

# 城市低碳交通与空间优化研究进展与启示

江辰星<sup>1</sup>, 汪军<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>上海市黄浦区老西门街道社区事务受理服务中心, 上海

<sup>2</sup>华东理工大学艺术设计与传媒学院, 上海

收稿日期: 2023年2月2日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年3月16日

## 摘要

本文梳理分析了低碳交通与城市空间优化相关研究进展, 内容包括城市碳排放概念及影响因素、城市形式与空间优化模式、低碳交通概念、交通体系碳排放量化、交通碳排放影响因素、低碳交通评价体系、碳减排政策措施制定、交通碳排放测算方法与模型, 以及低碳交通和城市空间优化的耦合研究。基于文献综述分析提出我国发展城市低碳交通的方向, 包括了对减排措施的系统化研究、对空间优化的实证研究、对低碳交通评价方法和模型有待创新以及加强低碳交通与城市空间优化的耦合研究等观点。

## 关键词

低碳交通, 城市空间优化, 城市碳排放

# Research Progress and Enlightenment of Urban Low-Carbon Transportation and Space Optimization

Chenxing Jiang<sup>1</sup>, Jun Wang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Huangpu District Laoximen Sub-District Community Affairs Acceptance Service Center, Shanghai

<sup>2</sup>School of Art Design and Media, East China University of Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 16<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

This paper combs and analyzes the research progress of low-carbon transportation and urban space optimization, including the concept of urban carbon emissions and influencing factors, ur-

\*通讯作者。

文章引用: 江辰星, 汪军. 城市低碳交通与空间优化研究进展与启示[J]. 现代管理, 2023, 13(3): 252-263.

DOI: 10.12677/mm.2023.133032

ban form and space optimization mode, low-carbon transportation concept, carbon emission quantification of transportation system, impact factors of transportation carbon emissions, low-carbon transportation evaluation system, formulation of carbon emission reduction policies and measures, measurement methods and models of transportation carbon emissions, as well as the coupling research of low-carbon transportation and urban space optimization. Based on the analysis of literature review, the paper puts forward the direction of developing urban low-carbon transport in China, including the systematic research on emission reduction measures, the empirical research on spatial optimization, the innovation of low-carbon transport evaluation methods and models, and the strengthening of the coupling research between low-carbon transport and urban spatial optimization.

## Keywords

Low-Carbon Transportation, Urban Space Optimization, Urban Carbon Emissions

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近几十年来, 全球变暖已成为威胁人类社会和全球生态系统的最重要的环境问题之一[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)的报告显示, 全球变暖的主要原因与化石燃料能源消耗所产生的碳排放密切相关[2]。城市提供就业机会, 是创新和财富创造的中心, 集中包含着大部分的人口和人类活动, 但也往往是空气污染(如颗粒物、NO<sub>2</sub>)、噪音、热量和疾病的焦点所在[3]。研究表明, 全球 70% 以上的温室气体排放是在城市地区产生的[4], 作为二氧化碳排放的主要来源, 城市碳排放在全球变暖中产生了越来越严重的影响[5]。

碳排放的强弱主要受碳源和碳汇影响。城市地区的碳源主要指向大气中释放二氧化碳的人为因素, 如供电、供热、交通运输等[6]。据《联合国气候变化框架公约》报道, 21 世纪初, 道路运输是 40 个国家的第二大碳排放源。道路运输作为交通相关碳排放增长的主要驱动力, 占全球交通运输碳排放量的 75% 以上[7], 其中日常出行在道路运输相关碳排放中起主导作用[8]。城市交通碳排放对环境危害严重, 并对特定地区乃至整个世界的气候变化产生重大影响[9]。近年来, 随着交通运输业的迅猛发展, 交通碳排放所占比重愈发引人注目, 探索低碳交通方式和机遇意义重大[10]。

在我国, 随着经济迅猛发展, 人民收入显著增长, 生活水平日益提升, 再加上汽车工业的壮大和城市化进程的加快, 私家车普及率和总交通量都急剧增加, 居民交通需求呈高速增长的趋势[11]。根据 2018 年《中国机动车环境管理年报》, 交通排放已成为北京、上海、杭州、广州、深圳、济南 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源, 南京、武汉等多个大城市 PM<sub>2.5</sub> 的次要来源[12]。交通能源消耗在国内能源消耗结构中的占比逐年提升, 交通体系在国民经济中的能源消耗明显加快[13]。其中, 不同出行方式的属性差异很大, 其中私家车的平均能耗和碳排放量最高, 是公交车的 10 倍以上, 轨道交通的 20 倍左右[14]。交通碳排放作为中国城市污染的主要来源之一, 造成了严重的环境退化和健康危害[15], 这对交通部门的碳减排构成了前所未有的压力。在这样一个城市化快速扩张的时期, 中国的城市形态不断发生变化, 促使通勤方式和距离向低碳模式转变[16]。如何在不影响交通便利性、出行感受和经济增长的前提下减少交通碳排放, 已成为相关研究者与规划者、交通政策制定者乃至公众面临的一个现实而紧迫的问题[17]。城市空间的优化, 对

于交通出行碳排放的降低具有极大效用。改善交通发展模式, 优化城市空间结构, 是城市可持续发展之道。

## 2. 低碳城市相关研究

### 2.1. 城市碳排放

21 世纪以来, 低碳城市设计理论和方法在城市环境问题的针对性处理中得到推广应用。政府间气候变化专门委员会(IPCC)于 2018 年主办了第一届城市与气候变化科学会议[18], 研究人员呼吁在城市层面上提出需求侧气候解决方案, 以求缓解城市问题[19]。

