代谢视角下的城市低碳表现评估

陈绍晴^{1,2}, 龙慧慧^{1,2}, 陈彬^{3*}

1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275;

2. 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275;

3. 北京师范大学环境学院, 北京 100875

* 通讯作者, E-mail: chenb@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-10-14; 收修改稿日期: 2021-05-22; 接受日期: 2021-06-17; 网络版发表日期: 2021-08-17

广东省自然科学杰出青年基金项目(编号: 2018B030306032)、国家自然科学基金项目(批准号: 72074232、71704015)和国家杰出青年科学基金项目(编号: 71725005)资助

摘要 如何系统有效地削减城市地区的碳排放, 将在很大程度上决定21世纪控温目标行动的成败. 本研究以国内外12个城市为典型案例, 定量分析了城市碳代谢的重要过程, 并评估了碳通量、碳输入和碳排放在部门分布特征、人均水平和强度水平上的区别. 在此基础上, 建立了由流量指标和结构指标组成的城市碳代谢系统评估体系, 用于系统地分析国内外案例城市在代谢的同化端、异化端或同化-异化混合端的低碳表现差异. 结果表明, 在制造和服务业上, 国内案例城市比欧美城市的碳通量和碳输入平均高出7~12%, 但在生活消费上却比后者低6~9%. 同作为大型城市, 北京、天津、南京和广州虽然人均碳通量和人均碳输入均较低(排名靠后), 但相应的碳强度却是巴黎和洛杉矶等欧美发达城市的3倍左右(排在前列). 从影响因素来看, 城市人均碳通量与人均能源消费显著相关, 而与人均建筑面积或人均住房面积也具有一定的相关性. 本研究发现, 碳通量、碳输入量和碳排放量三者可为衡量城市气候影响时提供不同侧面的信息, 而流量指标和结构指标下评估国内外城市低碳表现排名的差异也较大. 各类碳代谢系统评估指标在应用于城市碳管理时应加以区分、结合判断, 使之更为准确地体现城市的脱碳现状和减排潜力, 为实现经济社会的碳中和发展目标提供系统性决策支持.

关键词 城市代谢系统, 物质碳流动, 低碳表现评估, 城市资源管理, 气候变化减缓

1 引言

城市化在中国以及全球很多发展中国家都呈现出不可逆的趋势. 1900年, 仅有10%的全球人口为城市居民, 而目前城市人口比例已超过54%(United Nations, 2019). 城市用地面积增加和碳库减少在不停加剧, 在亚洲、欧洲和美洲大部分地区其变化的速率已成倍地

超过人口的增速(Seto等, 2012). 城市化下经济发展给人类带来巨大福利的同时, 也在很大程度上加剧了全球气候变化的进程(魏一鸣等, 2006; 张友国, 2010; 薛冰等, 2011; 张宁和张维洁, 2019). 城市地区的生产生活(如制造业生产、商业、交通和电力消费)是全球人为碳排放的主要驱动因素(王锋等, 2010). 政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告专门增设了关于城

中文引用格式: 陈绍晴, 龙慧慧, 陈彬. 2021. 代谢视角下的城市低碳表现评估. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1693–1706, doi: 10.1360/SSTe-2020-0279

英文引用格式: Chen S, Long H, Chen B. 2021. Assessing urban low-carbon performance from a metabolic perspective. Science China Earth Sciences, 64(10): 1721–1734, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9807-y>

市碳排放与区域规划的章节, 并指出约65%的全球最终能源消费来自于城市社会经济活动, 超过70%的能源消费相关碳排放来自于城市区域(Seto等, 2014)。同时, 作为技术相对发达区域, 城市更易普及清洁能源技术和实施碳减排策略, 因此也是减缓社会经济系统对全球环境变化的影响的重要研究范本, 为构建低碳可持续社会提供重要突破口(林伯强和刘希颖, 2010; 林伯强和孙传旺, 2011; 潘家华, 2013)。目前, 诸如C40等全球特大城市联盟已建立了气候变化减缓的共识, 以促成共同但有差别的深度减排。

城市的碳排放活动高度地嵌入于复杂的经济社会行为和生态过程中, 与其他碳流(进口、出口、库存变化等)紧密偶联在城市复合系统中(Kennedy等, 2009; Chen和Chen, 2012; 夏楚瑜等, 2018)。目前大部分城市碳研究集中在基于能耗和工业生产的排放清单分析, 主要关注直接和间接的人为碳排放而非城市系统的碳流(例如, Sovacool和Brown, 2010; 刘竹等, 2011; ICLEI, WRI和C40, 2014; Mi等, 2016; Long等, 2019; 韩梦瑶等, 2020)。相对应, 全球各城市的减排策略多为针对特定部门而制定, 这对于针对性、局部的碳减排目标较为有效(王海鲲等, 2011; 刘竹等, 2011; Creutzig等, 2015; Yu等, 2018; 丁凡琳等, 2019)。由于缺乏相应的分析框架和方法, 城市内部经济社会部门与自然生态系统间的碳流关系、各部门之间的相互作用以及城市碳流档案与结构并不明晰, 针对全局减碳仍较多处于理论探讨层面。如何追踪各经济部门相互作用下城市碳排放过程、实现城市碳账户的全局分析逐渐成为了当下低碳城市研究的重要问题。

“代谢”这一源于生物学的概念与理论框架, 已被应用于研究人类社会的能源和物质流动及其环境影响(Wolman, 1965; 石磊和楼俞, 2008; 卢伊和陈彬, 2015; 刘刚等, 2018; Liang等, 2020)。近期, 有学者将其用于描述和分析经济社会活动相关的碳代谢过程。譬如, 有学者运用物质流分析等方法, 追踪了石化产品和木制品等的物质碳在经济体中的流动, 并分析了资源消费减量化、提升资源利用效率、提高废物回收技术等措施对于提高碳减排潜力的作用(Fujimori和Matsuoka, 2007; Lauk等, 2012; 夏琳琳等, 2017; Ohno等, 2018)。Churkina等(2010, 2012)从生物地球化学循环的视域建立了平面和垂直向的城市碳流模型框架, 并基于城市建筑、产品和绿地变化清单, 对城市中心与郊区的碳

