

高海拔地区主动出行碳减排效益研究

杨 灿 王海波*

(西藏大学工学院 西藏拉萨 850000)

摘要 基于马尔康、西宁、拉萨和日喀则4个高海拔城市6389名居民、8858份1日出行日记和10302次出行活动数据,构建“总体关联-分组关联”的双层分析框架,采用混合效应模型与边际效应分析,研究主动出行对个体日常出行CO₂排放的总体关联,比较不同出行目的下出行行为指标与CO₂排放的关联差异。结果表明:(1)在控制个体社会经济属性和交通资源变量后,以自行车为主要出行方式的居民,其个体平均日生命周期CO₂排放较以小汽车为主要出行方式的居民低约75%;(2)与非骑行者相比,偶尔骑行者的CO₂排放约高44.5%,经常骑行者的CO₂排放约低78.5%;(3)主动出行与CO₂排放的关联随出行指标和出行目的而变化,经常骑行和当天骑行在4类目的下均呈负向关联,但自行车出行次数的关联方向随出行目的而变化。

关键词 高海拔地区;主动出行;碳减排;双层分析;日常出行;碳排放

DOI:10.16249/j.cnki.2096-4617.2026.03.009

中图分类号 U491

文献标识码 A

文章编号 2096-4617(2026)03-095-09

引言

在“双碳”目标持续推进和城市绿色转型不断深化的背景下,交通领域碳排放已成为城市低碳治理中不可忽视的重要组成部分^[1,2]。居民日常出行作为交通碳排放的重要来源,出行方式的结构优化被普遍视为实现减排目标的重要路径^[3,4]。与依赖能源替代或车辆技术升级的减排策略相比,步行和骑行等主动出行方式具有低成本、低门槛和多重效益等优势,不仅有助于降低交通活动碳排放^[3,4],还能够改善居民健康并提升城市宜居性^[5-7]。近年来,主动出行的低碳价值已在城市交通与可持续发展研究中受到广泛关注,但相关实证证据主要来自一般城市情境^[3,4],对于高海拔特殊环境下主动出行减排效应的认识仍然不足。

高海拔城市的主动出行具有明显的情境特殊性。低氧环境可能提高步行和骑行的生理负荷^[8],地形起伏会改变出行阻抗^[9],气温、降水、降雪和风等天气条件则会影响居民步行与骑行选择^[10]。这些因素并不一定直接表现为单次出行排放因子,却可能通过出行距离、方式选择、出行目的、设施可达性以及居民对主动出行的接受程度,间接影响交通碳排放水平^[9-11]。在满足居民基本出行需求的前提下,减少不必要的机动化出行并推动适宜距离内的方式转换,是短期交通减排的重要方向。鉴于长期技术解决方案尚未

收稿日期:2026-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(U23A2060);西藏自治区自然科学基金面上项目(XZ202501ZR0051)。

第一作者简介:杨灿,男,汉族,河南信阳人,西藏大学工学院讲师,主要研究方向为高原交通及地质灾害。

通讯作者简介:王海波,男,汉族,山东青岛人,西藏大学工学院讲师,主要研究方向为高原地质与全球变化。

完全实施,短期行为改变显得更为紧迫^[2,12],转向公共交通和主动出行模式已被广泛视为降低交通相关CO₂排放的重要策略^[3,4,13]。推广公共交通和主动出行方式不仅有助于减排,也可产生健康等社会效益^[5-7],相关研究为政策制定和可持续城市发展提供了实证依据,并表明步行、骑行在适宜情境下可替代部分小汽车出行^[3,4,13]。

Cornet等^[14]通过构建可持续交通指标体系,提出由概念化、操作化和应用的3个功能构成的元框架,以支持交通可持续性评价与决策。现有研究也从不同尺度考察了建成环境与出行行为及其碳排放后果,已有研究表明,人口密度、土地利用混合度、道路连通性和公共交通可达性等因素会通过出行距离与方式选择影响交通碳排放^[15,16];目的地可达性、土地利用多样性和街道网络特征与汽车行驶里程、步行及公共交通使用存在关联^[17-19]。在实证方法上,研究已由宏观情景分析逐步拓展至家庭或个体层面的结构方程和多层模型,Liu等^[20]识别了建成环境通过出行行为影响家庭交通能耗的间接路径;Lee等^[21]进一步分析了城市形态与家庭出行CO₂排放的关联;Hankey等^[22]则从城市增长情景估算了乘用车温室气体排放变化。出行目的也被证明会改变建成环境、交通方式与排放之间的关系,北京和达卡的研究分别比较了工作与非工作出行以及工作、上学和其他出行的差异^[23,24];广州的多尺度研究则显示居住地与工作地建成环境对通勤排放的影响并不相同^[25]。总体来看,既有研究仍存在三方面不足:一是相关结论多来自低海拔或一般城市,对高原城市居民日常出行情境的适用性仍需验证;二是出行方式、交通资源条件与日常出行CO₂排放的关联需要结合高海拔城市样本进一步检验;三是有必要区分不同出行目的下的关联差异与实际方式替代的减排效益。

