

国外低碳城市研究进展

秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先, 闫卫阳, 王 喜

(河南大学黄河文明与可持续发展研究中心/环境与规划学院, 开封 475004)

摘 要:在人类应对全球气候变化的挑战中,低碳城市逐渐成为低碳经济与低碳社会的空间聚焦点。文章从城市碳排放驱动因素、低碳城市循环与代谢、低碳城市空间规划、低碳城市环境管治等四方面系统归纳了国外低碳城市研究的内容和模型方法,并对LMDI方法、Hybrid-EIO-LCA方法、CGE模型作了具体评述。可以认为,低碳城市研究在理论上,由可持续发展、循环经济转向低碳经济和社会论,由城市生态系统、共生城市、精明增长和公交导向细化为低碳社区的构建;在方法上,由单一计算转变到综合评估,由衍生方法借用转到低碳城市模型方法的提出;数据使用由估测数据转向明确的环境账户;空间尺度由城市个体向家庭、社区、园区、城市群等不同层面扩展;研究地域则从少数发达国家推广到发展中国家。基于低碳城市研究体系的不完备性和多学科交叉性、数据的不确定性、时空尺度的多样性等特点,当前研究应从城市共生和谐论出发,以微观尺度的调查数据为基础,综合利用现代空间信息技术,建立城市碳排放账户,对城市碳能源—经济—社会—环境(CEESE)系统的功能与机理、过程与控制以及关联与效应进行探索,创建低碳城市研究的理论与方法体系。

关 键 词:低碳城市;低碳模型;碳排放;空间尺度;国外研究进展

2003年,英国率先在《我们能源的未来》白皮书中提出“低碳经济”^[1],日本随后提出“低碳社会”^[2]，“低碳”问题引起国际社会广泛关注,而低碳城市逐渐成为低碳经济与低碳社会的空间聚焦点。据估计,到2030年世界上将有超过60%的人口居住在城镇,城市环境碳排放量占总排放量的70%^[3],低碳城市成为稳定自然生态系统、减少温室气体排放的主要力量,也是人类应对全球气候变暖挑战、保持人地和谐共生而采取的一种迫切有效的可持续发展策略。低碳城市涉及到经济、社会、资源、环境和技术诸要素,成为地理学、城市学、生态学、环境学和经济学多学科共同关注的焦点。国外学者基于可持续发展和循环经济思想,从城市生态系统、共生城市、精明增长和可持续社区层面进行理论提升,并在低碳生产、低碳能源、低碳交通、低碳建筑、低碳社区等实践领域进行了探索。本文系统回顾和总结国外低碳城市研究进展,梳理低碳城市理论与方法,旨在为我国低碳城市研究与实践提供借鉴。

1 低碳城市研究的主要内容

低碳城市是以城市空间为载体,以能源、交通、

建筑、生产、消费为要素,以技术创新与进步为手段,通过合理的空间规划和科学的环境管治,在保持经济社会有效运转的前提下,实现碳排放与碳处理动态平衡的发展模式。国外低碳城市研究主要集中在城市碳排放驱动因素、城市碳循环与碳代谢、低碳城市空间规划、低碳城市环境管治等方面,其中低碳技术的研究贯穿各个层面。根据城市碳排放、碳循环与碳代谢、碳规划与碳管治的城市“碳转移与控制”过程(图1),可以看出碳排放驱动因素研究是前提,碳循环与碳代谢研究是核心,低碳城市空间规划研究是基底,低碳环境管治研究是关键,四者共同构成了低碳城市研究相互关联的内容体系。

1.1 城市碳排放驱动因素

城市碳排放的影响因素可以分为宏观和微观两个层面(图1-①)。

宏观层面因素可以概括为城市化过程中的人口和经济增长、城市扩张、低碳技术进步、低碳城市政策和体制创新,以及城市所依赖的能源结构等。研究表明:不同地区碳排放量与人均GDP之间存在线性^[4]、倒U型^[5]和N型关系^[6];城市扩张引起城市格局和功能变化,导致碳排放时机、空间分布模式

收稿日期:2010-07; 修订日期:2010-10.

基金项目:国家教育部高校重点研究基地项目(YRCS08A15);国家973计划“应对气候变化”科技专项(2010CB955901)。

作者简介:秦耀辰(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事区域可持续发展理论、模型与信息系统研究。

E-mail: qinyc@henu.edu.cn

和构成的变化^[7];先进的低碳技术包括碳减排技术、低碳能源利用技术、碳固定与封存技术(CCS)等,直接影响城市生产和消费的碳排放水平及成本^[8-9];城市政策是追求可持续发展和实现低碳排放的有效手段^[10];城市清洁发展机制(CDM)^[11]、碳排放交易计划(ETS)^[12]、城市区域碳管理(URCM)^[13]等全球、地方气候政策需要落实到区域、城市层面,碳税^[14]、限额交易、碳信用额等是常用的政策工具^[15];城市的能源结构很大程度上决定了城市碳排放的强度^[16]。

宏观层面因素是外在的,而微观层面因素则从根本上影响着城市的碳排量。Bristowa等人研究发现,若不考虑行为变化,即使最显著的技术进步也不能满足碳削减的目标^[17]。微观层面主要是从生产和消费两方面核算碳排放,生产碳排放账户包括工业^[18]、建筑业^[19]、交通运输业^[20]、商业^[21]及宾馆服务业^[22]等方面,消费碳排放账户涵盖人类衣、食、住、行、娱乐的相关活动。在城市之间的比较研究中生产账户较为常用,但这仅仅考虑了城市“点位”的直接碳排放,忽略了城市“碳泄漏”(carbon leakage)。城市生产和消费产生的碳排放强度体现在碳基能源消耗上,能源结构和排放强度是重要指示变量,诸多学者据此分析工业^[23]、家庭^[24]、交通(私家车^[25]和货车^[26])等不同城市部门的碳排放。

1.2 城市碳循环与碳代谢

城市碳循环与碳代谢关注的主要问题是城市系统内部及跨界物质流动过程中的碳排放清单,该清单具有透明、完整、一致、可比和精确性。城市碳循环系统所涵盖的城市蔓延区和城市碳足迹区不一定毗邻,可能位于数百公里之外^[27]。城市碳循环和碳代谢主要研究城市垂直和水平两个方向的碳通量^[28]:城市开放空间、城市非开放空间以及城市扩张过程会影响城市生态系统中的土壤成分、绿地结构^[29],进而影响城市垂直碳循环;城市蔓延区和足迹区的贸易、服务和物质流动等活动影响城市的水平碳通量,即城市碳代谢(图1-②)。城市碳循环

