

居住自选择视角下的广州出行碳排放影响机理

杨文越¹, 曹小曙^{2,3}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 2. 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 3. 陕西师范大学交通地理与空间规划研究所, 西安 710119)

摘要: 国内外已有不少研究从国家、城市和社区层面探讨了交通出行碳排放的影响因素, 然而, 很少研究考虑到居住自选择的影响。若忽略该影响, 将很可能会错误地估计建成环境的作用, 以至于相关规划与政策制定有所偏离。中国城市是否与西方国家一样也具有居住自选择效应? 在考虑了居住自选择后, 建成环境是否对出行碳排放具有显著的影响, 如何产生影响? 为了回答以上科学问题, 基于2015年广州15个社区1239份问卷数据和出行O-D点智能查询系统(TIQS)的开发与应用, 对居民出行碳排放进行了测度, 并通过构建结构方程模型(SEM)探究了不同类型出行碳排放的影响机理。研究发现: 中国城市同样存在居住自选择效应, 转变居民出行方式选择偏好有利于减少出行碳排放。在控制居住自选择效应后, 建成环境仍然对居民出行碳排放产生显著的影响。这些影响有的属于直接影响, 有的则是通过影响其他中介变量, 例如小汽车拥有或出行距离, 进而再对出行碳排放造成间接影响。对于不同类型出行, 其碳排放的影响机理并不一样。

关键词: 居住自选择; 建成环境; 出行碳排放; 影响机理; 广州

DOI: 10.11821/dlxb201802010

1 引言

近年来, 随着对自然生态系统和人类社会造成的负面影响日益明显, 全球气候变化问题受到了整个学术界的广泛关注^[1]。人类活动的能源消耗及其碳排放是引起气候变化的重要原因。其中, 交通出行是人类活动碳排放的主要来源之一。目前, 交通已成为全球第二大CO₂排放部门。根据国际能源机构(IEA)的最新研究报告^[2], 2014年全球交通部门CO₂排放总量为7547.25 Mt, 占CO₂排放总量的23.31%。其中, 道路交通排放的CO₂占交通部门总量的比例高达1/4。减少交通碳排放对于实现减缓气候变化目标来说是一个重大的挑战^[3], 因为在全球范围内, 交通部门的能源消耗和碳排放增长最快^[4], 被视为碳减排最难实现的部门^[5-6]。

已有关于建成环境与交通行为的研究大多关注于出行频率、出行距离、出行方式选择(或结构)和个人出行里程(person miles traveled, PMT)、机动车行驶里程(vehicle miles traveled, VMT)或机动车行驶时间(vehicle hours traveled, VHT), 很少关注于居

收稿日期: 2017-01-25; 修订日期: 2017-11-27

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) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41701169, No.41671160; Philosophy and Social Sciences Planning Project of Guangdong Province, No.GD17YSH01]

作者简介: 杨文越(1988-), 男, 广东韶关人, 博士, 讲师, 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, 博导, 教授, 中国地理学会会员(S11005157M), 主要从事交通地理与土地利用研究。E-mail: caoxsh@mail.sysu.edu.cn

民出行的环境成本,例如出行碳排放,且这些研究并没有得到一致的研究结论^[7-10]。宏观层面的研究主要基于国家时间序列数据和城市截面数据利用集计的分析方法对城市形态(城市密度、城市规模、建成区面积和路网密度等)和交通能源消耗及其碳排放之间的关系进行分析^[11-19]。微观层面的研究主要基于问卷数据进行非集计分析。Brownstone等基于美国家庭出行调查数据(NHTS)的研究发现,居住人口密度每平方英里减少1000户家庭,家庭汽车年行驶里程将增加1200英里,汽车燃料将增加65加仑^[20]。Modarres基于美国社区调查数据的研究也证实了居住人口密度对交通能源消耗的重要影响作用^[21]。也有学者发现,工作地密度在减少交通能源消耗及其碳排放方面比居住地密度起到更大的作用^[22]。然而,部分研究则发现居住人口密度与出行碳排放之间的关系并不显著^[23-25],或呈现非线性关系,当居住人口密度高达一定水平时,继续提高其密度将不一定能减少出行碳排放^[26]。大多研究一致认为土地利用混合度与居民出行碳排放呈负相关关系,提高城市郊区的土地利用混合度比提高人口密度对减少出行碳排放的帮助更大^[27-29]。在公共交通方面,马静等研究发现地铁可达性与通勤碳排放呈负相关关系^[4],但有研究发现常规公交可达性对出行碳排放具有正向影响^[24],还有研究探究了几个建成环境要素对减少出行碳排放的弹性作用。Zahabi等在加拿大蒙特利尔的研究显示,居住人口密度、土地利用混合度和公共交通可达性若提高10%,将分别能减少3.5%、2.5%和5.8%的出行碳排放^[30]。Hong等在美国普捷湾地区的研究也发现,城市地区的居住密度、土地利用混合度和道路交叉口密度若提高100%,其减少交通碳排放的弹性总和将在31.2%~34.4%之间^[31]。杨文越等则发现社区人口密度、公共交通供给水平和路网密度对出行碳排放的影响很可能存在空间异质性^[32]。此外,一些研究还关注居民社会经济属性的影响,对建成环境的影响考虑得较少^[23, 33-35]。

总体而言,以上研究并未得出一致的结论,且大多关注建成环境影响的研究仅测度了其直接影响,而忽略了间接影响。然而,部分建成环境要素对出行碳排放的影响很可能是间接的,而非直接的。同时,国内外关于建成环境和出行碳排放的研究很少考虑居住自选择的影响^[36-37]。建成环境对居民出行碳排放的影响究竟是来自建成环境自身,还是因为居民根据自身社会经济属性或态度偏好选择居住在具有不同建成环境特征的社区,从而表现出特定的出行行为及其碳排放,这两者是截然不同的。后者就是所谓的“居住自选择”效应”。如果不考虑居住自选择,那么将很可能错误地估计建成环境对居民出行碳排放的影响,进而误导低碳城市与交通政策的制定。

为此,本文提出以下研究问题:第一,中国城市是否与西方(主要是北美)城市一样,也同样存在居住自选择效应?第二,在考虑了居住自选择效应之后,建成环境是否仍然对出行碳排放具有显著的影响,究竟产生怎么样的影响(直接还是间接的)?第三,对于不同类型的出行,居民出行碳排放影响因素及机理是否具有差异?由于以上研究问题并未得出一致和清晰的结论,且中国城市在空间结构、土地利用模式、城市交通系统和居民出行偏好等方面与西方城市具有巨大差异,已有的西方研究结论很可能不适用于中国。因此,亟需以中国城市作为背景,针对以上问题展开研究。

2 研究方法

2.1 研究数据

本文以广州为例,选取了15个社区开展居民问卷调查工作。由于需要考虑居民自选择效应,必须确保被调查居民是可以根据自身社会经济属性和出行态度偏好选择不

同建成环境特征的居住地,因此,问卷调查选取了住房结构以购买商品、购买二手房和租房^①为主体的社区进行,排除以单位分房和保障性住房为主体的社区(居民住房选择受到一定限制,不符合居住自选择前提)^[38]。此外,为保证社区选取的代表性和模型估计的统计显著性,本文选取建成环境差异化的社区。

