

建成环境对步行和自行车出行的影响 ——以波哥大为例

Robert Cervero¹, Olga L. Sarmiento², Enrique Jacoby³, Luis Fernando Gomez⁴, Andrea Neiman⁵ 著 耿雪⁶ 译
(1.加州大学伯克利分校城市和区域规划系,美国 加利福尼亚州 伯克利 94720; 2.安第斯大学医学院,哥伦比亚 波哥大 111711; 3.泛美卫生组织,美国 华盛顿特区 20037; 4.艾伯特基金会哥伦比亚协调办公室,哥伦比亚 波哥大 111311; 5.伊利诺伊大学芝加哥分校公共卫生学院,美国 伊利诺伊州 芝加哥 60607; 6.中国城市规划设计研究院,北京 100037)

摘要: 哥伦比亚波哥大以可持续的城市交通系统闻名,包括其密集的自行车道网络以及 Ciclovía 系统——为骑车者和行人预留的道路空间,可在星期日和节假日休闲出行使用。探讨此类设施以及建成环境的其他属性——城市密度、混合用地、可达性以及与公共交通车站的距离——如何影响步行和自行车出行行为以及 Ciclovía 的使用。结果表明,道路设施设计要素例如道路密度、连通性、与 Ciclovía 车道的距离,与体力活动相关;而建成环境的其他属性如密度和用地混合程度,对体力活动影响甚微。这可能是由于波哥大建成区的大部分街区均在非机动交通出行占绝对优势的时期演变发展——紧凑、用地混合、交通可达性水平相似。由此可见,影响非机动交通出行的因素是设施设计而非一般的街区用地属性。

关键词: 建成环境; 自行车出行; 健康; 体力活动; 公共交通; 步行

Influences of Built Environments on Walking and Cycling: Lessons from Bogotá

Written by Robert Cervero¹, Olga L. Sarmiento², Enrique Jacoby³, Luis Fernando Gomez⁴, Andrea Neiman⁵, Translated by Geng Xue⁶

(1. Department of City and Regional Planning, University of California, Berkeley CA 94720, USA; 2. Faculty of Medicine, University of Los Andes, Bogotá 111711, Colombia; 3. Pan-American Health Organization, Washington DC 20037, USA; 4. Foundation FES Social, Bogotá 111311, Colombia; 5. School of Public Health, University of Illinois, Chicago IL 60607, USA; 6. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

Abstract: Bogotá, Colombia, is well known for its sustainable urban transport systems, including an extensive network of bike lanes and set-aside street space for recreational cyclists and pedestrians on Sundays and holidays, called *Ciclovía* (“cycleway”). This paper examines how such facilities along with other attributes of the built environment—urban densities, land-use mixes, accessibility, and proximity to transit—are associated with walking and cycling behavior as well as Ciclovía participation. We find that whereas road facility designs, like street density, connectivity, and proximity to Ciclovía lanes, are associated with physical activity, other attributes of the built environment, like density and land-use mixtures, are not. This is likely because most neighborhoods in built-up sections of Bogotá evolved during a time when non-automobile travel reigned supreme, meaning they are uniformly compact, mixed in their land-use composition, and have comparable levels of transport accessibility. Thus facility designs are what sway nonmotorized travel, not generic land-use attributes of neighborhoods.

Keywords: built environment; cycling; health; physical activity; transit; walking

收稿日期: 2016-06-17

作者简介: Robert Cervero(1951—),男,美国人,博士,教授,加州大学交通中心主任,主要研究方向: 交通规划、可持续交通政策与规划、交通与土地利用。E-mail: robertc@berkeley.edu

译者简介: 耿雪(1982—),女,辽宁辽阳人,硕士,工程师,主要研究方向: 城市交通规划。

E-mail: gengxue1314@gmail.com

文章来源: International Journal of Sustainable Transportation, 2009 年第 3 卷第 4 期 203–226 页, Taylor & Francis LLC (<http://www.tandfonline.com>) 版权所有, 文章链接: <http://dx.doi.org/10.1080/15568310802178314>

1 波哥大先进的交通系统

波哥大是哥伦比亚安第斯山区的首府，居住人口700万人，拥有国际公认的先进、可持续的交通系统。尤其是千禧年快速公交系统(TransMilenio，长55 km)，被很多文献作为快速公交(Bus Rapid Transit, BRT)的典范^[1-4]。同样知名的还有波哥大世界级的自行车道网络。1990—2002年，波哥大投入1.8亿美元用于自行车道建设，相当于同期全美国自行车基础设施投资额的50%^[1]。

目前，波哥大拥有自行车专用车道(Cicloruta)291.3 km。一份由荷兰给出的远期规划显示未来30年波哥大自行车专用车道长度将翻倍。即使在城市边缘地区的农田也将看到世界级的自行车交通设施，目的是为了在即将到来的城镇化中促进自行车出行、抑制机动车出行，以及在年轻人和无车一族中植入自行车出行意识^[5]。

高密度的自行车道网络以及人性化的环境促进了自行车出行。波哥大位于安第斯山脉的高原地区，有着温和的赤道气候。城市3/4的日出行量出行距离在10 km以内，由于城市交通拥堵，在这一出行距离内自行车比小汽车更具优势。1996—2003年，波哥大自行车出行比例由0.58%上升至4.4%^[3]。尽管在拉丁美洲属于较高比例，但波哥大自行车出行还远落后于哥本哈根、阿姆斯特丹等世界级自行车城市，这些城市的自行车出行比例达到出行总量的25%^[6-7]，且高达50%的非步行出行距离低于4 km^[8]。此外，波哥大还存在影响自行车出行的显著不利因素，包括城市海拔高(2 600 m)、每年两个雨季、空气污染以及公众对交通安全的担忧。

为了进一步促进自行车出行和休闲活动，波哥大在星期日和节假日日间的7小时封闭121 km长的主要道路。这些无车通道被称为Ciclovía(西班牙语“自行车专用车道”)，供步行、跑步、轮滑、婴儿车使用。同时还考虑行人的需求，在几位积极且具有改革思想的市长(如恩里克·潘纳罗萨、安塔纳斯·莫库斯)的领导下，投入了可观的公共基金用于改造公共广场、街心公园以塑造更具吸引力的街道景观。2001—2003年，城市人均绿地面积从 $2.5 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 提高至 $4.1 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ，向设定的2013年 $8 \text{ m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ 的目

标迈进^[9]。城市核心区普遍安装隔离桩，避免小汽车占用人行道或自行车道停车。通过建设高架人行廊道、人行道、自行车道，以提高快速公交车站的可达性，同时辅之以有吸引力的景观和砖块铺装。