本文选取马尔康、西宁、日喀则和拉萨4个中国高海拔城市,利用居民一日出行调查数据,构建“总体关联-分组关联”的双层分析框架,考察主动出行与个体日常出行CO₂排放的关联。本研究的主要贡献为:①基于高海拔地区居民出行调查数据,结合个体及家庭属性,考察出行特征与日常出行CO₂排放之间的条件关联,补充了既有个体出行研究在中国高海拔城市样本中的区域性证据。②将居民出行划分为工作/上学、个人事务、休闲购物和公务等类型,比较不同活动场景下主动出行与CO₂排放的关联差异,明确不同出行指标的比较对象及其解释边界。③结合不同出行目的的关联差异,将高原气候、地形起伏和空间结构作为政策解释背景,讨论主动出行推广的现实边界、优先场景和设施优化重点,为高原城市低碳交通治理提供情境化参考。

1 研究设计

1.1 研究区概况

本文选取四川省马尔康市、青海省西宁市、西藏自治区拉萨市和日喀则市4个高海拔城市作为研究区域,涵盖青藏高原及其东部边缘的不同城市地理环境。马尔康为阿坝藏族羌族自治州州府,地处川西北高原山地,海拔约2 600 m;西宁位于青藏高原东北部的河湟谷地,海拔约2 261 m。日喀则位于雅鲁藏布江与年楚河交汇附近,海拔约3 840 m;拉萨位于拉萨河谷,海拔约3 650 m。4个城市海拔存在明显差异,为考察不同高原城市背景下的居民出行行为与碳排放关系提供了研究场景。

1.2 数据来源

选取马尔康、西宁、拉萨和日喀则4个中国高海拔城市,数据来源于居民一日出行调查,共记录6 389名受访者的8 858份出行日记和10 302次出行活动,为分析居民日常出行碳排放提供了微观基础。

1.3 变量选取

1.3.1 因变量

本文将个体日常出行CO₂排放作为因变量,综合考虑居民在一天内不同出行活动对应的排放水平,从

而避免仅以单次出行或单一路径替代总体碳排放的局限。

1.3.2 核心解释变量

本本文构建各交通方式出行次数、主导出行方式、骑行频率以及当天是否骑行4类解释变量。通过多维刻画,比较不同出行行为与日常出行CO₂排放的条件关联。

1.3.3 控制变量

为分析主动出行与碳排放的条件关联,本文纳入性别、年龄、收入、就业状况、教育程度、民族、家庭规模等社会经济属性变量,并进一步控制公共交通可达性、小汽车拥有量和自行车拥有量等交通资源变量。

1.4 模型选取

本研究构建了3个回归模型,模型1为未调整的固定效应模型。该模型使用按每日交通方式分类的出行次数作为主要解释变量,每日CO₂排放量作为因变量。模型公式如下:

$$CO_2 = \beta_1 f_{walk} + \beta_2 f_{car} + \beta_3 f_{bicycle} + \beta_4 f_{PT} + \lambda \quad (1)$$

式中, $f_{mode,x}$ 为解释变量,即为按出行模式划分的每日行程; β_i 为回归参数; λ 为残差项。

模型2为调整的混合效应模型,纳入了多个人口统计变量作为控制变量,包括性别、年龄、收入、民族、教育水平、就业状况和家庭规模。模型公式如下:

$$CO_2 = \beta_1 f_{walk} + \beta_2 f_{car} + \beta_3 f_{bicycle} + \beta_4 f_{PT} + \beta_5 X + \lambda \quad (2)$$

式中, β_i 为回归参数, λ 为残差项, X 为性别、年龄、收入、就业、教育、民族和家庭规模等一系列控制变量。

模型3为完全调整的混合效应模型,加入了交通环境相关变量,以进一步考察主动出行与碳排放的关联在更充分控制条件下是否仍然显著。模型公式如下:

$$CO_2 = \beta_1 f_{walk} + \beta_2 f_{car} + \beta_3 f_{bicycle} + \beta_4 f_{PT} + \beta_5 Pta + \beta_5 Ca + \beta_6 Bo + \beta_7 X + \lambda \quad (3)$$

式中, Pta 、 Ca 和 Bo 分别为公共交通可达性、小汽车拥有量和自行车拥有量。若在纳入上述控制变量后主动出行变量仍显著,则说明其与碳排放的条件关联在逐步调整后仍然存在。在出行目的分组分析中,进一步围绕4类出行目的开展分组估计,用以描述不同活动场景下步行和骑行与排放的关联差异。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