本文考虑和测度了社区到城市公共中心的距离(DTC)、土地利用混合度(LUM)、居住人口密度(RD)、公交站密度(BSD)、地铁站密度(MSD)和路网密度(RND)等6个社区建成环境要素,最终选取了15个社区:富力社区、五羊社区、逸景翠园、光大花园、芳草园、骏景社区、中海康城、汇侨社区、富力城花园、金碧社区、万科城市花园、洛溪新城、丽江花园、祈福新村和东怡社区(图1a)。从建成环境要素的散点图及其拟合曲线可以看出,这些社区的建成环境特征具有较大差异(置信椭圆面积较大)(图1b)。

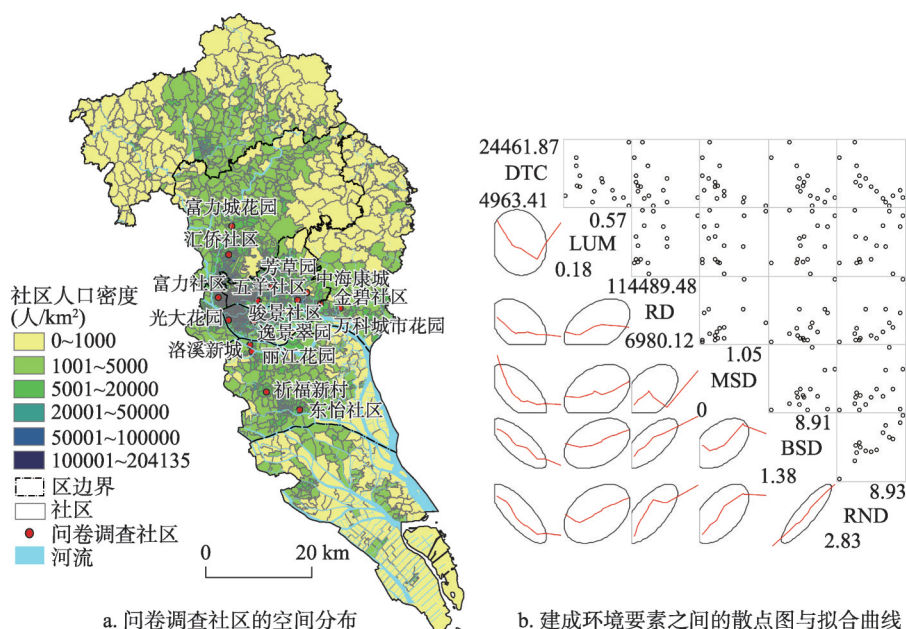


图1 问卷调查社区的空间分布及其建成环境要素之间的散点图与拟合曲线

Fig. 1 Spatial distribution of the communities surveyed and scatter plots and fitting curves between built environment elements

本文在2015年3月进行了问卷预调查工作。经过反馈和修改完善后,于2015年5月-7月正式投入社区进行问卷调查。问卷针对社区内16岁以上的居民,采取面对面、随机拦截的方式进行。问卷一共回收1345份,其中有效问卷1239份(表1)。

问卷收集了居民的社会经济、与出行相关的态度偏好和出行信息等数据(表2)。其中,分别获取通勤、社交、休闲娱乐和日常购物4种类型出行的交通起止点(简称O-D点)1239条、726条、702条和712条。根据统计标准,样本量与观察变量的数量之比若大于15,则可以视该样本为大样本^[41]。本文对4种类型出行分别构建的结构方程模型中,样本量与观察变量的数量之比分别为1239/24(≈52)、726/24(≈30)、702/24(≈29)和712/24(≈30),均大于15,因此,该样本量较大,能够满足模型构建要求。本文

① 根据广州市第六次人口普查数据的住房结构

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 communities surveyed

社区	行政区	常住人口数 (人)	样本数	到城市公共 中心的距离 (km)	居住人口 密度 (万人/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	7.37	114489	0.54	8.91	0.68	8.93
五羊社区	越秀区	14110	88	4.96	39885	0.57	6.28	1.05	7.63
逸景翠园	海珠区	13979	75	7.23	24695	0.48	6.89	0.23	6.99
光大花园	海珠区	17466	102	8.04	32147	0.18	6.09	0.36	7.97
芳草园	天河区	4230	39	5.93	63200	0.35	7.72	0.67	7.28
骏景社区	天河区	12320	109	9.34	13827	0.36	4.85	0.36	6.43
中海康城	天河区	8016	69	10.71	17580	0.27	4.56	0.21	5.86
汇侨社区	白云区	15044	121	9.49	56825	0.47	8.07	0.02	8.68
富力城花园	白云区	4372	41	14.05	10343	0.27	5.70	0.00	4.78
金碧社区	黄埔区	10685	89	13.36	63149	0.40	4.75	0.10	5.38
万科城市花园	黄埔区	4747	34	17.12	29717	0.25	4.45	0.29	4.48
洛溪新城	番禺区	12599	109	11.00	13938	0.25	5.15	0.25	4.81
丽江花园	番禺区	11056	95	12.13	9989	0.41	5.32	0.21	4.42
祈福新村	番禺区	27136	159	19.64	6980	0.25	1.38	0.00	2.83
东怡社区	番禺区	7874	46	24.46	20503	0.57	3.52	0.12	4.31
合计		172465	1239	11.66	34484	0.37	5.58	0.30	6.05

注：到城市公共中心的距离为社区到16个不同类型城市公共中心的欧几里得（Euclidean）距离；土地利用混合度借鉴了Frank等^[39]和Moniruzzaman等^[40]的方法，采用13种类型兴趣点（POIs）计算而得。

将这些出行O-D点信息（共3379条）进行空间编码与矢量化，并利用出行O-D点智能查询系统（Travel O-D point Intelligent Query System, TIQS）^②查询计算其出行距离、出行时间和相关的出行信息等。

2.2 居民出行碳排放测度模型

本文结合TIQS的应用构建了居民出行碳排放测度模型，用以测度居民每段O-D出行所排放的CO₂。其计算的公式如下：

$$TC_i = MTD_i \times EF_m \tag{1}$$

$$MTD_i = TD_i - NTD_i \tag{2}$$

式中：TC_i是第i段O-D出行所排放的CO₂；TD_i是利用TIQS查询计算出来的全程出行距离；NTD_i是在TIQS查询计算结果中显示的非机动化出行距离；MTD_i则是该段O-D出行中的机动化出行距离；EF_m是本段O-D出行所采用的机动化方式的碳排放因子（表3）。在已有相关研究中，往往基于全程出行距离（即TD）来测算排放的CO₂，但实际上产生CO₂的只是机动化出行距离（即MTD）。基于此，本文利用TIQS将机动化出行距离单独剥离出来，以求更加精确地对出行碳排放进行测度。