2 研究内容

本文探讨波哥大建成环境如何对步行、自行车出行以及Ciclovía使用产生影响，包括密度、用地混合和设计要素(自行车道及人行道设施)。步行和自行车对交通和环境方面的益处已经在交通拥堵和环境污染严重的发展中国家得到印证。除此之外，步行和自行车还对公众健康有潜在的益处，根据文献[10]数据，全球80%的死亡原因是慢性疾病，例如中低收入国家多发的心脏衰竭和中风。尽管体力活动有益于身体健康，但波哥大大部分的成年人缺少运动。近期一项全国调查显示，波哥大每日体力活动量达到推荐最低值的成年人比例不足50%^[11]。大量女性、受教育程度低的居民，以及生活在最贫困和生活条件最差社区的人极少出于休闲和娱乐目的步行或骑自行车。

在发达国家尤其是美国，大量研究指出建成环境是非机动交通出行的显著影响因素^[12-13]。旧金山湾区的一项研究显示，密度、用地以及街道连通性对促进出行距离小于5英里(约8 km)的步行和自行车出行有中等程度影响，而个人及家庭属性是更显著的影响因素^[14]。一项针对亚特兰大体力活动的测度结果显示，用地混合程度、居住密度，以及街道交叉口密度与每日适度运动的时间呈正相关关系^[15]。研究进一步指出，方格网街道可以降低出行距离、提供可选路径，因此有利于步行和自行车出行，同时降低机动车出行速度^[16]。近期针对北卡罗来纳州的一项分析显示，为“主动交通”(active transportation)设计的社区对步行和自行车出行产生最显著的影响，其中的低收入群体每周相应的出行时间至少为150 min^[17]。

这些有关建成环境与步行和自行车出行之间关系的研究同样适用于像波哥大这样的发展中国家吗？尽管近年波哥大经济有所增长，但大量居民还在为生计每日奔波，超过50%的家庭还生活在贫困线以下。对很多人

来说，无论城市环境如何，步行和自行车出行是一种必然选择。因此，城市景观设计可以显著影响体力活动的假设对于像波哥大这样的城市可能并不显著。如果是这样，在发达城市得到的研究结果与经济落后城市可能存在本质的不同。文献[18]研究显示，在发展中国家，收入越低，出于休闲和娱乐目的步行和骑自行车的人群越少。尽管如此，很少有研究探讨发展中国家影响步行和自行车刚性出行(例如通勤、通学、日常购物等非休闲目的)的因素。

另一种可能是在缺少城市规划或者严格执行用地规制(例如分区)传统的情况下，发展中国家的很多城市已发展适应步行和自行车的出行环境。波哥大仅约1/5的家庭拥有小汽车，紧凑、混合用地开发致使利用步行可以快速、方便地到达很多目的地。因此，在波哥大这样的城市，密度、用地混合程度、针对社区的城市设计等因素很难显著影响出行选择。相反，收入、小汽车拥有率等社会人口因素可能是出行的决定性因素。在波哥大，一些特定的设施，例如某些街区的自行车专用车道、高密度街道网络，可能是解释出行行为的边际因素。本文将对这些因素展开分析。

迄今为止，极少有研究对第一世界国家之外的区域展开建成环境与非机动交通关系的研究。本文试图填补这项空白。下一章首先将介绍本文研究思路，探讨波哥大建成环境对步行和自行车出行以及Ciclovía使用的影响。其次构建3个模型：步行刚性出行模型、自行车刚性出行模型和Ciclovía使用(主要是休闲目的)模型。最后，针对本文研究结果探讨对政策的启示。

3 研究思路与方法

本章首先评述选择街区和家庭样本的方法，以便研究建成环境如何影响波哥大步行和自行车出行以及Ciclovía使用。其次对核心数据的调查方法进行讨论，筛选描述建成环境的变量，并分析建模方法。

3.1 样本选取方法

由于开展本研究需要的建成环境数据成本极高且整理整个城市的数据非常耗时，因

此选择多阶段分层抽样(multistage stratified sampling)方法代替。波哥大划分为120个行政区，大致等同于人口普查区域的规模。基于能力测试(power test)，随机选取30个典型街区作为样本。首先根据4个变量对街区进行分类，变量包括社会经济属性、地形平均坡度、与快速公交车站的临近程度，以及公园情况。由于步行和自行车出行在这些方面差异很大，因此选取这四个分层变量。文献[19]研究表明，波哥大居民步行和自行车出行比例因地势和人口统计特征呈现差异。此外，有研究揭示体力活动水平受到公园可达性的影响^[20-21]，同时波哥大居民很重视居住在快速公交车站步行距离范围内^[22-23]。通过分析波哥大所有街区这些变量的柱状图，得到4个分层变量的分界点：1)社会经济属性：低(阶层2)，中(阶层3~4)，高(阶层5)；2)平均坡度： $\leq 10\%$ ， $> 10\%$ ；3)与快速公交车站的临近程度： $\leq 500\text{ m}$ ， $> 500\text{ m}$ ；4)公园情况：公园面积率 $\leq 6\%$ ，公园面积率 $> 6\%$ 。将街区划分成不同组后，使用分层抽样方法即可随机抽取案例街区。选取的30个典型样本街区如图1所示。

