

城市形态与城市交通能耗的关联性研究：进展、共识、难点

陈 珏 杜思宏 李艳霞 石 邢

提 要 在“碳达峰、碳中和”背景下，控制城市交通运输能源消耗，对于实现“双碳”目标、建设低碳城市、提高资源使用效率、保护生态环境具有重要意义。基于城市形态与城市交通能耗的关联性文献调研，分别从宏观、中观、微观3个尺度对城市形态量化指标进行分类总结，综述多尺度下城市形态与城市交通能耗的关联性的研究进展，梳理已形成的研究共识。尽管该方向的研究已经形成了一系列成果，但仍然存在一些难点，主要包括城市交通能耗基础数据获取困难、非城市形态指标交互影响下的城市交通能耗效用模型尚不成熟等。提出未来研究有待深化的方向。

关键词 城市形态；城市交通能耗；多尺度量化指标；影响因素；效用模型

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202204006
文章编号 1000-3363(2022)04-0051-07

作者简介

陈 珏，广州市城市规划勘测设计研究院，广东省城市感知与监测预警企业重点实验室，220190029@seu.edu.cn

杜思宏，同济大学建筑与城市规划学院博士研究生

李艳霞，东南大学建筑学院博士研究生

石 邢，同济大学建筑与城市规划学院，高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室，教授、博士生导师，通信作者，20101@tongji.edu.cn

Correlation Between Urban Form and Urban Traffic Energy Consumption: Progress, Consensus, and Difficulties

CHEN Jue, DU Sihong, LI Yanxia, SHI Xing

Abstract: In the background of peak carbon and carbon neutrality, controlling energy consumption in the urban transportation sector is of great significance for realizing the dual carbon goals and building low-carbon cities. Based on a literature review of the correlation between urban form and urban transportation energy consumption, the paper categorizes indicators of urban form at three scales, namely macroscale, mesoscale, and microscale. The correlation between indicators of urban form and urban transportation energy consumption at multiple scales is summarized, and views expressed in the existing literature are sorted out. However, some difficulties remain, including the obstacle of obtaining basic data of urban transportation energy consumption, and the flaw in the urban transportation energy consumption model due to uncontrolled influence of factors other than urban form. On this basis, the paper proposes the future directions of research.

Keywords: urban form; urban traffic energy consumption; multi-scale quantitative indicator; influence factor; utility model

气候变暖是全球共同面对的严峻挑战，其主要原因是人类活动带来的能源消耗。城市是人口、建筑、交通、工业高度汇聚的区域，是能源消耗的重点，也是实现节能减排的关键。根据国际能源署IEA的统计，2019年全球能源消耗总量为14.28 Gtce，中国作为全球能耗大国，其能源消耗量为3.03 Gtce，占全球总能源消耗量的21.21%^[1]。为应对日益严重的能源消耗问题，中国提出了“3060目标”，即“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。实现“双碳”目标，不仅需要国家做好政策顶层设计，也需要多部门共同发力，努力构建低碳至零碳经济发展体系。在城市中，产生城市能耗的部门主要是建筑、交通、工业^[2]，其中交通部门是重点减排对象，据统计，2019年交通运输能源消耗量占全球能源总消耗量的比重最大，为28.94%，中国的交通部门能源消耗量占全社会总能源消耗量也高达15.52%^[1]。随着城市化的快速

*国家自然科学基金：优化算法和知识库驱动的方案阶段建筑节能设计与技术工具原型研究(51678124)、广东省城市感知与监测预警企业重点实验室基金项目(2020B121202019)、广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目：“碳中和”目标引领下国土空间规划方法与关键技术研究(RDI2210202162)

发展,城市扩张、无序开发、“以车为本”等城市问题逐渐出现^[3],城市交通能源消耗日趋严重。因此,控制交通运输能源消耗,对于实现“双碳”目标、建设低碳城市具有重要而深远的意义。

如何减少城市交通能耗是城市规划、交通管理、行为地理、环境能源、应用统计等多学科研究的重要课题。影响城市交通能耗的驱动力包括城市形态指标和非城市形态指标^[4-5],其中城市形态发挥着重要作用。在以城市交通能耗为视角的研究中,城市形态主要指与交通行为的“效用”相关的具体特征^[6]。在这些研究中,如何选定空间尺度和城市形态量化指标,采用何种城市交通能耗获取方法和分析模型,以及是否加入对社会经济属性、居民态度选择等非城市形态指标的考虑,都会产生不同的结果^[7-8]。

为此,本文立足于建筑学与城乡规划学科背景,主要关注城市形态与城市交通能耗的关联性:首先,分别梳理宏观、中观、微观3个尺度的城市形态量化指标,归纳城市形态和城市交通能耗的关联性研究进展;其次,在总结各研究的基础上,凝练共识;再次,通过列举获取城市交通能耗数据的方法并评估其数据价值,比较现有研究的分析模型,从而发现研究难点;最后,提出未来研究有待进一步深化的问题,以期今后研究提供有益借鉴,也为低碳城市建设提供科学依据。