2.3 结构方程模型

结构方程模型（structural equations model, SEM）常用于探究建成环境和出行行为之间的复杂关系^[43-47]，它可以更有效地解决变量之间的内生性问题，并且能够探究外生变量

② 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O-D点查询的智能系统。

对内生变量以及内生变量之间的直接效应、间接效应和总效应^[44, 48-49]。因此,本文分别对通勤、社交、社交娱乐和日常购物4种类型出行构建结构方程模型,以探究考虑了居住自选择的居民出行碳排放影响机理。

模型的构建根据以下框架:将居民社会经济(SD)和态度偏好(AP)设定为外生变量,出行碳排放(TC)、出行距离(TD)、小汽车拥有(CAR)和建成环境(BE)设定为内生变量。其中,由于考虑到小汽车拥有和出行距离对出行碳排放的影响并不是独立的,因为它们同时还可能受居民社会经济、态度偏好和建成环境的影响,因此,将这两个变量设定为中介变量^[44-45];同时,为检验是否存在居住自选择效应,考察居民社会经济和态度偏好是否会影响其居住地建成环境的选择,将建成环境设定为内生变量(图2)。

居住自选择指的是,居民根据自身社会经济属性或态度偏好选择居住在具有一定建成环境特征的社区,从而表现出某种出行特征^[50]。因此,在模型中,若社会经济或态度偏好对建成环境的路径显著,且社会经济或态度偏好对出行距离或出行碳排放的路径显著(SD→BE,且SD→TD或SD→TC;或AP→BE,且AP→TD或AP→TC),则说明存在居住自选择效应。在此情况下,若建成环境到出行碳排放的路径(BE→TC)显著,则说明考虑居住自选择效应后,建成环境对出行碳排放仍然具有显著的直接影响。此外,建成环境也可能对出行碳排放不具有直接影响,而是通过小汽车拥有或出行距离这两个中介变量对出行碳排放产生间接影响。

表2 样本居民社会经济属性分布
Tab. 2 Distribution of social and economic attributes for sample population

变量	水平	样本数	比例(%)
性别(GENDER)	0: 男	694	56.01
	1: 女	545	43.99
	1: 16~24岁	137	11.06
年龄(AGE) (岁)	2: 25~34岁	605	48.83
	3: 35~44岁	426	34.38
	4: 45~54岁	60	4.84
	5: 55~64岁	9	0.73
	6: 65及以上	2	0.16
家庭规模(HS) (人)	1: 1	39	3.15
	2: 2	140	11.30
	3: 3	429	34.62
	4: 4	355	28.65
	5: 5及以上	276	22.28
拥有16岁以下的小孩(CHILD)	0: 没有	414	33.41
	1: 有	825	66.59
学历(EDU)	1: 初中及以下	17	1.37
	2: 高中(含中专、职高)	134	10.82
	3: 大专	357	28.81
	4: 本科	551	44.47
	5: 研究生及以上	180	14.53
户籍(HR)	0: 外地	584	47.13
	1: 本地(广州)	655	52.87
家庭人均月收入 (INCOME) (元/月)	1: 3000以下	28	2.26
	2: 3000~3999	101	8.15
	3: 4000~5999	221	17.84
	4: 6000~7999	208	16.79
	5: 8000~9999	202	16.30
	6: 10000~15000	208	16.79
	7: 15000以上	271	21.87
小汽车拥有 (CAR)	0: 没有	488	39.39
	1: 有	751	60.61
自行车拥有 (BIKE)	0: 没有	429	34.62
	1: 有	810	65.38

注:受篇幅所限,居民态度偏好变量的分布未列于表中。问卷调查了7个与出行相关的态度偏好变量: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”。

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	11.0	1.3	0.84	233.1
公交车	35.0	40	0.35	26.0
班车(楼巴)	30.0	44.0	0.27	20.3
地铁	5.0	216	0.26	20.9

注：根据^[42]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。

由于本文构建的结构方程模型变量均为观测变量，而非潜在变量，因此，模型公式如下^[44]：

$$Y = BY + \Gamma X + \zeta \tag{3}$$

式中： Y 代表的是 $N_y \times 1$ 内生变量向量； X 代表的是 $N_x \times 1$ 外生变量向量； B 是内生变量对其他内生变量的 $N_y \times N_x$ 直接影响系数矩阵； Γ 是外生变量对内生变量的 $N_y \times N_x$ 直接影响系数矩阵； ζ 是 $N_y \times 1$ 的误差向量。对于居民社会经济属性中的有序多分类变量（年龄、家庭规模、学历和家庭人均月收入），在结构方程模型中直接将其视为连续变量放入模型^[4]。模型采用Amos 21.0进行估计。由于变量数据并不是多元正态分布的，采用常用的极大似然估计法（maximum likelihood estimation, ML）会使估计结果有偏。因此，本文采用Bollen-Stine bootstrap的估计方法^[51-52]，重抽样（bootstrap）的样本数设为2000。

模型的修正参考Amos提供的修正指标（Modification Indices, M.I.），新增能够提高模型适配度的影响路径（变量之间的连线）和误差变量之间的共变关系^[53]。同时，将影响不显著（ $p > 0.1$ ）的路径删除。每进行一次修正后再对模型进行重新估计，直到M.I.表中不再提示需要修正模型，以及每条路径的显著性水平均在10%以上。

3 考虑了居住自选择的居民出行碳排放影响机理

3.1 模型结果

结构方程模型的适配度指标结果和参考值如表4所示。全部指标均显示，这4种类型出行的模型和数据之间拟合得很好。

图3展示了在通勤、社交、休闲娱乐和日常购物4种类型出行结构方程模型中，居民社会经济、态度偏好、建成环境、居民小汽车拥有、出行距离和出行碳排放之间的路径关系。虽然，4个模型变量之间的路径关系大致相似，但仍存在一定差异。外生变量对内生变量的直接影响如表5所示，内生变量之间的直接效应、间接效应和总效应如表6。

3.2 结果解释

由表5可见，对于4种类型出行，部分居民社会经济变量和态度偏好变量与建成环境

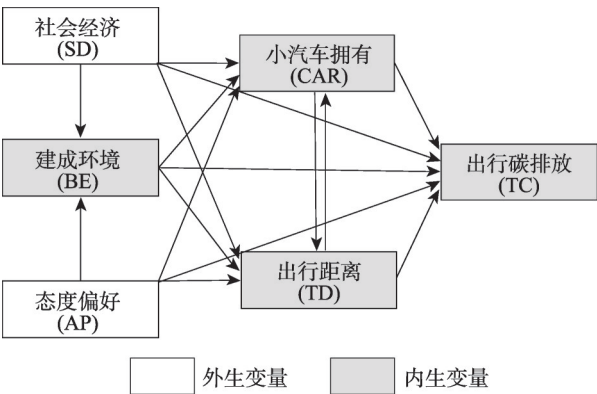


图2 结构方程模型构建的概念框架图

Fig. 2 Conceptual framework for the SEM construction

表 4 结构方程模型适配度指标
Tab. 4 The model fit indices for the SEM

模型适配度指标	适配参考值	模型结果			
		通勤	社交	休闲娱乐	日常购物
卡方(χ^2)		162.977	159.150	163.185	174.072
自由度(df)		167	165	166	170
Bollen-Stine bootstrap P 值	> 0.05	0.591	0.614	0.578	0.417
拟合优度指数(GFI)	> 0.9	0.983	0.982	0.981	0.980
调整拟合优度指数(AGFI)	> 0.9	0.970	0.968	0.966	0.966
比较拟合指数(CFI)	> 0.9	1.000	1.000	1.000	0.999
规范拟合指数(NFI)	> 0.9	0.974	0.974	0.972	0.970
非规范拟合指数(NNFI)	> 0.9	1.001	1.002	1.001	0.999
近似误差均方根(RMSEA)	< 0.05	0.000	0.000	0.000	0.006

