》、CEADs数据库公布的《2015中国城市多区域投入产出表》以及《中国碳排放清单2015》,能源产品的城市调入量估算参数主要来源于《2015年度深圳市环境状况公报》《2016广东统计年鉴》《2016深圳统计年鉴》;钢铁产品的城市调入量主要通过2015年深圳市新增建筑存量的换算所得<sup>[23]</sup>. 2015年深圳市餐厨垃圾及建筑废弃物的总产量均来源于文献[24-25];其他类型废弃物的产生总量来源于《2016深圳统计年鉴》与《2015年度深圳市环境状况公报》;2015年深圳市对各类废弃物的处置缺口来自相关部门实地调研;各类废弃物的碳排放因子来源于Carbonstop碳排放因子数据库<sup>[26]</sup>.

### 3 结果分析

表2展示了2015年深圳市碳足迹结果及各范围的碳排放结构. 2015年深圳市的碳足迹总量为6566.19万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,各范围碳排放量及占比分别为:范围一,城市内主要产业部门及居民消费的能源活动以及非能源活动引起的直接碳排放为3282.38万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,占碳足迹总量的49.99%;范围二,城市外调电力消费引起的间接碳排放为1240.54万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,占碳足迹总量的18.89%;范围三,跨境隐含碳排放为2043.27万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,占碳足迹总量的31.12%. 由此可知,2015年深圳市整体碳足迹中,城市跨境间接碳排放总量(范围二和范围三)与城市境内直接碳排放量(范围一)相当,分别占到城市碳足迹总量的50.01%和49.99%.

2015年深圳市境内直接碳排放量(范围一)为3282.38万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,92.81%是由能源活动直接引起,其中,工业能源部门、境内交通、服务业依次是前3大部门,分别占到直接碳排放的73.91%、9.98%、6.77%. 而由境内非能源活动引起的碳排放总量为235.84万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,略高于服务业部门的直接排放,占境内直接碳排放量的7.19%. 其中 $\text{CH}_4$ 排放贡献了非能源活动碳排放的71.26%,主要由垃圾填埋场及污水处理厂产生,分别占到 $\text{CH}_4$ 排放量的95.91%和1.89%.

2015年深圳市跨境间接碳排放量为3283.81万 $\text{t CO}_2\text{e}$ ,其中由范围二外调电力及范围三引起的间接碳排放量比例分别为37.78%及62.22%. 在范围三引起的间接碳排放中,71.53%、17.25%和11.22%分别集中

表 2 深圳市 2015 年碳足迹清单

碳排放范围	分类	部门	部门碳排放/ 万t(比例/%)	分类碳排放/ 万t(比例/%)	范围碳排放/ 万t(比例/%)
范围一	能源活动	服务业	222.18 (3.38)	3 046.54 (46.40)	3 282.38 (49.99)
		农村生活	0.69 (0.01)		
		城镇生活	68.68 (1.05)		
		农业	1.43 (0.02)		
		工业能源	2 426.10 (36.95)		
		工业过程	0 (0)		
	非化石能源活动	境内交通	327.46 (4.99)	235.84 (3.59)	
		CH <sub>4</sub> 活动	168.06 (2.55)		
		N <sub>2</sub> O活动	1.74 (0.03)		
		含氟气体活动	66.04 (1.01)		
范围二	外调电力	外调电力	1 240.54 (18.89)	1 240.54 (18.89)	1 240.54 (18.89)
范围三	跨境交通	道路	192.89 (2.94)	352.45 (5.37)	
		水运	43.75 (0.67)		
		铁路	10.65(0.16)		
		航空	105.16 (1.60)		
	关键支撑物质上游产业链	食物	139.17 (2.12)	1 461.56 (22.26)	2 043.27 (31.12)
		钢铁	154.12 (2.35)		
		水泥	666.90 (10.16)		
	废弃物的下游处理	能源	379.22 (5.77)	229.26 (3.49)	
		水	122.15 (1.86)		
		生活垃圾	204.90 (3.12)		
一般工业固废		19.52 (0.30)			
工业危险废物		1.92 (0.03)			
医疗废物		0.05 (0)			
餐厨垃圾		2.04 (0.03)			
建筑废弃物	0.83 (0.01)				
城市碳足迹合计			6 566.19	6 566.19	6 566.19