与代谢的研究可以为城市与区域碳管理(URCM)提供坚实的理论基础。

对城市垂直碳循环而言,土壤是重要的碳库,其固碳量大约是所有陆地植被的3倍^[30],绿地(园林、草坪^[31]、树木^[32])通过光合作用将有机碳元素储存在土壤中。城市绿色空间储存和吸收CO₂,是重要的“碳汇”^[33];城市灰色空间的碳排放主要来自道路CO₂排放^[34];作为全球碳循环的一个特殊因子^[35],城市空间建成区、绿地、贫民区有不同碳循环^[36]。城市扩张导致了自然生态系统转换为城市生态系统^[37],引起植被、土壤碳库和碳通量变化^[38]。随着新技术方法应用,碳排放季节周期^[39]、每天每时能源和燃料使用方式造成的碳排放也开始受到关注^[40]。

城市碳代谢为理解城市水平碳流动提供了概念性框架^[28]。城市碳代谢研究人类活动直接和间接产生、产品整个生命周期累积的碳排放总量^[41],包括城市内利用的最终碳基能源以及跨境交通、贸易等活动产生的CO₂等。Hillman等人根据美国8个城市的数据,计算了城市内部最终利用能源、跨境交通运输以及食物、水、燃料、水泥等4种主要物质境外生产过程消耗能源的碳排放,表明跨境碳排放比境内平均多47%^[42-43]。Peters和Hertwich最近的研究发现,国际贸易中碳排放量占全球排放量的21.5%^[44],可见,城市之间、区域之间的商品和服务流动所体现的间接碳排放不容忽视。

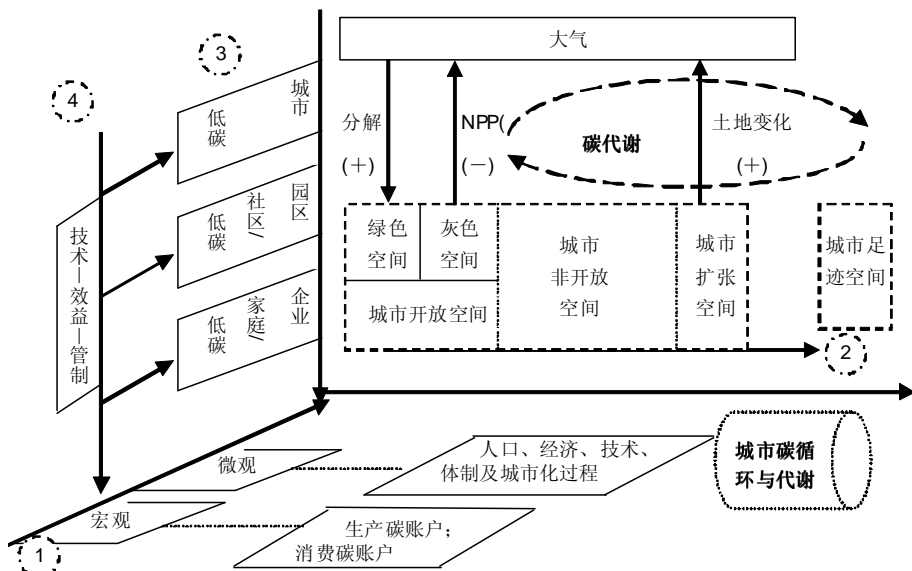


图1 低碳城市的研究体系

Fig. 1 A skeleton for low-carbon city research

1.3 低碳城市空间规划

低碳城市空间规划旨在通过合理配置土地、资源、建筑、交通等城市空间要素,确定城市低碳发展的中期、长期情景模式,调节化石燃料使用,减少城市碳排放量。低碳城市空间规划需要整合低碳社会和低碳经济的理念,关键要推进“低碳”排放或者“零碳”排放,包括低碳城市格局、用地、交通与道路系统、产业、居住区等方面内容,可将其分为3个空间尺度:低碳城市规划、低碳产业园区—居住区规划和低碳企业—家庭规划(图1-③),其中低碳城市格局、用地、交通与道路系统是城市尺度关注的主要方面,支撑着园区/社区和家庭/企业尺度的发展。

具体而言,城市格局对能源消费、碳排放的控制主要集中于紧凑型城市设计^[45],最终体现在综合式土地利用、倡导公共交通和减少对小汽车的依赖上^[46-47]。典型规划理念和模式有Jabareen的7种设计和4种模式^[48],Rickaby的6种中心分部格局^[49],Kenworthy的10个关键交通—规划功能区界定^[50]。

不同尺度社区(城市社区、部门社区、兴趣社区、智能手机社区)可以将经济—环境—社会目标整合^[51],为个人提供低碳行为的氛围与规范^[52];低碳社区规划可以合理安排住房密度,有效利用交通设施,弥补综合规划的缺陷,日渐成为规划过程的主题^[53]。工业生态学提供了描述、解释、解决城市环境问题的综合方案^[54],生态产业为企业提供了可持续发展的方向^[55],成为地方和区域发展的新范式^[56],低碳生态工业园区和集群成为流行规划模式^[57-58]。

家庭是城市的“使用者”,家庭行为、能源消费的空间范围与城市格局密切相关^[59-60],低碳家庭规划主要通过城市基础设施(交通、供暖等)的规划来实现^[61]。低碳房屋的发展依赖于低碳建筑技术和设计的出现^[62],节能建筑的推广对缓解全球变化起着不可替代的作用^[63],合理的房屋规划设计如增加密度、混合利用、邻近公交^[64],能有效地降低CO₂排放^[65],但房屋制度的多样性、低碳房屋发展面临的信任和分权挑战所带来的实施中的困难比规划设计与维护本身难度更大,而这正是人文地理学中地方权力、根植性、尺度可以解决的问题^[66]。

1.4 低碳城市环境管治

低碳城市环境管治研究以环境经济地理学为基础^[67],将碳经济化(新碳经济、低碳经济、零碳经济和碳政治经济)^[68],探讨应对气候变化的策略,分析其“成本—收益”,选定合适的低碳城市发展路径,

如低碳技术创新、低碳能源推广、调整能源供应、规范碳排放交易标准和碳交易市场等(图1-④)。

低碳城市环境管治的分析基础是新自由主义、生态现代化、技术中心主义^[69],也是研究空间、尺度、地域和人地关系的透镜^[70]。新自由主义从全球化、权力下放、市场和个人激励层面研究碳管制^[71],侧重于政府管制^[72];生态现代化市场和绿色行为有效结合能平衡城市碳经济,重点探讨了基于市场工具的清洁生产机制^[73];碳减排—经济发展并非零和博弈,而是创新、选择的结果,绿色技术经济成为城市低碳转型的新范式^[74]。