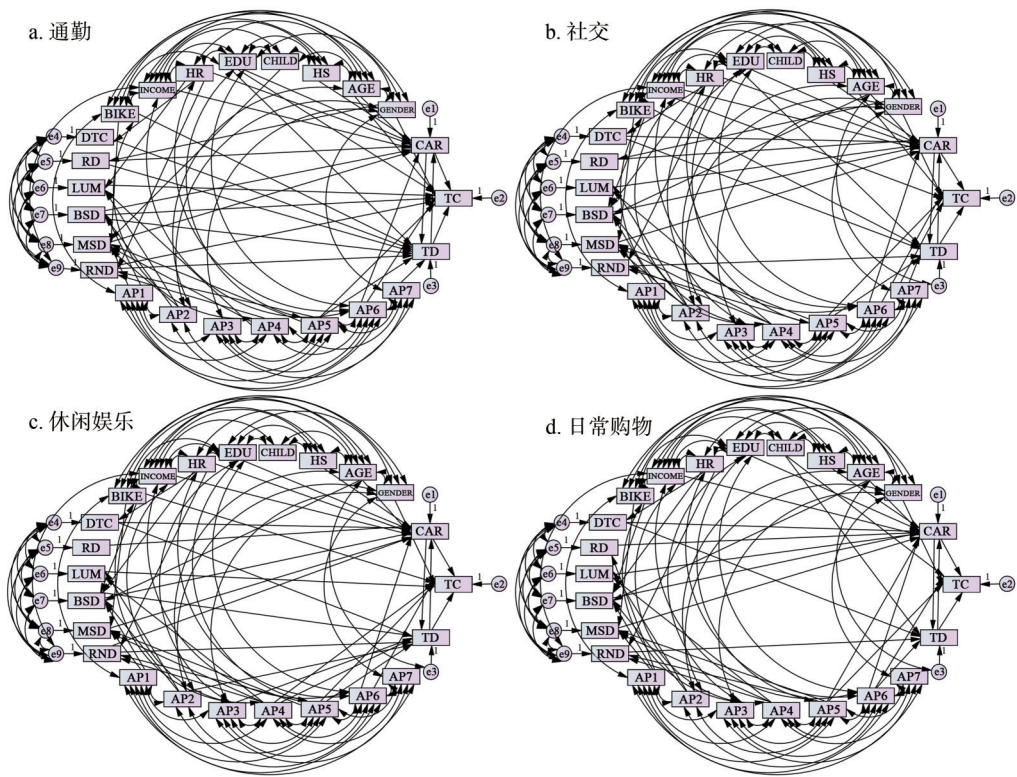


图3 通勤、社交、休闲娱乐和日常购物出行的结构方程模型路径分析
Fig. 3 SEM path diagram for commuting, social, recreational and daily shopping trips

存在显著的关联关系，且对出行距离或出行碳排放具有显著的直接影响。这意味着，不同社会经济属性的居民会根据其自身的态度与偏好选择居住在具有不同建成环境特征的社区，并表现出特定的出行行为特征，也即存在居住自选择效应。

3.2.1 居民社会经济属性的影响 居民社会经济属性对小汽车拥有、出行距离和出行碳排放的影响如下：在不同类型出行中，男性居民均普遍比女性居民排放更多CO₂，且在通勤出行中表现得尤为明显；年龄越大者，越有可能拥有小汽车，在通勤和社交出行中排

表 5 外生变量对内生变量的标准化直接效应

Tab. 5 Standardized direct effects of exogenous variables on endogenous variables

外生变量	出行类型	DTC	RD	LUM	BSD	MSD	RND	CAR	TD	TC
GENDER	通勤	-	0.039 ^b	-	-	-	-	-	-	-0.080 ^a
	社交	-	0.035 ^c	-	-	-	-	-	-	-0.074 ^b
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.073 ^b
	日常购物	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.060 ^b
AGE	通勤	-	-	-	-	-	-	0.092 ^a	-	0.093 ^a
	社交	-	-	-	0.028 ^b	-	-	0.078 ^b	-	0.067 ^b
	休闲娱乐	-	-	-	0.023 ^c	-	-	0.086 ^b	-	-
	日常购物	-	-	-	0.024 ^b	-	-	0.065 ^b	-	-
HS	通勤	-	-	-	-	-	-	0.208 ^a	-	-
	社交	-	-	-	-	-	-	0.234 ^a	-	-
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	0.223 ^a	-	-
	日常购物	-	-	-	-	-	-	0.216 ^a	-	-
CHILD	通勤	-	-	-	-	-0.041 ^b	-	-	-	-
	社交	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	日常购物	-	-	-	-	-	-	-	-0.107 ^a	0.093 ^a
EDU	通勤	-	-	-	-	-	-	0.127 ^a	0.126 ^a	-0.048 ^c
	社交	-	-	-	-	-	-	0.100 ^a	0.101 ^b	-
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	0.102 ^a	-	-
	日常购物	-	-	-	-	-	-	0.133 ^a	-	-
HR	通勤	-0.057 ^b	-	-	0.085 ^a	-	0.082 ^a	0.074 ^c	-	-
	社交	-0.071 ^a	-	-	0.090 ^a	-	0.087 ^a	0.093 ^b	-	-
	休闲娱乐	-0.083 ^a	-	-	0.093 ^a	-	0.091 ^a	0.068 ^c	-	-
	日常购物	-0.073 ^a	-	-	0.088 ^a	-	0.084 ^a	-	-	-
INCOME	通勤	-	-	-	-	-	-	0.304 ^a	-	-
	社交	-	-	-	-	-	-	0.300 ^a	-	0.077 ^a
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	0.295 ^a	-	-
	日常购物	-	-	-	-	-	-	0.315 ^a	-	-
BIKE	通勤	-	-	-	-	0.072 ^a	-	-	-0.099 ^a	-
	社交	-	-	-	-0.033 ^b	0.095 ^a	-	-	-0.064 ^c	-
	休闲娱乐	-	-	-	-0.035 ^a	0.089 ^a	-	-	-	-0.059 ^c
	日常购物	-	-	-	-0.033 ^b	0.103 ^a	-	-	-	-
AP1	通勤	-	-	-	0.053 ^a	-0.044 ^b	-	-	-	-
	社交	-	-	-	0.053 ^a	-0.046 ^b	-	-	-	-
	休闲娱乐	-	-	-	0.048 ^a	-0.045 ^b	-	-	-	-
	日常购物	-	-0.055 ^b	-	0.041 ^a	-0.058 ^a	-	-	-	-
AP2	通勤	-	-	-0.090 ^a	-0.037 ^a	-0.059 ^b	-	-	-	-
	社交	-	-	-0.086 ^a	-0.032 ^b	-0.045 ^c	-	-	-	-
	休闲娱乐	-	-	-0.081 ^a	-0.041 ^a	-	-	-	-0.093 ^b	-
	日常购物	-	-	-0.061 ^b	-0.045 ^a	-	-	-	-	-