注：“( )”中的数值表示相应碳排放量在城市碳足迹合计中的比例。

在关键支撑物质上游产业链、跨境交通、废弃物的下游处理过程,具体如下:

1)2015年深圳市关键支撑物质在上游产业链中隐含的碳排放总量为1 461.56万t CO<sub>2e</sub>,其中,45.63%、25.95%、10.54%、9.52%和8.36%的碳排放分别集中在水泥、能源、钢铁、食物、水的上游产业链。

2)2015年深圳市跨境交通引起的间接碳排放量为352.45万t CO<sub>2e</sub>,略高于境内交通碳排放量(327.46万t CO<sub>2e</sub>)。其中,长途道路交通、航空部门、水运引起的碳排放依次占跨境交通碳排放总量的54.73%、29.84%和12.41%,而铁路运输碳排放比例仅为3.02%。

3)2015年深圳市主要废弃物在下游处理产生的碳排放量达到229.26万t CO<sub>2e</sub>,与城市境内非能源活

动引起的直接碳排放量相当(235.84万t CO<sub>2e</sub>)。深圳市的6种废弃物下游隐含碳排放结构中,生活垃圾和一般工业固废贡献占比分别为89.37%及8.51%;而工业危险废物、餐厨垃圾、医疗废物及建筑废弃物的下游隐含碳排放量相对较小,在总碳足迹中几乎可以忽略。

## 4 结论与政策建议

本研究从生命周期视角构建了城市碳足迹核算框架及方法学,以深圳市为研究案例,识别了城市境内直接碳排放和跨境间接碳排放的关键部门及结构特征,研究结果可为城市摸清自身碳排放家底,在碳中和战略中发挥引领性作用提供科学基础,具体政策建议及管理启示如下:

1) 重点关注城市境内关键产业部门生产能效提升及结构调整。2015年深圳市碳足迹的最大构成是工业能源部门的直接碳排放,占碳足迹的36.95%。深圳市2015年计算机、通信和其他电子设备制造业占全市工业部门总产值中的比例达到58%,是深圳市碳排放量最大的“龙头行业”,是深圳市直接碳排放治理的有力抓手。优化工业流程和装备设施,推进制造生产线智能化技术改造,注重节能等能效提升技术的研发及应用,是削减工业直接碳排放的关键举措。

2) 引导城市消费模式调整及加强关键产业绿色供应链管理。2015年深圳市由城市关键支撑物质在上游产业链产生的间接排放占碳足迹的22.26%。深圳市作为典型的消费碳排放主导型城市,应有序引导城市消费模式调整,提倡绿色及可持续消费。加强重点行业的绿色供应链管理,强调行业全生命周期联动减碳。深圳市是全国低碳建筑领域的引领者和典范,应率先推广新建建筑全产业链低碳化发展,提高材料利用效率,在全市范围内推广绿色建筑。

3) 加强“双碳”目标下城市多生态要素协同管理。2015年深圳市主要废弃物在下游处置产生的间接碳排放占碳足迹的3.49%。深圳市作为全国首批“无废城市”试点建设之一,在废弃物管理与处理中,应率先强化源头治理和整体治理,大力推行生活垃圾分类,推动生活垃圾从源头到末端的全过程治理,优化提升城市在“双碳”目标下的资源代谢体系、强化生态要素间的协同治理与管控,在城市治理过程中实现减污降碳协同治理效应。

4) 推动城市与区域协同合作共同实现碳中和。2015年深圳市由范围二和范围三引起的跨境间接碳排放占碳足迹的50.01%。城市碳排放在上下游跨区域流动过程中引起的碳泄漏现象,极易引发碳减排责任分配的不公平。可见,以城市行政区划为界的碳排放治理思路,会滞后国家碳中和目标的整体实现。因此,城市应破除行政区划的界限藩篱,突破当前区域协同发展的硬约束和软约束<sup>[27]</sup>;强化城市消费碳排放的追根溯源,加强城市与目标区域的协同联动,系统思考和探索城市与区域协同推进碳中和的治理模式<sup>[28]</sup>。