具体说,低碳城市环境在市场平台上,将自然与经济结合,从生态、经济、技术、管制角度关注碳抵消、固碳、碳交易等碳减排项目实施的成本-效益及背后的空间机制。对于碳金融、碳贸易等碳市场而言,均衡有效的投资、投资组合可使CO₂有效减排^[75],碳金融风险也为不同气候政策提供了扩大交流的机会^[76]。从技术经济角度看,产品、服务的单位成本随着经验积累而降低^[77],内生创新^[78]、技术学习、政策诱发的技术变革在消减碳排放量的同时降低了排放成本^[79];而研发和“干中学”两种不同驱动力的技术进步作用,也对应着不同的政策情景和碳税模式^[80]。从管治层面说,政府、企业、个人起着重要的作用,考虑市场环保论、运用新环境政治工具的同时^[81],也要考虑不同区域的社会文化特性,以及各种机制适用的空间尺度。

2 低碳城市研究的模型与方法

2.1 低碳城市研究模型与方法分类

随着低碳城市研究内容不断拓宽深化、研究技术不断发展进步,低碳城市研究的模型和方法取得了显著进展。根据已有文献,按照研究内容体系可把低碳城市模型方法归纳为4大类:①Laspeyres指数法、简单平均分解法(SAD)、自适应权重分解法(AWD)等指标因素分解方法^[82-83],结构分解方法^[84]、Kaya恒等式等完全分解方法^[85];②城市碳通量平衡模型^[86],过程分析法、环境投入产出法(EIO)、混合分析法(Hybrid-EIO-LCA)等城市碳足迹分析方法^[41];③情景分析法^[87]、系统动力学模型^[88]、城市元胞自动机模型^[89]等低碳城市空间规划模型方法;④可计算的一般均衡模型(CGE)^[90]、长期能源规划模型

(LEAP)^[91]和 Markal-Macro 模型^[92]等低碳城市环境管治模型(表 1)。

城市碳排放因素分解方法用以研究城市人口、经济增长、能源消费等对碳排放的影响:指标因素分解法用于分析能源结构、能源效率、能源强度、经济发展、产业结构等因素的变化;结构因素分解模型常和指标因素分解模型结合在一起使用;完全分解法是一种无残差分析方法,思路简单,操作性较强。低碳生态城市模型方法包括城市碳循环模型和碳代谢模型,前者多根据土地利用的变化来计算城市产生的碳、分解的碳和输出的碳,后者涉及物质和能量流分析、生命周期和循环代谢评价、环境投入产出分析等计算方法,现在受到越来越多的学者关注。常用的低碳城市空间规划模型方法有情景分析法、系统动力学(SD)模型、城市 CA 模型等,情景分析方法对既定减排目标下的社会情境做出长期定量规划,系统动力学模型常用 FML 模型计算和预测城市能源消费趋势和碳排放水平,城市 CA 模型通过对城市空间结构、用地结构变化的模拟预测,估测碳排放量。低碳城市环境管治模型基于城市环境—能源—经济系统,从能源经济、能源

技术、能源消费、环境、政策等方面探析碳排放的成本效益、技术可行性,从而为城市能源战略和决策提供依据,CGE、LEAP 和 Markal-Macro 等 3 种模型最为典型。上述 4 类低碳城市模型方法的理论背景不同,方法原理各异,都存在各自的优势与不足,在低碳城市研究中常被交叉综合使用,因此,低碳城市模型整合发展、综合模型体系的构建成为方法论发展的重要趋势。

2.2 典型模型评述

表 1 中的模型或方法已被广泛应用于解决许多城市碳排放—循环—规划—替代管治问题。从应用广度、完善程度、操作灵活度来看,对数平均权重(LMDI)指数法、Hybrid-EIO-LCA 法、基于 SD 的 FML 模型、CGE 模型是 4 类中的代表,分别从城市—区域、城市、城市空间、城市管治层面核算了城市碳排放量,是低碳城市模型方法研究中的核心。

LMDI(log-mean Divisia index)是一种对数平均完全分解方法,该方法弥补缺解释残差的缺陷,主要有 LMDI I 和 LMDI II 两种模型^[109],前一种模型更具灵活性,其一般形式包括乘法分解 D_{xk} 和加法分解 ΔV_{xk} ^[23]:

表 1 低碳城市研究模型与方法分类

Tab.1 Model and method classification of low-carbon city research

分类	代表模型方法	简单描述	代表人物
城市碳排放因素分解	Laspeyres 指数法	以基期数量指标作为权重,其他变量不变	Park S H ^[93]
	简单平均分解法(SAD)	用研究变量始年和末年的某种平均值做权重,LMDI 法得到广泛应用	Boyd G A ^[94] , Ang B W ^[95]
	自适应权重分解法(AWD)	利用时间段内积分求平均值	Liu X Q, Ang B W ^[96]
	结构分解法	将碳排放分解为产业部门的排放系数、投入产出系数、最终消费比例以及总产值等因子的乘积	McGregor G Swales J K ^[97]
城市碳循环	完全分解法	将经济、人口、政策同碳排放量联系起来	Kaya Y ^[98]
	直接计算法	计算城市生态系统中生产、分解、输出以及土地利用变化引起的碳排放	Svirjeva H A ^[37]
	间接推导法	直接计算城区地面一大气中的 CO ₂ 交换量	Grimmonda B ^[99]
	双参数“Γ 分布”模型	估算人口密度和城市扩张面积,进而估算城市碳排放量	Svirjeva H A ^[36]
城市碳代谢	生命周期分析(LCA)	用于分析单个产品从摇篮到坟墓的环境影响	Tukker A ^[100]
	碳足迹分析法	EIO	Leontief W ^[101]
		结合稳定的环境账户数据,综合估算碳足迹	Wiedmann T ^[102]
		Hybrid-EIO- LCA	Heijungs R ^[103]
低碳城市空间规划	情景分析法	综合使用生命周期法和环境投入产出法	Shimada K ^[104]
	FML 模型	确认未来可能发生的态势、描述各种态势的特征及发生可能性、分析各种态势的发展路径	Fong W K ^[105]
	城市规划 CA 模型	基于 SD 模型,研究和调控复杂反馈系统	Li X ^[106]
		基于 CA 模型,模拟和预测城市空间形态的变化	
低碳环境管治	自下而上模型	以能源需求、消费和环境影响为研究对象,预测其影响,分析能源方案的经济效益	Shin H C ^[107]
	自上而下模型	CGE 模型	Glu G S K ^[108]
	混合模型	Markal-Macro 模型	Contaldi M ^[92]
		将代表经济系统的宏观经济模型与代表经济系统的市场分配模型结合,探讨 CO ₂ 减排的影响	

$$D_{xk} = \exp \left(\sum_i \frac{(V_i^T - V_i^0)/(\ln V_i^T - \ln V_i^0)}{(V^T - V^0)/(\ln V^T - \ln V^0)} \times \ln \left(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0} \right) \right) \quad (1)$$

$$\Delta V_{xk} = \frac{(V_i^T - V_i^0)}{(\ln V_i^T - \ln V_i^0)} \ln \left(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0} \right) \quad (2)$$