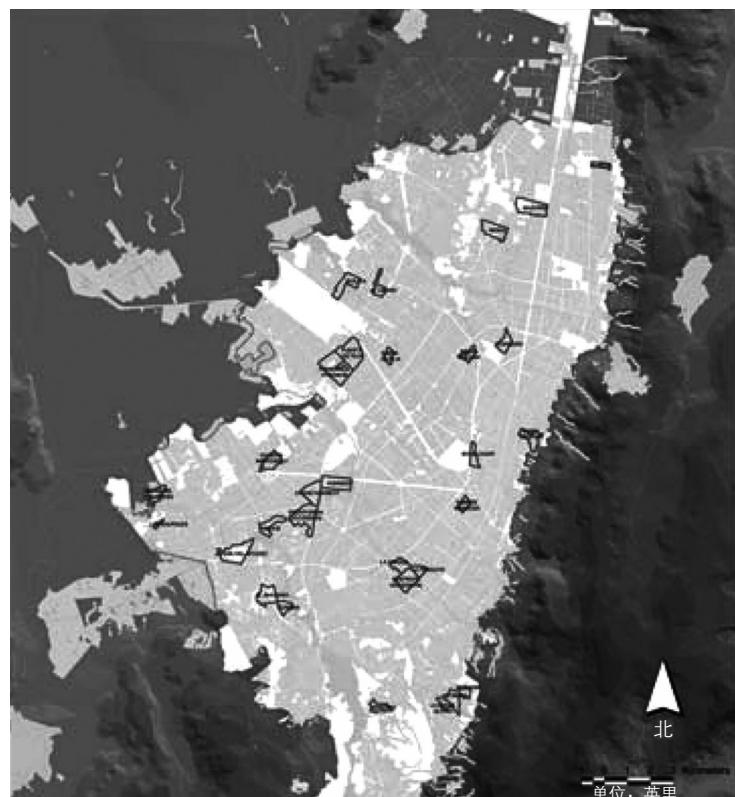


图1 波哥大30个样本街区区位

Fig.1 Locations of 30 selected neighborhoods in Bogotá

在抽样第二阶段，在每个样本街区中随机选取5个区块，每个区块中随机选取10户家庭。这些家庭满足至少有1个成年人且在该街区居住时间至少达到1年以上。接着联系这些样本家庭安排时间进行入户调查，调查对象为所有年满18岁的家庭成员。调查共联系了2 000个受访者，其中1 500人给予反馈，样本回收率为66.7%。

3.2 调查方法

为获得样本家庭步行和自行车出行信息，对国际体力活动调查问卷(International Physical Activity Questionnaire, IPAQ)进行调整。IPAQ被用于进行全国性的体力活动问卷调查。一项针对在12个不同国家使用IPAQ的研究显示，IPAQ是可靠、有效的获得体力活动数据的问卷调查方法^[24]。本文针对IPAQ的长版本进行调整，并使用认知询问方法(cognitive interview technique)进行评估。波哥大使用的调查版本针对每种类型体力活动设置一个日志表格，以每日持续时间(min)表示。体力活动类型包括步行刚性出行、自行车刚性出行，以及在过去1个月内使用Ciclovía的情况(包括4个星期日和1个节日)。

针对研究人口的子样本，使用单轴计算机科学与应用公司(Uniaxial Computer Science and Application, Inc.)的加速计(型号CSA7164)对调整后的IPAQ问卷反馈进行有

效性测试。从符合条件的家庭中随机选取300个成年人，其中160个同意佩戴加速计。然而，仅有41人使用加速计的时间超过5天且总时长超过600 min。IPAQ问卷调查反馈与加速计客观测量结果之间的斯皮尔曼相关系数为0.42($p=0.006$)，这与在其他12个国家进行的IPAQ验证^[24]得到的中位数相当。第一次IPAQ调查后1周进行可靠性重测，斯皮尔曼相关系数为0.69($p<0.001$)，低于在其他12个国家的分析结果^[24]。

获得被试者同意后通过面对面访谈的形式开展问卷调查。佩戴加速计的被试者签署一份同意书，由此获得其体力活动水平的记录。同时向所有被试者赠送一件T恤，作为参与调查的小礼品。哥伦比亚安第斯大学(Universidad de los Andes)审查委员会(Institutional Review Board)负责对所有协议书和问卷进行审阅与核准。

3.3 变量筛选方法

本文应用一种生态方法对步行和自行车行为进行建模，用以描述每周非机动交通出行时间(min)，模型变量包括建成环境属性、社会经济、态度、政策^[25]。为便于建模，将步行和自行车刚性出行看作二元变量。关注被试者在过去一周内每天步行或自行车刚性出行时间超过30 min的天数是否达到5天以上。

预测变量分成两类：1)有关个人和家庭的变量；2)有关街区的变量。个人属性(性别、年龄等)和家庭属性(社会经济状况)可通过IPAQ调查获得。街区属性主要涉及用地和建成环境变量，从波哥大地籍科(Cadastre Department)获取数据并利用GIS进行分析。

本文基于文献[26]提出的3D模型“密度-多样性-设计”(density, diversity, and design)进行延展，用以描述建成环境属性。另外增加两个“D”：与公共交通车站的距离(distance to transit)和目的地可达性(destination accessibility)，前者描述快速公交服务如何吸引出行者步行到达和离开，后者描述出行者在街区之外进行活动的方便程度。当然，这些变量并非不相关，毕竟高密度开发通常也会伴随用地的多样性、以人为本的设计、与其他地点临近，以及高服务水平的公共交通。由于5D实际上在韦恩图中

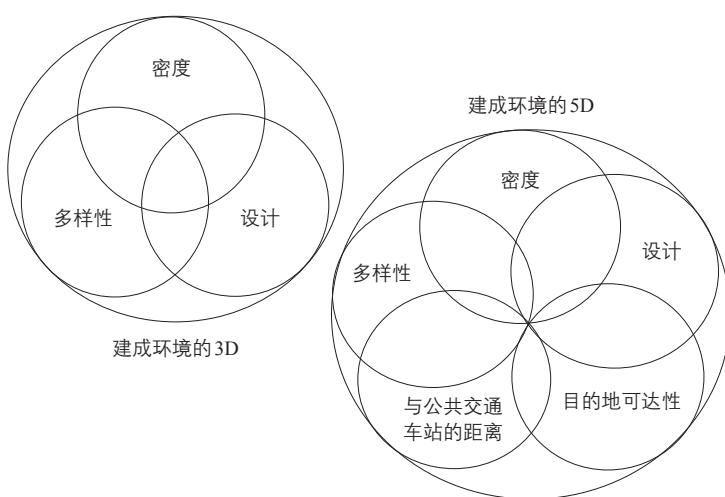


图2 建成环境从3D扩展至5D：密度、多样性、设计、目的地可达性，以及与公共交通车站的距离

Fig.2 Expanding from three to five “Ds” of built environments: Density, diversity, design, destination accessibility, and distance to transit

存在相互重叠(见图2), 即显性变量有相当一部分是相关的, 因此首先对39个不同的建成环境变量进行相关性分析得到公共方差。将39个变量划分为5D模型中的不同类别(见表1)。例如设计层面, 邻里缓冲范围(neighborhood buffers)变量包括与设施条件(如公园面积)、街道设计(如3条、4条、5条道路相交的交叉口比例, 街道连通性指标, 路线直线系数(route directness indices), 方格状街区比例), 以及行人安全性(如事故率)相关的变量。

所有的建成环境变量测算范围为: 1)基本缓冲区, 针对30个样本街区随机选择的区块, 以每个区块形心500 m半径形成的缓冲圈; 2)扩展缓冲区, 由样本街区边界向外扩展1 km直线距离(见图3)形成的区域, 这一范围与人口普查区域规模相当。前者用于描述住宅周边的建成环境属性, 后者用于描述1 km缓冲圈的建成环境属性, 因为人们偶尔可能会步行或骑自行车去更远的地点, 例如社区公园、购物中心。在30个样本街区中, 扩展缓冲区的平均面积为604.6 hm², 离散程度适中(标准差为123.6 hm²)。