储量和减排潜力进行了空间尺度上的区分。赵荣钦等(2009)基于“自然-社会”二元碳循环的概念, 从垂直和水平方向上分析了城市系统碳储量、碳通量和碳流通, 以识别城市系统碳循环的内部机理(赵荣钦和黄贤金, 2013)。Chen和Chen(2012)建立了自上而下的碳代谢网络模型, 模拟了主要的经济社会部门和城市生态系统间的碳交换, 并分析城市碳代谢的层次机构和部门间关系, 识别了碳排放相关的主要网络链路。碳代谢相关的研究均表明, 由于密集的城市基础设施、物资积累和家庭消费, 城市系统累积的物质碳不可忽视, 将会对未来气候变化应对的成效带来巨大影响。除历史碳排放外, 其余以原材料或产品形式进口至城市经济体同样有可能在未来一段时间内以二氧化碳或甲烷等温室气体的形式释放到大气中。有学者已指出全社会含碳产品追踪分析的必要性和紧迫性, 并进行了城市碳代谢系统的研究的流量和存量变化核算(Shigetomi等, 2019; Chen等, 2020a, 2020b)。然而, 将碳代谢分析结果应用于城市管理部门的碳管理政策制定上, 仍需要进一步提出可直接用于气候影响评估的指标体系, 以便利用统一、可量化的标准来比较不同城市的减排进展与潜力, 并系统性地提出城市经济体的脱碳路径。当下, 包括中国在内的多个国家已明确提出了碳中和的具体目标和时间表, 不少城市也自发制定了实现净零排放的行动指南, 对21世纪全球1.5℃控温目标做出必要的贡献(van Soest等, 2021; Duan等, 2021)。建立基于碳代谢的评估体系将有助于识别中国城市未来碳减排潜力, 为经济发展的低碳转型提供理论依据, 并通过寻找合适的城市样本示范, 助力中国2030年碳达峰和2060碳中和总体目标的实现。

本研究建立了城市碳代谢系统评估的方法框架, 以12个全球城市(包括北京、天津、南京、广州等4个国内城市和开普敦、伦敦、洛杉矶、纽约、巴黎、新加坡、悉尼和多伦多等8个国外城市)作为典型研究案例, 对城市内部各经济社会部门之间和城市经济体与外部环境之间的碳流进行统一核算, 追踪与城市经济活动相关的碳代谢过程。然后, 分析了碳输入和碳通量等碳代谢流与碳排放的分部门差异, 并揭示了这些碳代谢流与能源消费(以及能源强度)和建筑面积(以及居住面积)的相关性。最后, 从代谢流量和代谢结构两个角度, 提出城市碳代谢系统评估指标体系, 并应用于比较国内外城市经济社会发展的当下脱碳现状和未来

脱碳潜力差异, 以期为中国乃至全球城市的低碳经济转型和21世纪控温目标的实现提供新的思路 and 理论依据.

2 模型方法与数据

2.1 城市碳代谢分析方法框架

本研究的城市碳代谢评估方法框架目标为用于分析经济社会部门与自然环境间的碳流动所引起的当下和未来气候影响(图1). 本研究框架主要针对物质碳在城市区域中的代谢, 不考虑发生在其他上游城市或地区的贸易相关碳排放(即“虚拟碳”). 与传统关注二氧化碳等温室气体为主的碳账户不同, 本研究所提出的方法框架从系统的角度出发, 在经济社会各部门碳排放基础上拓展核算的边界, 量化经济社会活动和自然过程等各环节对城市碳代谢的贡献. 在此基础上, 建立了由流量指标和结构指标组成的评估体系, 确定城市消费产品管理相关的脱碳现状与减排潜力, 可为城市碳管理提供更为全局的理论与方法学依据.

根据城市内各经济社会部门和自然组分之间的相互作用, 建立了碳代谢系统的统一核算框架, 主要由五个经济部门(农业、制造业和服务业、建筑业、交通部门和生活消费), 以及城市本地生态系统、外部市场等组分构成. 该框架综合考虑自然生物物理过程和社会经济活动, 涵盖了不同部门之间的碳流, 城市经济

体与自然生态系统的碳交换(包括本地获取和供应、外来进口、回收利用等流入及出口、排放和固体废弃物等流出), 以及各经济社会部门的碳存量变化. 由于目前仍缺乏城市尺度的物质代谢全球化数据库, 本研究根据碳代谢系统的结构需求, 对城市及区域的物流数据(如商品购买、物料输入、燃料消费、碳排和废物处理等)进行了逐一编制. 然后, 根据含碳因子将物质流(以t物质为单位)折算成碳流(以吨碳(t C)为单位). 在这部门核算基础上, 本研究在总量和人均水平上定量分析城市碳流总体情况.

2.2 城市碳代谢系统评估指标体系

基于碳流核算框架, 本研究建立了城市碳代谢系统评估指标体系, 从流量水平及系统结构两个角度, 评估国内外不同城市的碳代谢性能与经济社会脱碳程度. 与传统的碳排放核算指标相比, 碳代谢系统评估涉及经济社会和自然环境的范畴, 涵盖了进口、出口、存量变化和废物输出等多个环节, 因此可以更为系统地捕捉到城市气候影响的动态变化, 并反映出全球城市的脱碳现状和未来重点领域的碳减排潜力.

该指标体系具体由流量指标和结构指标两大类组成. 其中, 流量(包括存量变化)指标量化了当年城市碳代谢各过程的综合影响, 以总量或人均水平进行表征; 结构指标指示的是代谢路径的组成比例和分布特征, 以百分比表征. 表1总结归纳了本研究中城市碳代谢系

图1 城市碳代谢分析方法框架

表 1 基于流量和结构的城市碳代谢系统评估指标体系^{a)}

指标类型	具体指标	分析视角	基本定义	评估属性	数据可获得程度
流量指标	总碳通量(TCT)	同化-异化混合端	城市各部门碳流通量之和	指示城市碳代谢的信息容量	低
	总碳输入(TCI)	同化端	从各类途径输入到城市内部的碳流量	指示城市区域内活动引起的气候影响	低
	总碳进口(TCM)	同化端	城市从外部环境进口的碳流量	指示城市从外部环境进口的资源和产品所带来的气候影响	中
	总碳出口(TCE)	异化端	向外部环境输出的碳流量	指示城市所生产出口的资源和产品所带来的气候影响	中
	碳贸易赤字(CT)	同化-异化混合端	城市总碳进口与总碳出口之差	指示城市系统所摄入的净碳流量	中
	碳滞留量(CS)	异化端	以耐用品形式暂滞留在城市经济体的碳量	指示当年城市系统碳库存的变化	低
	碳排放量(CE)	异化端	城市各经济社会部门人为碳排放(二氧化碳)之和	注意在本论文框架仅包含直接排放和电力排放, 不包含范围三的间接碳排	高
	碳废置量(CW)	异化端	城市各部门固体废弃物之和	指示城市消费所废置的物质碳大小	中
	物质碳累积量(CA)	异化端	城市气态碳排放之外的输出碳流量之和	指示城市经济体消费和出口引起的累积碳排放风险	低
结构指标	碳贸易赤字率(CTR)	同化-异化混合端	城市总碳进口与总碳出口之差占总碳平衡的比例	指示城市系统所摄入的净碳流量在城碳账户中的重要程度	中
	碳滞留率(CSR)	异化端	城市中滞留的碳占总碳通量的比例	指示城市滞留碳对总碳平衡的贡献	低
	碳排放率(CER)	异化端	城市碳排放占总碳通量的比例	指示城市碳排放量对总碳平衡的贡献	中
	碳废置率(CWR)	异化端	城市含碳固体废物占总碳通量的比例	指示城市含碳固体废物对总碳平衡的贡献	中
	物质碳累积率(CAR)	异化端	城市未释放的物质碳占总碳通量的比例	指示在总碳平衡中城市未来碳排放风险比率	低

a) 分析视角中城市代谢中同化端-异化端的定义见文献(Goodland和Daly, 1996), 即同化端主要指资源的输入和能量的摄取, 而异化端主要指废物废气的输出和能量的耗散