式中:0, T 分别是研究的基期和末期, V 是相关能源的集合, V_i 是 V 的子集。研究 CO_2 排量时考虑活动效应 D_{act} 、结构效应 D_{str} 、能源强度效应 D_{int} 、能源结构效应 D_{mix} 、排放因子效应 D_{emf} , 其表达方式为:

$$D_{\text{tot}} = D_{\text{act}} D_{\text{str}} D_{\text{int}} D_{\text{mix}} D_{\text{emf}} \quad (3)$$

$$\Delta C_{\text{tot}} = \Delta C_{\text{act}} + \Delta C_{\text{str}} + \Delta C_{\text{int}} + \Delta C_{\text{mix}} + \Delta C_{\text{emf}} \quad (4)$$

式中: D 和 ΔC 分别表示变量从基期0到末期 T 的变化值, D_{tot} 、 ΔC_{tot} 表示变化期的总效应。随着对负值^[110]、零值^[111]问题研究的深入,该方法的适用范围逐步扩大。但是该方法也存在诸多缺陷,比如仅从能源消费(排放)总量、结构、强度等因子分析直接碳排放,缺乏对其背后影响机制的探究;也无法核算不同城市之间、不同产业之间的碳排放。

Hybrid-EIO-LCA 方法融合生命周期与投入产出方法的优点^[41],既能分析单个产品从“摇篮到坟墓”的环境影响,又能结合稳定的环境账户数据,研究中观(部门)水平所有经济活动的碳排放量。生命周期分析提供了一种思路,投入产出分析则提供了核算的方法,其模型表示为^[103]:

$$E = RX = R[I - A]^{-1}F \quad (5)$$

式中: E 为所有环境负担向量, R 为 $k \times n$ 阶的环境压力矩阵, r_{ij} 是 j 部门单位产出的环境负担 k (如 CO_2 排放), A 为直接需求系数矩阵, X 为所有部门产出向量, F 为最终需求向量。将生命周期分析与投入产出整合时有多种方式^[112]:如把产品作为一个新的假设工业部门 a_{n+1} ,分解现有产业部门:

$$a_{nj} = A_{nj} + A_{n+1j} \quad (6)$$

根据生命周期进行迭代分类。混合碳足迹法的理念比较科学,将自上而下方法与自下而上方法整合;核算项目比较齐全,既考虑直接碳排放,也计算了间接碳排放;但是,该方法对数据质量要求高,不仅要有详尽的统计数据,也要有可靠的调查数据,因而应用成本较高,操作流程复杂。

CGE 模型采用经济学方法,基于大量的数据,用一系列非线性函数表征供给、市场、需求的关系,引入市场机制和政策工具,使得供-需、价格、交易有机结合在一起,对宏观经济背景下能源经济与环境均衡进行模拟。该模型的优点在于能全面分

析经济系统,通过模型参数和外生变量的设置,不仅能描述城市碳排放的基准情景,模拟城市碳排放量、部门碳减排量、控制成本等问题,还可以探析能源需求变化。该模型的不足在于:假设条件多,适用于市场体制发育完善的区域;模型参数多,缺乏统一的标准,大量的估测数据难以保证部分参数的有效性;对技术进步的考虑不够,不能控制技术进步对经济的影响。

可以看出,这些模型与方法多源于经济学、环境学、系统学等领域,研究中忽视了空间格局与过程、碳排放结构与调控的地理基础、不同时空尺度碳排放等城市碳排放应关注的内容。因而建立低碳城市研究方法论,探析不同时空尺度的碳排放及其空间机理是当前的重要工作。

3 低碳城市研究的空间尺度及区域

低碳城市初期的研究仅限于城市个体层面,在全球碳排放与管理框架下,研究不同国家典型城市全球化响应:如2005东京议定书签订后,伦敦^[113]、慕尼黑^[114]、加利福尼亚^[115]等分别制定了到目标年份的削减计划;Sovacool 和 Brown 具体研究了12个大都市区的碳足迹,并指出了其他大都市区减排的可能性^[116]。随着低碳经济和低碳社会的倡导,研究视角多元化、研究内容具体化,从低碳家庭、低碳社区、低碳企业、低碳园区/集群等小、中尺度探寻城市碳排放与控制的趋势成为低碳城市研究的增长点。家庭—企业、社区—园区、城市层面、大都市区/城市群是低碳城市研究的主要尺度和空间单元,其中家庭、企业空间能源消费活动是城市低碳排放的基本单位,居民的衣食住行、企业生产活动与城市碳排放密切相关;社区是居民能源利用、日常生活方式改变的背景,有助于居民低碳消费观念的形成;园区是企业的集聚区和碳排放的集中区,可以从生产源头控制城市碳排放;城市个体是全球碳循环的基本单元,也是国家实现减排目标的基本行动者;城市群被视为城市发展过程中的高级空间组织,也是综合控制管理城市碳排放的高级单元。城市正常运转的动力主要来自碳基能源,通过碳基能源在其经济(E)和社会(S)过程的利用转化为环境(EN)中的 CO_2 等气体超量问题,进而构成了低碳城市的排放与控制中的多尺度关联及效应(图2)。

