

多尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响 ——来自广州的实证研究

杨文越¹, 梁斐雯², 曹小曙^{3,4}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 广西科技大学经济与管理学院, 柳州 545006;
3. 陕西师范大学交通地理与空间规划研究所, 西安 710119; 4. 中山大学城市与区域规划系, 广州 510275)

摘要: 通勤出行碳排放是城市交通碳排放的主要来源。然而, 现有研究很少关注不同地理尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响差异, 且尚未得出一致的结论。本文基于居民出行调查数据和多层次混合效应模型对广州多尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响进行了实证研究。研究发现: 在控制居住自选择效应之后, 居民通勤出行碳排放具有明显的空间差异, 这些差异是由社区间的建成环境差异所导致的。在不同尺度建成环境中, 社区尺度的建成环境对居民通勤出行碳排放的影响最显著。而且, 居住地建成环境对通勤出行碳排放的影响比工作地建成环境的影响显著。对建成环境进行规划干预更多着眼于居民所居住的社区以及与居民日常出行活动联系紧密的社区 15 分钟步行生活圈。虽然实证案例社区的选取可能存在局限性, 但研究结论可为构建低碳城市空间结构、引导居民出行行为转变和制定具有针对性的低碳交通与土地利用政策提供一定的科学理论依据。

关键词: 建成环境; 通勤; 碳排放; 尺度; 多层次混合效应模型

DOI: 10.11821/dljy020190566

1 引言

在全球气候变暖、快速城市化和机动化发展背景下, 交通出行碳排放成为城市低碳、可持续发展的重要议题^[1]。中国在 2007 年已超越美国成为世界第一大碳排放国家, 且交通部门碳排放总量位居全球第二^[2,3]。随着社会经济发展和小汽车的普及, 中国交通碳排放将在未来呈不断增长的态势^[4,5], 使实现《巴黎条约》的碳减排目标面临严峻挑战^[6]。通勤出行是城市交通碳排放的主要来源, 因为通勤是最主要的出行方式^[7,8]。目前, 中国不少城市进入了郊区化和蔓延式发展的阶段。很多新城和郊区建设具有显著的大街区和宽马路特征, 摒弃了以步行和公交为导向的传统社区发展模式^[9]。低密度、单一化和分散发展的土地利用模式促使居民通勤距离和小汽车使用大幅增加, 排放大量的 CO₂^[10]。

虽然已有大量文献探究建成环境与出行行为之间的关系, 但这些研究较少关注于居民出行的环境成本, 例如出行碳排放, 且并未得出一致的研究结论^[7,8,11-16]。国外关于建成环境与出行碳排放的研究大多认为人口密度、土地利用混合度、公共交通可达性和道路

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701169, 41671160); 广东省哲学社会科学规划项目 (GD17YSH01); 广州市哲学社科规划 2019 年度课题 (2019GZGJ49)

作者简介: 杨文越 (1988-), 男, 广东韶关人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为城市交通地理与土地利用。
E-mail: yangwenyue900780@163.com

通讯作者: 曹小曙 (1970-), 男, 甘肃灵台人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地理与规划。
E-mail: caoxsh@snnu.edu.cn

交叉口密度与机动车使用、交通能源消耗及碳排放呈负相关关系^[17-21]。Modarres在美国洛杉矶的研究显示,高密度地区的居民通勤能源消耗较少^[22]。Barla等在加拿大魁北克的研究显示,人口密度较低的城市郊区和城市外围地区的居民出行碳排放普遍比中心城区的高27%和70%^[23]。但Brand等在英国^[24]的研究显示,居住人口密度与出行碳排放之间的关系并不显著^[24]。还有研究认为,工作地密度比居住地密度的影响更大^{[25]589}。也有学者认为,建成环境与居民出行碳排放之间的关系很可能是非线性的^[26]。在国内,学者们在不同城市的实证研究结论也存在一定差异^[7,16,27-32]。有研究认为居住人口密度对通勤出行碳排放没有显著的直接影响^{[8]487},也有研究显示高密度的社区居民出行能耗远高于其他社区^[33]。对于公共交通可达性(尤其是普通公交),文献间的研究结论也有较大差异^[34-36]。有学者认为,不同建成环境要素对不同类型出行碳排放的影响作用并不一致^[7,16]。以上研究大多仅关注于单一尺度建成环境对居民出行碳排放的影响,很少探究不同尺度建成环境的影响差异;且主要以居住地建成环境为研究对象,较少考虑到其他地理背景,例如工作地建成环境。建成环境在不同地域空间上对出行碳排放的影响很可能是不一致的,具有空间异质性^[37]。

尺度是地理学的核心概念之一,选取不同研究尺度往往会导致研究结果产生差异^[38-40]。因此,不同尺度建成环境要素对居民通勤出行碳排放的影响作用很可能并不一致,很有必要同时考虑和测度不同尺度和地理背景建成环境对居民通勤出行碳排放的影响作用。鉴于此,本文试图提出并回答以下研究问题:第一,究竟哪个尺度的建成环境对居民通勤出行碳排放的影响更大,哪些建成环境要素的影响更显著?第二,居住地建成环境对居民通勤碳排放的影响大还是工作地建成环境的影响更大?本文将以广州为例进行实证研究,基于居民出行问卷调查数据和出行O-D点智能查询系统(Travel O-D point Intelligent Query System, TIQS)^①的应用,通过构建多层次混合效应模型探究不同尺度建成环境要素对居民通勤出行碳排放的影响。

2 研究方法

2.1 研究范围

广州是华南地区最大的城市,具有明显的高密度城市特征。2018年末常住人口有1490.44万,城镇化率86.38%,市域人口密度高达2005人/km²。本文首先基于大数据和GIS技术对研究区域全域、多尺度建成环境进行定量测度,并以此为依据选取15个社区进行问卷调查(图1)。这些社区分别位于荔湾区、越秀区、海珠区、天河区、白云区、黄埔区和番禺区7个行政区,建成环境特征在不同尺度上(社区、街道和社区边界1 km缓冲范围)均具有一定的差异(表1,见第1628页),以确保社区选取具有代表性和模型估计在统计上的显著性。

2.2 研究数据

本文考虑和测度的建成环境包括六个要素。其中,到城市中心的距离(DC)为社区(街道、缓冲范围)中心到广州新城市中心珠江新城的欧氏距离;居住人口密度(RD)为社区(街道、缓冲范围)内的常住人口除以土地面积;土地利用混合度(LUM)通过13种类型兴趣点(POIs),借鉴Frank等^[41]和Moniruzzaman等^[42]的方法计算而得;公交站密度(BSD)和地铁站密度(MSD)通过在ArcGIS上对公交站点和地铁站点分别进行核

^① TIQS是本研究团队基于百度地图LBS(Location Based Service)开放平台开发的能够自动进行大量出行OD点查询的智能系统。

密度 (kernel density) 估计计算而得; 路网密度 (RND) 则通过对路网进行线密度 (line density) 估计计算而得。社区、街道和社区边界 1 km 缓冲范围三个尺度的建成环境均采用以上方法分别进行测度。工作地建成环境为居民通勤目的地所对应的社区建成环境。