针对90个区块及其500 m基本缓冲区获取建成环境变量。这些区块中参与IPAQ调查的居民为1 285人。之所以少于原始样本(30个街区×5个区块=150区块)是由于为了获得足够的统计效力, 将少于10户家庭的区块与共享缓冲区的临近区块进行合并。每个样本区块内涉及的居民为10~27人, 均值为

14人。针对27个更大的分析单元(1 km扩展缓冲区), 共有1 315人完成调查。扩展区域涉及的居民为31~61人, 均值为49人。

为计算选择模型的优势比, 将建成环境变量均转换为二元变量或三元变量。这样可以有效地消除不同测量尺度的影响, 使不同层面建成环境变量的相对重要性在描述步行和自行车出行选择时具有可比性。基于分位或柱状图显示的分布变化点确定建成环境变量的各段分界点。同时还利用LOESS曲线(例如鲁棒性、局部加权回归等^[27])对建成环

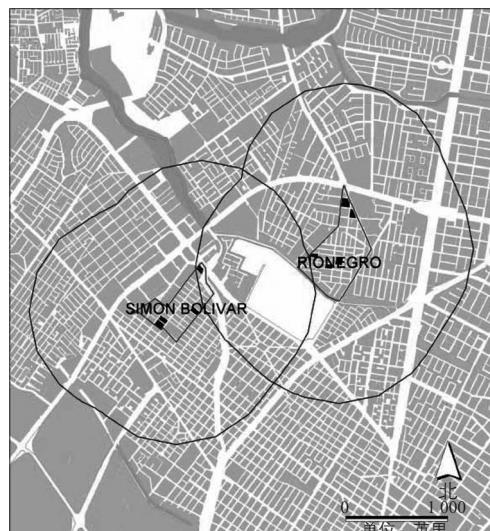


图3 波哥大西蒙玻利瓦尔和里奥内格罗样本街区1 km缓冲区示例

Fig.3 Example of 1000-m buffers around the peripheries of two sampled neighborhoods in Bogotá: Simon Bolívar and Rio Negro

表1 建成环境5D初始变量(以500 m和1 000 m半径缓冲区进行度量)

Tab.1 Candidate variables for five built environment dimensions, measured at the neighborhood (500m) and extended neighborhood (1 000 m around perimeter) scales

5D	初始变量
密度	每公顷住宅面积, 建筑用地面积比例/%, 建筑平均层高, 容积率(=建筑面积/地块面积)
多样性	用地混合熵指数(0~1), 建筑纵向业态混合率, 建筑业态在两种以上的比例
设计(设施)	公园面积率, 公园平均面积/hm ² , 有中央隔离带的道路比例, 交通信号灯密度(=信号灯数量/道路长度), 行道树密度(=行道树数量/道路长度)
设计(场所和街道设计)	平均地块面积/m ² , 方格状地块比例, 包含封闭住宅的街区比例, 道路密度(=道路长度/区域用地面积), 不同数量道路相交的交叉口比例(断头路、3条、4条、5条及以上), 自行车道密度(=自行车道长度/区域用地面积), 路线直线系数(=最短道路距离/街区形心与8个罗盘方位点的直线距离, 其值为0~1), 连通性指数(=节点数量/道路路段数量), 桥梁数量, 自行车专用车道(Ciclovía)双向长度(直线长度)
设计(安全性)	人行天桥数量, 行人年事故率, 主要道路机动车平均车速, 所有交通事故年死亡人数, 有记录的年犯罪率
目的地可达性	公立学校数量, 医院数量, 公共图书馆数量, 规模超过500 m ² 的购物中心数量, 教堂数量, 银行数量
与公共交通车站的距离	快速公交车站数量, 距离最近的快速公交车站的最短距离, 快速公交补给站(feeder TransMilenio stations)数量

境变量进行连续测量检验，帮助确定建成环境变量各段分界点。

3.4 建模方法

本文遵循理论与探索相结合的原则，采用一系列方法进行模型构建。首先，初始模型包含与被试者及其家庭社会经济属性相关的控制变量以及态度变量。控制变量的未调整概率(unadjusted probability)值 ≤ 0.15 ，达到多元共线性的最低值要求，其系数符合先验期望值条件。其次，检验街区尺度的建成环境变量是否使个人及家庭层面控制变量的统计学解释力有所提高。由于表1中39个建成环境变量存在高度相关性，通过因素分析确定能够代表5D新的潜变量。在多层次模型中输入选取因素的分值，通过初步的模型处理，即控制建成环境初始变量的数量，得到解释力更强、拟合效果更好的结果。利用背景排除法(backward elimination process)选择模型的建成环境变量，使用显著性水平 $\alpha=0.10$ 以降低重要变量被排除的概率。由此选出的建成环境变量，一方面提高了控制变量的边际解释力同时相关性最低，另一方面可得到与理论一致的可解释结果。本文选择、提出的模型包含了显著的控制变量并能够描述5D，具有可解释性，相关性最小，且与理论相一致。

在下面的章节中，提出拟合度最优模型(best-fitting models)用于分析：1)步行刚性出行；2)自行车刚性出行；3)使用Ciclovía进行娱乐、休闲活动的情况。前两个模型基于IPAQ数据，考察了利用步行及自行车进行的有目的的出行。相比之下，第三个模型是为了探究影响休闲出行尤其是使用Ciclovía的影响因素。总体上，本文认为这些分析可以为研究波哥大建成环境对步行和自行车出行的影响提供更广泛的视角。

针对每个模型进行数据结构分析、显著性分析，以及拟合度检验。每个时序建模阶段将进行汇总统计：一个局部模型(intercept-only model)，一个仅包含个人和家庭层面控制变量的简化模型(reduced model)，以及一个包含控制变量和街区层面建成环境变量的完整模型(full model)。由t检验得到区块之间独立变量预测值的方差，其值越大说明街区之间建成环境属性等解释变量的离散性越

强。组内相关性(intra-class correlation, ICC)分析可显示区块之间独立变量的相对离散性，其值越大说明居住在同一街区的群体享有更相近的建成环境属性。针对每个时序建模阶段分析消减错误的比例(proportional reduction in error, PRE)，其值越高说明拟合度越好。最后，利用卡方检验对比局部模型、简化模型与完整模型的显著性差异。