续表 5

外生变量	出行类型	DTC	RD	LUM	BSD	MSD	RND	CAR	TD	TC
AP3	通勤	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	社交	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	-	0.082 ^b	-
	日常购物	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AP4	通勤	-	-	0.055 ^b	-	-0.057 ^a	0.036 ^a	-	-	-
	社交	-	-	0.078 ^a	-	-0.060 ^a	0.035 ^b	-	-	-
	休闲娱乐	-	-	0.065 ^a	-	-0.049 ^b	0.037 ^b	-	-0.089 ^c	-0.063 ^c
	日常购物	-	-	0.065 ^a	-	-0.053 ^b	0.028 ^c	-	-	-
AP5	通勤	-	-	-	-	0.094 ^a	-0.070 ^a	-	0.094 ^a	-0.102 ^a
	社交	-	-	-	-	0.101 ^a	-0.070 ^a	-	0.075 ^b	-0.078 ^a
	休闲娱乐	-	-	-	-	0.089 ^a	-0.073 ^a	-	0.090 ^b	-0.092 ^a
	日常购物	-	-	-	-	0.085 ^a	-0.075 ^a	-0.068 ^c	-	-0.085 ^b
AP6	通勤	-	-	-	-	-	-	0.156 ^a	-	0.162 ^a
	社交	-	-	-	-	-	-	0.154 ^a	-	0.121 ^a
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	0.169 ^a	-	0.160 ^a
	日常购物	-	-	-	-	-	-	0.142 ^a	-0.085 ^b	0.120 ^a
AP7	通勤	-	-	-	-	-	-	-	-0.103 ^a	-
	社交	-	-	-	-	-	-	-	-0.076 ^b	-0.059 ^b
	休闲娱乐	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	日常购物	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注：“-”表示在模型中变量之间不存在联系；^a表示显著性水平为1%，^b表示显著性水平为5%，^c表示显著性水平为10%。

放的CO₂也越多；家庭规模也与拥有小汽车呈显著的正相关关系，但对出行碳排放的影响并不显著；家庭拥有16岁以下孩子的居民在日常购物出行中的出行距离较短，但排放的CO₂量较大，暗示着他们更多倾向于高碳排放的出行方式，例如小汽车；学历越高的居民拥有小汽车的可能性越高，在通勤和社交出行中的出行距离更长，但对出行碳排放的影响并不明显；拥有本地户籍的居民拥有小汽车的可能性也越高，但对出行距离和出行碳排放的影响均不显著；虽然家庭人均月收入越高与拥有小汽车呈显著的正相关关系，但收入水平仅对社交出行碳排放有显著的正向影响；自行车拥有与小汽车拥有之间没有显著的相关关系，拥有自行车的居民在通勤出行中距离较短，但对出行碳排放并没有显著的直接影响。

3.2.2 居民态度与偏好的影响 居民与出行相关的态度对出行碳排放的影响并不大。是否认为“低碳绿色出行是重要的”和是否认为“小汽车出行是身份地位的象征”对居民小汽车拥有并无显著的影响，且对出行距离及其碳排放的影响亦不显著。

相比态度方面，居民与出行相关的偏好则对出行碳排放具有不可忽视的影响，其中，“喜欢公共交通出行”与“喜欢小汽车出行”的影响最为显著。模型结果表明，居民对公共交通出行的偏好对4种类型出行碳排放均具有显著的负向影响，但与出行距离呈正向相关关系。这说明了有公共交通出行偏好的居民在出行中会倾向于选择低碳的公共交通，从而排放较少的CO₂，但使用公共交通的出行距离相比小汽车或非机动化出行方式很可能更长。相反，居民对小汽车出行的偏好则对4种类型出行碳排放具有显著的正

表6 内生变量对内生变量之间的标准化总效应、直接效应和间接效应
Tab. 6 Standardized total, direct and indirect effects of endogenous variables on endogenous variables