本文所用的居民出行问卷调查数据开展于 2015 年。首先于 2015 年 3 月分别对 4 个社区进行问卷预调查工作, 回收问卷 150 份。经调查反馈和问卷修改后于 2015 年 5—7 月正式展开全面的问卷调查工作。调查对象为 16 岁以上、在社区居住超过半年的居民; 采用面对面、随机拦截的方式进行。正式问卷调查阶段一共回收了 1345 份问卷, 其中有效问卷 1239 份, 有效回收率 92.12%。收集的数据包括居民出行态度与偏好、社会经济属性和通勤出行信息等。

本文将居民单程通勤 (从居住地到工作地) 所排放的 CO_2 设定为模型的因变量, 居民出行态度与偏好和社会经济属性设定为控制变量, 建成环境变量设定为解释变量, 以探究多尺度建成环境对居民通勤出行碳排放的影响。其中, 居民出行态度与偏好考虑了以下 7 方面: 低碳绿色出行是重要的 (AP1)、小汽车出行是身份地位的象征 (AP2)、喜欢运动和锻炼身体 (AP3)、喜欢步行或自行车出行 (AP4)、喜欢公共交通出行 (AP5)、喜欢小汽车出行 (AP6) 和喜欢就近上班 (AP7), 分别通过打分法用“1~5 分”来表示“非常不同意”到“非常同意”。居民社会经济属性变量包括: 性别 (GENDER)、年龄 (AGE)、家庭规模 (HS)、是否拥有 16 岁以下的小孩 (CHILD)、学历 (EDU)、户籍 (HR)、家庭人均月收入 (INCOME)、小汽车拥有 (CAR) 和自行车拥有 (BIKE) 等。问卷样本的社会经济属性分布如表 2 (见第 1269 页)。

2.3 通勤出行碳排放的计算

本文基于居民通勤出行 OD 点和 TIQS 的应用计算通勤出行碳排放。其计算公式如下:

$$TC_i = MTD_i \times EF_m \quad (1)$$

$$MTD_i = TD_i - NTD_i \quad (2)$$

式中: TC_i 为样本 i 通勤出行 (单程) 所排放的 CO_2 ; MTD_i 是这段通勤使用机动化出行方式的出行距离; EF_m 为使用该机动化出行方式的碳排放因子 (表 3, 见第 1629 页); TD_i 是这段通勤的全程出行距离; NTD_i 是这段通勤中采用非机动化方式出行的距离。

在一段实际通勤出行中, 除全程通过步行或自行车出行以外, 往往是机动化出行与非机动化出行相结合的 (图 2, 见第 1630 页)。例如, 居民搭乘公共交通上班在绝大多数的情况下需要先从居住地步行或骑自行车到公共交通站点, 然后再搭乘公共交通, 下车后需要继续步行或骑自行车到达工作地。同时, 搭乘公共交通过程中还可能涉及到换

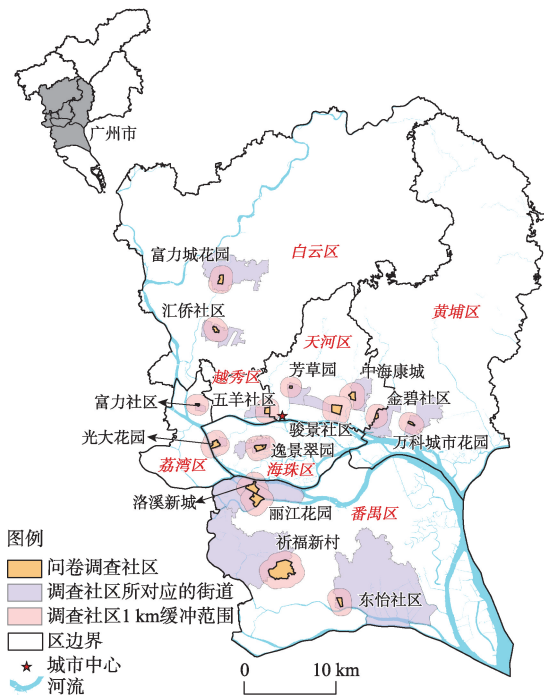


图 1 问卷调查社区的空间分布与不同研究尺度范围

Fig. 1 Spatial distribution and different research scales for the neighborhoods surveyed

表1 问卷调查社区的样本分布和建成环境

Tab. 1 Sample distribution and built environments for the neighborhoods surveyed

社区	所属 行政区	常住人口 (人)	样本数 (个)	研究 尺度	到城市中心的 距离(km)	居住人口密 度(人/km ²)	土地利用 混合度	公交站密度 (个/km ²)	地铁站密度 (个/km ²)	路网密度 (km/km ²)
富力社区	荔湾区	8831	63	尺度一	8.93	114489	0.54	8.91	0.68	8.93
				尺度二	8.62	76456	0.52	9.50	0.73	9.35
				尺度三	8.94	51399	0.54	8.68	0.64	8.79
五羊社区	越秀区	14110	88	尺度一	1.31	39885	0.57	6.28	1.05	7.63
				尺度二	2.37	26730	0.44	6.51	0.61	8.22
				尺度三	1.31	17929	0.51	6.31	0.91	7.75
逸景翠园	海珠区	13979	75	尺度一	4.54	24695	0.48	6.89	0.23	6.99
				尺度二	4.90	35726	0.37	7.68	0.36	7.31
				尺度三	4.52	29414	0.35	7.06	0.28	6.89
光大花园	海珠区	17466	102	尺度一	7.89	32147	0.18	6.09	0.36	7.97
				尺度二	7.46	45427	0.27	6.71	0.47	8.19
				尺度三	7.92	30684	0.25	6.33	0.37	8.08
芳草园	天河区	4230	39	尺度一	2.86	63200	0.35	7.72	0.67	7.28
				尺度二	2.66	44470	0.58	7.10	0.57	7.53
				尺度三	2.86	30830	0.57	7.31	0.67	7.32
骏景社区	天河区	12320	109	尺度一	6.24	13827	0.36	4.85	0.36	6.43
				尺度二	4.64	13634	0.44	5.97	0.24	6.78
				尺度三	6.26	23922	0.39	4.72	0.32	6.18
中海康城	天河区	8016	69	尺度一	8.16	17580	0.27	4.56	0.21	5.86
				尺度二	9.10	4628	0.34	4.23	0.13	4.89
				尺度三	8.17	10099	0.34	4.60	0.19	5.62
汇侨社区	白云区	15044	121	尺度一	11.22	56825	0.47	8.07	0.02	8.68
				尺度二	10.53	20983	0.37	7.46	0.14	8.22
				尺度三	11.21	24475	0.39	7.73	0.06	8.73
富力城花园	白云区	4372	41	尺度一	15.62	10343	0.27	5.70	0.00	4.78
				尺度二	16.10	6449	0.23	4.22	0.01	3.31
				尺度三	15.63	7504	0.23	5.24	0.00	4.37
金碧社区	黄埔区	10685	89	尺度一	10.62	63149	0.40	4.75	0.10	5.38
				尺度二	11.48	7560	0.12	4.00	0.15	4.12
				尺度三	10.62	9215	0.27	4.79	0.12	4.88
万科城市 花园	黄埔区	4747	34	尺度一	14.44	29717	0.25	4.45	0.29	4.48
				尺度二	15.70	4630	0.20	2.11	0.10	3.55
				尺度三	14.45	7196	0.40	4.16	0.23	4.18
洛溪新城	番禺区	12599	109	尺度一	8.90	13938	0.25	5.15	0.25	4.81
				尺度二	9.44	3469	0.22	3.00	0.11	3.63
				尺度三	8.84	4141	0.28	4.63	0.22	4.99
丽江花园	番禺区	11056	95	尺度一	9.98	9989	0.41	5.32	0.21	4.42
				尺度二	9.44	3469	0.22	3.00	0.11	3.63
				尺度三	9.99	6375	0.34	4.62	0.18	4.34
祈福新村	番禺区	27136	159	尺度一	17.38	6980	0.25	1.38	0.00	2.83
				尺度二	15.72	2060	0.25	1.48	0.01	1.95
				尺度三	17.40	5278	0.32	1.83	0.01	2.82
东怡社区	番禺区	7874	46	尺度一	21.83	20503	0.57	3.52	0.12	4.31
				尺度二	22.02	1790	0.23	2.23	0.03	2.37
				尺度三	21.84	10348	0.44	3.96	0.09	4.26
合计		172465	1239							