从样本基本特征看,4个高海拔城市在性别结构上较为均衡,受访者整体受教育水平较高,就业人口占比较大。从交通资源方面来看,小汽车仍是较常见的家庭交通工具,但步行在日常出行中仍保持较高发生率,表明高海拔城市并未完全进入“汽车主导型”出行阶段。从均值结果看,主动出行总体对应更低的日常出行碳排放,而小汽车出行对应更高的碳排放水平,与低碳交通的一般理论预期一致。同时,样本中不同收入、年龄和职业群体在出行方式上存在显著差异,说明主动出行行为并非均匀分布,而是嵌入在具体的社会经济结构之中(表1)。

2.2 交通方式使用与碳排放

结果显示(表2),CO₂排放与交通方式使用之间存在显著关系。表2(A)表明,步行和自行车次数与日CO₂排放呈负向条件关联,小汽车和公共交通次数呈正向条件关联。模型2和模型3中上述关联方向一致。此外,在模型3中,自行车和小汽车出行次数的系数分别为-0.045和0.661,反映其他变量相同时的条件关联。

为便于解释对数回归系数,本文进一步将相关系数转换为百分比形式。以表2(B)模型3为例,小汽车主导出行方式的系数为0.718,自行车主导出行方式的系数为-0.661,二者系数差为-1.379。对该差值取指数可得 $\exp(-1.379)=0.252$,说明在模型控制条件相同的情况下,以自行车为主要出行方式居民的CO₂

表 1 样本主要测量值、均值和标准差
Table 1 The main measured data, mean, and standard deviation of the sample

影响因素	类型	日常出行 CO ₂ 平均值(标准差)/(kg/d)	百分比
主要交通方式	步行	0.213(0.089)	27%
	汽车	12.568(2.269)	35%
	自行车	2.612(0.271)	16%
	公交车	2.678(1.183)	22%
骑行类别	非骑行者(无)	7.348(0.953)	33%
	偶尔骑行者(每周一到两次)	1.604(0.409)	51%
	经常骑行者(每周三次及以上)	0.793(0.237)	16%
是否骑行	当天未骑行	4.562(1.371)	45%
	当天骑行	1.048(0.343)	55%
性别	男性	3.696(0.518)	49%
	女性	3.180(0.399)	51%
年龄	34 岁及以下	3.090(0.233)	41%
	35~59 岁	3.492(0.329)	50%
	60 岁及以上	3.019(0.314)	9%
年收入	16 k 以下	2.799(0.194)	26%
	16~38 k	2.878(0.223)	61%
	38 k 以上	3.816(0.305)	13%
就业状态	非就业	2.692(0.271)	18%
	就业	3.337(0.296)	82%
教育水平	无高等教育	3.052(0.186)	16%
	有高等教育	3.385(0.376)	84%
民族	其他少数民族	2.426(0.400)	15%
	藏族	3.301(0.339)	47%
	汉族	3.488(0.299)	38%
家庭规模	1~2 人	2.772(0.334)	42%
	3 人及以上	3.389(0.351)	58%
是否持有公共交通卡	是	2.837(0.274)	47%
	否	3.346(0.28)	53%
家庭自行车数量	无	3.090(0.220)	21%
	1~3 辆	2.669(0.284)	52%
	3 辆以上	1.942(0.293)	27%
家庭汽车数量	无	2.550(0.269)	26%
	1~2 辆	3.404(0.209)	49%
	2 辆以上	3.837(0.218)	25%

注:家庭规模原始变量为家庭成员数量,样本均值为 2.62 人。描述性统计中以样本均值作为分组依据,由于家庭成员数量为整数,故“小于 2.62”实际对应 1~2 人家庭,“大于 2.62”实际对应 3 人及以上家庭。
Notes:The original household-size variable represents the number of household members, with a sample mean of 2.62 persons. In the descriptive statistics, the sample mean was used as the grouping criterion. Because the number of household members is an integer, "less than 2.62" actually corresponds to households with 1~2 members, whereas "greater than 2.62" corresponds to households with three or more members.