相关学者积极响应号召, 对城市碳排放相关问题展开研究。Wang 等通过对荷兰埃因霍温案例的土地利用模式的划分, 发现植被的地理特征是影响碳排放的关键因素, 建立多目标空间优化模型, 分析各土地利用类型变化的影响, 找出了影响最大的几种类型[6]; 在赫尔辛基大都会地区, Ottelin 等分析了六种不同类型城市地区的碳足迹变化, 以评估建筑能耗和汽车燃料之间碳排放减少的差异[20]; Benjamin 等认为城市形态(包括土地利用模式和交通基础设施布局)是住宅和交通部门碳排放的主要驱动因素[21]。

关于低碳城市的探索, 李陈宸以苏州中心城区为例, 从紧凑度、路网与功能布局、公共交通建设水平等方面分析苏州城市交通与空间结构发展特征, 并提出低碳城市发展策略[22]; 檀稳结合武汉实情构建碳排放测算模型, 提出城市土地利用碳减排策略[23]; Subba 等认为低碳城市可通过合理的土地利用和交通相结合来实现[24]; Zhang 等提出了城市低碳管理策略层次, 包括用于调整未来城市土地需求的自上而下的碳减排策略, 以及用于限制土地利用转换的自下而上的土地斑块固碳保护策略[25]; Gao 等辨析了低碳城市设计概念, 并从城市规划、物流经济、物流交通等方面提出低碳城市发展策略, 以及从土地利用布局和交通设计等方面进行指标控制的城市设计方法[26]。

### 2.2. 城市空间优化

从交通规划和城市健康角度来看, 目前世界上存在的城市形式可归纳为以下几类: 大型混凝土结构密集, 包括高楼、机动交通道路等基础设施(如上海、深圳); 建筑密度低, 道路基础设施大量蔓延(如亚特兰大、洛杉矶、墨尔本); 以及两种形式混合的形式。从可持续性、宜居性和市民健康来看, 前两者都有缺陷。这些城市中, 汽车的大量存在都导致了严重空气污染和噪音水平、大量碳排放、热岛效应以及缺乏体育活动和城市绿地等问题[27]。尽管城市可能是环境问题之源, 但其本身也可以是解决方案。有充分的证据表明, 城市设计、市民出行方式这类影响环境和生活方式的因素与市民健康存在直接联系, 空气污染、热岛效应等问题将造成心血管和呼吸系统发病率的增加、认知功能降低、引发癌症等结果, 而上述问题较少, 社会联系和绿色空间较多的城市, 市民患病率和死亡率更低[28]。规划和管理良好的城市能为大量人口提供高效可持续、宜居且健康的栖息地。

关于城市空间优化方向的研究, 学者们选择的研究变量各不相同, 例如 Newman 等将人均汽油消费、城市中心就业比例等考虑在内, 认为紧凑的城市形态与低汽油消耗量存在密切联系[29]; 李保华建立了多层次城市空间效率评价模型, 得出交通因素在各个层次城市空间的运行特征, 并以郑州为例, 对城市空间效率评价模型进行实证研究[30]; Kennedy 等则将交通运输人均碳排放作为研究的因变量[31]。针对具体改进方向, 张卫丽构建了基于公共交通和慢行交通的两种城市空间生态化拓展模式[32]; 鄂尚霖将定量研究与定性研究相结合, 立足街区尺度, 为构建环境友好型空间环境提供策略[33]; Nieuwenhuijsen 等倡导用绿化取代道路、停车场等交通基础设施的方式改善城市环境[34]; Giles Corti 及其团队确立了八项改善城市的具体干预措施, 其中包括增加目的地的可达性、设计行人友好和环境友好的交通网络, 实现最佳的居住密度水平, 缩短与公共交通的距离等空间层面的内容, 他们认为这些干预措施将共同创造更健

康、更可持续且结构紧凑的城市, 减少影响生活方式选择、交通水平、环境和社会问题的风险因素[35]。

### 3. 低碳交通相关研究

#### 3.1. 低碳交通

涉及低碳交通领域的研究主要集中在低碳交通的概念[36] [37] [38] [39]、交通体系碳排放的量化[40]-[45]、交通碳排放相关影响因素[46] [47] [48] [49] [50]、低碳交通体系评价[51] [52] [53]、碳减排政策及措施制定[54]-[66]等方向。

“低碳交通”这一概念最早出现于《低碳交通创新战略》一书中, 由英国交通运输部于 2007 年出台, 两年后又发布《低碳交通运输》, 成为英国交通运输业低碳发展的重要指导方针[36]。低碳交通理念从此在世界范围内迅速传播, 各国政府也加以重视, 思考低碳交通的发展方向与战略。其定义目前在国际上并未形成统一, 我国学者基于国情, 通过我国节能减排与低碳经济的联系[37]、交通领域绿色发展概念[38]、“脱钩”理论[39]等方面的研究对低碳交通提出了各自的见解。

碳排放量化方面, Nocera 等讨论了如何使用技术处理不完整的交通流量数据以获得量化碳排放结果[41]; Yan 等从宏观和微观两个层次对上海市大规模共享交通的减排量进行估算和分析, 发现共享单车有助于减少交通碳排放, 尤其在严重污染的道路区域[43]; Tezel-Oguza 等选择土耳其黑海东部城市特拉布宗人口最多的奥塔希萨区作为研究区域, 对交通相关碳排放进行量化并建立其扩散模型, 并对五种不同的减排方案进行了测试, 以求最优方案[44]; Wang 等则发现由于建模原则和指标质量的不一致, 不同方法计算的碳排放量数值相差很大, 无法提供道路交通系统碳排放量的明确估计[45]。