1 多尺度城市形态与城市交通能耗的关联性研究进展

城市形态在不同空间尺度上呈现不同的性质,由于城市空间尺度与交通方式有关^[9],国内外学者在研究城市形态与城市交通能耗的关联性时,通常按照微观、中观、宏观3个尺度展开研究,如图1所示。其中:微观尺度涵盖步行和自行车出行范围,由于步行范围一般在1 km内,以此模数形成邻里单元,而自行车的出行极限在6 km,以此组成城市慢速交通的基本单元;中观尺度关注城市地面公交和小汽车出行范围,由于公交单程出行距离在20 km以内,以此组织城市片区基本交通网络,小汽车

出行范围在60 km以内,在此范围内确定城市市域;宏观尺度包括城市区域间铁路系统,其中150 km是都市圈区域规划范围^[9]。涉及的具体指标如表1所示。

1.1 宏观尺度

宏观尺度主要指都市圈尺度、行政区划的城市尺度,这一尺度是最早关于城市形态与交通出行的关系研究的切入点,可以追溯到1980年代。描述宏观尺度的指标包括城市紧凑特征、城市中心结构、城市空间格局等。

欧美的研究最早从讨论城市紧凑特征对城市交通的影响开始。城市紧凑特征包括人口密度、城市蔓延度、建成区

面积等,其中人口密度能够反映空间集中程度,是使用最多的指标。有学者^[10]通过对比世界不同城市的人口密度,发现其与人均城市交通能耗有显著的负相关性。但随后有学者^[11]提出质疑,认为他们的研究没有考虑到不同国家地区之间社会经济的差异,因此随后的研究开始加入对非城市形态指标的考虑。尽管如此,关于人口密度对城市交通能耗或交通出行的影响仍然存在不一致的观点,有学者^[12]认为人口密度对城市交通能耗影响不大。在中国,有研究^[13-14]表明人口密度不是影响城市交通能耗的主要因素,这是由国内外人口密度和城镇化水平的差异造成的。除人口密度外,也有学者用城市南北方向和东西方向的

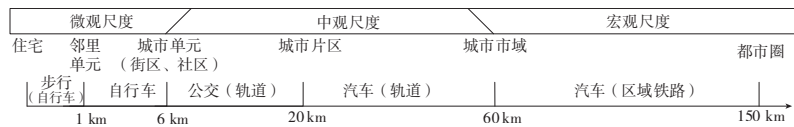


图1 城市空间尺度划分示意图
Fig.1 Schematic diagram of urban spatial scales

表1 影响城市交通能耗的各尺度城市形态指标

Tab.1 The indicators of urban form at various scales affecting urban transportation energy consumption

尺度	分类	量化指标	含义	
宏观	城市紧凑特征	人口密度 ^[10]	单位面积上的人口数量	
		紧凑度 ^[15]	南北方向和东西方向的最长距离的比例	
		建成区面积 ^[15-16]	城市行政区域内实际已开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的区域面积	
	城市中心结构	多中心性 ^[17-20]	城市区域内城市中心的数量	
		城市中心集中度 ^[21, 25]	城市中心周边资源配置的集中程度	
	城市空间格局	城市形状指数 ^[23]	城市面积与周长之比	
空间格局指数 ^[24]		格局中斑块的空间形态和模式		
中观	土地利用混合度	信息熵 ^[26]	土地利用多样性和均衡性的测度	
		职住自平衡比 ^[29]	利用可达性和距离两方面的匹配状况构建异质性指标	
	土地利用强度	开发强度 ^[30]	建设用地总量占行政区域面积的比例	
土地利用密度 ^[31]		单位土地面积就业人数和居住人数		
微观	密度	容积率 ^[39]	社区总建筑面积与社区用地面积的比例	
		建筑物覆盖率 ^[39]	社区内建筑物占地面积与区域总面积的比例	
		建筑高度 ^[41]	社区内各建筑的高度或层数	
	可达性	道路可达性 ^[3]	社区中心到快速路或主干道的距离	
		公交可达性 ^[27]	社区中心到最近公交站点的距离	
		生活服务设施可达性 ^[3, 37]	日常购物商业、教育、行政管理、体育活动、文化娱乐等生活服务设施社区中心的距离之和或加权距离之和	
	设计	路网设计	交叉口密度 ^[3, 39]	社区中心半径1000 m范围内交叉路口数量
			路网密度 ^[40]	道路总长度与街区面积的比值
		步行街道设计	绿化率 ^[41]	社区中心半径1000 m范围内两旁设置绿化带道路的比例
			平均街道宽度 ^[42]	社区中心半径1000 m范围内街道的平均宽度
社区设计	适宜步行道路长度 ^[42]	社区中心半径1000 m范围内低速道路(时速≤30 km/h)的道路长度		
	街区网格设计 ^[35, 42]	街区地块形状和大小设计		
	小区出入口比例 ^[42]	社区出入口的数量与街区边界长度的比值		