注：尺度一为社区范围，尺度二为社区所在的街道范围，尺度三为以社区边界向外缓冲1 km范围。

表2 问卷样本的社会经济属性分布

Tab. 2 Distribution of social and economic attributes for the sample population

指标 (变量, 单位)	指标水平说明	样本数 (个)	比例 (%)
性别 (<i>GENDER</i> , -)	0: 男	694	56.01
	1: 女	545	43.99
年龄 (<i>AGE</i> , 岁)	1: 16~24	137	11.06
	2: 25~34	605	48.83
	3: 35~44	426	34.38
	4: ≥ 45	71	5.73
家庭规模 (<i>HS</i> , 人)	1: 1	39	3.15
	2: 2	140	11.30
	3: 3	429	34.62
	4: 4	355	28.65
	5: ≥ 5	276	22.28
拥有16岁以下的小孩 (<i>CHILD</i> , -)	0: 没有	414	33.41
	1: 有	825	66.59
学历 (<i>EDU</i> , -)	1: 高中 (含中专、职高) 及以下	151	12.19
	2: 大专	357	28.81
	3: 本科	551	44.47
	4: 研究生及以上	180	14.53
户籍 (<i>HR</i> , -)	0: 外地	584	47.13
	1: 本地 (广州)	655	52.87
家庭人均月收入 (<i>INCOME</i> , 元)	1: ≤ 3999	129	10.41
	2: 4000~5999	221	17.84
	3: 6000~7999	208	16.79
	4: 8000~9999	202	16.30
	5: 10000~15000	208	16.79
	6: > 15000	271	21.87
小汽车拥有 (<i>CAR</i> , -)	0: 没有	488	39.39
	1: 有	751	60.61
自行车拥有 (<i>BIKE</i> , -)	0: 没有	429	34.62
	1: 有	810	65.38

表3 机动化出行方式的能源消耗及其碳排放因子

Tab. 3 Specific energy consumption and CO₂ emission factor for motorized travel modes

机动化 出行方式	最终能源消耗 (L/100 km, kWh/km)	容量 (人)	一次能源消耗 (MJ/Pkm)	碳排放因子 EF (g/Pkm)
小汽车 (出租车)	11.0	1.3	0.84	233.1
公交车	35.0	40.0	0.35	26.0
班车 (楼巴)	30.0	44.0	0.27	20.3
地铁	5.0	216.0	0.26	20.9

注: 根据文献[43]关于中国交通碳排放的研究整理所得, 此处碳排放指的是直接碳排放。

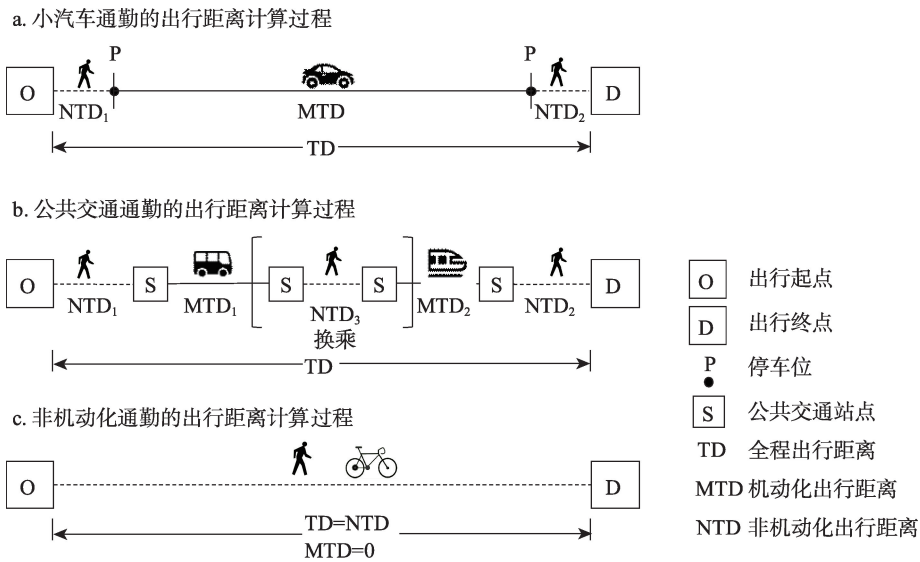


图2 不同方式通勤出行距离的计算过程

Fig. 2 The calculating process of commuting distance in different travel modes

乘。例如在某个站点下车，步行一定距离到另外一个站点换乘其他线路的公共交通，又或者是常规公交与地铁之间相互换乘。其间都会产生一定距离的非机动化出行，而这些非机动化出行并不排放CO₂。在计算出行碳排放时应剔除这些非机动化出行距离，也即公式(2)中的NTD_i。

上述TD_i和NTD_i可通过在TIQS中输入每个样本通勤出行OD点的经纬度坐标和出行方式计算而得。TIQS将根据每对出行OD点和所选择的出行方式，通过调用百度地图后台实时交通路况数据计算查询该通勤出行最佳推荐路线(出行时间最小)方案的全程出行距离(TD_i)和非机动化出行距离(NTD_i)，从而计算出实际排放CO₂的机动化出行距离MTD_i，以将非机动化出行从中剥离出来，尽可能更精确地估算出行碳排放。