分析辨识交通碳排放的影响因素, 是制定低碳交通发展相关政策与措施的基础工作[46]。Labib 等认为城市交通结构是影响交通系统碳排放总量的关键因素[47]; 陈飞等从交通方式、城市结构、交通拥堵等角度总结了低碳交通建设过程中的制约因素, 包括城市的生产结构、城市在区域空间结构中的等级、汽车数量、交通时耗等[48]; Zhang 等综合考虑交通供给、交通需求和外部环境的影响因素, 建立了用于优化城市交通结构的多目标规划模型, 分析发现上海市交通碳减排潜力有限, 应通过实施资源配置、交通技术、城市规划等措施改善现有状况[49]; Talbi 采用向量自回归模型(VAR)分析了 1980~2014 年突尼斯交通碳排放变化的影响因素, 包括经济增长、城镇化率、能源强度等[50]。

低碳交通体系的评价有助于进一步明确低碳交通未来发展策略和路径。Li 等构建了低碳交通评价指标体系, 并对全球各大主要城市做评估[51]; Park 等使用国家级数据评估了 2004~2012 年美国交通运输部门的环境效率和 50 个州的碳效率与潜在的碳减排[52]; Zhou 等基于不同规模收益率的产出导向数据包络分析模型, 对中国 30 个行政区交通运输部门的碳排放绩效做评价[53]。

制定合理有效的政策法规和缓解措施, 降低交通系统产生的碳排放, 是相关研究者的最终目标。政策法规方面, Sun 等回顾了迄今为止为解决北京交通问题而制定的政策和法规, 从总体调控机制、公共交通基础设施、车辆技术相关措施、车辆活动相关措施和生态驾驶相关措施等方面对我国实施的具体政策法规进行展望和分析, 并提出推广生态驾驶、广泛应用电动交通等解决方案[55]。措施制定方面的研究主要聚焦技术和结构两个角度的碳减排方式[56]。技术角度包括低排放技术、清洁能源、智能交通等技术的应用研究[57]; 而结构性减排方法则提倡优化交通结构, 推动公共交通为主的低碳交通模式发展[39] [58] [59] [60]。Woodcock 等预估了英国伦敦和印度德里两种替代城市陆路交通的方案对市民健康的影响, 发现积极出行和低排放机动车结合的效果最好, 能够有效减少城市碳排放[61]; Creutzig 等认为公共交通带来了许多环境、气候变化和健康方面的优势, 且可以覆盖自行车无法到达的更长路途, 因此从私家车交通转向积极的公共交通可以带来重大的环境气候变化、市民健康和经济效益[62]。还有学者认为城市低碳交通结构转型应结合城市发展情况, 在城市发展早期阶段优先考虑限制或改造私人机动车出行, 而不是

土地控制和公共交通推广[63]; 中期注重交通走廊建设、交通网络优化和交通流控制[64]; 城市发展后期, 发达国家普遍以公交化发展为目标, 实现紧凑型发展, 探索信息技术在智能公交系统建设中的应用[65]。

此外, Zhang 等综合考量以上内容, 对自上而下和自下而上两种中国道路交通碳排放测算方法作了综述, 总结了影响交通碳排放的需求侧、供给侧和环境测因素, 最后从经济、技术、行政三方面探讨交通缓解措施[66]; 龙江英将影响碳排放的各类因素作为约束条件, 构建低碳目标下城市交通结构优化模型, 以贵阳市为例, 设计低碳交通体系的基本模式, 提出“减碳路径”[67]。

### 3.2. 交通碳排放测算方法与模型

目前国际上对于碳排放的测算方法主要有三种: 实测法、物料平衡法和排放系数法[68]。其中, 排放系数法也称 IPCC 移动排放源测算法, 由 IPCC——联合国政府间气候变化专门委员会于 1994 年发布的《IPCC 国家温室气体清单指南》中提出, 1996 年二次修订, 通过各类能源的碳排放系数和能源总消耗量等数据进行计算, 主要应用于交通运输业以及其他各行业的能源消耗碳排放量核算[69]。

IPCC 移动排放源测算法分为“自上而下”和“自下而上”两种形式, 其测算方式和优劣对比如表 1 所示。

**Table 1.** Comparison of mobile emission source measurement algorithms of IPCC  
**表 1.** IPCC 移动排放源测算法对比

	“自上而下”法(能源经济模型)	“自下而上”法(工程技术模型)
测算方式	将交通工具所使用的各种燃料的碳排放系数乘以各种燃料的总消耗量数据从而得到碳排放量。	将各类交通工具出行总里程乘以每千米燃料消耗量, 得出各交通方式的燃料消耗总量, 再与碳排放系数相乘, 得到各交通方式的碳排放量。
优点	适用于各行业的碳排放计算, 仅需获取各种能源的消耗数据即可计算, 数据较精确。	各交通方式出行里程、碳排放系数等数据可从统计年鉴、年报中获得, 计算精确度高, 便于区分不同交通工具碳排放。
缺点	无法分析交通结构, 尺度较小的区域往往缺乏统计数据而不方便计算, 且能源消费地和排放地可能不统一。	高度依赖调查数据, 各种交通运输工具的燃料消耗量等基础数据误差大且收集困难。

在我国, 由于“自上而下”法难以区分各类交通方式的能源消耗, 且不适合小尺度的研究对象, 国内城市交通碳排放计算普遍采用的是“自下而上”法, 尤其是对年度碳排放量的测算[70]。例如刘爽等通过“自下而上”法测算了北京市交通碳排放, 并利用城市客运交通结构优化模型分析了不同情景下的交通出行比例[71]; 张清等采用“自下而上”法分别对上海市公共交通和私人交通碳排放进行了核算[72]; Xia 等估算了杭州市每日出行的碳排放量, 提出一种自下而上的城市交通碳减排方法[73]; 高莹同样采用“自上而下”法对天津市 2000~2016 年的交通碳排放进行了核算, 并采用迪氏分解法分析了碳排放的影响因素[74]。