统的相关评估指标的特征, 包括分析视角(代谢过程的同化端、异化端或同化-异化混合端)、基本定义(所测算相关指标的物理意义)、评估属性(评估指标针对的具体方面)和已测算程度(即现有文献对该指标的测算程度, 分为低、中、高三种)等4方面. 无论是同化端、异化端或同化-异化混合端, 均可以选取指标以反映某一个维度的城市的碳代谢系统, 具有相对的不可替代性. 相比已有大量研究的碳排放指标, 涉及碳赤字、进出口量、废置量的测算程度相对较低, 而部门活动相关的碳通量、碳输入以及城市内部的存量等指标的测算程度最低.

在分部门核算中, 部门*i*的总碳流通量(T_i)表示该部门联接的所有碳流量, 既可以从输入端也可以从输出端来表征及量化, 如式(1)所示:

$$\begin{aligned} T_i &= \sum_{j=1}^n f_{ji} + f_{\text{ext}i} + f_{\text{loc}i} + f_{\text{rec}i} \\ &= \sum_{i=1}^n f_{ij} + f_{\text{icms}} + f_{\text{iwas}} + f_{\text{iloc}} + f_{\text{ics}}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, *i*和*j*分别是行方向的经济部门和列方向的经济部门; *n*是部门总数; f_{ji} 和 f_{ij} 分别表示从部门*j*流向部门*i*以及从部门*i*流向部门*j*的碳流量; $f_{\text{ext}i}$ 、 $f_{\text{loc}i}$ 和 $f_{\text{rec}i}$ 分别为城市以外的碳输入(即碳进口)、当地碳供应和循环利用量; f_{icms} 、 f_{iwas} 、 f_{iloc} 和 f_{ics} 分别是碳排放、含碳固体废弃物、可降解的循环碳流和碳存量变化.

在整体核算上, 城市总碳流通量(TCT)表示所有部门碳流通量之和. 碳流通总量, 不仅包括自然界进口的碳, 还包括部门间的碳流动, 可用于指示城市碳代谢的容量, 反映城市系统和外界以及自然系统间碳交换的

完整信息. 某个城市的总碳通量大, 不能说明其气候影响更大, 但可以反映出含碳产品涉及的流通环节更多, 因此对于各部门的潜在管理路径也更复杂. 比如, 如果某一城市比另一城市的零售服务业碳通量更大, 就应该考虑到在前一城市管控零售服务业可能会对其他部门产生更为显著和广泛的影响. 与TCT不同, 总碳输入(TCI)为城市区域内经济社会活动所驱动的城市碳代谢规模, 反映出整个城市经济体的气候影响(包括直接影响和潜在影响), 如式(2)~(3)所示:

$$\text{TCT} = \sum_{i=1}^n T_i, \quad (2)$$

$$\text{TCI} = \sum_{i=1}^n f_{\text{exi}} + f_{\text{loci}} + f_{\text{reci}}. \quad (3)$$

此外, TCI强度为单位城市生产总值所驱动的碳输入, 可以指示城市经济体碳代谢影响强度, 而TCT强度单位城市生产总值所驱动的碳通量可以指示城市经济体碳代谢的信息强度. 相对于碳排放的传统分析, 城市经济社会各部门碳输入和碳通量的核算为代谢视角下的城市碳代谢系统评估提供了定量化基础, 支持实现更为系统的城市间碳账户比较.

城市总碳进口(TCM)表示从外部环境进口碳流总量(资源和产品进口), 而城市总碳出口(TCE)是向外部环境输出的碳流总量(资源和产品出口), 分别可以由式(4)和式(5)得出:

$$\text{TCM} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ji} + \sum_{i=1}^n f_{\text{exi}}, \quad (4)$$

$$\text{TCE} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n f_{ij} + \sum_{i=1}^n f_{\text{icms}}. \quad (5)$$

碳贸易赤字(CT)表示城市摄入净碳量, 由城市总碳进口(TCM)与总碳出口(TCE)之差计算得到(式(6)). 相对应, 碳贸易赤字率(CTR)是碳贸易赤字占总碳输入的比例, 用于表示城市对于净碳进口相对依赖度(式(7)). 大部分现代都市存在明显的生产活动外包现象, 城市生产一般远不足以满足城市居民的消费和投资需求. 有研究表明, 这一现象在收入和消费水平更高的城市更为明显(Minx等, 2013; 蔡博峰, 2014). 碳贸易赤字可以反映出进出口的差异, 从代谢的角度揭示不同城市对外的依赖程度是否存在差异.

$$\text{CT} = \text{TCM} - \text{TCE}, \quad (6)$$

$$\text{CTR} = \text{CT} / \text{TCT}. \quad (7)$$

碳滞留量(CS)是以注入城市库存, 暂时滞留在城市经济体中的碳, 反映出被研究年份的碳储量变化(式(8)). 相对应, 碳滞留率(CSR)是碳滞留量占总碳平衡(即碳通量中扣除中间输出流量, 可从异化端进行衡量)的比例(式(9)). 类似的存量变化指标在物质流分析中较为常见, 但多为针对氮、磷、铁等元素, 对于碳元素的追踪分析不足(石磊和楼俞, 2008). CS和CSR可为估算未来较长一段时间的存量释放引起的新增碳排放提供关键信息.

$$\text{CS} = \sum_{i=1}^n f_{\text{ics}}, \quad (8)$$

$$\text{CSR} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{ics}}}{\text{TCT} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ji}}. \quad (9)$$

碳排放量(CE)和碳释放率(CER)分别是城市各部门碳排放量之和及其占总碳平衡的比例(式(10)和(11)). CE是目前测算较多的低碳衡量指标, 与城市的气候变化影响直接相关(Kennedy等, 2009). CER是从代谢异化端反映含碳产品最终有多少直接转化成为碳排放的结构指标. 由于CER的计算需要代谢信息的支撑, 目前测算程度并不高, 需要进一步研究讨论其对于城市脱碳的政策意义.

$$\text{CE} = \sum_{i=1}^n f_{\text{icms}}, \quad (10)$$

$$\text{CER} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{icms}}}{\text{TCT}}. \quad (11)$$