2.4 多层次混合效应模型(Multilevel and mixed-effects modeling)

本文将通过构建多层次混合效应模型以探究不同尺度建成环境对居民通勤碳排放的影响。多层次混合效应模型包括两种效应：固定效应(fixed effects)和随机效应(random effects)。前者通过相同的、“固定的”截距和斜率来描述样本整体，与普通回归原理一样；而后者则分别通过不同的、“随机的”截距和斜率来对样本不同层次的亚组(subgroups)进行回归。由于样本个体(居民)是嵌套(nested)在多个尺度建成环境中的，如社区、街道等，因此，针对这种类型的数据可使用多层次混合效应模型对其整个样本的固定效应和不同尺度亚组的随机效应进行有效估计^[44]。

当多层次混合效应模型只包含固定效应时，其模型公式如下：

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_n x_{ni} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中：*i*表示样本个体；β₀是样本整体的截距项；β₁是解释变量x₁的系数；ε为随机误差项。

当模型同时包含固定效应和随机效应时，其公式如下：

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{1ij} + \beta_2 x_{2ij} + \dots + \beta_n x_{nij} + u_{0j} + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

式中：*j*表示的是样本个体所嵌套的地理空间单元，如所在的社区；u_{0j}是该地理空间单

元的随机截距项, 也即随机效应, 以此测度各地理空间单元 (如社区) 之间除已有解释变量描述以外的通勤碳排放差异。该随机效应可通过最佳线性无偏预测方法 (best linear unbiased predictions, BLUPS) 进行估计。

多层次混合效应模型同时还可以测度解释变量在不同地理空间单元中的影响差异, 也即除了可以包含随机的截距项以外, 还允许包含随机的解释变量斜率。其模型公式如下:

$$y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 x_{1ij} + \beta_2 x_{2ij} + \dots + \beta_n x_{nij} + u_{0j} + u_{nj} x_{nij} + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

式中: u_{nj} 为解释变量 x_{nij} 的随机斜率; 对应于不同的地理空间单元 j , 解释变量 x_n 的系数不一样。也即, 若解释变量 x_n 存在显著的随机效应, 则其在不同地理空间单元中对因变量 y 具有不一样的影响, 影响大小和作用方向均可能不一致。解释变量是否存在显著的随机效应, 可通过似然率 (likelihood-ratio) 检验包含解释变量随机斜率的模型是否优于仅包含随机截距项的模型。

为测度不同尺度、不同地理背景建成环境对居民通勤出行碳排放的影响, 首先将针对居住地建成环境构建4个模型。其中, 模型1仅考虑样本个体尺度的出行态度与偏好和社会经济属性变量, 模型2~模型4分别加入社区尺度、街道尺度和社区边界1 km缓冲范围尺度的居住地建成环境变量, 以探究究竟哪个尺度的居住地建成环境对通勤碳排放的影响更大、更显著。此外, 为探究工作地建成环境是否会影响居民通勤出行碳排放, 分别构建模型5~模型7对其进行检验。其中, 模型5在模型1的基础上加入了工作地建成环境变量, 以检验在不考虑居住地建成环境的条件下, 工作地建成环境是否对通勤碳排放具有显著的影响。模型6在模型5的基础上进一步加入社区尺度居住建成环境变量, 以探究究竟工作地建成环境对通勤碳排放的影响显著还是居住地建成环境对通勤碳排放的影响显著。模型7采用逐步回归的方法, 在模型6的基础上逐步剔除不显著的变量, 以确保模型构建最有效和具有稳健性。

本文多层次混合效应模型的构建与估计是通过Stata 12.0软件的“xtmixed”命令执行, 估计方法使用最大似然法 (maximum likelihood, ML)。

3 研究结果

3.1 个体尺度的通勤碳排放影响因素

模型1~模型4的估计结果如表4。从估计结果可见, 居民个体尺度的出行态度与偏好和社会经济属性对通勤碳排放的影响在四个模型中都是一致的, 也即模型的构建具有稳健性。总体上, 居民出行态度“是否认同低碳绿地出行是重要的”和“是否认同小汽车出行是身份地位的象征”对通勤碳排放并无显著的影响, 出行偏好“喜欢运动和锻炼身体”和“喜欢步行或自行车出行”对通勤碳排放亦无显著的影响, 而“喜欢公共交通出行”和“喜欢就近上班”则对通勤碳排放具有负向影响作用 (显著性水平10%), “喜欢小汽车出行”具有显著的正向影响作用 (显著性水平1%)。社会经济属性方面, 性别、年龄、户籍、家庭收入水平和是否拥有小汽车对通勤碳排放具有显著的影响, 显著性水平分别为1%、1%、10%、5%和1%。其中, 男性、年龄较大、拥有广州户籍、家庭人均月收入较高和拥有小汽车的居民将在通勤中排放更多的CO₂。而家庭规模、是否拥有16岁以下的小孩、学历和是否拥有自行车则对通勤碳排放没有显著影响。以上个体尺度影响因素的估计结果与已有研究结论基本一致^[8,16]。因此, 本文不再进一步对其进行详细分析。在模型2~模型7中, 这些变量亦仅作为控制变量纳入到模型构建当中。

表 4 多尺度居住地建成环境对居民通勤出行碳排放影响的模型估计结果

Tab. 4 Model estimation results of the effects of multi-scale residential built environment on residents' CO₂ emissions from commuting

	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
个体尺度变量				
<i>AP1</i>	27.0162	14.3191	26.5988	19.8548
<i>AP2</i>	28.7874	26.5083	15.3102	24.5177
<i>AP3</i>	30.1147	20.9674	24.8029	30.0696
<i>AP4</i>	-40.7247	-25.0515	-45.0258	-44.7375
<i>AP5</i>	-129.1811*	-132.6503*	-113.6033*	-126.0231*
<i>AP6</i>	361.9357***	368.1032***	360.8664***	366.1136***
<i>AP7</i>	-131.6832*	-136.8782*	-136.8357*	-142.9529*
<i>GENDER</i>	-311.4853***	-283.6218***	-299.8431***	-313.0708***
<i>AGE</i>	187.5015***	184.1566***	191.0341***	190.1026***
<i>HS</i>	1.5238	1.4895	7.0559	6.8284
<i>CHILD</i>	84.2960	87.2285	77.1349	83.3836
<i>EDU</i>	-5.2603	-13.0242	-10.4170	-10.9997
<i>HR</i>	199.2319*	188.5969*	201.9674*	185.4167*
<i>INCOME</i>	82.2795**	82.0098**	83.8621**	80.1377**
<i>CAR</i>	734.7905***	745.1148***	716.3562***	726.8929***
<i>BIKE</i>	-61.8951	-62.3969	-51.8799	-44.6196
社区尺度变量				
<i>DC₁</i>		0.0510**		
<i>RD₁</i>		-0.0055*		
<i>LUM₁</i>		-893.8533		
<i>BSD₁</i>		302.4923***		
<i>MSD₁</i>		308.0092		
<i>RND₁</i>		-248.7261***		
街道尺度变量				
<i>DC₂</i>			-0.0004	
<i>RD₂</i>			0.0049	
<i>LUM₂</i>			-386.7136	
<i>BSD₂</i>			117.3472	
<i>MSD₂</i>			-593.7092	
<i>RND₂</i>			-180.9338	
1 km 缓冲范围尺度变量				
<i>DC₃</i>				0.0407*
<i>RD₃</i>				-0.0142*
<i>LUM₃</i>				-1459.1270
<i>BSD₃</i>				266.3485***
<i>MSD₃</i>				511.8110
<i>RND₃</i>				-196.9419**
整体截距项	-1283.1370**	-1459.7630**	-656.8980	-1198.1770
随机截距项标准差	296.0624	1.0043e-04	152.8091	55.7814
Log likelihood	-6783.6177	-6770.1713	-6778.1210	-6774.5890