内生变量	效应	通勤			社交			休闲娱乐			日常购物		
		CAR	TD	TC	CAR	TD	TC	CAR	TD	TC	CAR	TD	TC
DTC	总效应	-0.119 ^a	0.354 ^a	0.129 ^a	-0.245 ^a	0.197 ^a	0.045	-0.366 ^a	0.135	-0.010	-0.226 ^a	0.069	-0.006
	直接效应	-	0.388 ^a	-	-0.211 ^b	0.233 ^a	-	-0.328 ^a	0.199 ^a	-	-0.207 ^b	0.124 ^b	-
RD	间接效应	-0.119 ^a	-0.034 ^a	0.129 ^a	-0.033 ^a	-0.036 ^b	0.045	-0.038 ^a	-0.065 ^b	-0.010	-0.019	-0.056 ^b	-0.006
	总效应	0.120 ^b	-0.128 ^b	-0.025	0.203 ^a	0.030 ^b	0.057 ^a	0.205 ^a	0.036 ^b	0.065 ^a	0.164 ^a	0.040 ^a	0.051 ^a
LUM	直接效应	0.077 ^c	-0.162 ^c	-	0.208 ^a	-	-	0.216 ^a	-	-	0.175 ^a	-	-
	间接效应	0.043 ^b	0.034 ^a	-0.025	-0.005 ^b	0.030 ^b	0.057 ^a	-0.010 ^b	0.036 ^b	0.065 ^a	-0.011 ^a	0.040 ^a	0.051 ^a
BSD	总效应	-	-	-0.073 ^c	-0.081 ^c	-0.012 ^c	-0.023 ^c	-	-	0.089 ^a	-0.083 ^c	-0.020 ^b	-0.026 ^b
	直接效应	-	-	-0.073 ^c	-0.083 ^c	-	-	-	-	0.089 ^a	-0.088 ^c	-	-
MSD	间接效应	-	-	-	0.002 ^c	-0.012 ^c	-0.023 ^c	-	-	-	0.006 ^b	-0.020 ^b	-0.026 ^b
	总效应	-0.264 ^a	0.338 ^a	0.353 ^a	-0.326 ^a	-0.048 ^b	-0.092 ^a	-0.329 ^a	0.210 ^b	0.038	-0.281 ^a	-0.069 ^a	-0.087 ^a
RND	直接效应	-0.151 ^a	0.413 ^a	0.272 ^a	-0.334 ^a	-	-	-0.269 ^b	0.268 ^a	-	-0.301 ^a	-	-
	间接效应	-0.113 ^a	-0.075 ^a	0.081 ^b	0.008 ^b	-0.048 ^b	-0.092 ^a	-0.059 ^b	-0.058 ^b	0.038	0.019 ^a	-0.069 ^a	-0.087 ^a
CAR	总效应	-0.098 ^a	-0.028 ^a	-0.040 ^a	-0.143 ^b	-0.021 ^b	-0.040 ^a	-0.222 ^a	-0.039 ^b	-0.071 ^a	-0.156 ^a	-0.038 ^a	-0.048 ^a
	直接效应	-0.107 ^a	-	-	-0.146 ^b	-	-	-0.234 ^a	-	-	-0.166 ^a	-	-
TD	间接效应	0.009 ^a	-0.028 ^a	-0.040 ^a	0.004 ^b	-0.021 ^b	-0.040 ^b	0.011 ^b	-0.039 ^b	-0.071 ^a	0.011 ^a	-0.038 ^a	-0.048 ^a
	总效应	0.084 ^a	-0.252 ^a	-0.257 ^a	0.028 ^b	-0.167 ^a	-0.076 ^a	-0.097 ^a	-0.430 ^a	-0.251 ^a	0.042 ^a	-0.152 ^a	-0.070 ^a
CAR	直接效应	-	-0.276 ^a	-0.165 ^b	-	-0.171 ^a	-	-0.218 ^b	-0.412 ^a	-	-	-0.162 ^a	-
	间接效应	0.084 ^a	0.024 ^a	-0.092 ^a	0.028 ^b	0.004 ^b	-0.076 ^a	0.121 ^a	-0.017	-0.251 ^a	0.042 ^a	0.010 ^a	-0.070 ^a
TD	总效应	-0.086 ^a	0.258 ^a	0.370 ^a	-0.024 ^b	0.143 ^b	0.275 ^a	-0.047 ^b	0.168 ^b	0.303 ^a	-0.064 ^a	0.230 ^a	0.290 ^a
	直接效应	-	0.282 ^a	0.276 ^a	-	0.147 ^b	0.210 ^a	-	0.177 ^b	0.224 ^a	-	0.246 ^a	0.184 ^a
TD	间接效应	-0.086 ^a	-0.024 ^a	0.094 ^a	-0.024 ^b	-0.004 ^b	0.065 ^b	-0.047 ^b	-0.008 ^a	0.079 ^b	-0.064 ^a	-0.016 ^a	0.106 ^a
	总效应	-0.306 ^a	-0.086 ^a	0.332 ^a	-0.165 ^b	-0.024 ^b	0.443 ^a	-0.268 ^a	-0.047 ^b	0.447 ^a	-0.260 ^a	-0.064 ^a	0.431 ^a
TD	直接效应	-0.335 ^a	-	0.456 ^a	-0.169 ^b	-	0.489 ^a	-0.282 ^a	-	0.533 ^a	-0.278 ^a	-	0.511 ^a
	间接效应	0.029 ^a	-0.086 ^a	-0.124 ^a	0.004 ^b	-0.024 ^b	-0.046 ^b	0.013 ^b	-0.047 ^b	-0.085 ^a	0.018 ^a	-0.064 ^a	-0.081 ^a

注: -表示在模型中变量之间不存在联系; ^a表示显著性水平为1%, ^b表示显著性水平为5%, ^c表示显著性水平为10%。

向影响,且与小汽车拥有正向相关。这说明,有小汽车出行偏好的居民更可能拥有小汽车,且在出行中倾向于使用高碳的出行方式(例如小汽车)。虽然“喜欢就近上班”对通勤距离具有显著的负向影响,但与排放的CO₂并无显著的相关性。这是因为,即使通勤距离较短,但居民亦有可能使用高碳的出行方式通勤,这将更多取决于居民是喜欢公共交通出行抑或喜欢小汽车出行的偏好。此外,“喜欢步行或自行车出行”对休闲娱乐出行距离及其碳排放具有较为显著的负向影响,但对其他类型出行影响不大。这很可能是因为,通过步行或自行车出行较难满足其他类型出行的需求。例如,虽然居民有步行或自行车出行的偏好,但由于通勤距离过长或其他客观因素的限制,无法通过步行或自行车达到通勤目的。而“喜欢运动和锻炼身体”则对4种类型出行碳排放均无显著影响,这说明,具有运动和锻炼身体偏好的居民并不一定会在出行中选择有益身心健康、低碳环保的出行方式,例如步行或自行车。

以上研究结果说明,居民对低碳绿色出行持如何态度,以及是否把小汽车出行视为身份地位的象征,对出行碳排放的实际影响并不大。而转变居民出行方式选择偏好,由小汽车出行转向公共交通出行,是减少出行碳排放最直接而有效的途径。

3.2.3 建成环境的影响 在考虑了居住自选择效应之后,建成环境对出行碳排放仍然具有显著的影响(总效应)。这些影响有的是对出行碳排放的直接效应,有的则是通过影响小汽车拥有和出行距离进而再转化为对出行碳排放的间接效应(表6)。具体而言,在通勤出行中,社区土地利用混合度、公交站密度和路网密度对其出行碳排放具有直接效应,显著性水平分别为10%、1%和5%;同时,社区到城市公共中心的距离、公交站密度、地铁站密度和路网密度具有显著的间接效应(除公交站密度外,显著性水平均为1%)。但在社交出行、休闲娱乐出行和日常购物出行中,以上建成环境要素对出行碳排放的直接效应并不明显,主要表现为间接效应。也即,虽然建成环境对这些类型出行碳排放没有直接影响,但仍然会通过影响居民小汽车拥有或出行距离进而对其碳排放产生影响。同时,这也说明了建成环境对通勤出行碳排放的影响比其他类型出行的大,且在不同类型出行中的影响机理亦不一样。

从总效应来看,社区到城市公共中心的距离在通勤出行中对碳排放具有正向的总效应(来自间接效应),在社交出行、休闲娱乐出行和日常购物出行中影响不显著。也即,社区到城市公共中心的距离仅对与居住一就业空间距离密切相关的通勤碳排放有影响,且是通过影响居民小汽车拥有和通勤出行距离进而对通勤碳排放产生的间接影响。这很大程度上是因为居民就业地与城市公共中心区位关联较大,而其他出行目的地则更多受居住地影响,与城市公共中心关联较弱,由此对其他类型出行碳排放影响不大。居住人口密度在社交出行、休闲娱乐出行、日常购物出行中对碳排放具有显著的正向总效应,在通勤出行中的影响并不显著,与肖作鹏等^[24]、姜洋等^[25]的研究结论一致,但与Barla等^[23]和Zahabi等^[30]分别在加拿大昆士兰和蒙特利尔的研究结论相反。他们的研究显示居住人口密度具有显著的负向影响作用。这说明,居住人口密度对中国城市居民出行碳排放的影响作用与西方国家不一样。杨文越等关于中国交通碳排放影响因素的宏观层面研究也发现,人口密度对交通碳排放具有正向效应^[54]。这很可能是因为中国城市过高的人口密度导致产生了与西方城市相反的影响效应,例如因人口拥挤而导致的交通拥堵。在美国,Hong的研究就证实了居住人口密度与出行碳排放之间存在先正后负的非线性关系^[26],而Brand等在英国的研究也发现居住人口密度对出行碳排放的影响不显著^[34]。土地利用混合度在通勤出行、社交出行和日常购物出行中均呈现负向总效应,与已有的研究结论基本一致^[24, 28-30];但本文发现,它在休闲娱乐出行中呈现显著的正向总效应(显著性水平