碳废置量(CW)和碳废置率(CWR)分别是指城市各部门固体废弃物之和(除去可立即分解的生物有机质)以及其占总碳平衡的比例(式(12)和(13)). 固体废弃物在焚烧过程中将主要以二氧化碳的形式释放碳, 而在填埋过程中也可能大量释放甲烷, 均产生温室效应. 因此, 量化固体废弃物中的含碳水平, 并进行不同类型的区分, 结合“无废城市”等规划设计, 将是未来碳管理很重要的一环.

$$\text{CW} = \sum_{i=1}^n f_{\text{iwas}}, \quad (12)$$

$$\text{CWR} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{\text{iwas}}}{\text{TCT}}. \quad (13)$$

物质碳累积量(CA)是指除去碳排放和城市生态系

统循环之外碳流量(即碳存量、废置、出口和家庭碳消费之和), 而物质碳累积率(CAR)则为物质碳累积量与总碳平衡之比, 用于表示城市经济体中物质碳累积量的大小和结构情况(式(14)和(15)). 这部分的物质碳在城市中(本城市或下游城市)以各种形式累积起来, 可反映城市实时碳代谢增长(或消减)状态以及消费调整所带来的减排潜力变化. 为了提高城市间的可比性, 本研究以人均(t C/人)和结构比例(百分比)的形式量化城市碳代谢各类评估指标.

$$CA = \sum_{i=1}^n T_i - \sum_{i=1}^n f_{iems} - \sum_{i=1}^n f_{iloc}, \quad (14)$$

$$CAR = \frac{\sum_{i=1}^n T_i - \sum_{i=1}^n f_{iems} - \sum_{i=1}^n f_{iloc}}{TCT}. \quad (15)$$

2.3 数据收集与处理

本研究以12个全球城市作为研究案例, 包括北京、天津、南京、广州、开普敦、伦敦、洛杉矶、纽约、巴黎、新加坡、悉尼和多伦多. 国内城市案例包括北方和南方城市各两个, 在经济体产业结构方面也具有多样性; 国外城市案例主要分布在5大洲的相对发达国家, 在经济规模、收入水平、人口密度上各不相同, 但在各自国家的碳排放总量中占了相当份额, 同时低碳绿色发展实行较早. 所选择的案例城市均存有较为可靠的城市代谢数据记录. 所选城市物质流动和能源消费的数据获取方法和编制过程在Chen等(2020b)中有详细介绍. 不同物质含碳因子的数据可以从IPCC等报告和文献获取, 包括燃料、木材和木制产品、纸张、食物和其他农业产品、工业用料、建材等(例如, Fujimori和Matsuoka, 2007; Lauk等, 2012; Hao等, 2015). 总的来说, 由于目前还没有专门针对全球城市的代谢流数据库, 因此模型中使用的数据是由城市层面的能源和物质流逐个调查编制而成. 编制的步骤包括: (1) 在实证案例分析中, 通过查阅各城市的统计年鉴或城市官方统计网站, 本研究选择了能够获得详细、可靠信息的年份(由于数据稀缺, 本研究把分析的时间固定在2008年前后), 最大程度满足碳代谢核算框架的数据要求, 保持计算的信息可靠性和城市间可比性; (2) 与其他经济和环境统计数据相互补充和校正, 对于不来源同源的碳代谢流动进行核算, 并分析各部门碳代谢流的最终流向; (3) 统一按照碳代谢核算框架

对数据进行部门间编制和输入-输出调平, 确保每个经济社会部门对应的碳账户达到平衡并满足分析的需求, 支持城市各个碳代谢系统指标的评估. 国内能源消费和建筑面积等数据的主要来源来自各城市官方统计年鉴, 国外城市相关数据主要来源于Grubler等(2012)和Kennedy等(2015)等文献报告.

3 结果与讨论

3.1 国内外城市碳代谢规模与结构比较

图2分析了国内外城市碳通量、碳输入量和碳排放量三个指标的差异分布. 国内城市碳输入(TCI)在32~72Mt, 按人均水平为3.5~6.4t(均值为4.1t), 低于8个国外城市案例的人均TCI值(4.8t). 碳通量也呈现相似的差异. 国内城市的总碳通量(TCT)在65~140Mt(按人均, 均值为8.1t), 而国外城市的TCT为40~78Mt(人均水平为9.5t左右). 无论从TCI还是TCT的角度衡量, 南京和广州的碳代谢规模与伦敦和巴黎相近. 但由于不同的发展规模(如人口规模、产品消费、商业和住宅建设), 北京和天津的总TCT是这两个欧洲城市的2倍, 但人均TCT都在7~8t, 远低于悉尼和多伦多的人均水平(11~12t). 一个重要原因是, 国内大城市的人口密度比悉尼和多伦多更大, 公共设施的利用率也显著更高.

虽然各城市不同部门的碳流比例有所不同, 但总体来说, 占主导地位的部门是制造业和服务业, 其次依次是建筑业、生活消费和交通运输部门. 国内的案例城市(北京、天津、南京和广州)比欧美城市有更高的制造业和服务业相关的碳通量和碳输入(平均高7~12%), 但在家庭生活消费上显然更低(平均低6~9%). 比起碳排放, 城市间的差异有所缩小. 碳排放为全球城市最主要的碳代谢终点之一, 占城市总TCI的40~54%, 占城市总TCT的20~27%. 也就是说, 城市碳代谢需要比城市即时碳排放以外的另外3/4的碳流. 此外, 这一比例在城市间差异较大, 如巴黎和洛杉矶的碳排放比例比北京和天津高出约7~8个百分点. 对于交通部门, 几乎全部的碳输入量均会以碳排放形式代谢, 主要与车辆与交通基础设施的化石能源消费的主导作用有关. 相比下, 建筑部门的碳排放只占其碳输入的9~29%, 剩下的大部分为木材等建筑材料与原生资源的处置. 制造业和服务业的比例介于交通部门和建筑部门之间, 即碳排放和产品物质碳各占一半左右. 由

图 2 国内外城市碳通量、碳输入量和碳排放量的分部门差异

由此可见, 碳通量、碳输入量和碳排放量在分析国内外城市碳账户差异时可提供不同侧面的信息, 具有一定互补性, 因此三者刻画各城市部门的碳代谢过程上均有重要价值, 加以区分的同时也应该注意结合应用。

3.2 城市碳代谢影响因素分析

除了各部门的碳排放, 还有其他重要的物质碳流组成城市部门层面的碳代谢账户。因此, 本研究通过相关分析观察碳代谢的影响因素。研究发现, 城市总碳输入和总碳通量与碳排放在人均水平上调整线性拟