而在国外学者的研究中, 这两种方法都得到了广泛应用, 如 Saija 等改进了“自上而下”法, 对意大利道路运输碳排放量进行了测算[75]; Mensink 等通过“自下而上”法建立了城市交通碳排放模型, 并核算了安特卫普地区的交通碳排放量[76]。

此外, 也有研究者将两种方法相结合, 如蔡博峰等结合“自上而下”法和“自下而上”法计算了 2007 年全国交通运输与省域尺度下的交通碳排放[77]; 杨加猛等也将两种方法相结合, 分别对江苏省交通运输业和公路运输碳排放进行核算, 并探讨了汽车保有量调控、燃油经济性调控等减排情景下的碳排放总量和强度变化水平[78]。

基于 IPCC 移动排放源测算法, 两类交通碳排放核算模型见表 2 [74] [79]。

**Table 2.** IPCC accounting model  
**表 2.** IPCC 法核算模型

“自上而下”法	“自下而上”法
$E = \sum A_i \times F_i \times K_i$	$E = \sum T_i \times d_i \times w_i$
<i>E</i> 为交通碳排放总量(万 t); <i>A<sub>i</sub></i> 为第 <i>i</i> 类能源对应的实物消耗量(万 t); <i>F<sub>i</sub></i> 为第 <i>i</i> 类能源对应的折标煤系数; <i>K<sub>i</sub></i> 为第 <i>i</i> 类能源对应的碳排放系数; <i>i</i> 为能源类型(包括原油、燃油、汽油、煤油、柴油、天然气、电力、液化石油气和其他石油能源共 9 类能源)。	<i>E</i> 为交通碳排放总量(万 t); <i>T<sub>i</sub></i> 为第 <i>i</i> 种交通方式的年客运量(亿人次); <i>d<sub>i</sub></i> 为第 <i>i</i> 种交通方式的平均出行距离(km); <i>w<sub>i</sub></i> 为第 <i>i</i> 种交通方式的碳排放因子(g/(per·km))。

#### 4. 低碳交通与城市空间耦合研究

除了以上对于低碳交通与城市两方面的研究, 还有少数学者将低碳交通与城市空间规划设计进行耦合研究。张娅薇从低碳出行与城市空间的互动关系出发, 探讨低碳出行导向下的城市空间模式[80]; 刘博首先分析了市民的出行特征, 接着探究城市空间要素与居民出行的相互影响机制, 提出低碳导向下的城市空间规划策略[81]; 叶洋对绿色交通理念在城市中心区空间上的作用机制及其与城市要素的关联进行梳理, 明确城市中心区空间减轻交通拥堵、减少环境污染、促进社会公平、合理利用资源的发展目标, 进而提出城市中心区空间优化原则[82]; Mark 等将更好的城市和交通规划, 尤其是改变土地利用、私人机动交通转向公共、积极的交通和城市绿化的方式视为实现碳中和与健康城市的有效途径[83]; Subba 等利用 LUE 空间显性土地利用平衡模型建立不同城市形态(紧凑、分散)的城市土地利用情景, 并以日本横滨为例, 利用大型交通模拟器对各城市形态下的交通进行预测, 分析城市形态与土地利用和交通碳排放的关系[25], 该方法可作为城市可持续发展规划中测试土地利用和交通政策的有效工具, 但仅验证于横滨一处案例, 地理上不具有代表性。

#### 5. 研究进展总结

根据上文研究综述, 涉及城市低碳交通与空间优化的研究总体上存在以下特征与问题, 分别从研究对象与范围、案例选取、总体缺陷等方面进行评价。

城市碳排放方面基于 IPCC 城市与气候变化会议的主要内容, 除了相关理论辨析, 还涉及土地利用、碳足迹、城市形态等因素对城市碳排放的影响。国外研究较多, 但大多关注影响因素及实证研究, 较少提及后续改善措施。低碳城市实践上, 研究内容包括设计概念、低碳城市发展与管理策略、土地利用策略、固碳保护策略等。国内研究往往以某一城市为例进行分析, 且相关理论方法的补救措施相对薄弱, 需继续发展和系统化, 才能对城市建设产生指导意义; 而国外则多从理论维度提出解决策略或设计方法。整体案例研究大部分针对较为发达的城市, 但缓解城市环境问题的最大潜力存在于城市化早期的中小型城市[84]。

城市空间优化研究一方面是对现有城市形式的归纳、各自代表性城市特征与缺陷的总结, 成果表明城市空间的合理规划有利于城市环境与市民健康; 另一方面是对于空间优化的策略研究, 涵盖能源消耗、市民就业比例、交通方式与结构、土地利用等研究方向, 最终从生态性、空间尺度、景观改造、交通网络干预等角度提出空间优化策略, 倡导通过城市空间的规划管理实现可持续发展。这类研究根据因变量的不同, 选取了不同尺度的案例, 但很少在具体城市范围内进行实证, 研究成果较多停留在理论分析层面。