最长距离的比例表征城市紧凑度，发现其与城市交通能耗有较强的正相关性^[15]，同时建成区面积对城市交通的影响也不能忽视^[16]。

城市中心结构有多种表征，包括城市多中心性、城市中心集中度等，其中单中心与多中心的分野对城市交通能耗影响较大，讨论也较多。单中心支持者认为多中心使得就业分散，通勤距离增加，导致城市交通能耗上升；多中心支持者则认为多中心可以促使市民通过周期性调整来达到职住平衡^[17]。因此，发展单中心城市还是多中心城市更有利于降低城市交通能耗不能一概而论，对某一特定的城市而言，需要进行实证研究和充分的成本效益分析。例如，在地广人稀的美国，多中心结构导致公共交通服务困难，和城市交通能耗之间主要呈正相关关系^[18]。但是在中国，这一相关性还与城市规模有关，多中心结构在特大城市中更有利于减少城市交通能耗，在小城市中则与单中心结构区别不大^[19]。香港的一项研究^[20]则认为，双中心结构最有利于减少香港的通勤交通能耗。此外，不论采用单中心还是多中心，如果城市中心周边资源配置越集中，即城市集中度越高，私家车出行量越少，公共交通出行比例越高，城市交通能耗越低^[21]。

城市空间格局采用的量化指标包括城市几何形状、空间格局指标等，相比城市紧凑特征和城市中心结构，对城市空间格局与城市交通能耗的关联性研究较少。龙瀛等^[22]通过构建多智能体模型，发现在城市形态指标中，就业中心斑块的数量对城市交通能耗的影响最显著，同时还发现在所有城市几何形状中，圆形城市形态的城市交通能耗最低。但陈珍启等^[23]则认为城市几何形状对城市交通能耗的影响不大。也有学者^[24]用空间格局指标作为测度，发现最大城市斑块的优势度与城市交通能耗呈负相关性。

1.2 中观尺度

中观尺度主要指城市片区尺度，描述其城市形态的指标包括土地利用混合度、土地开发强度等。

中观尺度关注最多的指标是土地利用混合度，它是土地多样性的测度，表征方式主要有信息熵、职住自平衡比

等，目前国际上使用最多且最认可的指标是信息熵^[26]。在城市土地利用系统中，单一的土地使用结构会增加城市交通能耗^[26-27]，而土地利用多样性越高，越有利于减少城市交通能耗。就业用地和居住用地的分配对城市交通能耗有较大的影响，促进职住平衡能有效减少交通出行量，从而降低城市交通能耗。但是如果简单地用职住人口与就业人口之比量化职住平衡，即使职住比达到平衡，也会出现单个个体的居住地不平衡的情况^[28]。空间混合指数在职住分布上更关注可达性和距离的空间匹配情况，可以更准确地反映职住自平衡^[29]。

土地利用强度指城市土地利用系统上单位面积土地混合利用程度，表征方式有开发强度、土地利用密度等。有学者^[30]认为相较于土地利用混合度，土地开发强度与城市交通能耗呈更显著的负相关性。居住密度和就业密度常用来表示土地利用密度，就业密度相对居住密度更关注职住空间配置的协调，对城市交通能耗影响更大^[31]。

1.3 微观尺度

微观尺度城市形态通常包括邻里尺度、街区尺度、社区尺度。1990年代开始，国外学者^[32]在微观尺度上形成以密度（density）、多样性（diverty）、设计（design）构成的3D量化城市形态指标体系。随后，又加入了距公交站点距离（distance to transit）和目的地可达性（destination accessibility），形成了5D指标^[33]。

在微观尺度上，人口密度对城市交通能耗影响较小^[18]。因此与宏观尺度强调人口集中程度不同，微观尺度的密度更关注土地开发强度，包括容积率、建筑物覆盖率、建筑高度等。其中建筑密度对城市交通能耗的影响最显著^[34]，低密度开发的小区相比高密度开发的小区，会产生更高的城市交通能耗^[35]。

可达性指出发地到目的地之间的交通联系和便利程度，包括道路可达性、公交可达性、各类生活服务设施可达性等。可达性对出行距离的影响最明显^[36]，从而对城市交通能耗有着重要的影响。其中，由于购物设施主要分布在住区周围，居民的选择频率更高，对城市交通

能耗影响最显著，且呈负相关性^[37]。但值得注意的是，商业中心可达性涉及尺度更大，对出行能耗影响却不显著^[34]。公共交通是通勤能耗的最大影响因素^[38]，公交可达性与城市交通能耗呈显著正相关性，如果把职住距离控制在适宜公交出行的范围内，可以有效地降低通勤能耗^[27]。提升快速路或主干道可达性会增加私人汽车出行率，从而使城市交通能耗增高。