合优度均达到0.85以上(图3a和3c), 在强度水平上的调整线性拟合优度均达到0.90以上, 存在显著的相关性(图3b和3d)。这说明, 城市的经济发展水平和生活方式不仅是决定了其碳排放量, 更是对整个碳代谢系统有广泛的影响(赵荣钦等, 2009; Chen和Chen, 2012)。比如, 多伦多的人均碳排放是北京2.8倍, 而多伦多的人均碳通量和人均碳输入分别是北京的1.6倍和1.5倍。多伦多的人均城市生产总值是北京3.9倍, 同时前者也有更大的人均居住面积和更长的通勤距离, 决定了其有更高的人均气候影响。然而, 北京的碳排放强度

图3 人均和强度水平下城市碳强度、碳输入与碳排放相关性以及排名差异

(单位生产总值的碳排放)是多伦多的2.4倍。从碳代谢的视角,这一技术差异更为明显,北京的碳强度(单位生产总值的碳强度)和碳输入强度(单位生产总值的碳输入)是后者的2.9倍左右。广州作为与巴黎人口规模相当的特大城市(1100万左右),其人均碳通量和人均碳输入要仅高出后者11%左右,在强度上却高出后者4倍以上。

在人均和强度两个角度综合判断,均可以清晰看

出三个指标在表征城市气候影响上存在一定的差异(图3e和3f)。虽然人均排名上,国内城市在三个碳指标评价中都排在中游以后,但从排放转到TCT和TCI评估后排名均有变化。北京和广州在人均碳排放的排名上分别处于12个城市的第8位和第11位,但按照人均碳输入和碳强度,北京和广州的排名均下降1名(即气候影响变高);相似地,天津人均碳输入和碳强度排名则比人均碳排放上升了2名;南京的情况刚好相反,即人均

碳输入和碳通量排名相对于碳排放有所上升(即气候影响变低)。从TCT/TCI/排放强度的角度看,国内城市均排在前四位,相对于国外发达地区的城市仍有较大的下降空间。

图4a表明,城市碳代谢规模与能源消费高低和建筑面积大小有关。城市人均碳通量与人均能源消费具有较强的相关性(调整拟合优度为0.78)。比如,多伦多的人均能源消费量(163GJ/人)是南京和广州的2倍左右,而其人均TCT也达到是后两者的1.7倍。能源消费与城市制造业和服务业发展、交通运行和居民生活等均息息相关,与其他资源输入具有耦合性,因此也在一定程度上决定了城市的碳代谢规模。人均TCT与能源强度并不存在显著的相关性。能源强度更多的是用于揭示城市间发展阶段和技术水平的差异,并不与碳代谢规模直接关联。图4b表明,城市人均碳通量与人均建筑面积也具有一定的相关性(调整拟合优度为0.39),而与人均住房面积也有类似的相关性。比如,悉尼居民拥有两倍于南京的建筑和住房面积,而其TCT也是后者的1.5倍。有研究表明,更大的人均居住面积会带来能耗的额外增加(Kennedy等, 2015)。建筑面积可反映城市建设的规模,同时也影响了建筑物的耗能程度,进而左右着城市的气候影响。

3.3 国内外城市碳代谢系统评估

城市低碳评估指标的结果与排名见图5。所有案例城市的碳贸易赤字(CT)和碳贸易赤字率(CTR)均为正值,说明城市消费多于其生产(越大说明该城市越偏向于消费型)。结果显示,多伦多的CT值最高(4.9t C/人),而南京的CTR均为最高(83%)。城市地区的物质碳对外部市场和环境的依赖性极高,与能源和资源的对外高度依赖性一致。其中,生活消费、建筑业、制造业和服务业都在城市碳进口中扮演着重要的角色,三者之和占总碳进口量的65%以上。但其他城市在两个外部依赖度指标上的表现也不完全一致。如开普敦由于经济体较小,其赤字率比绝对值的排名更高,意味着其碳净投入值占总碳平衡比例较高。由于北京的人均碳进口量(3.5t)明显小于多伦多(5.5t),两个城市的CT差异接近2倍,而案例城市间的CTR差异较小(在73~83%)。这表明,从结构上来说,城市碳代谢对于外环境的依赖程度较为一致,大量的碳以基础设施、食物、燃料等形式被城市所消费和累积,表现出了相对

图4 城市人均碳通量与能源消费和建筑面积的相关性

统一的碳占用模式。

滞留碳(CS)和滞留碳率(CSR)的城市排名也有较大差异,但国内城市的位置相对一致。北京当年以库存增加的方式滞留在城市内部为1.1t C/人,其CS和CSR值在案例城市中均为最高。相比较,多伦多和悉尼具有较高的人均CS值,但CSR值相对较低,结构上的碳累积程度不高,与这些城市的较高的人均消费和特定的城市布局模式有关。比较之下,南京和广州当年的碳库存积累的速度较慢,略低于欧美城市。但从代谢结构看,南京和广州的碳累积程度排名有所提高(达到18%和16%,与天津的CSR接近),表示在其总碳平衡中,碳存量是一个非常重要的组成部分,会对未来碳减排带来潜在的挑战。有研究表明,城市经济体的累积碳可达到植被碳库的两倍以上(Churkina等, 2010; Churkina, 2012)。与Churkina等学者所估算的城市碳存量密度不同,研究结果显示从碳代谢的角度考虑,城市

图5 代谢视角下的国内外城市低碳表现差异

地区碳周转率更高。滞留碳的测度可揭示有多少碳(进口或本地供应的碳)以城市库存增加的形式被暂存在城市内部, 对于掌握城市较长时间段的脱碳潜力有重要政策意义。城市在CS和CSR的排名差异佐证了同时考察这两个指标对于城市碳库存评估和管理的必要性。

案例城市人均碳排放量(CE)在1.4~3.1t C, 城市间最大差异达到将近2.2倍(多伦多与巴黎之间的差异)。国内城市的CE排名均在第6名以后, 平均值为1.8t, 比位于北美和澳洲等城市低40%左右, 但比欧洲城市(伦敦和巴黎)高出10%。相比之下, 广州、天津和北京的碳释放率(CER)处于较低水平, 有38%左右的异化端碳代谢以排放形式释放至大气中。无论从CE还是从CER来看, 多伦多、洛杉矶和悉尼都是高碳城市, 因为交通(通勤时间长)和生活消费(消费水平高)相关的排放都较高。此外, 地理气候条件(如城市形态、城市化和年均温度)和社会运行因素(如基础设施、清洁能源可获得性和交通运输模式)都会影响城市的碳排放水平。广州的高人口密度带来的居住和交通集聚效应和较高的服务业比例也使得其有比其余几个国内城市更低的人均碳排。