1%)。也即社区土地利用混合度越高,有可能会促使居民在休闲娱乐出行中排放更多的CO₂。这在一定程度上说明,社区土地利用多元化并不能完全抑制所有类型出行的碳排放,它也有可能诱发某些类型出行碳排放的增加。社区公交站密度对居民通勤出行碳排放具有显著的正向总效应,对社交出行碳排放和日常购物出行碳排放则具有显著的负向总效应,与肖作鹏等^[24]对北京的研究结论相似。

表6显示,虽然社区公交站密度对居民小汽车拥有具有显著的负向总效应和直接效应(导致了对社交出行和日常购物出行的碳排放具有负向总效应),但同时也对通勤出行距离具有显著的正向总效应和直接效应(均大于小汽车拥有),由此导致了社区公交站密度越大,居民通勤出行碳排放越多。广州是一个公共交通非常发达的城市,有的社区虽然与城市公共中心距离较远,但同时也拥有较高的公交站密度,例如汇侨社区。也即,虽然这些社区公交供给水平较高,但其居民通勤距离也较长,导致了其通勤出行碳排放较大。因此,虽然提高社区公交站密度可以有效地抑制居民购买小汽车的需求,但未必能进一步减少出行碳排放。而地铁站密度和路网密度对4种类型出行碳排放均具有负向的总效应,与已有的研究结论基本一致^[4, 24, 31]。

以上研究结果证实了建成环境对不同类型出行碳排放的影响机理并不一样:有的建成环境要素可能在某种出行中对碳排放具有显著的影响,但在其他类型出行中则影响不显著;有的建成环境要素可能在这种出行中具有正向的影响,但在另一种出行中则具有负向的影响。因此,相关规划的编制与政策制定需要全面综合考量建成环境在不同类型出行中的影响,而不能仅关注于某一种出行,例如通勤。

4 结论

本文以广州为例,基于社区问卷调查数据和结构方程模型对居民出行碳排放影响机理进行了实证研究,主要得出以下结论与启示:

(1) 与西方国家一样,中国城市也同样存在居住自选择效应。也即居民会根据自己的社会经济属性和态度偏好选择居住在具有不同建成环境特征的社区,从而表现出一定的出行行为规律。在建成环境与出行行为研究中,若忽略了居住自选择效应,很可能会错误地估计(可能是高估,也可能是低估)建成环境的影响作用,从而误导以此为依据的规划与政策制定。

(2) 居民关于“低碳绿色出行是否重要”、“小汽车出行是否身份地位的象征”等与出行相关的态度对出行碳排放的影响并不大,但偏好则对出行碳排放具有非常重要的影响。其中,居民对公共交通出行的偏好对出行碳排放具有显著的负向影响,而对小汽车出行的偏好则具有显著的正向影响。这说明,转变居民出行方式选择偏好,尤其是由小汽车出行向公共交通出行转变,对减少出行碳排放具有至关重要的作用。

(3) 控制居住自选择效应后,建成环境仍然对出行碳排放具有显著的总效应(部分来自直接效应,部分来自通过影响小汽车拥有或出行距离进而产生的间接效应),说明对建成环境要素进行规划干预是非常有必要的。

(4) 在不同类型出行中,建成环境对碳排放的影响并不一样。虽然它们对通勤出行碳排放的影响比其他类型的显著,但应全面考虑其在不同类型出行中的影响,为构建低碳城市空间结构与土地利用模式提供更加科学、客观的依据。

(5) 社区到城市公共中心的距离对通勤出行碳排放具有正向影响,意味着应限制城

市建成区的无序扩张,积极倡导多中心发展,缩短社区与城市公共中心之间的距离,进而减少居民通勤碳排放。同时,适度控制社区居住人口密度对抑制非通勤出行碳排放具有一定的积极作用,因为居住人口密度在社交出行、休闲娱乐出行、日常购物出行中对碳排放具有正向影响。社区土地利用多元化可以有效地满足居民大多数出行需求、缩短出行距离和促进使用低碳的出行方式,但也有可能会诱导部分出行碳排放的增加,例如休闲娱乐出行碳排放。虽然提升社区公交供给水平有利于降低居民购买小汽车的需求,但未必能够有效地减少所有类型出行碳排放,地铁站密度比公交站密度对减少出行碳排放具有更为重要的作用。因此,公交供给充足的社区应以增加地铁建设和扩大地铁服务范围来促进居民低碳出行,增加社区路网密度,摒弃大街区和宽马路,构建尺度适宜、“以人为本”的非机动化出行环境,将有利于引导居民出行行为的转变和低碳出行。

致谢:感谢美国明尼苏达大学曹新宇教授给本文提供了非常宝贵的修改意见!

参考文献(References)

- [1] Wang S, Fang C, Wang Y, et al. Quantifying the relationship between urban development intensity and carbon dioxide emissions using a panel data analysis. *Ecological Indicators*, 2015, 49: 121-131.
- [2] IEA. CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2016. IEA, Paris. http://dx.doi.org/10.1787/co2_fuel-2016-en
- [3] Schwanen T, Banister D, Anable J. Scientific research about climate change mitigation in transport: A critical review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2011, 45(10): 993-1006.
- [4] 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.
- [5] Marsden G, Rye T. The governance of transport and climate change. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(6): 669-678.
- [6] Brand C, Tran M, Anable J. The UK transport carbon model: An integrated life cycle approach to explore low carbon futures. *Energy Policy*, 2012, 41: 107-124.
- [7] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: A synthesis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1780(1): 87-114.
- [8] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.
- [9] 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. [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.]
- [10] 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. [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.]
- [11] Newman P W, Kenworthy J R. Gasoline consumption and cities: A comparison of US cities with a global survey. *Journal of the American Planning Association*, 1989, 55(1): 24-37.
- [12] Kenworthy J R, Laube F B. Automobile dependence in cities: An international comparison of urban transport and land use patterns with implications for sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4): 279-308.
- [13] Ewing R. Is Los Angeles-style sprawl desirable? *American Planning Association. Journal of the American Planning Association*, 1997, 63(1): 107.
- [14] Hughes B, Chambers L, Lansdell H, et al. Cities, area and transport energy. *Road & Transport Research*, 2004, 13(2): 72.
- [15] Newman P. The environmental impact of cities. *Environment & Urbanization*, 2006, 18(2): 275-295.
- [16] 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): 351-367.
- [17] Lu I J, Lin S J, Lewis C. Decomposition and decoupling effects of carbon dioxide emission from highway transportation in Taiwan, Germany, Japan and South Korea. *Energy Policy*, 2007, 35(6): 3226-3235.