设计量化指标是为了区分面向行人环境和面向汽车环境，包括街区网格设计、小区出入口间距等社区设计指标，交叉口密度、路网密度、近端路口密度等路网设计指标，绿化率、平均街道宽度、有步行设施道路比例等步行街道设计指标。国内外学者普遍认为小尺度的格网状街区、数量多且密度高的小区出入口可以有效缩短出行距离，减少城市交通能耗^[35]。交叉口密度和路网密度与城市交通能耗有负相关性。虽然路网设计指标对城市交通能耗影响程度不大，但由于其设计修改可行性最高，是改善城市交通能耗的最有效手段^[39]。倾向于步行的街道设计可以有效减少私人汽车出行比例，减少城市交通能耗。

2 研究共识

城市形态与城市交通能耗的关联性虽然较为复杂，但是国内外学者通过理论和实践研究，已形成了若干共识，这些研究共识是该方向目前最重要的知识基础，也是未来开展进一步研究的起点。

2.1 影响城市交通能耗的因素主要分为城市形态和非城市形态指标

来自不同学科背景的学者普遍认为影响城市交通能耗的因素主要分为城市形态指标和非城市形态指标，其中非城市形态指标包括社会经济属性、居民态度偏好、交通系统特征、出行行为、交通工具技术等指标。具体来看，社会经济属性、城市形态、态度偏好等指标通过影响交通系统特征、居民出行行为、交通工具技术等，从而影响城市交通能耗，具体关系如图2所示。近年来，随着时空行为理论不断发展，居民自选

择效用的影响不断被证实^[4, 8, 23, 39], 事实上, 一些非城市形态指标也会对城市形态和城市交通能耗关联性产生干扰, 例如居民的社会经济属性和对交通模式的偏好选择, 会影响其对居住环境的选择, 导致城市形态对城市交通能耗影响的原因、方式、程度有所不同, 因此在探究城市形态与城市交通能耗的关联性时, 必须考虑社会经济属性和居民态度偏好等非城市形态指标的干扰。

2.2 将城市形态划分为3个尺度是研究其与城市交通能耗关联性的有效方法

将城市形态划分为3个尺度, 不仅有利于定义更具体的量化指标, 也便于获取相应尺度的城市交通能耗, 从而探究两者关联性。但值得注意的是, 不同尺度量化指标的意义并不完全互斥, 甚至可能是重复的。例如, 多样性在不同尺度的城市形态上都有具体的表征, 宏观尺度的多样性强调如何分布不同功能的城市中心, 中观尺度的多样性注重混合开发土地利用系统, 在微观尺度上多样性重视开发建设各类生活服务设施。

2.3 中微观尺度的研究是未来城市形态与城市交通能耗关联性研究的重点方向

宏观尺度的城市形态与城市交通能耗关联性研究一般基于不同城市之间的横向比较, 结论较为统一, 普遍认为一个紧凑的、精明增长的、城市中心集中的、以公交为导向的、多中心的城市形态有利于减少城市交通能耗。但是在中微观尺度上, 国内外学者们多对不同国家地区的社区进行案例分析, 还未形成较一致的结论。如果说宏观尺度上合理的城市规划能为降低城市交通能耗确定方向, 那么中微观尺度上科学的城市形态设计则能更有效、更直接、更准确地降低城市交通能耗提供具体手段。因此, 确定一套具有广泛适用性、科学有效性的中微观城市形态指标体系, 是未来研究城市交通能耗减排的重点方向。

3 研究难点

3.1 城市交通能耗基础数据获取困难

早期学者主要关注城市形态对交通出行行为的影响。近年来, 随着低碳城

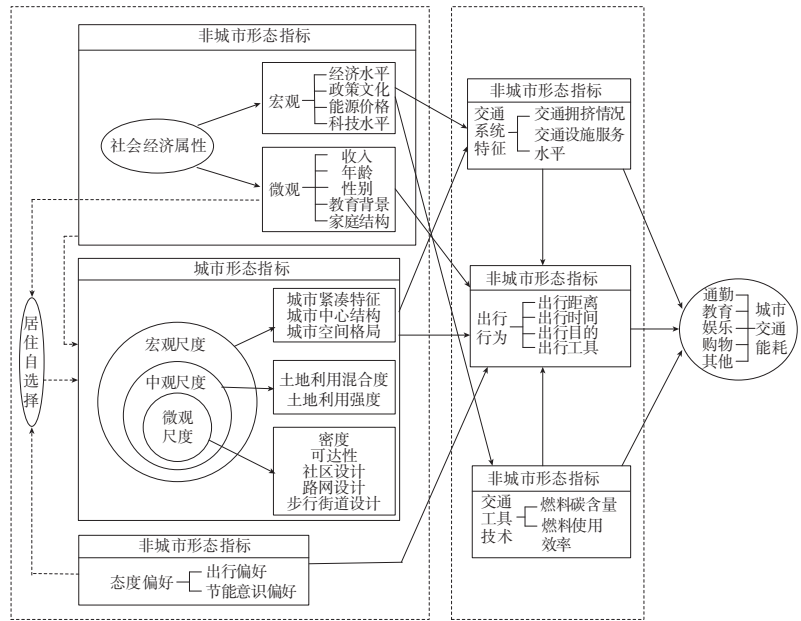


图2 城市交通能耗影响因素

Fig.2 Influencing factors of urban transportation energy consumption

市和智慧城市成为热点, 城市交通能耗数据作为居民出行行为的量化, 可以为城市规划设计、政府能源管理、政策法规制订提供信息支持, 为以实证研究为主的空间分析提供有效的预测手段。目前, 城市交通能耗数据需要出行距离、不同交通方式的具体能源消耗等信息, 在不同尺度上的获取方法不尽相同。