不同城市人均碳废置量(CW)的差异也较大, 碳废置率(CWR)在11~23%。广州和天津的CW排名前三位(1.0t C/人以上), 而南京和北京排名靠后。这主要与食物、木材和其他资源的消费模式差异以及的建设和设施更新速度有关。尽管城市在废物和排放两者上的排名类似, 在部门层面上的分布则有很大不同。总的来说, 产生最多含碳废物的行业是建筑业, 其次是制造和服务业, 分别平均占总废弃量的38%和20%, 超过其他部门之和。因此, 在当下的无废城市和循环经济的建设中, 需要重点关注建筑业、制造业和服务业后期的废物处置过程中可能带来的高碳代谢方式及其气候影响。

最后, 人均物质碳累积量(CA)和物质碳累积率(CAR)的评估结果表明, 国内案例城市的累积程度差异较大, 与国外其他发达地区城市并无明显的分隔。南京CA值排在倒数第二, 而天津排名所有城市第四(CA值为南京的1.4倍)。从全球范围来看, 多伦多和悉尼的CA值比国内城市的均值要高出30%。但从代谢结构来看, 广州、北京和天津是CAR值最高的城市之一(即异化端碳平衡中50%左右转化为该城市或者其下

游城市的碳累积量), 比多伦多和洛杉矶高出10%. 物质碳累积量的城市排行与碳滞留率的排行有一定关联性, 表明碳滞留的过程是城市物质碳累积量的重要环节. 这两个指标从不同侧面揭示了城市输出端所显示出的物质碳累积水平. 排名较高的城市未来碳减排的可能性会增加, 需要对含碳耐用产品从生命周期角度进行有效管理, 从而实现进一步低碳或零碳经济社会发展.

在快速城市化进程中, 城市区域对全球碳平衡影响愈加巨大. 如何定义城市的碳化水平, 以及选择何种指标来评判与管理城市的低碳表现, 是气候变化应对研究的重要问题(毕军等, 2009; Chan等, 2013; Ramaswami和Chavez, 2013). 在城市碳排放核算的基础上(蔡博峰, 2011; 鞠丽萍等, 2012; 林剑艺等, 2012; Mi等, 2016), 已有较多学者从碳源碳汇、能源消费、技术变化和全球产业链等角度, 对城市的气候影响进行了评估, 并提出相应的碳减排路径(Kennedy等, 2009; 石敏俊和周晟吕, 2010; 林伯强和孙传旺, 2011; 王海鲲等, 2011; Minx等, 2013; 刘竹等, 2020). 本研究通过基于城市碳代谢账户构建了碳代谢表现评估指标体系, 以系统地揭示城市对全球变暖的贡献和未来碳减排潜力. 这一评估体系可作为城市碳管理的一种补充性的方法与工具, 为调控城市经济社会部门的发展路径提供多元化的信息, 同时也加强了碳代谢指标的政策相关性(Peters等, 2012; Chen等, 2020b). 比如, 如何在保证基本经济活动和居民生活需求的同时, 降低碳输入量和物资消耗, 如何监控城市碳的输出端, 实现城市碳库和固体废物的科学管理, 从而降低最终以

碳排放形式释放的路径. 同时, 评估最终能源和材料减量化或利用效率提升等技术也应该基于更为完整的代谢视角进行.

相较于碳的输入和流通, 总排放量和人均排放量在现有研究和决策中受到更多的关注. 学者采用自上而下或自下而上的模型, 反映城市气候变化的影响与责任应该承担的责任, 同时表明历史碳排放和“已锁定”的未来碳排放对于科学评估城市低碳程度同样重要(王微等, 2010; Price等, 2013; Ramaswami和Chavez, 2013; 蔡博峰, 2014; Lin等, 2015). 本研究表明, 在整个碳账户中排放结构也很重要, 应该在评估城市碳足迹时进行相应的考量. 几乎在每一种情况下, 流量指标和结构指标的结果都有很大的差异. 因此, 综合两者进行城市碳代谢系统的分析尤为重要, 可避免对城市综合评估造成ChanChoyEtal2013误差, 为评估城市的碳化程度、低碳转型情况等提供了更为综合性的视角, 推动管理者对于城市可持续发展和低碳社会的认知.

目前, 中国已提出了低碳城镇建设激励措施和清晰的目标任务, 将为21世纪的全球控温目标做出重要贡献(石敏俊和周晟吕, 2010; 温宗国, 2015; Fang等, 2019). 2020年9月, 中国已明确提出了2030碳达峰、2060年争取实现碳中和的目标, 而城市的低碳发展是实现这一目标的关键. 为此, 城市管理者在末端控排的同时, 还应合理处置好物质碳存量, 稳定推进中国乃至全球城市的低碳转型, 避免在脱碳过程中出现反弹式排放增长. 需要注意的是, 城市碳代谢研究尚处于初期阶段, 在方法适用性和数据完备性等方面仍面

表 2 碳代谢评估的数据局限性、不确定性和未来展望

	碳输入	碳存量变化与输出
现有数据局限	(1) 除化石燃料外, 其他含碳产品消费数据在现有年鉴并无直接记录, 时效性较差; (2) 资源循环利用的数据较为缺乏, 更新也较慢; (3) 建筑用木材的城市内外来源区分不明确	(1) 物质流数据部门间区分不细致; (2) 存量变化难以直接统计或测算, 通常以流量平衡公式推算得出; (3) 产品损耗和向外环境流动和泄露暂无统计数据
不确定性来源	(1) 进口统计边界和统计口径存在差异; (2) 同类产品的含碳量有细微差别; (3) 直接流入家庭的含碳产品追踪量化存在不确定性	(1) 出口和存量增减的统计边界和统计口径存在差异; (2) 存量释放对于碳输入的补充和碳排放的影响量化存在不确定性
未来研究展望	(1) 应协调各部门, 尽早建立统计口径更一致、完整性更高、时效性更强的城市碳代谢数据库, 满足更广泛范围的城市系统碳管理需求; (2) 应进一步区分国内输入和国外进口对于城市碳代谢的影响, 进行快速消费品和耐用用品的影响差异分析	(1) 应建立方法整合国内外不同类型城市的行业统计数据与现在的存量计算数据; (2) 应精细化固体废弃物的碳排放评估, 进一步管控固废长时段碳排放风险, 探索面向碳中和目标的废弃物处置方式; (3) 应注意与城市碳汇评估相结合, 分析城市内部的碳捕捉对于碳代谢评估的影响

临较大的挑战。表2总结了现有碳代谢评估的数据局限性、不确定性, 并提出未来改进和完善的方向, 为下一步研究提供参考。为了实现更高效的减排管理, 目前仍需要开发和健全经济社会碳代谢数据库, 克服城市尺度物质流等数据不完备的问题。同时, 全面探讨如何协调各部门, 建立面向低碳甚至零碳排放的科学碳管理机制, 进一步区分国内输入和国外进口对于城市碳代谢系统的影响, 进行快速消费品和耐用品的影响差异化。此外, 相关管理部门还应精细化固体废弃物的碳减排工作, 进一步管控固废长时段碳排放风险, 结合废弃物的资源化和碳汇的增加, 探索面向碳中和目标的下一代处置思路与方案, 为实现低碳、零碳经济社会的高质量发展提供决策支持。