注：***、**和*分别表示显著性水平为1%、5%和10%。

各社区居民通勤出行碳排放的特征分布如图3。虽然从图3中可以看出社区之间居民通勤碳排放存在一定差异,例如位于城市郊区的富力城花园社区的最大值和中位数远高于其他社区,且其箱体较长(社区内部差异较大),但与城市中心距离更远的祈福新村社区和东怡社区的箱体分布特征却与富力城花园社区的有很大差异,难以从中发现和归纳具有更大价值的空间特征规律。为此,针对模型1估计了各社区其自身对居民通勤出行碳排放影响的随机效应,如图4。其统计学上的意义是,当考虑和控制了社区居民的出行态度与偏好和社会经济属性后,各社区之间居民通勤出行碳排放具有怎么样的特征差异。更进一步地,导致如图3这样的各社区居民通勤碳排放特征差异很可能是因为居民自身的因素或属性(出行态度与偏好和社会经济属性),例如因为喜欢小汽车通勤且家庭拥有小汽车的居民集中居住在富力城花园社区,所以导致该社区居民通勤碳排放普遍高于其他社区,而非因为建成环境因素的影响。这也就是所谓的“居住自选择”效应^[8,16,45]。

由图4可见,中心城区社区和城市郊区社区对居民通勤碳排放影响的随机效应具有显著差异。也即,若居民出行态度与偏好和社会经济属性一致,位于中心城区社区的居民通勤碳排放将普遍比位于城市郊区社区的小。在已有研究中,大多仅通过描述性统计分析来比较城市不同区域的居民通勤碳排放特征差异,而并未考虑居住自选择效应。也即居民通勤碳排放的空间差异很可能是由具有相同或类似社会经济属性和出行态度与偏好的居民在城市不同空间上的居住集聚导致的,而非建成环境、空间因素或社区自身的差异。本文通过构建多层次混合效应模型控制居民出行态度与偏好和社会经济属性,验证了居民通勤碳排放除了受居住自选择效应影响外,还会受到社区自身建成环境的影响。因此,很有必要进一步探究不同尺度建成环境对居民通勤碳排放的影响。

3.2 不同尺度的居住地建成环境对通勤碳排放的影响

模型2在模型1的基础上加入了社区尺度的六个居住地建成环境变量,模型的随机截距项标准差由296.0624减少到接近为0,也即社区的随机效应由显著变成了不显著。这意味着,模型2中新加入的建成环境变量很好地解释了社区间的通勤碳排放差异(图4所

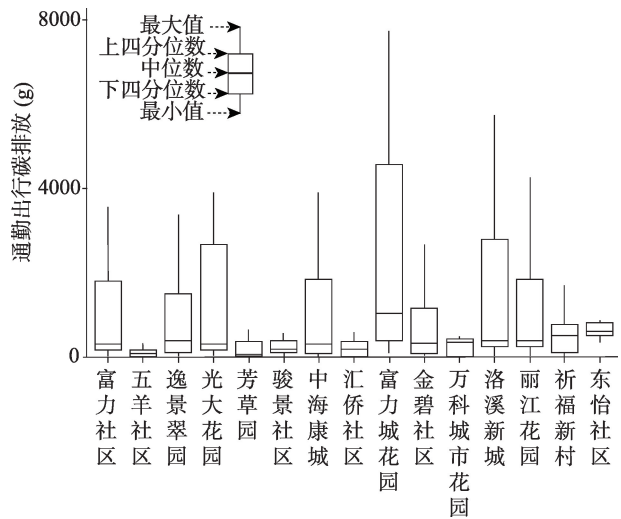


图3 各社区居民通勤出行碳排放的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of residents' CO₂ emissions from commuting among neighborhoods

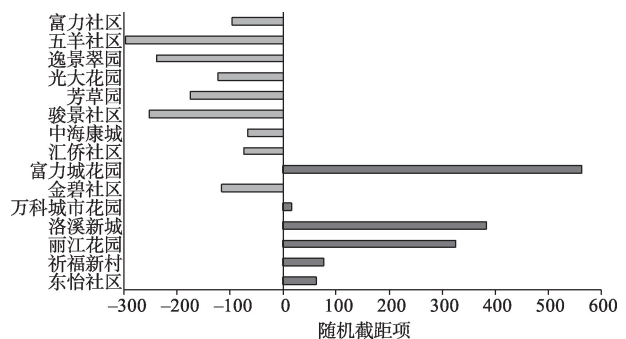


图4 各社区对居民通勤碳排放影响的随机效应差异

Fig. 4 Differences in the random effects of neighborhoods' impact on residents' CO₂ emissions from commuting

示的差异)。模型3和模型4分别在模型1的基础上加入街道尺度和社区边界1 km缓冲范围尺度建成环境变量,它们的随机截距项标准差分别为152.8091和55.7814。也即这两个模型建成环境变量对社区间通勤碳排放差异的解释力度低于模型2,其中模型3街道尺度建成环境变量的解释力度最差。从解释变量的显著性来看,模型3街道尺度的建成环境变量对居民通勤碳排放的影响均不显著,而模型2社区尺度建成环境变量对通勤碳排放的影响显著性亦优于模型3社区边界1 km缓冲范围尺度,由此可以说明建成环境对通勤碳排放的影响具有尺度效应,其中以社区尺度的影响最为显著。因此,若希望通过对建成环境进行规划干预以减少居民通勤碳排放,应更多着眼于与居民所居住的社区以及与居民日常出行活动联系最紧密的社区15分钟步行生活圈范围(约等于1 km缓冲范围尺度)。

同时,通过似然率(likelihood-ratio)对模型2~模型4的建成环境变量进行随机效应检验,结果显示这六个建成环境变量在不同尺度上均不存在显著的随机效应,也即这些建成环境因素不管在哪个社区,对通勤碳排放的影响都是一致的,没有显著的差异。