排放约为以小汽车为主要出行方式居民的 25.2%,即二者之间存在约 74.8% 的排放相对差异。这一结果反映了不同主要出行方式群体之间的横截面关联差异,并不表示同一居民在减少一次小汽车出行并增加一次自行车出行后必然产生 75% 的减排量。表 2(C)结果展示了不同骑行频率类别与日常出行 CO₂排放之间的关联。以非骑行者为参照,在调整社会经济属性和交通资源变量后,模型 3 中偶尔骑行者和经常骑行者的回归系数分别为 0.368 和 -1.537,指数化后分别为 1.445 和 0.215。按自然对数尺度解释,偶尔骑行者的条件几何平均日出行 CO₂排放约高 44.5%,经常骑行者约低 78.5%,上述结果反映不同骑行人群之间的条件关联。表 2(D)显示,以“当天未骑行的居民”为参照,当天骑行变量在模型 1、模型 2 和模型 3 中的回归系数分别为 -0.079、-0.135 和 -0.426,均具有统计显著性($P<0.001$)。在逐步控制社会经济属性和交通资源变量后,当天骑行与较低日常出行 CO₂排放之间的负向关联仍然存在。

表2 4种解释变量的回归模型结果

Table 2 Mixed-effects regression results for the four explanatory variables

变量	模型1		模型2		模型3	
	系数	P	系数	P	系数	P
(A)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与交通方式使用(每天出行次数)的关联						
步行	-0.459	<0.001	-0.460	<0.001	-0.460	<0.001
汽车	0.660	<0.001	0.661	<0.001	0.661	<0.001
自行车	-0.051	<0.001	-0.051	<0.001	-0.045	<0.001
公共交通	0.467	<0.001	0.468	<0.001	0.510	<0.001
(B)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与主导出行方式的关联						
步行	参照组	—	参照组	—	参照组	—
汽车	0.712	<0.001	0.714	<0.001	0.718	<0.001
自行车	-0.648	<0.001	-0.651	<0.001	-0.661	<0.001
公共交通	0.214	<0.001	-0.681	<0.001	-0.660	<0.001
(C)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与骑行频率类别的关联						
非骑行者(无)	参照组	—	参照组	—	参照组	—
偶尔骑行者(每周一到两次)	0.324	<0.001	0.342	<0.001	0.368	<0.001
经常骑行者(每周三次及以上)	-0.538	<0.001	-0.886	<0.001	-1.537	<0.001
(D)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与是否骑行的关联						
当天未骑行	参照组	—	参照组	—	参照组	—
当天骑行	-0.079	<0.001	-0.135	<0.001	-0.426	<0.001

从业居民倾向于选择步行以外的交通方式,而受教育程度较高的居民更倾向于选择积极出行方式,主要表现为骑自行车、步行和公共交通工具。交通卡持有情况和汽车拥有量与日常出行CO₂排放的关联随交通方式而变化,如图1所示。