低碳交通方面的研究内容包括概念明晰、交通碳排放量化、影响因素、低碳交通体系评价、碳减排

措施等。首先,明晰定义是后续研究的前提,低碳交通概念起源于2007年的英国交通运输部,随后在世界范围内传播,我国学者分别从低碳经济、绿色发展等相关理论的角度提出定义。作为一个发展不久的新颖理念,国内外学者还需进一步深入探讨,进行概念与理论深化。交通碳排放量化分析为影响因素探讨与措施制定提供数据参考,研究涉及数据处理技术、碳排放估算分析(宏观、微观)、模型建立与误差分析等。这一部分的研究最为普遍,方法广泛,并且存在大量方法模型的对比分析,研究体系较完善。分析交通碳排放影响因素是制定碳减排政策措施的基础工作。学者多采用模型(因素分解模型、投入产出模型、计量经济学模型等),针对某一因素进行实证,或提出多种可能对交通碳排放存在制约作用的宏观因素,包括交通结构、人口规模、产业结构、经济发展水平、城镇化率、城市空间分布、交通工具数量、交通能源强度、城市环境等,但仅从宏观层面加以分析对提出精准碳减排措施的支撑相对有限,研究深度有待加强;另外,研究集中在碳排放过程的某一方面或某一特定阶段,缺乏对整个碳排放过程中影响因素的系统综述[85],难以把握各因素在交通减排中的作用,明确各主体的减排责任[86]。低碳交通评价体系的构建是推动低碳交通发展的重要条件。研究包含评价指标体系、碳绩效、碳减排成本等内容,基于大数据或分析模型,对案例城市的低碳交通水平和潜在碳减排效率进行评价。这部分研究内容并不充足,还需构建更多分析模型,对现有评价方法持续优化。政策与措施的制定是低碳交通研究的最终目标。学者们通过对世界各城市的交通问题相关政策法规的回顾与展望,提出相应改善措施,大体分为技术性减排、结构性减排和管理性减排三类方案。目前,结构性减排的研究范围较广,通过案例城市交通方式对比、结合城市发展阶段等方式,得出了改变不同交通方式占比(尤其是提倡公共交通)、城市发展早期限制私家车、中期建设和优化交通基础设施、后期公交化与新技术应用等措施来实现交通碳减排。而技术性减排主要聚焦新型能源的替代与智能技术的应用,虽然研究历程短、内容较少,但有望随着科技发展持续产出新的研究成果。此外,管理性减排措施的研究还需细化,主要涉及政策引导的内容。以上低碳交通的相关研究往往聚焦影响因素、核算模型、政策措施等特定方向,缺乏将各个方向相结合的整体性视角。

交通碳排放测算方法与模型探索主要基于 IPCC 移动排放源测算法形成的“自上而下”和“自下而上”两种模型,各有优劣,其中我国由于数据采集、研究尺度、交通方式区分等方面的困难,使用“自下而上”法进行核算的较多,参考精确统计数据进行多种交通方式的碳排放测算,但缺乏对 IPCC 测算法缺陷与不足的挖掘,改进与优化研究较少,方法创新略显不足,且研究对象基本为中国整体或单个城市,缺少区域整体尺度的探讨;而国外研究则多将两种模型结合,在其基础上予以改进,建立各自的核算模型;还有少数学者同时使用两种方法,分别对不同尺度、不同交通方式的碳排放总量和强度变化做分析。整体来看,测算方法体系需要进一步拓展深化,尤其要从时间维度研究模型适用性,建立更切合实际的多阶段核算模型。

此外,虽然目前国内外针对城市空间和低碳交通两个领域的研究成果较为丰富,但考虑到两者之间的联系并进行耦合研究的成果还有所欠缺,研究视角包含相关研究综述、两者互动关系、市民出行特征、绿色交通理念、交通模式转变等,但案例实践太少,且在地理上不具有代表性,还需实践广度的扩充。在城市化进程加快、城市问题日益显现的今天,城市空间优化是交通领域碳减排、城市环境问题改善的重点努力方向之一,今后应加强两者的关联研究,使城市空间对低碳交通发展产生促进作用,让低碳交通对城市空间演变产生积极影响。

## 6. 结论与展望

通过上文的综述与分析总结,可得到如下结论:

- 1) 低碳城市研究包括概念明晰、影响因素、案例实践等内容,国内理论研究的补救措施还需系统化

发展, 而国外研究较多, 但改善措施探索不足。总体着眼视角也应适当转向城市化早期的中小城市。

2) 城市空间研究涉及城市形式归纳对比以及空间优化策略, 案例尺度涵盖范围广, 但缺乏城市层面的实证分析。

3) 低碳交通研究内容包括概念、量化分析、影响因素、低碳水平评价、碳减排措施等, 整体性研究不足。目前国际上还未达成概念统一, 而交通碳排放量化研究体系较完善; 影响因素多从宏观层面分析, 且集中于某一碳排放过程, 缺乏全过程研究; 评价体系的模型构建缺乏多样性, 而政策措施的探索内容丰富, 管理性措施是下一步完善的重点。

4) 交通碳排放测算方法与模型研究主要包含两种 IPCC 测算法的对比分析与各自的应用实证, 国内多采用“自下而上”法, 而国外研究两者兼具, 需加强时间层面的模型构建。

5) 低碳交通与城市空间优化的耦合研究内容单薄且实践案例少, 今后需加强两者相互联系。

城市空间的合理规划与精准管理有助于改善城市环境问题, 为居民提供健康可持续的生活场所。交通体系碳排放是城市问题的重要诱因之一, 改善交通发展模式, 实现碳减排, 加强城市空间与低碳交通的相互促进作用, 是推动城市可持续发展的有效途径。除了相关理论研究, 今后还应加强城市实践方面的探索, 切实推进碳减排工作的落实。