- [18] Hankey S, Marshall J D. Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4880-4887.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Modarres A. Commuting and energy consumption: Toward an equitable transportation policy. *Journal of Transport Geography*, 2013, 33: 240-249.
- [22] 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.
- [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] Xiao Zuopeng, Chai Yanwei, Liu Zhilin. Quantitative distribution and related factors for household daily. *Urban Studies*, 2011, 18(9): 104-112. [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.]
- [25] 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. [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.]
- [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): 1-12.
- [27] Chai Yanwei, Xiao Zuopeng, Liu Zhilin. Comparative analysis on CO₂ emission per household in daily travel based on spatial behavior constraints. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(7): 843-849. [柴彦威, 肖作鹏, 刘志林. 基于空间行为约束的北京市居民家庭日常出行碳排放的比较分析. *地理科学*, 2011, 31(7): 843-849.]
- [28] 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. [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.]
- [29] 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. *Urban Planning International*, 2013, 28(2): 25-30. [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. *国际城市规划*, 2013, 28(2): 25-30.]
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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. [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.]
- [33] Ko J, Park D, Lim H, et al. Who produces the most CO₂ emissions for trips in the Seoul metropolis area? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011, 16(5): 358-364.
- [34] 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.
- [35] Brand C. "Hockey Sticks" made of carbon unequal distribution of greenhouse gas emissions from personal travel in the United Kingdom. *Transportation Research Record*, 2009(2139): 88-96.
- [36] 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.
- [37] Cao J. Residential self-selection in the relationships between the built environment and travel behavior: Introduction to the special issue. *Journal of Transport and Land Use*, 2014, 7(3): 1-3.
- [38] Wang D, Lin T. Residential self-selection, built environment, and travel behavior in the Chinese context. *Journal of*

- Transport and Land Use, 2014, 7(3): 5-14.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Stevens J P. *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences*. 5th ed. New York: Routledge, 2012.
- [42] Entwicklungsbank K. *Transport in China: Energy Consumption and Emissions of Different Transport Modes*. Heidelberg: Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, 2008.
- [43] Bagley M N, Mokhtarian P L. The impact of residential neighborhood type on travel behavior: A structural equations modeling approach. *The Annals of Regional Science*, 2002, 36(2): 279-297.
- [44] Cao X, Mokhtarian P L, Handy S L. Do changes in neighborhood characteristics lead to changes in travel behavior? A structural equations modeling approach. *Transportation*, 2007, 34(5): 535-556.
- [45] Van Acker V, Witlox F. Car ownership as a mediating variable in car travel behaviour research using a structural equation modelling approach to identify its dual relationship. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(1): 65-74.
- [46] Wang D, Lin T. Built environments, social environments, and activity-travel behavior: A case study of Hong Kong. *Journal of Transport Geography*, 2013, 31: 286-295.
- [47] Aditjandra P T, Cao X J, Mulley C. Understanding neighbourhood design impact on travel behaviour: An application of structural equations model to a British metropolitan data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, 46 (1): 22-32.
- [48] Aditjandra P T, Cao X J, Mulley C. Understanding neighbourhood design impact on travel behaviour: An application of structural equations model to a British metropolitan data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, 46 (1): 22-32.
- [49] Cervero R, Murakami J. Effects of built environments on vehicle miles traveled: Evidence from 370 US urbanized areas. *Environment and Planning A*, 2010, 42(2): 400-418.
- [50] Mokhtarian P L, Cao X. Examining the impacts of residential self-selection on travel behavior: A focus on methodologies. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, 42(3): 204-228.
- [51] Chowdhury S, Ceder A. A psychological investigation on public-transport users' intention to use routes with transfers. *International Journal of Transportation*, 2013, 1(1): 1-20.
- [52] Ma L, Dill J, Mohr C. The objective versus the perceived environment: What matters for bicycling? *Transportation*, 2014, 41(6): 1135-1152.
- [53] Wu Minglong. *Structural Equation Modeling: The Operation and Application of AMOS*. Chongqing: Chongqing University Press, 2010. [吴明隆. 结构方程模型: AMOS 的操作与应用. 重庆: 重庆大学出版社, 2010.]
- [54] 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. [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.]

The influence mechanism of travel-related CO₂ emissions from the perspective of residential self-selection: A case study of Guangzhou

YANG Wenyue¹, CAO Xiaoshu^{2,3}

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642,

China; 2. School of Geography Science and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Institute of Transport Geography and Spatial Planning, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Numerous studies have examined the influencing factors of CO₂ emissions from transportation at the national, city and community levels. However, fewer studies have considered the effect of residential self-selection. Ignoring this effect is likely to result in underestimating the role of the built environment, thus affecting relevant planning and policy development. Is the effect of residential self-selection in Chinese cities the same as in Western cities? How and to what extent does the built environment affect CO₂ emissions from travel after controlling for the effect of residential self-selection? To address these questions, this paper first measures the CO₂ emissions from travel on the basis of the Travel Intelligent Query System (TIQS) developed by us on the Baidu map LBS (Location Based Service) open platform, and 1239 questionnaires conducted in 15 communities in Guangzhou in 2015. It develops a structural equation model (SEM) to examine the effects of the influencing factors on CO₂ emissions of trips with different purposes. The results show that the effect of residential self-selection also exists in Chinese cities. Changing residents' preference of travel mode will help reduce travel-related CO₂ emissions. After controlling the effect of residential self-selection, the built environment still has significant effects on CO₂ emissions from travel. Although some of them are direct effects, others are indirect effects that work through mediating variables, such as car ownership and travel distance. For different trip purposes, the mechanisms of CO₂ emissions are not the same. Specifically, the distance to city public centers has a significant positive total effect on CO₂ emissions from commuting trips, which is an indirect effect. Residential density significantly affects CO₂ emissions from social, recreational and daily shopping trips, but it has no significant effect on CO₂ emissions from commuting trips. Bus stop density is positively associated with CO₂ emissions from commuting trips, and negatively associated with CO₂ emissions from social and daily shopping trips. In addition, land-use mix has a negative effect on CO₂ emissions from commuting, social and daily shopping trips, and metro station density and road network density have significant negative effects on CO₂ emissions from all types of trip. These results suggest that it is necessary to comprehensively consider the effects of the built environment on CO₂ emissions from different types of trip, and carry out targeted intervention on the built environment in related planning and policy development so as to guide the public to change their travel behavior and to promote low-carbon travel.

Keywords: residential self-selection; built environment; travel-related CO₂ emissions; influence mechanism; Guangzhou