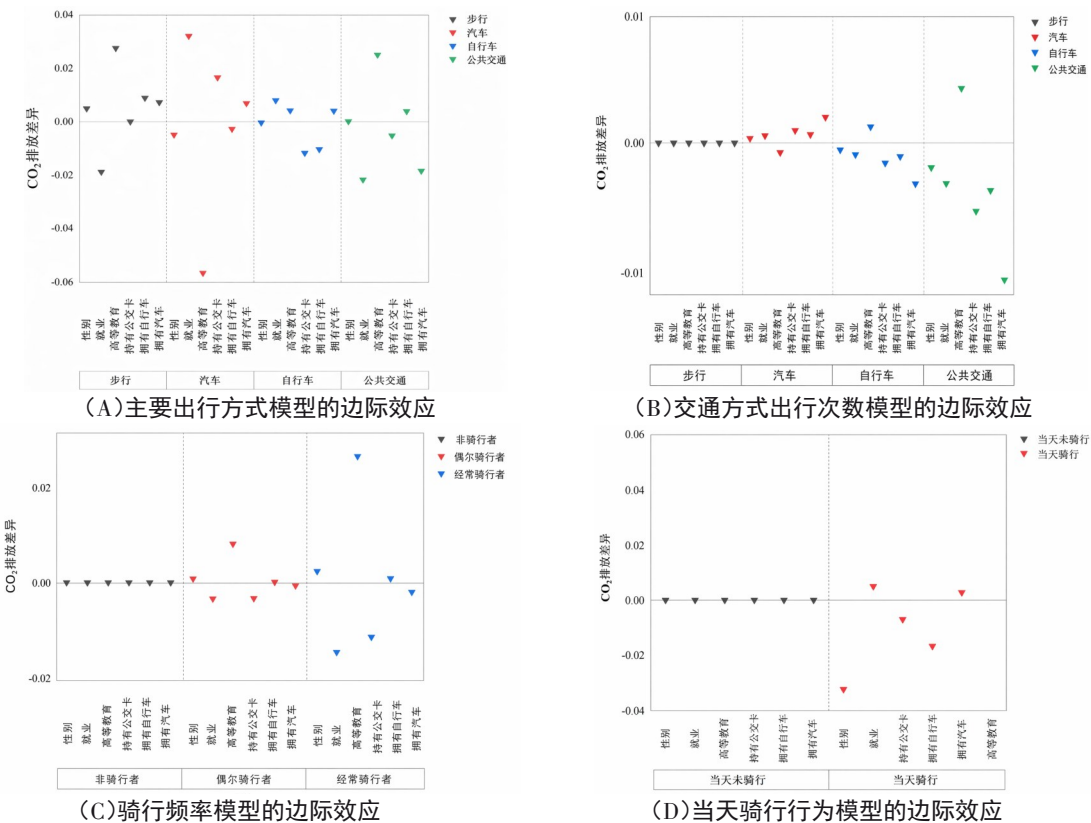


图1 边际效应的统计分析

Fig.1 Statistical analysis of marginal effects

图1(A)展示了主要出行方式模型中不同个体属性与交通资源条件对应的边际效应,其中,公共交通主导组的估计值多数为负,其中高等教育对应的估计值为正,自行车和小汽车主导组均包含正向与负向

估计。结果表明,不同主要出行方式下的排放关联呈现一定差异。图1(B)展示了交通方式出行次数模型中不同个体属性与交通资源条件对应的边际效应,其中,自行车出行次数对应的结果中,持有公共交通卡和拥有自行车的估计值均为负。总体而言,相关排放差异的方向随交通方式和个体条件而变化。图1(C)展示了骑行频率模型中不同个体属性与交通资源条件对应的边际效应,其中,偶尔骑行组和经常骑行组中,就业及持有公共交通卡的估计值均为负,高等教育的估计值均为正。结果表明,不同骑行频率人群的排放差异还与个体属性和交通资源条件有关。图1(D)展示了当天骑行行为模型中不同个体属性与交通资源条件对应的边际效应,其中,当天骑行组中持有公共交通卡和拥有自行车的估计值均为负。

进一步利用路径分析考察主动出行影响碳排放的作用机制,结果表明(图2),交通方式与碳排放之间并非完全是单一直接关系,总出行距离等变量可能在其中发挥部分中介作用。

2.3 不同出行目的下的关联差异

为比较不同活动场景下的关联差异,按个人事务、工作与教育、休闲购物和公务4类出行目的开展分组分析,结果见表3。

表3 不同出行目的下4种解释变量的调整结果
Table 3 Adjusted results of the four explanatory variables for different travel purposes

变量	个人事务		工作与教育		休闲购物		公务	
	系数	P	系数	P	系数	P	系数	P
(A)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与交通方式使用(每天出行次数)的关联								
步行	0.051	<0.001	-1.241	<0.001	0.073	<0.001	-0.824	<0.001
汽车	-0.023	<0.001	2.307	<0.001	-0.012	<0.001	1.879	<0.001
自行车	1.382	<0.001	-0.047	<0.001	1.614	<0.001	-0.021	<0.001
公共交通	1.107	<0.001	0.017	<0.001	0.872	<0.001	-0.381	<0.001
(B)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与交通方式使用(每天出行次数)的关联								
步行	对照组	—	对照组	—	对照组	—	对照组	—
汽车	2.301	<0.001	1.887	<0.001	0.971	<0.001	2.302	<0.001
自行车	3.312	<0.001	0.396	<0.001	2.061	<0.001	2.562	<0.001
公共交通	2.978	<0.001	1.057	<0.001	1.722	<0.001	1.878	<0.001
(C)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与骑行频率类别的关联								
非骑行者(无)	对照组	—	对照组	—	对照组	—	对照组	—
偶尔骑行者(每周一到两次)	0.350	<0.001	-1.192	<0.001	0.491	<0.001	-0.547	<0.001
经常骑行者(每周三次及以上)	-2.286	<0.001	-1.880	<0.001	-0.976	<0.001	-2.253	<0.001
(D)对数变换日常出行CO ₂ 排放量与是否骑行(是/否)的关联								
当天未骑行	对照组	—	对照组	—	对照组	—	对照组	—
当天骑行	-0.512	<0.001	-1.597	<0.001	-0.0510	<0.001	-1.274	<0.001

表3(A)显示,步行和自行车次数在个人事务、休闲购物出行中均呈正向关联,在工作与教育、公务出行中均呈负向关联。不同方式次数的关联随目的变化,不能将骑行次数增加直接解释为对小汽车出行的替代。表3(B)以步行为参照,小汽车、自行车和公共交通主导组在4类目的下均呈正向关联。主要出行方式的排放关联需结合具体目的判断。表3(C)显示,骑行频率与CO₂排放的关联随出行目的而变化。以“非骑行者”为参照,经常骑行者在个人事务、工作与教育、休闲购物和公务4类出行目的下均呈负向关联;偶尔骑行者在工作与教育和公务出行中呈负向关联,在个人事务和休闲购物出行中呈正向关联。表3(D)中,相较于当天未骑行者,当天骑行在4类出行目的下的点估计均为负。