## 基金项目

上海市设计学四类高峰学科基金、教育部新文科改革与实践项目(编号 2021070038)资助。

## 参考文献

- [1] Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toret, A., Tsimplis, M.N. and Xoplaki, E. (2018) Climate Change and Interconnected Risks to Sustainable Development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, **8**, 972-980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- [2] Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., *et al.* (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva.
- [3] Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C. and West, G.B. (2007) Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**, 7301-7306. <https://doi.org/10.1073/pnas.0610172104>
- [4] IEA (2012) World Energy Outlook 2012. International Energy Agency (IEA), Paris, 700.
- [5] Pachauri, R.K., L. A. M. and C. W. T. (2014) Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers. IPCC, Geneva, 151.
- [6] Wang, G. and Han, Q. (2021) The Multi-Objective Spatial Optimization of Urban Land Use Based on Low-Carbon City Planning. *Ecological Indicators*, **125**, Article ID: 107540. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107540>
- [7] IEA (2015) CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion Highlights 2015. International Energy Agency (IEA), Paris.
- [8] Zhang, M. and Zhao, P. (2017) The Impact of Land-Use Mix on Residents' Travel Energy Consumption: New Evidence from Beijing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **57**, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.020>
- [9] Hickman, R., Ashiru, O. and Banister, D. (2010) Transport and Climate Change: Simulating the Options for Carbon Reduction in London. *Transport Policy*, **17**, 110-125. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.12.002>
- [10] UNFCCC (2011) Compilation and Synthesis of Fifth National Communications. Note by the Secretariat. Addendum. Policies, Measures, and Past and Projected Future Greenhouse Gas Emission Trends of Parties Included in Annex I to the Convention. FCCC/SBI/2011/INF.1/Add.1. *Bonn Climate Change Conference*, Bonn, 6-16 June 2011.
- [11] Li, P., Zhao, P. and Brand, C. (2018) Future Energy Use and CO<sub>2</sub> Emissions of Urban Passenger Transport in China: A Travel Behavior and Urban Form Based Approach. *Applied Energy*, **211**, 820-842. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.022>
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年中国汽车环境管理年报[EB/OL].



- [http://www.gov.cn/guoqing/2019-04/09/content\\_5380744.htm](http://www.gov.cn/guoqing/2019-04/09/content_5380744.htm), 2019-04-09.
- [13] 李迅, 张国华, 黄坤鹏. 中国城市交通发展的绿色之路[J]. 城市规划学刊, 2008(6): 51-56.
- [14] Yang, Y., Wang, C., Liu, W. and Zhou, P. (2017) Microsimulation of Low Carbon Urban Transport Policies in Beijing. *Energy Policy*, **107**, 561-572. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.021>
- [15] 薛佳平, 田伟利, 张清宇. 杭州市机动车 NO<sub>x</sub> 排放清单的建立及其对空气质量的影响[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 613-618.
- [16] Zhao, P., Lü, B. and de Roo, G. (2010) Urban Expansion and Transportation: The Impact of Urban form on Commuting Patterns on the City Fringe of Beijing. *Environment and Planning A: Economy and Space*, **42**, 2467-2486. <https://doi.org/10.1068/a4350>
- [17] Gorham, R. (2002) Air Pollution from Ground Transportation: An Assessment of Causes, Strategies and Tactics, and Proposed Actions for the International Community. Division for Sustainable Development Department of Economic and Social Affairs, New York.
- [18] Prieur-Richard, A.-H., Walsh, B., Craig, M., Melamed, M. L., Colbert, L., Pathak, M., Connors, S., Bai, X., Barau, A., Bulkeley, H., Cleugh, H., Cohen, M., Colenbrander, S., Dodman, D., Dhakal, S., Dawson, R., Espey, J., Greenwalt, J., Kurian, P., Lee, B., Leona-rdsen, L., Masson-Delmotte, V., Munshi, D., Okem, A., dDelgado Ramos, G.C., Sanchez Rodriguez, R., Roberts, D., Rosenzweig, C., Schultz, S., Seto, K., Solecki, W., van Staden, M. and Ürge-Vorsatz, D. (2018) Global Research and Action Agenda on Cities and Climate Change Science. Cities IPCC, Edmontondf.
- [19] Creutzig, F., Roy, J., Lamb, W.F., Azevedo, I.M., de Bruin, W.B., Dalkmann, H., *et al.* (2018) Towards Demand-Side Solutions for Mitigating Climate Change. *Nature Climate Change*, **8**, 268-271. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0121-1>
- [20] Ottelin, J., Heinonen, J. and Junnila, S. (2018) Carbon Footprint Trends of Metropolitan Residents in Finland: How Strong Mitigation Policies Affect Different Urban Zones. *Journal of Cleaner Production*, **170**, 1523-1535. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.204>
- [21] Leibowicz, B.D. (2020) Urban Land Use and Transportation Planning for Climate Change Mitigation: A Theoretical Framework. *European Journal of Operational Research*, **284**, 604-616. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.12.034>
- [22] 李陈宸. 低碳生态城市理念下城市交通与空间结构优化策略研究——以苏州中心城区为例[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- [23] 檀稳. 基于交通出行视角的城市土地利用碳减排策略研究——以武汉市为例[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [24] Subba, J.R., Thammakhet, C., Thavarungkul, P. and Kanatharana, P. (2016) Sampling of BTX in Hat Yai City Using Cost Effective Laboratory-Built PCB Passive Sampler. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, **51**, 861-869. <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1181464>
- [25] Zhang, Y., Liu, Y., Wang, Y., *et al.* (2020) Urban Expansion Simulation towards Low-Carbon Development: A Case Study of Wuhan, China. *Sustainable Cities and Society*, **63**, Article ID: 102455. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102455>
- [26] Gao, S. and Zhang, H. (2020) Urban Planning for Low-Carbon Sustainable Development. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, **28**, Article ID: 100398. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100398>
- [27] Nieuwenhuijsen, M.J. (2018) Influence of Urban and Transport Planning and the City Environment on Cardiovascular Disease. *Nature Reviews Cardiology*, **15**, 432-438. <https://doi.org/10.1038/s41569-018-0003-2>
- [28] Nieuwenhuijsen, M.J. (2016) Urban and Transport Planning, Environmental Exposures and Health-New Concepts, Methods and Tools to Improve Health in Cities. *Environmental Health*, **15**, Article No. S38. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0108-1>
- [29] Newman, P.W. and Kenworthy, J.R. (1989) Gasoline Consumption and Cities: A Comparison of U.S. Cities with a Global Survey. *Journal of the American Planning Association*, **55**, 24-37. <https://doi.org/10.1080/01944368908975398>
- [30] 李保华. 低碳交通引导下的城市空间布局模式及优化策略研究——以郑州为例[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [31] Kennedy, C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen, Y., Hillman, T., Havranek, M. *et al.* (2009) Greenhouse Gas Emissions from Global Cities. *Environmental Science & Technology*, **43**, 7297-7302. <https://doi.org/10.1021/es900213p>
- [32] 张卫丽. 基于低碳交通战略的重庆主城区城市空间生态化拓展研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [33] 邬尚霖. 低碳导向下的广州地区城市设计策略研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [34] Nieuwenhuijsen, M.J., Khreis, H., Triguero-Mas, M., Gascon, M. and Davvand, P. (2017) Fifty Shades of Green:

- Pathway to Healthy Urban Living. *Epidemiology*, **28**, 63-71. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000549>
- [35] Giles-Corti, B., Vernez-Moudon, A., Reis, R., Turrell, G., Dannenberg, A.L., Badland, H., Foster, S., Lowe, M., Sallis, J.F., Stevenson, M. and Owen, N. (2016) City Planning and Population Health: A Global Challenge. *The Lancet*, **388**, 2912-2924. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30066-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30066-6)
- [36] 杨雪英. 更加绿色的未来——英国低碳交通发展思路[J]. 交通建设与管理, 2010(11): 78-79.
- [37] 宿凤鸣. 低碳交通的概念和实现途径[J]. 综合运输, 2010(5): 13-17.
- [38] 张陶新, 周跃云, 赵先超. 中国城市低碳交通建设的现状与途径分析[J]. 城市发展研究, 2011, 18(1): 68-73, 80.
- [39] 王茜, 张建慧. 基于“脱钩”理论的城市低碳交通模式研究[J]. 经济论坛, 2012(4): 150-152.
- [40] Nocera, S., Ruiz-Alarcón-Quinterob, C. and Cavallaro, F. (2018) Assessing Carbon Emissions from Road Transport through Traffic Flow Estimators. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **95**, 125-148. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.020>
- [41] Javid, R.J., Nejat, A. and Hayhoe, K. (2014) Selection of CO<sub>2</sub> Mitigation Strategies for Road Transportation in the United States Using a Multi-Criteria Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **38**, 960-972. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.005>
- [42] Schmidt, A., Rella, C.W., Göckede, M., Hanson, A., Yang, Z. and Law, B.E. (2014) Removing Traffic Emissions from CO<sub>2</sub> Time Series Measured at a Tall Tower Using Mobile Measurements and Transport Modeling. *Atmospheric Environment*, **97**, 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.006>
- [43] Yan, L., Luo, X., Zhu, R. et al. (2020) Quantifying and Analyzing Traffic Emission Reductions from Ridesharing: A Case Study of Shanghai. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **89**, Article ID: 102629. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102629>
- [44] Tezel-Oguza, M.N., Saria, D., Ozkurt, N. and Keskin, S.S. (2020) Application of Reduction Scenarios on Traffic-Related NO<sub>x</sub> Emissions in Trabzon, Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, **11**, 2379-2389. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.014>
- [45] Wang, W., Zhang, M. and Zhou, M. (2011) Using LMDI Method to Analyze Transport Sector CO<sub>2</sub> Emissions in China. *Energy*, **36**, 5909-5915. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.031>
- [46] 王靖添, 马晓明. 低碳交通研究进展与启示[J]. 生态经济, 2021, 37(5): 57-64.
- [47] Labib, S.M., Nigar, M.N., Zahidur, R., Patwary, S.H. and Shakil, S.H. (2018) Carbon Dioxide Emission and Bio-Capacity Indexing for Transportation Activities: A Methodological Development in Determining the Sustainability of Vehicular Transportation Systems. *Journal of Environmental Management*, **223**, 57-73. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.010>
- [48] 陈飞, 诸大建, 许琨. 城市低碳交通发展模型、现状问题及目标策略——以上海市实证分析为例[J]. 城市规划学刊, 2009(6): 39-45.
- [49] Zhang, L., Long, R., Li, W. and Wei, J. (2020) Potential for Reducing Carbon Emissions From Urban Traffic Based on the Carbon Emission Satisfaction: Case Study in Shanghai. *Journal of Transport Geography*, **85**, Article ID: 102733. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102733>
- [50] Talbi, B. (2017) CO<sub>2</sub> Emissions Reduction in Road Transport Sector in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **69**, 232-238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.208>
- [51] Li, W.X., Bao, L., Wang, L.Q., Li, Y. and Mai, X. (2019) Comparative Evaluation of Global Low-Carbon Urban Transport. *Technological Forecasting and Social Change*, **143**, 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.02.008>
- [52] Park, Y.S., Lim, S.H., Egilmez, G. and Szmerekovsky, J. (2018) Environmental Efficiency Assessment of U.S. Transport Sector: A Slack-Based Data Envelopment Analysis Approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **61**, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.009>
- [53] Zhou, G.H., Chung, W. and Zhang, X.L. (2013) A Study of Carbon Dioxide Emissions Performance of China's Transport Sector. *Energy*, **50**, 302-314. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.045>
- [54] Hofer, C., Jäger, G. and Füllsack, M. (2018) Large Scale Simulation of CO<sub>2</sub> Emissions Caused by Urban Car Traffic: An Agent-Based Network Approach. *Journal of Cleaner Production*, **183**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.113>
- [55] Sun, L., Zhang, T., Liu, S., et al. (2021) Reducing Energy Consumption and Pollution in the Urban Transportation Sector: A Review of Policies and Regulations in Beijing. *Journal of Cleaner Production*, **285**, Article ID: 125339. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125339>
- [56] Marsden, G. and Groer, S. (2016) Do Institutional Structures Matter? A Comparative Analysis of Urban Carbon Management Policies in the UK and Germany. *Journal of Transport Geography*, **51**, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.01.002>