在宏观尺度上, 城市交通能耗主要以一个城市或地区“自上而下”统计的总体或平均截面数据为主, 一般直接利用相关政府和地区的能源统计年鉴数据^[23]、国际相关能耗数据库^[13]、相关文献公开数据^[19]等。该尺度的研究多是对不同城市和地区之间的城市交通能耗进行横向比较^[3, 10, 23], 难以从同一数据库找到同一时间截面的所有特定数据, 有些只能利用时间间隔较久的统计报告, 总体上数据基础薄弱、更新度较低、协调共享困难、利用可靠性较低。

在中微观尺度上, 主要以个体或家庭的交通能耗数据为主, 早期多采用固定时间段的居民出行日志调查^[30]和基于时间截面的问卷调查^[3]。这类调查方法能获取精确到个人或家庭单位的交通行为、家庭属性、态度偏好等信息, 可以更有效地控制非城市形态指标的影响, 但是大多通过人为记忆或者人工计

算获取数据, 且多基于单时间截面, 存在人为统计误差、收集数据麻烦、有效性低的缺点, 难以适应城市形态变化。后来, 有学者^[43]采用以家庭活动为基础的具有时间序列的纵向数据, 该方法能适应个人或家庭情况的变化, 但是数据获取困难、样本规模有限。近年来, 随着网约车、共享单车、新能源汽车的出现, 传统的调查方法准确度越来越低, 有些学者结合运用居民移动GPS数据、O-D点智能查询系统^[8]、LBS开放平台^[40]、加油站销售数据^[44], 这类方法获取的数据更准确、更省时、成本低, 但是存在空间范围难以界定、动态数据难以筛选的问题。总之, 在大数据时代, 如何借助数据监测平台、移动手机数据获取城市交通能耗, 是挑战亦是机遇。

3.2 非城市形态指标交互影响的效用模型建立困难

由于城市形态指标和非城市形态指标共同影响着城市交通能耗, 必须控制社会经济因素和居住自选择等非城市形态指标的影响, 建立相应的模型, 得到城市形态对城市交通能耗的“偏影响”。

城市交通能耗影响机理分析模型主要包括 STIRPA 模型、结构方程模型

(SEMs)、ASIF等、多元回归分析模型、Logit模型等(表2)。使用最多的方法是多元回归模型,它能够通过多个自变量的最优组合来预测城市交通能耗,具有实用意义,但是回归分析模型在解释多因素影响机制时有一定的局限性^[41],而结构方程模型基于统计分析技术,可以用来检查一个系统多变量间的因果关系,包括直接和间接的影响,是目前较好的方法。总之,由于城市交通能耗的影响因素复杂,需要研究人员具有综合学习能力,不同专业背景的研究人员进行多学科交叉合作,才能有效探究合理的城市交通能耗分析模型。

3.3 在两个重要问题上存在学术分歧

在两个重要的学术问题上,目前国内外学者尚未达成共识,存在明显的分歧。

第一,城市形态和非城市形态指标何者是城市交通能耗的主要影响因素。虽然目前的研究已经肯定非城市形态指标对城市交通能耗影响的重要性,但是与城市形态相比,何者的影响程度更大并且是否考虑非城市形态指标的干扰,可能会导致一些城市形态指标对城市交通能耗产生不同的影响效果。总之,由于不同学科的研究视角差异、交通工具和地区政策的演变、研究城市交通能耗类型不同(如通勤、非通勤),使得该问题至今仍没有统一的定论。

第二,在中微观尺度上关于城市形态对城市交通能耗的影响未形成一致的结论。这个问题其实是以第一个问题为基础的,尺度越小,非城市形态指标对城市交通能耗的影响更明显、更复杂。且由于研究案例存在地理背景不确定性,城市形态量化方法五花八门,获得

的城市交通能耗数据来源和类型不同,在时间和空间上匹配度不高,故而在中微观尺度上研究结论不一致,研究结果可比性较弱。

4 结论

在碳达峰、碳中和背景下,随着节能减排的理念深入人心,构建绿色环境和低碳城市是全球各行各业的首要工作。在城市规划和设计领域,也应当不断深化对“绿色低碳”的基本内涵和价值导向的认识。减少城市交通能耗是实现“双碳”目标、构建绿色交通和规划低碳城市的重要任务。