拟合度最优模型的独立变量以及所有解释变量的描述性统计结果如表2所示。例如，约27%的样本工作日每天步行刚性出行的时间超过30 min，而自行车这一比例约为15%。除了3个独立变量以外，基于标准差统计得到样本街区之间高离散性的解释变量，包括Ciclovía长度、附近有无快速公交车站、小汽车拥有、教育程度、地形坡度以及交通事故死亡率。需要说明的是，样本的其他属性未列于表2中。调查结果显示，57%的被试者已婚，30%在过去一个月内有工作或学习出行。步行和自行车刚性出行比休闲娱乐出行更加普遍。在过去一周步行刚性出行的平均时间为120 min(标准差为154 min)。在会骑车的被试者中，过去一周自行车刚性出行时间大于30 min的比例为15%。10%的被试者步行或骑自行车时使用Ciclovía。

一些变量不利于从样本中引出推论。首先，由于本文为横向分析，狭义而言不能推断因果关系。其次，在描述建成环境如何影响行为进行建模时多次涉及自选择问题。那些喜欢步行的人会搬到步行环境更好的社区生活吗^[28]？本研究不考虑这一选择偏好。因为样本家庭既不是波哥大最贫困的群体也不是最富有的，按照全球标准大部分为中等收入家庭，因此此类家庭进行住宅区位选择时会倾向于考虑步行或自行车出行是否方便以外的其他因素，例如可用性、房价等。此外，绝大多数样本家庭在其住区已经生活了很长时间，在自行车专用车道(Cicloruta)建设及其他改善措施实施之前已经形成了良好的运动习惯。成年人样本中，居住在当前住处的平均时间达14.4年(标准差为11.6年)。

4 步行刚性出行影响因素

波哥大建成环境如何影响通勤、通学、

日常购物、就医等步行刚性出行？构建的模型描述了出行者在过去5个工作日每天步行刚性出行时间是否超过30 min，用0-1变量表示。由于工作日步行刚性出行的数值高度接近0，而0与其他类别之间存在很大的区间(例如刚性出行目的的步行相对较少)，本文将变量进行二等分避免出现协变量非正常分布的问题，将工作日每天步行刚性出行时间30 min作为分界点。选择工作日每天30 min作为阈值一部分原因是美国卫生总署(U.S. Surgeon General)和世界卫生组织(World Health Organization)推荐其作为每天适当体力活动的最小值^[25]。此外，以分类的形式(例如象征性的(nominal)、顺序的(ordinal))描述预测变量，用以计算反映相对解释力的优势比，避免受到计量单位的影响。如表3所示，由拟合度最优模型得到基本缓冲区出行者工作日每天步行刚性出行时间是否超过

30 min(以下简称“街区尺度分析”)。表4展示了更大尺度的扩展缓冲区的分析结果(以下简称“扩展街区尺度分析”)。

由于从两个层面(个人和街区)测度变量，当组内相关性(街区之间步行刚性出行的方差)大于0.03时使用多层模型(multilevel modeling, MLM)。例如在街区尺度层面，工作日每天步行刚性出行超过30 min的组内相关性为0.065，说明步行6.5%的方差是由于街区差异造成的。总体上，由个体和建成环境变量导致区块层面步行的方差占41.4%。这些值足以验证多层次模型估计(结果反映不同层面变量的层次聚类程度而非模型拟合度)。在这一条件下使用普通最小二乘法(ordinary least squares, OLS)违背了独立性假设，造成参数估计偏差^[29]。此外，在多层次模型估计中使用惩罚伪似然估计(penalized quasi-likelihood, PQL)。由此得到随机变化

表2 模型独立变量和解释变量的描述性统计结果

Tab.2 Descriptive statistics for dependent and explanatory variables that entered predictive models

变量		均值	标准差
独立变量	步行刚性出行时间超过30 min(0-1变量)	0.267	0.499
	自行车刚性出行时间超过30 min(0-1变量)	0.154	0.361
	过去一个月内使用Ciclovia(0-1变量)	0.098	0.298
建成环境变量	连通性指数(节点、路段)	2.453	0.362
	基本缓冲区道路密度/(km·km ⁻²)	0.224	0.062
	扩展缓冲区道路密度/(km·km ⁻²)	0.211	0.051
	Ciclovia 长度/m	219.1	442.2
	基本缓冲区公园密度	0.066	0.047
	基本缓冲区快速公交车站情况(0-1变量)	0.145	0.436
社会经济变量	扩展缓冲区快速公交车站情况(0-1变量)	0.287	0.436
	年龄为35~65岁(0-1变量)	0.569	0.495
	家庭无小汽车	0.208	0.406
	家庭有自行车	0.558	0.497
	会骑自行车(0-1变量)	0.675	0.468
	教育程度(年)	0.295	0.456
	男性(0-1变量)	0.353	0.478
其他变量	社会经济状况(0为1~2, 1为3~5)	0.505	0.500
	基本缓冲区地形坡度/%	4.872	5.013
	扩展缓冲区地形坡度/%	5.602	7.620
	扩展缓冲区交通事故死亡率(年死亡人数/死亡总数)	1.474	1.921
街区可见其他跑步或骑自行车活动(1~5, 1为没有, 5为很多)		2.528	1.075

1级(个人层面)系数的近似贝叶斯估计值、2级(区域层面)系数的广义最小二乘估计值,以及方差和方差参数的近似最大似然估计值^[30]。最后,由于建成环境变量和控制变量(个人层面和家庭层面)之间的相互作用不大或显著性不足以影响系数估计,所有的多层模型假设为随机截距模型形式。

4.1 街区尺度分析

街区尺度模型如表3所示,建成环境变量中的道路密度和连通性指数显著,略微增强了对控制变量的解释力。由表2所示,道路密度=基本缓冲区道路长度/区域用地面积,连通性指数=基本缓冲区节点数量(如交叉口和断头路末端)/道路路段数量。指数值越大,连通性越高。高连通性说明利用道路网络出行有很多条路径可以选择,尽管这只是细密路网的情况。细密方格路网的道路密度和连通性变量值均很高。

由表3可知,道路连通性在建成环境变量中最为显著。针对工作日每天大于30 min的步行刚性出行,高连通性(>2.6)的优势比

是低连通性(<2.5)的2.21倍。高密度路网也会提高步行出行的可能性,但不如连通性的影响明显(变量在0.05的置信水平下不显著)。其他变量相差不大,高密度路网(>0.25)街区的居民比低密度路网(<0.20)街区的居民工作日每天步行超过30 min的概率高49%。需要注意的是,模型显著变量仅包含5D中设计层面的两个变量。密度、多样性、与公共交通车站的距离、目的地可达性在街区尺度均不显著。