4 结论

在碳代谢分部门输入-输出核算的基础上, 本研究分析了碳输入、碳通量等指标与多个社会经济因素的相关性, 进而建立了由流量指标和结构指标组成的城市碳代谢系统评估体系, 对国内外12个地理和经济差异巨大的案例城市进行评估, 从人均水平和结构组成两个角度来比较城市间低碳表现差异。该评估体系在对城市地区进行低碳评估时, 既考虑碳排放, 又考虑包括其他流量和存量和在内的整个经济社会碳账户, 可揭示城市气候变化影响现状和未来碳减排潜力, 对不同的城市乃至区域的低碳表现评估具有普适性。研究主要结论包括以下4个方面: (1) 国内的案例城市比欧美城市有更高的制造业和服务业相关的碳通量和碳输入, 但在家庭生活消费上显然更低。比起碳排放, 这些差异有所缩小, 可见碳通量、碳输入量和碳排放量在分析城市气候影响时可提供不同侧面的信息, 用于城市碳管理时应加以区分并结合判断。(2) 城市的经济发展水平和生活方式不仅是决定了其人均碳排放量, 也对人均碳输入和碳通量有显著的影响。同样作为大型城市, 北京、天津、南京和广州虽然人均碳代谢水平较低, 但其碳通量强度和碳输入强度却是欧美发达城市的3倍以上。(3) 城市人均碳通量与人均能源消费显著相关, 与人均建筑面积和人均住房面积也具有一定的相关性, 说明城市能源消费和建设规模带来的人为气候影响的具有广泛性和综合性。(4) 不同的评价指标看国内外城市低碳表现排名的差异较大, 可从

不同侧面揭示城市的低碳现状和减排潜力。因此, 结合运用流量型和结构型的碳代谢指标对合理评估低碳或零碳经济社会发展有重要的政策意义。

致谢 感谢刘竹教授、Klaus HUBACEK教授、Kuishuang FENG教授、Laixiang SUN教授在本论文研究想法上给予的建议。

参考文献

- 毕军, 刘凌轩, 张炳, 王仕. 2009. 中国低碳城市发展的路径与困境. 现代城市研究, 24: 13-16
- 蔡博峰. 2011. 世界城市碳排放总量控制和交易体系的启示. 环境保护, 23: 72-73
- 蔡博峰. 2014. 城市温室气体清单核心问题研究. 北京: 化学工业出版社
- 丁凡琳, 陆军, 赵文杰. 2019. 城市居民生活能耗碳排放测算及空间相关性研究——基于287个地级市的数据. 经济问题探索, (5): 40-49
- 韩梦瑶, 姚秋蕙, 劳浚铭, 唐志鹏, 刘卫东. 2020. 中国省域碳排放的国内外转移研究: 基于嵌套网络视角. 中国科学: 地球科学, 50: 748-760
- 鞠丽萍, 陈彬, 杨谨. 2012. 城市产业部门CO₂排放多层次核算研究. 中国人口·资源与环境, 22: 28-34
- 林伯强, 孙传旺. 2011. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标. 中国社会科学, (1): 64-76
- 林伯强, 刘希颖. 2010. 中国城市化阶段的碳排放: 影响因素和减排策略. 经济研究, 45: 66-78
- 林剑艺, 孟凡鑫, 崔胜辉, 于洋, 赵胜男. 2012. 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例. 生态学报, 32: 3782-3794
- 刘竹, 耿涌, 薛冰, 郝凤明, 焦江波. 2011. 城市能源消费碳排放核算方法. 资源科学, 33: 1325-1330
- 刘竹, 孟靖, 邓铸, 路平, 关大博, 张强, 贺克斌, 宫鹏. 2020. 中美贸易中的隐含碳排放转移研究. 中国科学: 地球科学, 50: 1633-1642
- 刘刚, 曹植, 王鹤鸣, 刘立涛, 陈伍, 王键. 2018. 推进物质流和社会经济代谢研究, 助力实现联合国可持续发展目标. 中国科学院院刊, 33: 30-39
- 卢伊, 陈彬. 2015. 城市代谢研究评述: 内涵与方法. 生态学报, 35: 24-37
- 潘家华. 2013. 新型城镇化道路的碳预算管理. 经济研究, (3): 13-15
- 石磊, 楼俞. 2008. 城市物质流分析框架及测算方法. 环境科学研究, 21: 196-200
- 石敏俊, 周晟吕. 2010. 低碳技术发展对中国实现减排目标的作用. 管理评论, 22: 48-53
- 王锋, 吴丽华, 杨超. 2010. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究. 经济研究, 45: 123-136