学者们普遍认为影响城市交通能耗的因素主要包括城市形态指标和非城市形态指标,其中城市形态对城市交通能耗起着重要的影响作用。将城市形态量化指标具体划分为宏观、中观、微观3个尺度进行研究,可以有效判断城市形态与城市交通能耗的关联性。但是在基于城市交通能耗的城市形态研究中,仍然面临一些难点,由于研究尺度的差异、量化指标的选取不同,导致数据获取处理方式不同,非城市形态指标交互影响下分析模型建立困难,使得研究难以获得一致的结论。

虽然城市形态影响下的城市交通能耗研究取得了诸多新的进展,但仍需在以下几个方面对其进行深化。

第一,重视中国背景下社会经济因素和居住自选择因素等非城市形态指标的影响。由于中西方社会发展阶段及居民生活方式存在差异,且中国目前在城市交通能耗的研究上对居住自选择的影响考虑较少^[4, 8],因此在未来的研究中,应对不同城市背景下的非城市形态指标

采取质性分析和量化分析相结合的方法,才能更进一步阐释城市形态对城市交通能耗的影响机制。

第二,构建科学的中微观城市形态量化指标体系。中观尺度关注居民居住地与目的地之间的路径和阻抗成本,微观尺度更关注居住地的建成环境。不同空间尺度的城市形态对城市交通能耗的影响机制不同,这就需要构建一套科学合理的量化指标体系。但是不能一味套用其他国家或地区的结论,应具体案例具体分析,并且在相同尺度、相同指标和相同分析模型的基础上对存在争议的问题进行科学分析,得出因地制宜的结论。

第三,利用智慧城市大数据和GIS技术获取不同尺度的城市交通能耗。近年来,随着数据采集和处理技术快速发展,我们开始进入大数据应用时代。因地制宜地建设本地化的城市交通能耗核算模型与应用平台,能够获取更全面的、具有时间序列的纵向数据,在结合GIS技术的基础上,能更准确地研究不同空间尺度和地理背景的城市形态、社会经济因素、居民自选择因素等对城市交通能耗的影响机理,为自下而上的减排模式和低碳城市建设提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] International Energy Agency(IEA). IEA energy and carbon tracker 2020[EB/OL]. 2021-09. <https://www.iea.org/>
- [2] 顾朝林,谭纵波,刘宛,等.气候变化、碳排放与低碳城市规划研究进展[J].城市规划学刊,2009(3):35-45.(GU Chaolin, TAN Zongbo, LIU Wan, et al. A study on climate change, carbon emissions and low-carbon city planning[J]. Urban Planning Forum, 2009(3): 35-45.)
- [3] 荣培君,张艳平,孙莹莹,等.建成环境对城市居民日常出行碳排放的影响:以开封市248个居住区为例[J].地理研究,2019,38(6):1464-1480.(RONG Peijun, ZHANG Yanping, SUN Yingying, et al. Impact of built environment on carbon emissions from daily travel of urban residents: a case study of 248 residential areas in Kaifeng [J]. Geographical Research, 2019, 38(6): 1464-1480.)
- [4] 杨文越,曹小曙.多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展[J].地理科学进展,2019,38(11):1814-1828.(YANG Wen-yue, CAO Xiaoshu. Progress of research

表2 城市交通能耗影响机理分析模型

Tab.2 Analytical models of influence mechanism of urban traffic energy consumption

方法	原理
STIRPA模型 ^[41]	可拓展的随机性的环境影响评估模型
结构方程模型(SEM) ^[18]	基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的一种统计方法,可以用来检查一个系统的因果关系,包括直接和间接的影响
ASIF ^[19]	人类活动对区域碳排放影响的估算方法
多元回归分析模型 ^[39]	建立多个变量之间线性或非线性数学模型数量关系式并利用样本数据进行分析的统计分析方法
Logit模型 ^[45]	最早的离散选择对数性模型,因变量是定量变量而不能是定性变量