表3同时显示,波哥大中年及更年长(>35岁)的居民使用步行进行通勤、日常购物等目的的刚性出行比例最高。与其他因素相比,地形坡度越大、家庭有小汽车以及社会经济状况更好等因素与步行刚性出行呈负相关关系。

表3汇总统计显示3个时序建模阶段对模型的改进。由局部模型、简化模型以及完整模型的t值和组内相关性检验结果可以看出,多层模型降低了由个人层面非独立变量导致的潜在偏差影响。与局部模型相比,包括建成环境变量的完整模型的结果误差降低

表3 街区尺度步行刚性出行多层非线性模型结果

Tab.3 Walking for utilitarian purposes at neighborhood scale: hierarchical nonlinear model for predicting walking for utilitarian purposes

	变量	系数	t	p	优势比	95%CI
建成环境变量(2级)	道路密度/(km·km ⁻²): 低(<0.20)				1.00	
	道路密度/(km·km ⁻²): 中等(0.20~0.25)	0.370	1.921	0.058	1.45	0.99~2.12
	道路密度/(km·km ⁻²): 高(>0.25)	0.402	1.683	0.096	1.49	0.93~2.40
	连通性指数: 低(<2.5)				1.00	
	连通性指数: 中等(2.5~2.6)	0.692	3.908	0.001	2.00	1.41~2.84
社会经济控制变量(1级)	连通性指数: 高(>2.6)	0.791	3.432	0.001	2.21	1.40~3.49
	年龄: 年轻人(18~35岁)				1.00	
	年龄: 年长者(>35岁)	0.349	3.216	0.002	1.42	1.15~1.76
	社会经济状况(低: 1~2)				1.00	
	社会经济状况(低: 3~4)	-0.496	-2.187	0.029	0.61	0.39~0.95
景观控制变量(2级)	家庭无小汽车				1.00	
	家庭有小汽车	-0.335	-2.136	0.033	0.72	0.53~0.97
	地形坡度(<4%)				1.00	
	地形坡度(≥4%)	-0.858	-2.969	0.004	0.42	0.24~0.75
	常量	-1.440	-6.648	0.000	0.24	

注: 工作日每天步行刚性出行时间>30 min为1, <30 min为0; 1级被试者为1 285人, 2级被试者为90人(基本缓冲区)。

汇总统计: 1)t值: 局部模型为0.227, 简化模型为0.241, 完整模型为0.133; 2)组内相关性: 局部模型为0.065, 简化模型为0.068, 完整模型为0.039; 3)与局部模型相比消减错误的比例: 简化模型为0.266, 完整模型为0.414; 4)偏差: 局部模型为3 848.1, 简化模型为3 836.1, 完整模型为3 814.1; 5)与完整模型相比的显著性: 局部模型($\chi^2=33.89$, df=8, p≤0.001), 简化模型($\chi^2=21.89$, df=5, p=0.001)。

41%。完整模型的偏差结果最低，由卡方检验结果可以看出，完整模型比局部模型更显著。

4.2 扩展街区尺度分析

为了在更大街区尺度描述建成环境变量，构建更精简的模型(例如减少变量)(见表4)。道路密度仍然是显著变量(简单划分为低、高二分变量)，而道路连通性却表现不显著。相反，5D中的另一个层面——与公共交通车站的距离呈现显著性。对扩展缓冲区进行考量，快速公交车站数量 ≥ 1 的街区居民工作日每天步行刚性出行时间超过30 min的概率比没有快速公交车站的街区高72%。由此可见，在年龄、小汽车拥有等社会经济变量后，波哥大快速公交专用车道不仅带来大量环境和机动性方面的效益，而且也有益于公众健康，尤其是起到了鼓励日常步行的作用。本文研究结果与文献[31]针对纽约的研究结果相吻合，其研究结果显示体质指数(Body Mass Index, BMI)与公共汽车站和轨道交通车站密度负相关。表4中社会经济控制变量对步行刚性出行的影响与表3街区尺度的分析结果类似。

同样，汇总统计结果显示，与局部模型、简化模型相比，完整模型的分层估计结果更优。与局部模型相比，完整模型的估计误差降低近50%，卡方检验结果显示完整模

型在0.001的置信水平下显著。

5 自行车刚性出行影响因素

对自行车刚性出行的影响因素进行平行分析(parallel analysis)。由于波哥大对自行车专用车道(Cicloruta计划)的投资相当可观，本文估计自行车专用车道的可达性对自行车出行行为有显著影响。为表征影响自行车出行的建成环境属性，在扩展街区尺度进行相关性分析。这一研究区域的平均面积是研究步行出行基本缓冲区面积的6倍。

自行车刚性出行的多层拟合度最优模型结果如表5所示，可以看出，从局部模型到仅包含个人层面控制变量的简化模型，再到包含建成环境变量的完整模型，模型在不断改进。该研究的分析对象为会骑车的成年人，样本量降至830人。唯一一项对控制变量影响显著的建成环境变量是道路密度。波哥大高密度街区(道路长度/区域用地面积 ≥ 0.20)居民工作日每天自行车刚性出行时间超过30 min的概率是低密度街区居民的两倍。出乎预料的是，自行车道密度并不是自行车刚性出行的显著影响因素。而自行车道完备性以及其余36个建成环境备选变量的影响也不显著。本文认为，自行车交通基础设施变量的不显著一部分原因是样本量较小造成的。自行车道密度变量的系数为正(尽

表4 扩展街区尺度步行刚性出行多层非线性模型结果

Tab.4 Walking for utilitarian purposes at extended-neighborhood level: Hierarchical nonlinear model for predicting walking for utilitarian purposes

	变量	系数	t	p	优势比	95% CI
建成环境变量(2级)	道路密度/(km·km ⁻²): 低(<0.20)				1.00	
	道路密度/(km·km ⁻²): 中等-高(≥ 0.20)	0.539	3.069	0.006	1.71	1.19~2.46
	无快速公交车站				1.00	
	快速公交车站数量 ≥ 1	0.541	3.056	0.006	1.72	1.19~2.47
社会经济控制变量(1级)	年龄: 年轻人(18~35岁)				1.00	
	年龄: 年长者(>35岁)	0.325	2.912	0.004	1.38	1.11~1.72
	家庭无小汽车				1.00	
	家庭有小汽车	-0.331	-1.910	0.056	0.72	0.51~1.01
	常量	-1.749	-8.243	0.000	0.17	