5) 增强城市生态碳汇的发展空间。2015年深圳市森林碳汇总量为-13.61万t CO<sub>2</sub>,仅为城市内化石能源燃烧碳排放的1%,发展潜力十分有限。深圳市具备发展蓝色碳汇的先天优势,海草床、红树林、滨海沼泽3大海岸带蓝碳生态系统具有固碳量巨大、固碳效率高、碳存储周期长等特点,深圳市拥有“三湾一口”海域资源及良好的深水岸线、沙滩、湿地等湾区资源,同时,深圳市可在福田国家级红树林自然保护

区加大培育近海红树林,是增加固碳的有效途径。

6) 双管齐下破解城市高碳锁定效应。提早对深圳市新建城镇或区域开展低碳布局,做好城市的功能分析与空间分配,避免高碳能源和基础设施的投入,规避城市形态和基础设施的碳锁定效应。深圳市开展近零碳排放区试点建设,是碳中和战略在城市规划建设过程中的落脚点,避免城市更新过程中的大拆大建,鼓励就地城镇化,在既有建筑进行综合系统整治,做好城市蓝绿基础设施的生态规划及建设,激发城市立体空间绿化的碳汇潜力。

7) 打造不同视角下城市碳排放MRV(measuring, reporting and verification)管理平台。深圳市亟需率先建立一个城市级别的可测量、可报告及可核查的碳排放数据管理平台,即城市MRV平台,可借助大数据技术推动碳排放数据的快速更新及结果可视,精准核算及追踪不同视角下城市不同产业部门的碳排放特征及其在跨区域空间格局的足迹,有助于厘清城市碳排放在全球供应链上的责任分配,为相关决策者进行及时高效的碳排放管理提供强有力的数据支持。

## 5 参考文献

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World urbanization prospects: the 2018 revision[R]. New York: United Nations, 2019
- [2] SETO K C, CHURKINA G, HSU A, et al. From low- to net-zero carbon cities: the next global agenda[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2021, 46: 377
- [3] CAI B F, LU J, WANG J N, et al. A benchmark city-level carbon dioxide emission inventory for China in 2005[J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 659
- [4] 孟凡鑫, 李芬, 刘晓曼, 等. 中国“一带一路”节点城市CO<sub>2</sub>排放特征分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 32
- [5] SHAN Y L, GUAN D B, ZHENG H R, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997-2015[J]. Scientific Data, 2018, 5: 170201
- [6] 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 等. 城市能源利用碳足迹分析: 以厦门市为例[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3782
- [7] 陈绍晴, 龙慧慧, 陈彬. 代谢视角下的城市低碳表现评估[J]. 中国科学:地球科学, 2021, 51(10): 1693
- [8] RAMASWAMI A, HILLMAN T, JANSON B, et al. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city-scale greenhouse gas inventories[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(17): 6455
- [9] MI Z F, ZHANG Y K, GUAN D B, et al. Consumption-based emission accounting for Chinese cities[J]. Applied Energy, 2016, 184: 1073