总体上,模型2和模型4的各变量估计结果基本上是一致的,由此可以认为模型估计具有稳健性。居民所在的社区与城市中心的距离越大,其通勤出行排放的CO₂则越多。而社区居住人口密度和路网密度越大,居民通勤出行碳排放则越小。这些结论与已有研究基本一致^[7,8,17,18]。值得注意的是,社区公交站密度与居民通勤出行碳排放呈正相关关系,公交供给水平越充足的社区,其居民通勤出行碳排放反而更大。已有研究亦得出相似的结论^[7,8,16]。在广州,公交密度高的社区主要集中分布在中心城区,这些社区往往可达性、环境品质和房价都比较高,其居民的收入水平和经济基础亦相对较好。因此,很多拥有小汽车的居民为了不必在上下班高峰期挤公交,在广州常年高温闷热环境下花更多时间等候公交以及暴露在汽车尾气污染当中,更倾向于选择小汽车出行。在调研中发现,即使是中心城区范围内的短距离通勤,拥有小汽车、收入较高的居民大多更倾向于使用小汽车出行,尽管其居住的社区拥有较高的公共交通供给水平。因此,在像广州这种高密度城市环境背景下,公交供给水平已经相当不错的社区进一步增加其公交站点或公交线路是否能够有效减少通勤出行碳排放,是科研人员、政策制定者和规划师值得关注的问题。同时,社区土地利用混合度和地铁站密度对居民通勤出行碳排放亦无显著的直接影响。可能大多数人都会直观地认为土地利用混合度和地铁站密度应与通勤出行碳排放呈显著的负相关关系,但通勤碳排放不仅取决于通勤方式,同时还受通勤距离的影响^[46]。通勤距离很大程度上决定于居住地与工作地之间的距离。而居住地和工作地之间的距离很大程度上直接取决于居民对居住地和工作地的选择,而非居住地社区本身的土地利用混合度。居住地与工作地之间的关系是一个自我调整的动态过程。居民有可能会因为通勤距离过长而调整居住地或调整工作地,使通勤成本和压力控制在自身可以承受的范围。地铁是一种低碳且便捷高效的交通方式。若居住地附近没有地铁,居民不一定会转向使用小汽车来通勤,也有可能通过调整工作地和居住地的方式来减少通勤距离。因此,社区土地利用混合度和地铁站密度与居民通勤碳排放之间的关系并不一定是显著负相关关系。

3.3 工作地建成环境对通勤碳排放的影响

为对比工作地建成环境与居住地建成环境对居民通勤碳排放的影响,模型5在模型1的基础上仅加入工作地建成环境变量,以验证除居住地建成环境外,工作地建成环境是否也会对通勤碳排放产生影响。模型5的估计结果显示(如表5),建成环境因素仅有地铁站密度显著(显著性水平10%)。同时,居民出行态度与偏好和社会经济属性变量与前

表5 工作地建成环境对居民通勤出行碳排放影响的模型估计结果

Tab. 5 Model estimation results of the effects of workplace built environment on residents' CO₂ emissions from commuting

	模型5	模型6	模型7
个体尺度变量			
<i>AP1</i>	25.2303	15.1263	
<i>AP2</i>	33.3261	31.6468	
<i>AP3</i>	25.8596	16.9444	
<i>AP4</i>	-33.1808	-19.3989	
<i>AP5</i>	-128.7016*	-129.1220**	-131.7649**
<i>AP6</i>	353.7867***	359.9583***	370.8355***
<i>AP7</i>	-133.8098*	-139.5642*	-141.5359**
<i>GENDER</i>	-314.5223***	-281.9345***	-277.3545***
<i>AGE</i>	177.4332**	172.8170**	198.2398***
<i>HS</i>	-8.2653	-8.8784	
<i>CHILD</i>	97.6867	106.1256	
<i>EDU</i>	-9.8654	-19.6187	
<i>HR</i>	188.8895*	175.5465*	176.6169*
<i>INCOME</i>	85.4567**	82.5496**	78.2263**
<i>CAR</i>	739.2698***	752.5380***	750.5512***
<i>BIKE</i>	-58.7123	-55.1057	
居住地建成环境			
<i>DC₁</i>		0.0542**	0.0461***
<i>RD₁</i>		-0.0063**	-0.0068**
<i>LUM₁</i>		-944.9631	
<i>BSD₁</i>		330.5942***	297.2532***
<i>MSD₁</i>		242.3151	
<i>RND₁</i>		-238.0425***	-233.2642***
工作地建成环境			
<i>DC_{work}</i>	0.0198	0.0184	
<i>RD_{work}</i>	0.0012	0.0016	
<i>LUM_{work}</i>	257.7178	214.2421	
<i>BSD_{work}</i>	-47.7365	-48.7330	
<i>MSD_{work}</i>	327.4418*	348.2815**	208.4993*
<i>RND_{work}</i>	-26.0990	-21.3677	-61.8349**
整体截距项	-1204.4360*	-1593.0720**	-1259.2970**
随机截距项标准差	304.9182	1.0049e-04	70.7000e-08
Log likelihood	-6778.5740	-6765.6044	-6769.1542

注: ***, **和*分别表示显著性水平为1%、5%和10%。

面的模型保持一致。这说明, 模型5的估计结果是可信的。但其随机截距项标准差(304.9182)远大于模型2~模型4, 这说明工作地建成环境变量的解释力度远不如居住地建成环境变量, 且对居民通勤碳排放的影响显著性不如居住地。该结果与部分国外研究具有差异。Ding等以美国华盛顿特区为例的研究显示工作地建成环境的影响比居住地的显著^{[25]589}。

模型6进一步将社区尺度居住地建成环境放入模型,以检验模型结果的稳健性和可信度。结果显示,六个居住地建成环境变量的估计结果均与前面模型一致,且居住地人口密度的显著性由之前的10%上升到5%,而工作地地铁站密度的显著性也由模型5的10%上升到5%,显著性有所提高。同时,模型随机截距项标准差减少到接近为0,说明模型6新加入的社区尺度居住地建成环境变量很好地解释了社区间的居民通勤碳排放差异。模型7为了进一步检验估计结果的稳健性和提高模型构建的效率,采用逐步回归剔除不显著的变量。结果显示,居住地建成环境变量的估计结果仍与前面的模型保持一致,且显著性有进一步的提高;而工作地建成环境变量方面,路网密度由之前的不显著变为显著(显著性水平5%),呈负向影响作用。

上述模型估计结果说明,增加工作地路网密度是有助于减少通勤碳排放的,但增加工作地地铁站密度却不一定能够减少通勤碳排放,因为通勤碳排放不仅取决于通勤方式,还取决于通勤距离,且受居住地建成环境的影响更大。

4 结论

本文以广州为例,基于居民出行问卷调查数据和多层次混合效应模型对多尺度建成环境要素对居民通勤出行碳排放的影响进行了实证研究,主要得出以下研究结论与启示:

(1) 当对居住自选择效应进行控制后,居民通勤出行碳排放呈现出以下空间规律:中心城区社区的居民通勤碳排放普遍小于城市郊区社区的居民通勤碳排放。且这种空间差异是由社区间的建成环境差异所导致的。

(2) 不同尺度的居住地建成环境对居民通勤出行碳排放的影响显著性为:社区尺度>社区边界1 km缓冲范围尺度>街道尺度。这说明,为构建低碳的城市空间与交通系统、减少城市交通碳排放,应更多着眼于居民所居住的社区以及与其日常出行活动联系最紧密的社区15分钟步行生活圈,对该尺度范围内的建成环境进行规划干预。

(3) 工作地建成环境对居民通勤碳排放的影响不如居住地建成环境的显著。因此,相比于改善工作地建成环境,有针对性地对居住地建成环境进行规划干预会对减少居民通勤碳排放产生更好的效果。

(4) 应尽可能减少居民居住地与城市中心和工作地之间的距离,同时将社区密度控制在适当的水平,以及优化路网结构,增加社区间适宜非机动车化出行的支路,进一步改善和保障步行和自行车出行环境,引导居民转向使用低碳、积极和健康的出行方式出行。

虽然本文取得了不少具有价值的研究结论,但尚存在一定的不足与缺陷。第一,在社区选取方面可能存在局限性,并不能以此完全代表广州所有社区。第二,在社区问卷调查过程中所采用的随机拦截方式可能存在非概率抽样问题,由此推广至总体的研究结论有可能存在一定的风险。

参考文献(References)

- [1] 曹小曙,杨文越,黄晓燕. 基于智慧交通的可达性与交通出行碳排放:理论与实证. 地理科学进展, 2015, 34(4): 418-429. [Cao Xiaoshu, Yang Wenyue, Huang Xiaoyan. Accessibility and CO₂ emissions from travel of smart transportation: Theory and empirical studies. Progress in Geography, 2015, 34(4): 418-429.]
- [2] IEA. CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2010. Paris: IEA, 2010.
- [3] IEA. CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2018. Paris: IEA, 2018.
- [4] Yang W, Li T, Cao X. Examining the impacts of socio-economic factors, urban form and transportation development on CO₂ emissions from transportation in China: A panel data analysis of China's provinces. Habitat International, 2015, 49: 212-220.

- [5] 杨文越, 李涛, 曹小曙. 中国交通 CO₂ 排放时空格局演变及其影响因素: 基于 2000—2012 年 30 个省(市)面板数据的分析. 地理科学, 2016, 36(4): 491-501. [Yang Wenyue, Li Tao, Cao Xiaoshu. The evolution of spatial-temporal characteristics and influence factors of CO₂ emissions from transport in China: A panel data analysis of 30 provinces in China from 2000 to 2012. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 491-501.]
- [6] Pan X, Wang H, Wang L, et al. Decarbonization of China's transportation sector: In light of national mitigation toward the Paris Agreement goals. *Energy*, 2018, 155: 853-864.
- [7] Yang W, Cao X. Examining the effects of the neighborhood built environment on CO₂ emissions from different residential trip purposes: A case study in Guangzhou, China. *Cities*, 2018, 81: 24-34.
- [8] Cao X, Yang W. Examining the effects of the built environment and residential self-selection on commuting trips and the related CO₂ emissions: An empirical study in Guangzhou, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52, Part B: 480-494.
- [9] 曹新宇. 社区建成环境和交通行为研究回顾与展望: 以美国为鉴. 国际城市规划, 2015, 30(4): 46-52. [Cao Xinyu. Examining the relationship between neighborhood built environment and travel behavior: A review from the US perspective. *Urban Planning International*, 2015, 30(4), 46-52.]
- [10] Zhao P. Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing. *Habitat International*, 2010, 34(2): 236-243.
- [11] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.
- [12] 孙斌栋, 但波. 上海城市建成环境对居民通勤方式选择的影响. 地理学报, 2015, 70(10): 1664-1674. [Sun Bindong, Dan Bo. Impact of urban built environment on residential choice of commuting mode in Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(10): 1664-1674.]
- [13] 塔娜, 柴彦威, 关美宝. 建成环境对北京市郊区居民工作日汽车出行的影响. 地理学报, 2015, 70(10): 1675-1685. [Tana, Chai Yanwei, Kwan Mei-Po. The relationship between the built environment and car travel distance on weekdays in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(10): 1675-1685.]
- [14] 张延吉, 胡思聪, 陈小辉, 等. 城市建成环境对居民通勤方式的影响: 基于福州市的经验研究. 城市发展研究, 2019, 26(3): 72-78. [Zhang Yanji, Hu Sicong, Chen Xiaohui, et al. The impact of urban built environment on residential choice of commuting mode: Based on empirical research in Fuzhou. *Urban Studies*, 2019, 26(3): 72-78.]
- [15] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: A synthesis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, (1780): 87-114.
- [16] 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. 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. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 346-361.]
- [17] Alford G, Whiteman J. Macro-urban form and transport energy outcomes: Investigations for Melbourne. *Road & Transport Research*, 2009, 18(1): 53-67.
- [18] Brownstone D, Golob T F. The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, 2009, 65(1): 91-98.
- [19] Zahabi S A H, Miranda-Moreno L, Patterson Z, et al. Transportation greenhouse gas emissions and its relationship with urban form, transit accessibility and emerging green technologies: A Montreal case study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012, 54: 966-978.
- [20] Song S, Diao M, Feng C. Individual transport emissions and the built environment: A structural equation modelling approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, 92: 206-219.
- [21] Hong J, Goodchild A. Land use policies and transport emissions: Modeling the impact of trip speed, vehicle characteristics and residential location. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2014, 26: 47-51.
- [22] Modarres A. Commuting and energy consumption: Toward an equitable transportation policy. *Journal of Transport Geography*, 2013, 33: 240-249.
- [23] Barla P, Miranda-Moreno L F, Lee-Gosselin M. Urban travel CO₂ emissions and land use: A case study for Quebec city. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011, 16(6): 423-428.
- [24] Brand C, Goodman A, Rutter H, et al. Associations of individual, household and environmental characteristics with carbon dioxide emissions from motorised passenger travel. *Applied Energy*, 2013, 104: 158-169.
- [25] Ding C, Wang Y, Xie B, et al. Understanding the role of built environment in reducing vehicle miles traveled accounting for spatial heterogeneity. *Sustainability*, 2014, 6(2): 589-601.
- [26] Hong J. Non-linear influences of the built environment on transportation emissions: Focusing on densities. *Journal of*