- on influencing factors of CO₂ emissions from multi-scale transport[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(11): 1814-1828.)
- [5] 张杰, 解扬. 基于能耗视角的我国城市最优规模研究[J]. *城市规划学刊*, 2015(6): 70-74. (ZHANG Jie, XIE Yang. Optimal city size in China: an extended empirical study from the energy perspective[J]. *Urban Planning Forum*, 2015(6): 70-74.)
- [6] TSAI Y H. Quantifying urban form: compactness versus 'sprawl' [J]. *Urban Studies*, 2010, 42(1): 141-161.
- [7] CREUTZIG F. How fuel prices determine public transport infrastructure, modal shares and urban form[J]. *Urban Climate*, 2014(10): 63-76.
- [8] 杨文越, 曹小曙. 居住自选择视角下的广州出行碳排放影响机理[J]. *地理学报*, 2018, 73(2): 346-361. (YANG Wenyue, CAO Xiaoshu. The influence mechanism of travel-related CO₂ emissions from the perspective of residential self-selection: a case study of Guangzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 346-361.)
- [9] 金广君, 邱红. 交通方式变更对城市空间尺度的影响[J]. *城市建筑*, 2005(12): 47-51. (JIN Guangjun, QIU Hong. Influence of changes in means of transport on urban spacial scale[J]. *Urbanism and Architecture*, 2005(12): 47-51.)
- [10] NEWMAN P W G, KENWORTHY J R. Gasoline consumption and cities: a comparison of U. S. Cities with a global survey[J]. *Journal of the American Planning Association*, 1989(1): 24-37.
- [11] COEVERING P V D, SCHWANEN T. Re-evaluating the impact of urban form on travel patterns in Europe and North-America[J]. *Transport Policy*, 2006, 13(3): 229-239.
- [12] KARATHODOROU N, GRAHAM D J, NOLAND R B. Estimating the effect of urban density on fuel demand[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 86-92.
- [13] 姚胜永, 潘海啸. 基于交通能耗的城市空间和交通模式宏观分析及对我国城市发展的启示[J]. *城市规划学刊*, 2009(3): 46-52. (YAO Shengyong, PAN Haixiao. A macroscopic analysis of transportation energy consumption and implication to China urban planning and development[J]. *Urban Planning Forum*, 2009(3): 46-52.)
- [14] 郭洪旭, 黄莹, 赵黛青, 等. 中国典型城市空间形态对居民出行能耗的影响[J]. *城市发展研究*, 2016(3): 95-100. (GUO Hongxu, HUANG Ying, ZHAO Daiqing, et al. Impact of urban form on private travel energy use of typical city in China[J]. *Urban Development Studies*, 2016(3): 95-100.)
- [15] SILVA A N R D, COSTA G C F, BRONDINO N C M D. Urban sprawl and energy use for transportation in the largest Brazilian cities[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2007, 11(3): 44-50.
- [16] 孙斌栋, 潘鑫, 吴雅菲. 城市交通出行影响因素的计量检验[J]. *城市问题*, 2008(7): 11-15. (SUN Bindong, PAN Xin, WU Yafei. Quantitative analysis to the determinants of urban transportation[J]. *Urban Problems*, 2008(7): 11-15.)
- [17] 孙斌栋, 潘鑫. 城市空间结构对交通出行影响研究的进展: 单中心与多中心的论争[J]. *城市问题*, 2008(1): 19-22. (SUN Bindong, PAN Xin. Progress in the study of the impact of urban spatial structure on transportation: a debate on single center and multicenter[J]. *Urban Problems*, 2008(1): 19-22.)
- [18] LEE S, LEE B. The influence of urban form on GHG emissions in the U. S. household sector[J]. *Energy Policy*, 2014, 68(14): 534-549.
- [19] LI P, ZHAO P, BRAND C. Future energy use and CO₂ emissions of urban passenger transport in China: a travel behavior and urban form based approach[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 820-842.
- [20] CHOW A S Y. Spatial-modal scenarios of greenhouse gas emissions from commuting in Hong Kong[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 54: 205-213.
- [21] RODRIGUE J P, COMTOIS C, SLACK B. *The geography of transport systems: 2nd ed[M]*. New York: Routledge, 2009.
- [22] 龙瀛, 毛其智, 杨东峰, 等. 城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型[J]. *地理学报*, 2011(66): 1033-1044. (LONG Ying, MAO Qizhi, YANG Dongfeng, et al. A multi-agent model for urban form, transportation energy consumption and environmental impact integrated simulation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011(66): 1033-1044.)
- [23] 陈珍启, 林雄斌, 李莉, 等. 城市空间形态影响碳排放吗? 基于全国110个地级市数据的分析[J]. *生态经济*, 2016(32): 22-26. (CHEN Zhenqi, LIN Xiongbin, LI Li, et al. Does urban spatial morphology affect carbon emission? a study based on 110 prefectural cities[J]. *Ecological Economy*, 2016(32): 22-26.)
- [24] CHEN Y, LI X, ZHENG Y, et al. Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: a case study in the Pearl River Delta, 2005-2008 [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 102(1): 33-42.
- [25] SCHWANEN T, DIELEMAN F M, DIJST M. Travel behaviour in Dutch mono-centric and policentric urban systems[J]. *Journal of Transport Geography*, 2001(9): 173-186.
- [26] 黄经南, 杜宁睿, 刘沛, 等. 住家周边土地混合度与家庭日常交通出行碳排放影响研究: 以武汉市为例[J]. *国际城市规划*, 2013(2): 25-30. (HUANG Jingnan, DU Ningrui, LIU Pei, et al. An exploration of land use mix around residence and family commuting caused carbon emission: a case study of Wuhan city in China[J]. *Urban Planning International*, 2013(2): 25-30.)
- [27] 肖作鹏, 柴彦威, 刘志林. 北京市居民家庭日常出行碳排放的量化分布与影响因素[J]. *城市发展研究*, 2011(9): 104-112. (XIAO Zuopeng, CHAI Yanwei, LIU Zhilin. Quantitative distribution and related factors for household daily travel CO₂ emissions in Beijing[J]. *Urban Development Studies*, 2011(9): 104-112.)
- [28] 郑思齐, 徐杨菲, 张晓楠. “职位平衡指数”的构建与空间差异性研究: 以北京市为例[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015(4): 475-483. (ZHENG Siqi, XU Yangfei, ZHANG Xiaonan. Jobs-housing balance index and its spatial variation: a case study in Beijing[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2015(4): 475-483.)
- [29] 刁晶晶, 王倩, 程苑, 等. 职位平衡对居民出行能耗的影响研究回顾[J]. *交通工程*, 2019(5): 25-30. (DIAO Jingjing, WANG Qian, CHENG Yuan, et al. Impact of jobs-housing balance on transport energy consumption: a research review[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2019(5): 25-30.)
- [30] CERVERO R. Mixed land-uses and commuting: evidence from the American housing survey[J]. *Transportation Research A*, 1996(5): 361-377.
- [31] 龚咏喜, 李贵才, 林姚宇, 等. 土地利用对城市居民出行碳排放的影响研究[J]. *城市发展研究*, 2013, 20(9): 112-118. (GONG Yongxi, LI Guicai, LIN Yaoyu, et al. Impact of land use on urban household travel carbon emissions[J]. *Urban Development Studies*, 2013, 20(9): 112-118.)
- [32] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design[J]. *Transportation Research Part D*, 1997, 2(3): 199-219.
- [33] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a meta-analysis[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.