- 王微, 林剑艺, 崔胜辉, 吝涛. 2010. 碳足迹分析方法研究综述. *环境科学与技术*, 33: 71–78
- 王海鲲, 张荣荣, 毕军. 2011. 中国城市碳排放核算研究——以无锡市为例. *中国环境科学*, 31: 1029–1038
- 魏一鸣, 范英, 王毅, 刘兰翠, 梁巧梅, 吴刚, 曹明奎, 黄耀, 王绍强. 2006. 关于我国碳排放问题的若干对策与建议. *中国科学院院刊*, 21: 15–20
- 温宗国. 2015. 工业部门的碳减排潜力及发展战略. *中国国情国力*, 275: 14–16
- 夏楚瑜, 李艳, 叶艳妹, 史舟, 刘婧鸣, 李效顺. 2018. 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析——以杭州为例. *生态学报*, 38: 73–85
- 夏琳琳, 张妍, 李名镜. 2017. 城市碳代谢过程研究进展. *生态学报*, 37: 4268–4277
- 薛冰, 李春荣, 刘竹, 耿涌, 郝凤明. 2011. 全球1970~2007年碳排放与城市化关联机理分析. *气候变化研究进展*, 7: 423–427
- 张宁, 张维洁. 2019. 中国用能权交易可以获得经济红利与节能减排的双赢吗? *经济研究*, 54: 167–183
- 张友国. 2010. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响. *经济研究*, 45: 120–133
- 赵荣钦, 黄贤金, 徐慧, 高珊. 2009. 城市系统碳循环与碳管理研究进展. *自然资源学报*, 24: 1847–1859
- 赵荣钦, 黄贤金. 2013. 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架. *生态学报*, 33: 47–55
- Chan E, Choy L, Yung E. 2013. Current research on low-carbon cities and institutional responses. *Habitat Int*, 37: 1–3
- Chen S, Chen B. 2012. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria. *Environ Sci Technol*, 46: 4498–4506
- Chen S, Chen B, Feng K, Liu Z, Fromer N, Tan X, Alsaedi A, Hayat T, Weisz H, Schellnhuber H J, Hubacek K. 2020a. Physical and virtual carbon metabolism of global cities. *Nat Commun*, 11: 182
- Chen S, Long H, Fath B D, Chen B. 2020b. Global urban carbon networks: Linking inventory to modelling. *Environ Sci Technol*, 54: 5790–5801
- Churkina G, Brown D G, Keoleian G. 2010. Carbon stored in human settlements: The conterminous United States. *Glob Change Biol*, 16: 135–143
- Churkina G. 2012. Carbon cycle of urban ecosystems. In: Rattan L, Bruce A, eds. *Carbon Sequestration in Urban Ecosystems*. Netherlands: Springer
- Creutzig F, Baiocchi G, Bierkandt R, Pichler P P, Seto K C. 2015. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 6283–6288
- Duan H, Zhou S, Jiang K, Bertram C, Harmsen M, Kriegler E, van Vuuren D P, Wang S, Fujimori S, Tavoni M, Ming X, Keramidas K, Iyer G, Edmonds J. 2021. Assessing China's efforts to pursue the 1.5°C warming limit. *Science*, 372: 378–385
- Fang K, Tang Y, Zhang Q, Song J, Wen Q, Sun H, Ji C, Xu A. 2019. Will China peak its energy-related carbon emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese provinces. *Appl Energy*, 255: 113852
- Fujimori S, Matsuoka Y. 2007. Development of estimating method of global carbon, nitrogen, and phosphorus flows caused by human activity. *Ecol Economics*, 62: 399–418
- Goodland R, Daly H. 1996. Environmental sustainability: Universal and non-negotiable. *Ecol Appl*, 6: 1002–1017
- Grubler A, Bai X, Buettner T, Dhakal S, Fisk D, Ichinose T, Keirstead J, Sammer G, Satterthwaite D, Schulz N, Shah N, Steinberger J, Weisz H. 2012. Urban Energy Systems. In: *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. Cambridge/New York: IIASA, Austria and Cambridge University Press
- Hao Y, Su M, Zhang L, Cai Y, Yang Z. 2015. Integrated accounting of urban carbon cycle in Guangyuan, a mountainous city of China: The impacts of earthquake and reconstruction. *J Cleaner Prod*, 103: 231–240
- ICLEI, WRI and C40. 2014. Global Protocol for Community-Scale GHG Emissions. <http://www.iclei.org/activities/agendas/low-carbon-city/gpc.html>
- Kennedy C A, Stewart I, Facchini A, Cersosimo I, Mele R, Chen B, Uda M, Kansal A, Chiu A, Kim K G, Dubeux C, Lebre La Rovere E, Cunha B, Pincetl S, Keirstead J, Barles S, Pusaka S, Gunawan J, Adegbile M, Nazariha M, Hoque S, Marcotullio P J, González Otharín F, Genena T, Ibrahim N, Farooqui R, Cervantes G, Sahin A D. 2015. Energy and material flows of megacities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 5985–5990
- Kennedy C, Steinberger J, Gasson B, Hansen Y, Hillman T, Havranek M, Pataki D, Phdungsilp A, Ramaswami A, Mendez G V. 2009. Greenhouse gas emissions from global cities. *Environ Sci Technol*, 43: 7297–7302
- Lauk C, Haberl H, Erb K H, Gingrich S, Krausmann F. 2012. Global socioeconomic carbon stocks in long-lived products 1900–2008. *Environ Res Lett*, 7: 034023
- Liang S, Yu Y, Kharrazi A, Fath B D, Feng C, Daigger G T, Chen S, Ma T, Zhu B, Mi Z, Yang Z. 2020. Network resilience of phosphorus cycling in China has shifted by natural flows, fertilizer use and dietary transitions between 1600 and 2012. *Nat Food*, 1: 365–375
- Lin J, Hu Y, Cui S, Kang J, Ramaswami A. 2015. Tracking urban carbon footprints from production and consumption perspectives. *Environ Res Lett*, 10: 054001
- Long Y, Yoshida Y, Fang K, Zhang H, Dhondt M. 2019. City-level household carbon footprint from purchaser point of view by a

- modified input-output model. *Appl Energy*, 236: 379–387
- Mi Z, Zhang Y, Guan D, Shan Y, Liu Z, Cong R, Yuan X C, Wei Y M. 2016. Consumption-based emission accounting for Chinese cities. *Appl Energy*, 184: 1073–1081
- Minx J, Baiocchi G, Wiedmann T, Barrett J, Creutzig F, Feng K, Förster M, Pichler P P, Weisz H, Hubacek K. 2013. Carbon footprints of cities and other human settlements in the UK. *Environ Res Lett*, 8: 035039
- Ohno H, Sato H, Fukushima Y. 2018. Configuration of materially retained carbon in our society: A WIO-MFA-based approach for Japan. *Environ Sci Technol*, 52: 3899–3907
- Peters G P, Davis S J, Andrew R. 2012. A synthesis of carbon in international trade. *Biogeosciences*, 9: 3247–3276
- Price L, Zhou N, Fridley D, Ohshita S, Lu H, Zheng N, Chen C. 2013. Development of a low-carbon indicator system for China. *Habitat Int*, 37: 4–21
- Ramaswami A, Chavez A. 2013. What metrics best reflect the energy and carbon intensity of cities? Insights from theory and modeling of 20 US cities. *Environ Res Lett*, 8: 035011
- Seto K C, Güneralp B, Hutya L R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 16083–16088
- Seto K, Dhakal S, Bigio A, Blanco H, Delgado G, Dewar D, Huang L, Inaba A, Kansal A, Lwasa S, McMahon J E, Müller D B, Murakami J, Nagendra H, Ramaswami A. 2014. Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. In: Edenhofer O R, et al., eds. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Shigetomi Y, Ohno H, Chapman A, Fujii H, Nansai K, Fukushima Y. 2019. Clarifying demographic impacts on embodied and materially retained carbon toward climate change mitigation. *Environ Sci Technol*, 53: 14123–14133
- Sovacool B K, Brown M A. 2010. Twelve metropolitan carbon footprints: A preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 38: 4856–4869
- United Nations. 2019. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations
- van Soest H L, den Elzen M G J, van Vuuren D P. 2021. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nat Commun*, 12: 2140
- Wolman A. 1965. The metabolism of cities. *Sci Am*, 213: 178–190
- Yu B, Wei Y M, Kei G, Matsuoka Y. 2018. Future scenarios for energy consumption and carbon emissions due to demographic transitions in Chinese households. *Nat Energy*, 3: 109–118

(责任编辑: 刘卫东)