- Transport and Land Use, 2015, 10(1): 229-240.
- [27] 马静, 柴彦威, 刘志林. 基于居民出行行为的北京市交通碳排放影响机理. 地理学报, 2011, 66(2): 1023-1032. [Ma Jing, Chai Yanwei, Liu Zhilin. The mechanism of CO₂ emissions from urban transport based on individuals' travel behavior in Beijing. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(2): 1023-1032.]
- [28] 柴彦威, 肖作鹏, 刘志林. 居民家庭日常出行碳排放的发生机制与调控策略: 以北京市为例. 地理研究, 2012, 31(2): 334-344. [Chai Yanwei, Xiao Zuopeng, Liu Zhilin. Low-carbon optimization strategies based on CO₂ emission mechanism of household daily travels: A case study of Beijing. Geographical Research, 2012, 31(2): 334-344.]
- [29] 黄经南, 黄小康, 高浩武. 城市家庭日常出行碳排放的影响因素: 以武汉市为例. 城市问题, 2015, (5): 66-76. [Huang Jingnan, Huang Xiaokang, Gao Haowu. Influencing factors of carbon emission from urban families' daily travel: A case study of Wuhan city. Urban Problems, 2015, (5): 66-76.]
- [30] 满洲, 赵荣钦, 袁盈超, 等. 城市居住区周边土地混合度对居民通勤交通碳排放的影响: 以南京市江宁区典型居住区为例. 人文地理, 2018, 33(1): 70-75. [Man Zhou, Zhao Rongqin, Yuan Yingchao. Impact of land-mixing degree of residential area on carbon emissions of commuting: A case study of typical residential district, Jiangning district, Nanjing. Human Geography, 2018, 33(1): 70-75.]
- [31] 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. 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. Urban Studies, 2013, 20(7): 83-89.]
- [32] 荣培君, 张丽君, 秦耀辰, 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. 地理研究, 2019, 38(6): 1464-1480. [Rong Peijun, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Impact of built environment on carbon emissions from daily travel of urban residents: A case study of 248 residential areas in Kaifeng. Geographical Research, 2019, 38(6): 1464-1480.]
- [33] 姜洋, 何东全, Christopher Z. 城市街区形态对居民出行能耗的影响研究. 城市交通, 2011, 9(4): 21-29, 75. [Jiang Yang, He Dongquan, Christopher Z. Impact of neighborhood land use on residents travel energy consumption. Urban Transport of China, 2011, 9(4): 21-29, 75.]
- [34] 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. 城市发展研究, 2011, 18(9): 104-112. [Xiao Zuopeng, Chai Yanwei, Liu Zhilin. Quantitative distribution and related factors for household daily. Urban Studies, 2011, 18(9): 104-112.]
- [35] 刘清春, 张莹莹, 肖燕, 等. 济南市主城区私家车日常出行碳排放特征及影响因素. 资源科学, 2018, 40(2): 262-272. [Liu Qingchun, Zhang Yingying, Xiao Yan, et al. Characteristics and determinants of carbon emissions from daily private cars travel in central area of Jinan. Resources Science, 2018, 40(2): 262-272.]
- [36] Ma J, Liu Z, Chai Y. The impact of urban form on CO₂ emission from work and non-work trips: The case of Beijing, China. Habitat International, 2015, 47: 1-10.
- [37] 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. 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. Geographical Research, 2015, 34(8): 1471-1480.]
- [38] Taylor P J. Is there a Europe of cities? World cities and the limitations of geographical scale analyses//Sheppard E, McMaster R B. Scale and Geographic Inquiry: Nature, Society, and Method. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. 2004, 18-35.
- [39] 徐维祥, 张筱娟, 刘程军. 长三角制造业企业空间分布特征及其影响机制研究: 尺度效应与动态演进. 地理研究, 2019, 38(5): 1236-1252. [Xu Weixiang, Zhang Xiaojuan, Liu Chengjun. Spatial distribution pattern and influencing factors of manufacturing enterprises in Yangtze River Delta: Scale effects and dynamic evolution. Geographical Research, 2019, 38(5): 1236-1252.]
- [40] 孟斌, 王劲峰. 地理数据尺度转换方法研究进展. 地理学报, 2005, 60(2): 277-288. [Meng Bin, Wang Jinfeng. A review on the methodology of scaling with geo-data. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(2): 277-288.]
- [41] Frank L D, Andresen M A, Schmid T L. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars. American Journal of Preventive Medicine, 2004, 27(2): 87-96.
- [42] Moniruzzaman M, Páez A, Habib K M N, et al. Mode use and trip length of seniors in Montreal. Journal of Transport Geography, 2013, 30: 89-99.
- [43] Entwicklungsbank K. Transport in China: Energy consumption and emissions of different transport modes. Heidelberg: Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, 2008.
- [44] Hamilton L C. Statistics with Stata: Version 12. Belmont, CA: Cengage, 2013: 387-421.
- [45] Cao X J, Mokhtarian P L, Handy S L. Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: A focus on

empirical findings. *Transport Reviews*, 2009, 29(3): 359-395.

[46] Carty J, Ahern A. Introducing a transport carbon dioxide emissions vulnerability index for the Greater Dublin Area. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(6): 1059-1071.

Examining the effects of the multi-scale built environment on residents' CO₂ emissions from commuting: An empirical study of Guangzhou

YANG Wenyue¹, LIANG Feiwen², CAO Xiaoshu^{3,4}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. School of Economics and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. Institute of Transport Geography and Spatial Planning, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 4. Department of Urban and Regional Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Commuting is the main source of CO₂ emissions from urban transport. However, existing studies have rarely paid attention to the differences in the effects of different geographical scales of built environments on residents' CO₂ emissions from commuting and had not yet reached a consensus conclusion. Based on the 2015 travel survey data and multilevel and mixed-effects models, this paper conducts an empirical study on the effects of multi-scale built environments on residents' CO₂ emissions from commuting in Guangzhou, China. The results show that after control for the residential self-selection effect, there are obvious spatial differences in the residents' CO₂ emissions from commuting among neighborhoods. It is shown that the residents in the central urban area generally emit less CO₂ emissions than their counterparts in the suburban area in commuting trips. These are caused by differences in built environments between neighborhoods. In terms of scale, the neighborhood's built environment has the most significant effect on residents' CO₂ emissions from commuting, followed by 1 km-buffer range of neighborhood boundary, and then subdistrict. Moreover, the effect of the built environment of the residence on CO₂ emissions from commuting is more significant than that of the workplace. These findings imply that planning interventions on the built environment should focus more on the neighborhoods in which residents live and the 15-minute walk life circle that is closely linked to the daily travel activities of residents. The distance between residence and workplace should be kept as short as possible, and the residential density of neighborhoods should be maintained at a reasonable level. Furthermore, optimizing the structure of road network and providing more community roads which are beneficial to non-motorized travel could help improve the environment for walking and bicycling and encourage people to use low-carbon, active and healthy travel modes. Although there may be some limitations in the selection of neighborhoods surveyed and random interception approach in the survey that may lead to non-possibility sampling, the conclusions can still provide a scientific basis for constructing a low-carbon urban spatial structure, guiding residents' travel behavior change and formulating targeted policies on low-carbon transportation and land use.

Keywords: built environment; commuting; CO₂ emissions; scale; multilevel and mixed-effects model