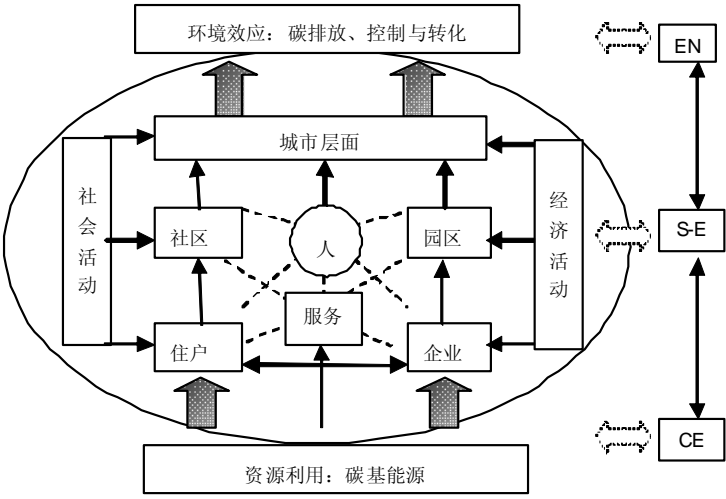


图2 低碳城市系统空间尺度及关联

Fig.2 Spatial scale and correlation for low-carbon city research

低碳城市研究最初关注的是发达国家的城市，其碳排放量超过世界总排放量的50%，低碳城市的实践也始于英国、日本和加拿大等国家。英国通过制定收取气候变化税、签订气候变化协议、建立碳排放贸易机制和碳信托基金等多项政策推动城市低碳经济发展^[117]。日本发起“面向2050年的日本低碳社会情景”研究计划，对东京、神户等城市的低碳社会发展做了详尽的规划^[87,104]。加拿大从产业生态学视角研究生态产业网络、集群和社区^[118]，形成低碳产业区/产业集群的雏形，温哥华制定宜居区域战略规划，通过对社区的规划实现城市低碳发展。亚洲和中东等发展中国家过去十年的工业发展加速了碳排放，也成为低碳城市研究关注的重点区域。这些区域一方面经济增长快，碳排放增速快，经济发展与碳排放脱钩尤为迫切；另一方面低碳城市研究薄弱，碳排放数据库没有或者不完善。该类区域的研究较多关注城市个体，如Chin对Iskandar低碳城市的规划^[119]，Tunc对影响土耳其碳排放量的实证分析^[120]，Fong试图建立马来西亚碳排放数据库系统^[105]等。

4 低碳城市研究展望与启示

4.1 总结与展望

尽管20世纪90年代以前，碳循环、碳排放和碳交易问题已受到学术界关注，但有关低碳城市研究直到90年代中期才成为多学科共同关注的领域。低碳城市研究的新进展可以概括为：①在理论上，

由可持续发展、循环经济转向低碳经济和社会论，由城市生态系统、共生城市、精明增长和公交导向细化为低碳社区的构建；②在方法上，由单一计算转变到综合评估，由衍生方法借用转到低碳城市模型的提出；③数据使用由估测数据转向明确的环境账户；④空间尺度由城市层面向家庭、企业、社区、园区、城市群等不同层面扩展，研究地域从少数发达国家拓展至发展中国家；⑤城市环境从封闭到开放，从单个城市内部研究转向多个城市之间的对比分析。

总之，低碳城市研究仍处于起步阶段。“低碳城市”不仅是一种应对全球变暖的应急之策，还是改善人地关系的基本信号。应深入思考：低碳城市是代表交叉科学理论方法应用的新领域，还是开创了理论创新的空间；如果是一种新的理论方向，应如何构建低碳城市学？因此，今后的研究应着重解决如下问题：

(1) 从人地和谐共生论出发，建立低碳城市研究的理论体系：研究城市碳能源—经济—社会—环境(CEESE)系统的结构与功能特征，CEESE系统的空间性、地方性与全球性，不同空间尺度CEESE系统碳循环与扩散的空间规律以及控制策略等。

(2) 建立低碳城市研究的方法论体系。目前碳排放量测度模型繁多，没有可比性和统一标准，并且缺乏空间基础，难以指导低碳城市研究深入进行，因而有必要建立城市碳排放与控制空间模型体系。

(3) 低碳城市是涉及资源环境、经济社会、地理生态、城市区域等多领域的复杂系统，要利用3S技术建立综合研究应用体系。发挥GIS的优势，建立低碳城市海量数据集，分析城市不同尺度的碳排放与转化的时空规律；将3S技术有效结合，形成低碳城市研究的多尺度全方位技术支撑。

4.2 几点启示

国外低碳城市理论、方法研究为中国低碳城市发展提供了广阔的视野和方法论基础。但也存在诸多不足：①自然过程的碳循环研究较为深入，人的社会经济活动碳排放研究相对滞后，碳排放的空间结构和分异规律研究薄弱；②已有碳模型多移植于经济、环境等学科，碳空间模型研究不足；③碳排放研究在国家、区域等较大尺度的成果较多，而在住户、社区、企业和园区等小尺度层面，数据获取困难，研究方法不成熟，成果相对较少。

中国各地区自然社会经济差异大,不同地区的发展历史、发展阶段、社会文化背景不同,因而在具体研究中应该注重以下3点:

(1) 吸收借鉴城市学、生态学、环境学、经济学的最新成果,创建适合中国区域发展的低碳城市理论方法体系。中国正处于经济社会转型期,特殊的国情、地情决定了低碳城市与国外有着迥异的特点和规律,西方国家处于经济发展成熟的后工业化阶段,家庭能源消费、交通、建筑是碳排放的主要来源,而中国正处于经济发展增长期,工业是经济增长的主要推动力,也是碳排放的主要来源。因而在控制策略上不仅要借鉴发达国家城市在交通、土地、社区、建筑等方面的先进理念和技术,更应结合国情探索解决工业增长碳排放与经济福利增长脱钩的方案。

(2) 随着经济、技术、文化的发展,城市的物质内容、空间结构和动力因素不断变化,低碳城市的内涵也在不断变化。交通、通讯技术和信息产业的发展改变了人流、物流的交通需求和土地利用方式;城市空间结构从团块状城市演变为大都市区、巨型都市区甚至大都市带;城市空间扩展带来人口和就业的郊区化、城中村改造等城市发展的新问题,因而城市碳排放、碳循环与代谢、低碳规划与控制也被赋予新的内容。

(3) 低碳城市研究存在空间尺度效应,城市内部的住户和企业、社区和园区以及城市层面等不同空间尺度的碳排放和控制有着相互关联及作用,根据时空耦合原理,不同空间尺度的碳排放和控制的时间尺度上展开的过程与机理值得深入探讨。选择低碳社区的住户研究为突破口,加强低碳城市综合测度与定量方法研究。开展实地调查,建立居民和企业环境账户,注重微观尺度的碳转换过程和机理分析,推动低碳城市研究不断深入发展。