注：工作日每天步行刚性出行时间>30 min为1，<30 min为0；1级被试者为1 315人，2级被试者为90人(扩展缓冲区)。
汇总统计：1)t值：局部模型为0.173，简化模型为0.169，完整模型为0.087；2)组内相关性：局部模型为0.050，简化模型为0.049，完整模型为0.026；3)与局部模型相比消减错误的比例：简化模型为0.442，完整模型为0.486；4)偏差：局部模型为3 927.4，简化模型为3 917.6，完整模型为3 906.5；5)与完整模型相比的显著性：局部模型($\chi^2=20.88$, df=4, p=0.001)，简化模型($\chi^2=11.10$, df=2, p=0.004)。

管可能是小样本量致使其不显著), 因此在最终建模时未考虑这一变量。未来需要扩大样本量以便研究波哥大自行车道及其他自行车交通基础设施对自行车出行的影响。

如表5所示, 交通事故高死亡率是波哥大自行车刚性出行的显著影响因素。与交通事故年死亡率(机动车和非机动车出行者)小于10相比, 年死亡率超过10的优势比降低约50%。女性使用自行车通勤、通学、购物以及其他非娱乐出行的概率更低, 且自行车刚性出行概率随着年龄增长、小汽车拥有、教育水平提高逐渐下降。地形坡度对自行车出行产生影响, 这与其他研究^[32]的结果一致。由于缺少数据, 本文未将其作为解释变量。与自行车刚性出行单一相关性最强的变量是家庭有自行车。随着越来越多的家庭购买自行车或有自行车可用, 其对自行车刚性出行的正面影响至少可以达到建设自行车道或者改变建成环境带来的影响程度。

6 Ciclovía 使用影响因素

如前文所述, 波哥大有一项历史悠久且影响广泛的计划, 即星期日及国家节假日将

主干路对小汽车封闭, 仅供骑车、跑步、轮滑以及其他形式的非机动交通活动使用。波哥大的Ciclovía倡议已经被拉丁美洲的里约热内卢、圣地亚哥等城市效仿。在星期日, Ciclovía成为世界上最大的线性公园。调查显示, Ciclovía有50%的使用者进行骑车和轮滑活动, 剩余50%为不同速度的步行活动。

利用相同的建模方法对步行和自行车刚性出行进行研究, 以探究建成环境的5D对Ciclovía使用的影响程度。IPAQ问卷中针对这一目的的特定问题是: 在过去1个月内是否使用过Ciclovía? 由于研究区域之间Ciclovía的组内相关性较低(0.030)且不显著, 没必要使用多层模型。因此, 利用最大似然法对logistic回归模型进行参数估计。由于骑车者和休闲目的出行者普遍接受长距离出行, 因此针对扩展缓冲区分析建成环境变量。

Ciclovía活动拟合度最优模型结果如表6所示。多层回归模型中, 调整后的R²与R²的解释类似, 说明拟合度适中、模型显著(基于卡方检验)。

由表6可以看出, 自行车交通设施显著

表5 扩展街区尺度自行车刚性出行多层非线性模型结果

Tab.5 Bicycling for utilitarian purposes at extended neighborhood level hierarchical nonlinear model for predicting walking for utilitarian purposes

	变量	系数	t	p	优势比	95% CI
建成环境 变量(2级)	道路密度/(km·km ⁻²): 低(<0.20)				1.00	
	道路密度/(km·km ⁻²): 中等-高(≥0.20)	0.689	3.024	0.007	1.99	1.24~3.19
街道安全 性(2级)	交通事故年死亡率: 0~10				1.00	
	交通事故年死亡率: >10	-0.746	4.098	0.001	0.47	0.32~0.69
社会 经济 控制 变量 (1级)	女性				1.00	
	男性	1.955	9.924	0.000	7.07	4.80~10.40
	年龄: 年轻人(18~35岁)				1.00	
	年龄: 年长者(>35岁)	-0.570	3.184	0.002	0.56	0.40~0.80
	教育程度: 高中或更低				1.00	
	教育程度: 高中以上	-0.477	2.052	0.041	0.62	0.39~0.98
景观控制 变量(2级)	家庭无小汽车				1.00	
	家庭有小汽车	-0.854	3.665	0.000	0.43	0.27~0.67
	地形坡度≤3%				1.00	
	地形坡度>3%	-1.736	3.858	0.001	0.18	0.07~0.45

注: 工作日每天自行车刚性出行时间≥30 min为1, <30 min为0; 1级被试者(个人)为830人, 2级被试者为27人(扩展缓冲区)。

汇总统计: 1)t值: 局部模型为0.446, 简化模型为0.510, 完整模型为0.100; 2)组内相关性: 局部模型为0.119, 简化模型为0.134, 完整模型为0.029; 3)与局部模型相比消减错误的比例: 简化模型为0.661, 完整模型为0.806; 4)偏差: 局部模型为2 314.6, 简化模型为2 296.4, 完整模型为2 205.9; 5)与完整模型相比的显著性: 局部模型($\chi^2=108.0$, df=6, p<0.001), 简化模型($\chi^2=90.5$, df=3, p≤0.001)。

相关。与扩展缓冲区内无 Ciclovía 相比, Ciclovía 长度超过 1 000 m 会增加其使用概率(一个月至少使用一次)。这与文献[33–35]的研究结果一致, 即临近自行车道会诱发自行车的使用以及其他形式的体力活动。

与建成环境相关的变量中公园因素有较高的显著性。公园面积率高会抑制 Ciclovía 的使用。很明显, 附近有很多公园会降低使用 Ciclovía 进行锻炼的需求。与前文步行、自行车刚性出行的分析结果一致, 由表 6 可以看到缺失其他的建成环境变量, 尤其是与城市密度、用地混合程度、与公共交通车站的距离或目的地可达性等有关的变量。

统计模型对于理解城市环境与出行的关系及简单对比非常重要。图 4 是两个样本街区的对比。其中, 左下图显示该街区有相当多的成年居民使用 Ciclovía, 而该街区有一条主要的 Ciclovía 车道且附近缺少公园。与之相比, 右下图的街区居民 Ciclovía 使用率很低, 尽管附近也有 Ciclovía 车道, 但附近

大量的公园削弱了 Ciclovía 作为休闲设施的重要性。

由表 6 可以看出, 一项展示街区活跃程度的变量(在街区可以看到其他跑步或骑车活动)会促进 Ciclovía 的使用。由于在紧凑、混合用地的街区, 居民会更倾向于社会化以及进行体力活动, 这一指标可以用作表征步行友好区域。有研究显示, 针对一系列不同的人群, 社会支持是影响体力活动的一项显著因素^[36~37]。这项指标的显著性也印证了文献[38]的论点, 即步行友好对增进社区参与(Ciclovía 的使用可视为一种形式)的重要性。