图3展示了不同出行目的下的CO₂排放差异估计,反映不同活动场景中的关联方向与幅度。图3(A)显示,主要出行方式与排放的关联方向随出行目的变化。在4类出行目的中,自行车和小汽车主导组相对

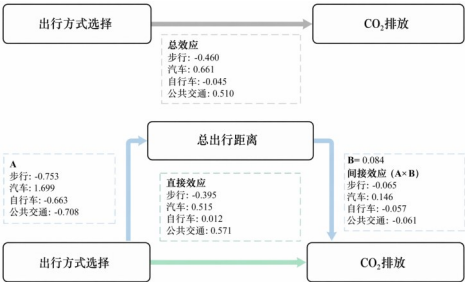


图2 路径分析结果
Fig.2 Path analysis results

于步行组的点估计均为正。图3(B)显示,步行次数在4类出行目的下均对应负向估计,其中公务出行的负值幅度最大。自行车次数在工作与教育和公务出行中为负,在个人事务和休闲购物中为正。图3(C)显示,经常骑行者在4类出行目的下均对应负向估计;偶尔骑行者在工作与教育和公务出行中为负,在个人事务和休闲购物中为正,呈现出方向差异。图3(D)显示,当天骑行在4类出行目的下均对应负向估计,其中工作与教育出行的负值幅度最大,公务出行次之,休闲购物最小,表明其关联幅度存在目的差异。

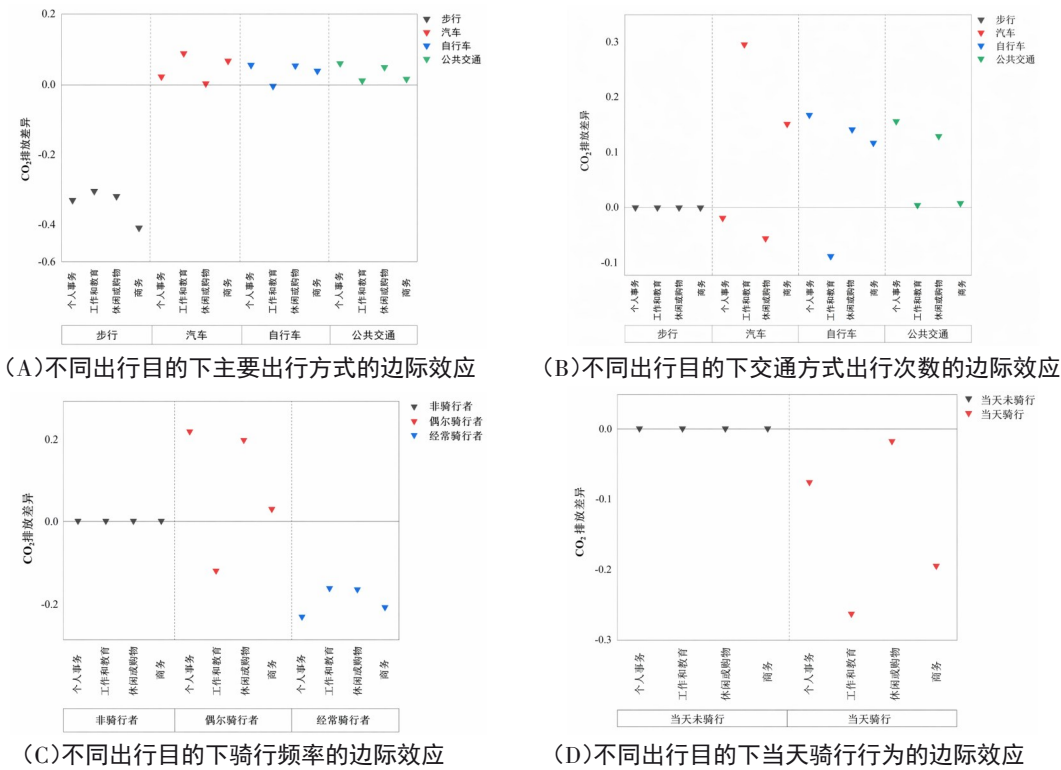


图3 边际效应的统计分析
Fig.3 Statistical analysis of marginal effects

2.4 日常骑行行为与 CO₂排放的关联

表 2(D)显示,以“当天未骑行的居民”为参照,当天骑行变量在模型 1、模型 2 和模型 3 中的回归系数分别为-0.079、-0.135 和 -0.426,均具有统计显著性($P<0.001$)。在逐步控制社会经济属性和交通资源变量后,当天骑行与较低日常出行 CO₂排放之间的负向关联仍然存在。图 1(D)进一步展示了是否骑行模型中不同个体属性与交通资源条件对应的边际效应,其中,当天骑行组中持有公共交通卡和拥有自行车对应的边际效应估计值为负。总体而言,结果支持当天骑行者具有较低排放水平的统计关联,但基于横断面数据的群体比较,尚不能将其解释为同一居民增加一次骑行所产生的因果减排效应。