- [10] MENG F X, LIU G Y, HU Y C, et al. Urban carbon flow and structure analysis in a multi-scales economy[J]. *Energy Policy*, 2018, 121: 553
- [11] CHEN S Q, LONG H H, CHEN B, et al. Urban carbon footprints across scale: important considerations for choosing system boundaries[J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114201
- [12] 中国城市温室气体工作组. 中国城市温室气体排放数据集: 2015[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019
- [13] 蔡博峰, 刘晓曼, 陆军, 等. 2005年中国城市CO<sub>2</sub>排放数据集[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(4): 1
- [14] 中国城市温室气体工作组(CCG). 中国产品全生命周期温室气体排放系数库[EB/OL]. 2022[2021-10-17]. <http://lca.cityghg.com/>
- [15] 关大博教授团队. 中国碳排放数据库(CEADs)[EB/OL]. [2022-10-17]. <https://www.ceads.net.cn/>
- [16] CHEN S Q, LONG H H, FATH B D, et al. Global urban carbon networks: linking inventory to modeling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(9): 5790
- [17] DANA B, ANU R. What is the contribution of city-scale actions to the overall food system's environmental impacts?: assessing water, greenhouse gas, and land impacts of future urban food scenarios[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(20): 12035
- [18] MENG F X, LIU G Y, YANG Z F, et al. Structural analysis of embodied greenhouse gas emissions from key urban materials: a case study of Xiamen city, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 212
- [19] 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, 24(4): 19
- [20] 蔡博峰, 张建军, 董会娟. 中国城市温室气体排放: 2015年[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019
- [21] CAI B F, YANG W S, CAO D, et al. Estimates of China's national and regional transport sector CO<sub>2</sub> emissions in 2007[J]. *Energy Policy*, 2012, 41: 474
- [22] LIN J Y, LIU Y, MENG F X, et al. Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen city, China[J]. *Energy Policy*, 2013, 58: 220
- [23] 张宇, 段华波, 张宁. 深圳市建筑水泥流量-存量分析及环境影响评估[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 482
- [24] 李蕾. 餐厨垃圾收运与集中处置一体化体系构建研究: 以深圳市为实证分析[C]//中国城市规划学会, 沈阳市人民政府. 规划60年: 成就与挑战: 2016中国城市规划年会论文集(02城市工程规划). 沈阳: 中国城市规划学会, 2016: 11
- [25] 李蕾, 唐圣钧. 深圳: 综合利用建筑废弃物实现“资源再生”[J]. *建筑*, 2018(10): 24
- [26] 碳足迹(北京)科技有限公司. Carbonstop碳排放因子数据库[EB/OL]. [2022-10-17]. <https://www.carbonstop.net/freeTry?pageFlag=product-data>
- [27] 张丽峰, 潘家华. 中国区域碳达峰预测与“双碳”目标实现策略研究[J]. *中国能源*, 2021, 43(7): 54
- [28] 庄贵阳, 魏鸣昕. 城市引领碳达峰、碳中和的理论和路径[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 114

## Urban carbon footprint accounting and implications for carbon neutrality from a life cycle perspective: a case study of Shenzhen

MENG Fanxin<sup>1)</sup> FAN Zhaoyu<sup>1)</sup> WANG Dongfang<sup>1)</sup> GUO Wenqing<sup>1)</sup>  
LIU Gengyuan<sup>1)</sup> CAI Bofeng<sup>2)</sup> YANG Zhifeng<sup>1, 3)</sup>

(1) State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 100012, Beijing, China;

3) Key Laboratory for City Cluster Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, 510006, Guangzhou, Guangdong, China)

**Abstract** Cities take up only 3% of the Earth's land surface but consume 67%-76% of global energy, emit 75% of total carbon. As a vital battleground to control carbon emission, cities have undertaken a leading role in carbon neutrality strategy. Cities consume lots of final products and services derived from outside the city during urban expansion and development. In the open urban economic system, spatial mismatch between production and consumption of final products and services results in carbon emissions embodied in the trade flowing into producing regions. However, current urban carbon governance policies are primarily formulated from a traditional production-based perspective, ignoring transboundary carbon emissions driven by final demand in the cities. The resulting carbon

leakages can easily cause unequal distribution of urban and regional carbon emission reduction responsibilities. Building a systematic urban carbon accounting method is urgently needed for national carbon neutral strategy. Therefore, we constructed urban carbon footprint accounting framework and methodology from a life cycle perspective. This system was used to account for and track carbon footprint in open urban “natural-economic-social complex ecosystem”, taking into account of both direct geographical carbon emissions and indirect transboundary carbon emissions. We selected Shenzhen in a case study. Data show total carbon footprints of  $6545.01 \times 10^4$  tons of  $\text{CO}_2\text{e}$  in Shenzhen in 2015. The direct carbon emissions (Scope 1) caused by energy and non-energy activities by main industrial sectors and residential consumption were  $3282.38 \times 10^4$  tons of  $\text{CO}_2\text{e}$ , accounting for 50% of total carbon footprint, of which industrial energy sector accounted for 29.2% of the total. Indirect carbon emissions (Scope 2) caused by purchased electricity consumption accounted for 19% of the total footprint. Indirect carbon emissions (Scope 3) embodied in transboundary transportation (5.27%), upstream supply chain of critical materials (22.01%) and downstream chain of waste disposal (3.72%) accounted for 31%. These data indicate that Shenzhen's indirect carbon emissions in 2015 were comparable to direct emissions. These results will provide policy suggestions and management implications for cities to clarify their carbon emission status and respond to carbon neutralization strategy.

**Keywords** carbon neutrality; carbon footprint; cities; life cycle perspective

【责任编辑:武 佳】