- [57] Amjad, M., Ahmad, A., Rehmani, M.H. and Umer, T. (2018) A Review of EVs Charging: From the Perspective of Energy Optimization, Optimization Approaches, and Charging Techniques. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **62**, 386-417. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.006>
- [58] 侯纳, 李冰. 城市低碳交通研究[J]. 生态经济, 2011(7): 154-158.
- [59] Karkatsoulis, P., Siskos, P., Paroussos, L. and Capros, P. (2017) Simulating Deep CO<sub>2</sub> Emission Reduction in Transport in a General Equilibrium Framework: The GEM-E3T Model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **55**, 343-358. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.026>
- [60] Geng, J., Long, R. and Chen, H. (2016) Impact of Information Intervention on Travel Mode Choice of Urban Residents with Different Goal Frames: A Controlled Trial in Xuzhou, China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **91**, 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.031>
- [61] Woodcock, J., Edwards, P., Tonne, C., Armstrong, B.G., Ashiru, O., Banister, D., Beevers, S., Chalabi, Z., Chowdhury, Z., Cohen, A. and Franco, O.H. (2009) Public Health Benefits of Strategies to Reduce Greenhouse-Gas Emissions: Urban Land Transport. *The Lancet*, **374**, 1930-1943. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)61714-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)61714-1)
- [62] Creutzig, F., Mühlhoff, R. and Römer, J. (2012) Decarbonizing Urban Transport in European Cities: Four Cases Show Possibly High Co-Benefits. *Environmental Research Letters*, **7**, Article ID: 044042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044042>
- [63] Zhang, L., Long, R. and Chen, H. (2019) Do Car Restriction Policies Effectively Promote the Development of Public Transport? *World Development*, **119**, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.03.007>
- [64] Nandi, A.K., Bhattacharya, K. and Manna, S.S. (2009) An Optimal Network for Passenger Traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **388**, 3651-3656. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2009.05.017>
- [65] Loo, B.P.Y., Chen, C. and Chan, E.T.H. (2010) Rail-Based Transit-Oriented Development: Lessons from New York City and Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, **97**, 202-212. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.06.002>
- [66] Zhang, L., Long, R., Chen, H. and Geng, J. (2019) A Review of China's Road Traffic Carbon Emissions. *Journal of Cleaner Production*, **207**, 569-581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.003>
- [67] 龙江英. 城市交通体系碳排放测评模型及优化方法[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [68] Auffhammer, M. and Carson, R.T. (2008) Forecasting the Path of China's CO<sub>2</sub> Emissions Using Province-Level Information. *Journal of Environmental Economics & Management*, **55**, 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2007.10.002>
- [69] 陈肖雨. 不同空间尺度下交通碳排放测算及其网络结构特征研究——以云南省为例[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [70] 景国胜, 张海霞, 廖文苑. 城市交通碳排放测算研究——以广州市为例[C]//中国城市规划学会城市交通规划学术委员会. 创新驱动与智慧发展——2018年中国城市交通规划年会论文集: 2018年卷. 北京: 中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院, 2018: 3453-3463.
- [71] 刘爽, 赵明亮, 包姹娜, 刘静. 基于交通结构发展情景分析的城市交通碳排放测算研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(3): 226-231.
- [72] 张清, 陶小马, 杨鹏. 特大型城市客运交通碳排放与减排对策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 35-42.
- [73] Xia, C., Xiang, M., Fang, K., et al. (2020) Spatial-Temporal Distribution of Carbon Emissions by Daily Travel and Its Response to Urban Form: A Case Study of Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, **257**, Article ID: 120797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120797>
- [74] 高莹. 天津市交通碳排放核算及影响因素分析[J]. 再生资源与循环经济, 2019, 12(6): 18-21.
- [75] Saija, S. and Romano, D. (2002) A Methodology for the Estimation of Road Transport Air Emissions in Urban Areas of Italy. *Atmospheric Environment*, **36**, 5377-5383. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00488-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00488-0)
- [76] Mensink, C., De Vlieger, I. and Nys, J. (2000) An Urban Transport Emission Model for the Antwerp Area. *Atmospheric Environment*, **34**, 4595-4602. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00215-6)
- [77] 蔡博峰, 曹东, 刘兰翠, 等. 中国交通二氧化碳排放研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(3): 197-203.
- [78] 杨加猛, 万文娟. 省域交通运输业碳排放核算及其减排情景分析[J]. 公路, 2017, 62(11): 155-159.
- [79] 张会丽. 基于结构优化的重庆市交通出行碳减排潜力研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [80] 张娅薇. 低碳出行导向的城市空间模式[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [81] 刘博. 低碳出行导向下的泰安市城市空间规划策略研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
- [82] 叶洋. 基于绿色交通理念的城市中心区空间优化研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

- 
- [83] Nieuwenhuijsen, M.J. (2020) Urban and Transport Planning Pathways to Carbon Neutral, Liveable and Healthy Cities; a Review of the Current Evidence. *Environment International*, **140**, Article ID: 105661.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105661>
- [84] Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Minx, J.C., *et al.* (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- [85] 王立平, 张海波, 刘云. 基于 EBA 模型的中国碳排放稳健性影响因素研究[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 47-53.
- [86] Glassom, D. (2007) Transport and Climate Change: A Review. *Journal of Transport Geography*, **15**, 354-367.  
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008>