2.5 不同出行目的下的异质性分析

表 3(C)与图 3(C)显示,骑行频率与 CO₂排放的关联随出行目的而变化。以“非骑行者”为参照,经常骑行者在个人事务、工作与教育、休闲购物和公务 4 类出行目的下均呈负向关联;偶尔骑行者则在工作与教育、公务出行中呈负向关联,在个人事务和休闲购物出行中呈正向关联。表 3(D)与图 3(D)进一步表明,相较于当天未骑行者,当天骑行者 4 类出行目的下均对应较低的 CO₂排放。从图 3(D)的点估计可以看出,工作与教育、公务出行中的负向排放差异幅度较大,个人事务次之,休闲购物较小。结果表明,骑行与较低排放的关联取决于具体行为指标和活动场景,不能统一概括为弹性出行比刚性出行具有更大的减排效益。此外,不同目的之间的幅度比较属于描述性结果,其组间差异是否具有统计显著性仍需进一步检验。

3 讨论

本文基于6 389名受访者的8 858份1日出行日记和10 302次出行活动,发现交通方式、骑行频率及当天是否骑行与居民日常出行CO₂排放存在统计关联。总体模型显示,以自行车为主要出行方式、经常骑行以及当天发生骑行行为的居民通常具有更低的CO₂排放。不同出行目的模型进一步表明,这种低碳关联并非在所有活动场景和所有指标下均保持一致。尤其在个人事务和休闲购物场景中,自行车出行次数系数为正,说明弹性活动中的骑行次数增加可能反映额外活动、出行链延伸或较长距离出行,并不代表小汽车出行的直接替代。本研究补充了高海拔城市主动出行与碳排放关系的区域性证据,显示不同出行指标及出行目的下的关联存在差异,为结合高原环境特点讨论低碳交通治理提供参考。高原地区的自然环境、热舒适条件、地形坡度和组团式空间结构,对主动出行推广提出了更高要求。

基于上述结果,本文提出以下建议:①高海拔城市应优先提升主动出行环境的气候适应性与舒适性,通过防滑、避风、遮阳和休憩设施完善,降低居民在高寒和强紫外线环境下进行步行和骑行的阻力^[9-11]。②结合社区生活圈建设、混合用地与近邻服务配置,缩短日常活动距离,提升个人事务和休闲购物等场景下主动出行替代小汽车的可能性^[26,27]。③结合高原地形与组团空间特征,推动慢行系统与公共交通协同布局,增强主动出行网络的可达性和连续性^[28,29]。④在政策实施中还应兼顾青年人群、通勤人群以及老年群体和弱势群体的差异化需求,提高低碳交通体系的公平性和包容性。此外,本研究存在以下两个方面的局限性:第一,基于一日出行日记开展横截面分析,易漏报且缺乏长期动态与因果验证;第二,主要针对成年人而忽视了青少年等其他群体,未将电动车、网约车等新型交通方式纳入考量,也没有计算由积极出行可能引发的饮食碳排放增加。

参考文献

- [1] 黄黎晨,曹乔松.碳中和目标下交通领域绿色发展对策分析[J].城市交通,2021,19(5):36-42.
- [2] Chapman L. Transport and climate change: a review[J]. Journal of transport geography, 2007, 15(5): 354-367.
- [3] Brand C, Dons E, Anaya-Boig E, et al. The climate change mitigation effects of daily active travel in cities[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 93: 102764.
- [4] Brand C, Götschi T, Dons E, et al. The climate change mitigation impacts of active travel: Evidence from a longitudinal panel study in seven European cities[J]. Global environmental change, 2021, 67: 102224.
- [5] Woodcock J, Edwards P, Tonne C, et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: urban land transport[J]. The lancet, 2009, 374(9705): 1930-1943.
- [6] De Nazelle A, Nieuwenhuijsen M J, Antó J M, et al. Improving health through policies that promote active travel: a review of evidence to support integrated health impact assessment[J]. Environment international, 2011, 37(4): 766-777.
- [7] De Hartog J J, Boogaard H, Nijland H, et al. Do the health benefits of cycling outweigh the risks?[J]. Environmental health perspectives, 2010, 118(8): 1109.
- [8] Bärtsch P, Saltin B. General introduction to altitude adaptation and mountain sickness[J]. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 2008, 18: 1-10.
- [9] Parkin J, Wardman M, Page M. Estimation of the determinants of bicycle mode share for the journey to work using census data[J]. Transportation, 2008, 35(1): 93-109.
- [10] Böcker L, Dijst M, Prillwitz J. Impact of everyday weather on individual daily travel behaviours in perspective: a literature review[J]. Transport reviews, 2013, 33(1): 71-91.
- [11] Heinen E, Van Wee B, Maat K. Commuting by bicycle: An overview of the literature[J]. Transport reviews, 2010, 30(1): 59-96.
- [12] Schwanen T, Banister D, Anable J. Rethinking habits and their role in behaviour change: the case of low-carbon mobility[J]. Journal of transport geography, 2012, 24: 522-532.