参考文献

- [1] Department of Trade and Industry (DTI). UK Energy White Paper: Our Energy Future-creating A Low Carbon Economy. London: TSO, 2003: 1-142.
- [2] Gomi K, Shimada K, Matsuoka Y. Scenario study for a regional low-carbon society. *Sustainability Science*, 2007, 2(1): 121-131.
- [3] United Nations. *World Urbanization Prospects: The 2005 Revision*. New York: United Nations, 2005: 1-196.
- [4] Galeotti M, Lanza A, Pauli F. Reassessing the environmental Kuznets curve for CO₂ emission: A robustness exercise. *Ecological Economics*, 2006, 57(1): 152-163.
- [5] He J, Richard P. Environmental Kuznets curve for CO₂ in Canada. *Ecological Economics*, 2009, 11(3): 1-11.
- [6] Martinez Z I, Bengochea M A. Pooled mean group estimation for an environmental Kuznets curve for CO₂. *Economic Letters*, 2004, 82(1): 121-126.
- [7] Lebel L, Garden P, Banaticla M R N, et al. Integrating carbon management into the development strategies of urbanizing regions in Asia. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 61-81.
- [8] International Energy Agency. *Energy Outlook*. 2009, Paris.
- [9] Strachan, N, Pye S, Kannan R. The iterative contribution and relevance of modeling to UK energy policy. *Energy Policy*, 2009, 37(3): 850-860.
- [10] McEvoy D, Gibbs D C, Longhurst J W S. Urban sustainability: problems facing the "local" approach to carbon-reduction strategies. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 1998, 16(4): 423-432.
- [11] Streck C. New partnerships in global environmental policy: The clean development mechanism. *Journal of Environment & Development*, 2004, 13(3): 295-322.
- [12] Steven S, Sijm J. Carbon trading in the policy mix. *Oxford Review of Economic Policy*, 2003, 19(3): 420-437.
- [13] Dhakal S, Betsill M M. Challenges of Urban and Regional Carbon Management and the Scientific Response. *Local Environment*, 2007, 12(5): 549-555.
- [14] Baranzini A, Goldemberg J, Speck S. A future for carbon taxes. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 395-412.
- [15] While A, Jonas A E G, Gibbs D. From sustainable development to carbon control: Eco-state restructuring and the politics of urban and regional development. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2009, 35(1): 76-93.
- [16] Garg A, Bhattachary S, Shukla P R, et al. Regional and sectoral assessment of greenhouse gas emissions in India. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(15): 2679-2695.
- [17] Bristowa A L, Tight M, Pridmore A, et al. Developing pathways to low carbon land-based passenger transport in Great Britain by 2050. *Energy Policy*, 2008, 36(9): 3427-3435.
- [18] Diakoulaki D, Mandaraka M. Decomposition analysis for assessing the progress in decoupling industrial growth from CO₂ emissions in the EU manufacturing sector. *Energy Economics*, 2007, 29(4): 636-664.
- [19] Dimoudi A, Tompa C. Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 53(1/2): 86-95.
- [20] Yang C, McCollum D, McCarthy R, et al. Meeting an 80% reduction in greenhouse gas emissions from transportation by 2050: A case study in California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009,

- 14(3): 147-156.
- [21] Yamaguchi Y, Shimoda Y, Mizuno M. Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management. *Energy and Buildings*, 2007, 39(5): 580-592.
 - [22] Wu X C, Priyadarsini R, Eang L S. Benchmarking energy use and green house gas emissions in Singapore's hotel industry. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 4520-4527.
 - [23] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
 - [24] Greening L A, Ting M, Krackler T J. Effects of changes in residential end-uses and behavior on aggregate carbon intensity: Comparison of 10 OECD countries for the period 1970 through 1993. *Energy Economics*, 2001, 23(2): 153-178.
 - [25] Greening L A. Effects of human behavior on aggregate carbon intensity of personal transportation: Comparison of 10 OECD countries for the period 1970-1993. *Energy Economics*, 2004, 26(1): 1-30.
 - [26] Greening L A, Ting M, Davis W B. Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: Trends from 10 OECD countries for the period 1971-1993. *Energy Economics*, 1999, 21(4): 331-361.
 - [27] Folke C, Jansson A, Larsson J, et al. Ecosystem appropriation by cities. *AMBIO*, 1997, 26(3): 167-172.
 - [28] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modeling*, 2008, 216(2): 107-113.
 - [29] Pataki D E, Alig R J, Fung A S, et al. Urban ecosystems and the North American carbon cycle. *Global Change Biology*, 2006, 12(11): 1-11.
 - [30] Schlesinger H, Andrews J. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
 - [31] Allaire S E, Dufour-L'Arrivee C, Lafond J A, et al. Carbon dioxide emissions by urban turfgrass areas. *Canadian Journal of Soil Science*, 2008, 88(4): 529-532.
 - [32] Nowak D J, Crane D E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 381-389.
 - [33] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*. 2002, 64(2): 115-126.
 - [34] Nejadkoorki F, Nicholson K, Lake I, et al. An approach for modelling CO₂ emissions from road traffic in urban areas. *The Science of the Total Environment*, 2008, 406(1-2): 269-278.
 - [35] Svirejeva H A, Schellnhuber H J, Pomaz V L. Urbanised territories as a specific component of the global carbon cycle. *Ecological Modelling*, 2004, 173(2-3): 295-312.
 - [36] Svirejeva H A, Schellnhuber H J. Modelling carbon dynamics from urban land conversion: Fundamental model of city in relation to a local carbon cycle. *Carbon Balance and Management*, 2006, 1(8): 1-9.
 - [37] Svirejeva H A, Schellnhuber H J. Urban expansion and its contribution to the regional carbon emissions: using the model based on the population density distribution. *Ecological Modeling*, 2008, 216(2): 208-216.
 - [38] Pouyata R, Groffman P, Yesilonisc I, Hernandezd L. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116 (s1):107-118.
 - [39] Pataki D E, Bowling D R, Ehleringer J R. Seasonal cycle of carbon dioxide and its isotopic composition in an urban atmosphere: Anthropogenic and biogenic effects. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(23): 1-8.
 - [40] Pataki D E, Bowling D R, Ehleringer J R, et al. High resolution atmospheric monitoring of urban carbon dioxide sources. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): 1-5.
 - [41] Wiedmann T, Minx J. A definition of "Carbon Footprint"//Pertsova C C. *Ecological Economics Research Trends*. Hauppauge NY: Nova science publishers, 2007.
 - [42] Ramaswami A, Hillman T. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city- scale greenhouse gas inventories. *Environmental science & technology*, 2008, 42(17): 6455-6461.
 - [43] Hillman T, Ramaswami A. Greenhouse Gas Emission Footprints and Energy Use Benchmarks for Eight U.S. Cities. *Environmental science & technology*, 2010, 44(6): 1902-1910.
 - [44] Peters G P, Hertwich E G. CO₂ embodied in international trade with implications for global climate policy. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(5): 1401-1407.
 - [45] Dieleman F M, Dust M J, Spit T. Planning the compact city: The Randstad Holland experience. *European Planning Studies*, 1999, 7(5): 605-621.
 - [46] Masanobu K, Kenji D. Multiagent land-use and transport model for the policy evaluation of a compact city. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 2005, 32(4): 485-504.
 - [47] Shim G E, Rhee S M, Ahn K H, et al. The relationship between the characteristics of transportation energy consumption and urban form. *The Annals of Regional Science*, 2006, 40(2): 351-357.
 - [48] Jabareen Y R. Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 2006, 26(1): 38-52.
 - [49] Rickaby P A. Six settlement patterns compared. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1987, 14(2): 193-223.
 - [50] Kenworthy J R. The eco-city: Ten key transport and planning dimensions for sustainable city development. *Environment and Urbanization*, 2006, 18(1): 67-85.
 - [51] Roseland M. Sustainable community development: Integrating environmental, economic, and social objectives. *Progress in Planning*, 2000, 54(2): 73-132.
 - [52] Heiskanen E, Johnson M, Robinson S, et al. Low-carbon communities as a context for individual behavioral