- [34] 张杰, 杨阳, 陈骁, 等. 济南市住区建成环境对家庭出行能耗影响研究[J]. 城市发展研究, 2013, 20(7): 83-89. (ZHANG Jie, YANG Yang, CHEN Xiao, et al. A research on neighborhood built environment and household travel energy in Jinan [J]. Urban Development Studies, 2013, 20(7): 83-89.)
- [35] 姜洋, 何东全, ZEGRAS C. 城市街区形态对居民出行能耗的影响研究[J]. 城市交通, 2011, 9(4): 21-29. (JIANG Yang, HE Dongquan, ZEGRAS C. Impact of neighborhood land use on residents travel energy consumption[J]. Urban Transport of China, 2011, 9(4): 21-29.)
- [36] CHAO L, SHEN Q. An empirical analysis of the influence of urban form on household travel and energy consumption [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2011, 35(5): 347-357.
- [37] 张杰, 解扬. 住区周边设施可达性对居民人均交通能耗的影响: 以我国286个地级以上城市为例的实证研究[J]. 动感(生态城市与绿色建筑), 2016(2): 98-104. (ZHANG Jie, XIE Yang. The impact of amenity accessibility around neighborhood on household per capita transportation energy consumption: an empirical study based on 286 cities at the prefectural level and above in China[J]. Eco-city and Green Building, 2016(2): 98-104.)
- [38] 童抗抗, 马克明. 居住-就业距离对交通碳排放的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 2975-2984. (TONG Kangkang, MA Keming. Significant impact of job-housing distance on carbon emissions from transport: a scenario analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 2975-2984.)
- [39] 杨阳. 济南市住区建成环境与家庭出行能耗关系的量化研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. (YANG Yang. A research on neighborhood built environment and household travel energy consumption in Jinan [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.)
- [40] 杨文越, 李涛, 曹小曙. 广州市社区出行低碳指数格局及其影响因素的空间异质性[J]. 地理研究, 2015, 34(8): 1471-1480. (YANG Wenyue, LI Tao, CAO Xiaoshu. The spatial pattern of community travel low carbon index(CTLCI)and spatial heterogeneity of the relationship between CTLCI and influencing factors in Guangzhou[J]. Geographical Research, 2015, 34(8): 1471-1480.)
- [41] 荣培君, 张艳平, 孙莹莹, 等. 微观视角下居民碳排放影响机理研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 379-390. (RONG Peijun, ZHANG Yanping, SUN Yingying, et al. Research progress on the influence mechanism of residential carbon emissions from microscopic perspective[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2018, 48(4): 379-390.)
- [42] 张娅薇, 李军. 低碳出行导向的城市街道空间模式[J]. 现代城市研究, 2016(4): 60-67. (ZHANG Yawei, LI Jun. Spatial pattern of urban streets based on low-carbon travel[J]. Modern Urban Research, 2016(4): 60-67.)
- [43] BARLA P, MIRANDA-MORENO L F, LEE-GOSSELIN M. Urban travel CO₂ emissions and land use: a case study for Quebec city[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011, 16(6): 423-428.
- [44] KAZA N. Urban form and transportation energy consumption[J]. Energy Policy, 2020, 136: 111049.
- [45] CERVERO R, LARMIENTO O, JACOBY E, et al. Influences of built environments on walking and cycling: lessons from Bogota[J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2009, 3(4): 203-226.

修回: 2022-07