- [13] Scheepers C E, Wendel-Vos G C W, Den Broeder J M, et al. Shifting from car to active transport: a systematic review of the effectiveness of interventions[J]. *Transportation research part A: policy and practice*, 2014, 70: 264–280.
- [14] Cornet Y, Gudmundsson H. Building a metaframework for sustainable transport indicators: Review of selected contributions[J]. *Transportation Research Record*, 2015, 2531(1): 103–112.
- [15] 敖仪斌,周仲礼,王艳. 建成环境对居民出行碳排放的影响研究进展[J]. *科技导报*, 2022, 40(4): 94–105.
- [16] 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.
- [17] Ewing R, Cervero R. Travel and the built environment: A meta-analysis[J]. *Journal of the American planning association*, 2010, 76(3): 265–294.
- [18] Cao X, Mokhtarian P L, Handy S L. Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: a focus on empirical findings[J]. *Transport reviews*, 2009, 29(3): 359–395.
- [19] Handy S L, Boarnet M G, Ewing R, et al. How the built environment affects physical activity: views from urban planning[J]. *American journal of preventive medicine*, 2002, 23(2): 64–73.
- [20] Liu C, 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.
- [21] Lee S, Lee B. The influence of urban form on GHG emissions in the US household sector[J]. *Energy policy*, 2014, 68: 534–549.
- [22] Hankey S, Marshall J D. Impacts of urban form on future US passenger-vehicle greenhouse gas emissions[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4880–4887.
- [23] 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[J]. *Habitat International*, 2015, 47: 1–10.
- [24] Ashik F R, Rahman M H, Kamruzzaman M. Investigating the impacts of transit-oriented development on transport-related CO₂ emissions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 105: 103227.
- [25] 杨文越,梁斐雯,曹小曙. 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[J]. *地理研究*, 2020, 39(7): 1625–1639.
- [26] Matsushashi K, Ariga T. Estimation of passenger car CO₂ emissions with urban population density scenarios for low carbon transportation in Japan[J]. *IATSS Research*, 2016, 39(2): 117–120.
- [27] Neves A, Brand C. Assessing the potential for carbon emissions savings from replacing short car trips with walking and cycling using a mixed GPS-travel diary approach[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 123: 130–146.
- [28] Kwan S C, Tainio M, Woodcock J, et al. The carbon savings and health co-benefits from the introduction of mass rapid transit system in Greater Kuala Lumpur, Malaysia[J]. *Journal of Transport & Health*, 2017, 6: 187–200.
- [29] Santos G, Behrendt H, Teytelboym A. Part II: Policy instruments for sustainable road transport[J]. *Research in Transportation Economics*, 2010, 28(1): 46–91.

A Study on Carbon Emission Reduction Benefits From Active Travel in High-Altitude Regions Based on a Two-Level Analytical Framework

YANG Can WANG Haibo*

(School of Engineering, Xizang University, Lhasa 850000, China)

Abstract: Based on data from 6 389 residents, 8 858 one-day travel diaries, and 10 302 trip activity records in four high-altitude cities—Maerkang, Xining, Shigatse, and Lhasa—we developed a two-level analytical framework distinguishing overall associations from purpose-specific associations. Mixed-effects regression and marginal-effects analysis were employed to examine the overall association between active travel and individual daily travel-related CO₂ emissions and to compare these associations across different travel purposes. The results show that: (1) after controlling for individual socioeconomic characteristics and transport-resource variables, residents who primarily use bicycles as their mode of transportation had a conditional geometric mean of daily travel-related CO₂ emissions approximately 75% lower than that of residents who primarily travelled by car; (2) compared with non-cyclists, occasional cyclists had approximately 44.5% higher conditional geometric mean daily CO₂ emissions, whereas frequent cyclists had approximately 78.5% lower emissions; (3) the associations between active travel and CO₂ emissions vary by travel indicator and purpose: frequent cycling and cycling on the survey day are negatively associated with emissions across all four purposes, whereas the association with cycling trip frequency differs by purpose.

Keywords: high-altitude regions, active travel, carbon emission reduction, two-level analysis, daily travel, carbon emissions

[责任编辑:张建伟]