- change. *Energy Policy*, 2009, 7(2): 1-10.
- [53] Raco M. Sustainable development, rolled-out neoliberalism and sustainable communities. *Antipode*, 2005, 37(2): 324-347.
- [54] Andrews C J. Putting industrial ecology into place evolving roles for planners. *Journal of the American Planning Association*, 1999, 65(4): 364-375.
- [55] Deutz P. Producer responsibility in a sustainable development context: Ecological modernization or industrial ecology. *The Geographical Journal*, 2009, 175(4): 274-285.
- [56] Gibbs D C, Deutz P, Proctor A. Industrial ecology and eco-industrial development: A new paradigm for local and regional development? *Regional Studies*, 2005, 39(2): 171-183(13).
- [57] McManus P, Gibbs D. Industrial ecosystems? The use of tropes in the literature of industrial ecology and eco-industrial parks. *Progress in Human Geography*, 2008, 32(4): 525-540.
- [58] Deutz P, Gibbs D. Industrial ecology and regional development: Eco-industrial development as cluster policy. *Regional Studies*, 2008, 42(10): 1313-1328.
- [59] van Diepen A, Voogd H. Sustainability and planning: Does urban form matter? *International Journal of Sustainable Development*, 2001, 4(1): 59-74.
- [60] van Diepen A. Households and their spatial-energetic practices. Searching for sustainable urban forms. *Journal of Housing and the Built Environment*, 2001, 16(3-4): 349-351.
- [61] Moll H C, Noorman K J, Kok R, et al. Pursuing more sustainable consumption by analyzing household metabolism in European countries and cities. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1-2): 259-275.
- [62] Seyfang G. Community action for sustainable housing: Building a low-carbon future. *Energy Policy*, 2010, 38(12): 7624-7633.
- [63] Retzlaff R C. Green building assessment systems: A framework and comparison for planners. *Journal of the American Planning Association*, 2008, 74(4): 505-519.
- [64] Crabtree L. Sustainable housing development in urban Australia: Exploring obstacles to and opportunities for ecocity efforts. *Australian Geographer*, 2005, 36(3): 333-350.
- [65] Urge-Vorsatz D, Harvey L D, Mirasgedis S, et al. Mitigating CO₂ emissions from energy use in the world's buildings. *Building Research and Information*, 2007, 35(4): 379-398.
- [66] Crabtree L. Sustainability begins at home? An ecological exploration of sub/urban Australian community-focused housing initiatives. *Geoforum*, 2006, 37(4): 519-535.
- [67] Gibbs D. Prospects for an environmental economic geography: Linking ecological modernization and regulationist approaches. *Economic Geography*, 2006, 82(2): 193-215.
- [68] Boykoff M T, Bumpus A, Liverman D, et al. Theorizing the carbon economy: Introduction to the special issue. *Environment and Planning A*, 2009, 41(10): 2299-2304.
- [69] Bailey I, Wilson G A. Theorising transitional pathways in response to climate change: Technocentrism, ecocentrism, and the carbon economy. *Environment and Planning A*, 2009, 41(10): 2324-2341.
- [70] Rutherford S. Green governmentality: Insights and opportunities into the study of nature's role. *Progress in Human Geography*, 2007, 31(3): 291-307.
- [71] Lemos M C, Agrawal A. Environmental governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 2006, 31: 297-325.
- [72] Barnett G. The consolations of 'neoliberalism'. *Geoforum*, 2005, 36(1): 7-12.
- [73] Boyd E. Governing the clean development mechanism: Global rhetoric versus local realities in carbon sequestration projects. *Environment and Planning A*, 2009, 41(10): 2380-2395.
- [74] Hayter R. Environmental economic geography. *Geography Compass*, 2008, 2(3): 831-850.
- [75] Caetano M, Gherardi D, Ribeiro G. Reduction of CO₂ emission by optimally tracking a pre-defined target. *Ecological Modelling*, 2009, 220(19): 2536-2542.
- [76] Hultman N E. Geographic diversification of carbon risk: A methodology for assessing carbon investments using eddy correlation measurements. *Global Environmental Change*, 2006, 16(1): 58-72.
- [77] Castelnovo E, Galeotti M, Gambarelli G, et al. Learning-by-Doing vs. Learning by Researching in a model of climate change policy analysis. *Ecological Economics*, 2005, 54(2-3): 261-276.
- [78] Weiss M, Junginger M, Patel M K, et al. A review of experience curve analyses for energy demand technologies. *Technological Forecasting & Social Change*, 2009, 10(9): 1-18.
- [79] Manne A, Richels R. The impact of learning-by-doing on the timing and costs of CO₂ abatement. *Energy Economics*, 2005, 46(3): 603-619.
- [80] Zwaana B, Gerlagha R, Klaassen G, et al. Endogenous technological change in climate change modeling. *Energy Economics*, 2002, 24(1): 1-19.
- [81] Bailey I. Market environmentalism, new environmental policy instruments, and climate policy in the United Kingdom and Germany. *Annals of the Association of American Geographers*, 2007, 97(3): 530-550.
- [82] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method? *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [83] Ang B W, Huang H C, Mu A R. Properties and linkages of some index decomposition analysis methods. *Energy*

- Policy, 2009, 37(11): 4624-4632.
- [84] Rhee Hae-Chun, Chung Hyun-Sik. Change in CO₂ emission and its transmissions between Korea and Japan using international input-output analysis. *Ecological Economics*, 2006, 58(4): 788-800.
- [85] Albrecht J, Francois D, Schoors K. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals. *Energy Policy*, 2002, 30(9): 727-736.
- [86] Maselli F, Gioli B, Chiesi Marta, et al. Validating an integrated strategy to model net land carbon exchange against aircraft flux measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(5): 1108-1116.
- [87] Gomi K, Shimada K, Matsuoka Y. A low-carbon scenario creation method for a local-scale economy and its application in Kyoto city. *Energy Policy*, 2009, 37(26): 1-14.
- [88] He Chunyang, Okada N, Zhang Qiaofeng, et al. Modeling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 86(1): 79-91.
- [89] Santé I, García A M, Miranda D, et al. Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(2): 108-122.
- [90] Rose A, Liao Shu-Yi. Modeling regional economic resilience to disasters: A computable general equilibrium analysis of water service disruptions. *Journal of Regional Science*, 2005, 45(1): 75-112.
- [91] Phdungsilp A. Integrated energy and carbon modeling with a decision support system: Policy scenarios for low-carbon city development in Bangkok. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4808-4817.
- [92] Contaldi M, Gracceva F, Tosato G. Evaluation of green-certificates policies using the MARKAL-MACRO-Italy model. *Energy Policy*, 2007, 35(2): 797-808.
- [93] Park S H. Decomposition of industrial energy consumption: An alternative method. *Energy Economics*, 1992, 14(4): 265-270.
- [94] Boyd G A, Hanson D A, Sterner T. Decomposition of changes in energy intensity: A comparison of the Divisia index and other methods. *Energy Economics*, 1988, 10(4): 309-312.
- [95] Ang B W, Lee S Y. Decomposition of industrial energy consumption: Some methodological and application issues. *Energy Economics*, 1994, 16(2): 83-92.
- [96] Liu X Q, Ang B W, Ong H L. The application of Divisia index to the decomposition of changes in industrial energy consumption. *The Energy Journal*, 1992, 13(4): 161-177.
- [97] McGregor P G, Swales J K, Turner K. The CO₂ 'trade balance' between Scotland and the rest of the UK: Performing a multi-region environmental input - output analysis with limited data. *Ecological Economics*, 2008, 66(4): 662-673.
- [98] Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios. Paris, IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, 1990.
- [99] Grimmonda S B, Kinga T S, Cropleya F D, et al. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 2002, 116(1): 243-254.
- [100] Tukker A. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(4): 435-456.
- [101] Leontief W, Ford D. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. *The Review of Economics and Statistics*, 1970, 52(3): 262-271.
- [102] Wiedmann T, Minx J, Barrett J, et al. Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis. *Ecological Economics*, 2006, 56(1): 28-48.
- [103] Heijungs R, Suh S. Reformulation of matrix-based LCI: from product balance to process balance. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(1): 47-51.
- [104] Shimada K, Tanaka Y, Gomi K, et al. Developing a long-term local society design methodology towards a low-carbon economy: An application to Shiga Prefecture in Japan. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4688-4703.
- [105] Fong W K, Matsumoto H, Lun Y F, et al. System dynamic model as decision making tool in urban planning from the perspective of urban energy consumption//Seminar Proceedings of the 3rd Seminar of JSPS-VCC (group VII). Skudai: Universiti Teknologi Malaysia, 2007.
- [106] LI X, YE H A G O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *Geographical Information Science*, 2000, 14(2): 131-152.
- [107] Shin H C, Park J W, Kim H S, et al. Environmental and Economic Assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model. *Energy Policy*, 2005, 33(10): 1261-1270.
- [108] Glu G S K. Environmental taxation and economic effects: a computable general equilibrium analysis for Turkey. *Journal of Policy Modeling*, 2003, 25(8): 795-810.
- [109] Ang B W, Liu F L, Chew E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, 2003, 31(14): 1561-1566.
- [110] Ang B W, Liu Na. Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 739-742.
- [111] Ang B W, Liu Na. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 238-246.
- [112] Joshi S. Product environmental life-cycle assessment us-

- ing input-output techniques. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 3(2-3): 95-120.
- [113] Greater London Authority. *Green Light to Clean Power: The Mayor's Energy Strategy*. London: Greater London Authority, 2004: 37-46.
- [114] Climate Alliance. *Climate Alliance 2004/2005 annual report*. Frankfurt: Muller, 2005.
- [115] California Environmental Protection Agency. *Climate action team report to Governor Schwarzenegger and the legislature*. California Environmental Protection Agency, 2006.
- [116] Sovacool B K, Brown M A. Twelve metropolitan carbon footprints: a preliminary comparative global assessment. *Energy Policy*, 2009, 10(1): 1-14.
- [117] Bumpus A, Liverman D. Accumulation by decarbonization and the governance of carbon offsets. *Economic Geography*, 2008, 84(2): 127-155.
- [118] Halifax, Scotia N. *Industrial ecology and the sustainable of Canadian cities*. The Conference Board of Canada, 2006.
- [119] Chin Siong H, Wee Kean F. *Planning for low carbon cities: The case of Iskandar development region*. Seoul, Toward Establishing Sustainable Planning and Governance II, 2007.
- [120] Tunc G. I, Turut-Asik S, Akbostanci E. A decomposition analysis of CO₂ emissions from energy use: Turkish case. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4689-4699.

Progresses of Low-carbon City Research

QIN Yaochen, ZHANG Lijun, LU Fengxian, YAN Weiyang, WANG Xi

(Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development

/College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: Responses to the challenge of global warming include research into the adoption of low-carbon approaches to resource use. Accordingly, low-carbon-city studies refer to documenting, among other things, the relative significance of factors driving the current increase in urban carbon emissions. Such studies refer to the cycle and metabolism of the hypothetical low-carbon city, the low-carbon-city planning, and low-carbon-city environmental governance that would be needed in implementation. These low-carbon-city studies have deployed a range of methods, such as the LMDI method, Hybrid-EIO-LCA method, and CGE. The emphasis has been put on the study of low-carbon city in terms of sustainable development and its relationship with low-carbon economy and society, and on the establishment of urban ecosystems to form the symbiotic city and to realize smart growth and transit-oriented development of the low-carbon communities.

Researchers from both economically developed and developing countries now notice that low-carbon-city research lacks attention to the comprehensive array of factors involved and that progress is limited by the interdisciplinary matters that must be dealt with, and the uncertainty attached to some of the available input data. Reconciliation of study results across a range of spatio-temporal scales is also a challenging issue. It is argued that it will be helpful to focus on the urban carbon energy-economy-society-environment system.

Key words: low-carbon city; low-carbon model; carbon emission; spatial scale; research progress

本文引用格式:

秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先, 等. 国外低碳城市研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(12): 1459-1469.