由表 6 模型其他控制变量可以看出, 男性及有自行车的人对 Ciclovía 的使用率更高。家庭有小汽车及地形坡度大对其使用有抑制作用。有自行车和会骑自行车对 Ciclovía 使用的影响最显著。因此, 对购买自行车的人提供小额贷款服务以及骑车的基本培训可能是促进波哥大居民进行体力活动的一种途径。建设更多的 Ciclovía 是另外一

表 6 过去 1 个月使用 Ciclovía 的 logistic 回归模型

Tab.6 Use of Ciclovía in the past 4 weeks: Logistic regression model

	协变量	系数	Wald	p	优势比	95%CI
建成环境变量	Ciclovía 长度: 0 m				1.000	
	Ciclovía 长度: 1~999 m	0.565	3.73	0.053	1.759	1.41~2.19
	Ciclovía 长度: ≥1 000 m	0.780	4.364	0.037	2.181	1.85~2.57
	公园面积率: 低(<0.04)				1.000	
	公园面积率: 中等(0.04~0.08)	-0.448	2.638	0.104	0.639	0.42~0.86
	公园面积率: 高(>0.08)	-0.722	3.882	0.049	0.486	0.36~0.61
社会资本	在街区看到其他跑步或骑车活动: 没有或很少				1.000	
	在街区看到其他跑步或骑车活动: 中等-多	0.545	30.508	0.000	1.725	1.58~1.93
社会经济控制变量	女性				1.000	
	男性	0.742	12.708	0.000	2.099	1.92~2.26
	家庭无小汽车				1.000	
	家庭有小汽车	-0.714	7.324	0.007	0.490	0.41~0.57
	家庭无自行车				1.000	
	家庭有自行车	1.174	22.197 8	0.000	3.235	2.88~3.53
	不会骑自行车				1.000	
景观控制变量	会骑自行车	1.123	11.578	0.001	3.075	2.86~3.29
	地形坡度<4%				1.000	
	地形坡度≥4%	-0.567	4.028	0.045	0.567	0.36~0.77
	常量	-4.943	95.724	0.000	0.007	0.006~0.008

汇总统计: χ^2 (概率)=148.1(0.000), 调整后的 $R^2=0.238$

种途径。然而，基于本文研究结果，改变城市开发密度及用地模式可能对休闲型的步行、自行车出行及Ciclovía的使用作用不大。

7 结论

尽管很多研究显示在发达国家尤其是美国，用地的密度和多样性对出行需求产生影响^[39]，但在波哥大情况不同。同时，另外两个“D”——目的地可达性、与公共交通车站的距离的影响也不显著，唯一的例外是后者在扩展缓冲区层面对步行刚性出行有一定影响。这能够反映出在波哥大，住宅、商店及其他用地混合的紧凑街区非常普遍，同时公共交通的可达性较好，总体上购物广场、学校以及医疗设施等次级区域目的地的可达性水平类似。由估计结果可以看到，密度、用地多样性及其他“D”对非机动交通出行的影响并不显著。

真正对刚性出行产生影响的是街道设

计，尤其是道路密度，自行车刚性出行还受到道路连通性的影响。对于休闲活动，在住宅附近为骑车者和行人提供专用通道有助于促进Ciclovía的使用。而城市设计及规划人员能够对步行和自行车出行施加重要影响力的是设计以及街道管理(针对Ciclovía)。街道的布局、连通性及密度有重要影响，而城市密度、用地混合、目的地可达性等其他建成环境因素影响不大。

本研究对新城开发或许有很好的启示。正如大部分快速发展的城市，波哥大城市周边正迅速出现新的土地开发和房屋建设。为促进步行和自行车出行，尤其应关注街道设计和布局以构建高连通性的密集路网。方格网道路模式以及规划小街区地块($40\text{ m} \times 40\text{ m}$)有利于形成密集、高连通性的网络。然而现实是，为满足居民通勤的需求，波哥大大部分的郊区开发在设计中都倾向于以小汽车为导向，形成曲线街道、稀疏网络的超大街区。当然，遵循城市建成区(老城区)的传统模式，尤其是紧凑、混合用地开发，似乎对鼓励非机动交通出行有重要作用。然而本文构建的模型中这些变量并不显著，但这并不意味着这些因素对非机动交通出行没有影响。研究结果不显著是由于波哥大街区本身紧凑、混合的特性所致。但可以确定的是，大街区、低密度的郊区设计，以及以小汽车为导向无疑会大大抑制非机动交通出行。

本文为星期日及节假日扩展Ciclovía网络至城市更多的区域(如郊区)提供了案例。尽管这对交通拥堵或空气质量改善可能影响甚微，但对促进居民体力活动及形成良好生活方式作用显著。Ciclovía并不是新鲜事物，早在1980年就已经存在。此外，将Ciclovía视作一种生活福利设施或锦上添花的想法是错误的。正如机动交通出行者需要安全、可靠的设施使用小汽车，人们骑自行车、跑步、步行以及轮滑也需要专用的车道和区域开展活动。

随着越来越多的发展中国家效仿世界级现代城市以小汽车为导向的发展模式，将会出现像美国及其他同样发展模式国家一样的问题——由体力活动不足导致慢性疾病及肥胖。有研究表明，中国男性每购买一辆小汽车体重平均增长1.82 kg，而每购买一辆自行车体重减少0.57 kg^[40]。因此，有必要严肃正视快速发展中城市以小汽车为导向的设



图4 不同样本街区的Ciclovía使用情况对比

Fig.4 Neighborhood comparisons of Ciclovía use

计以及由此带来的公众健康问题。

本文成果是否广泛适用于发展中国家的大城市有待证实。尽管不是所有城市，但本文认为该研究成果有一定的适用性。在湿热的东南亚大城市，无论步行和自行车交通环境如何友好，部分出行者一年大部分时间可能还是会避免步行和骑自行车。本文研究结果对像波哥大这样气候更温和的城市有更好的借鉴意义。期待在其他地区出现类似的研究作为佐证。

声明

本研究得到美国疾病控制与预防中心(US Centers for Disease Control and Prevention)的资助。感谢对本研究做出贡献的研究者，尤其要感谢 Jose David Pinzon 在组织建成环境数据方面做出的努力。

参考文献：

References:

- [1] Hook W. Automobile Dependency and the Global Cultural War: Lessons from Bogotá[J]. Sustainable Transport, 2004(16):1–3.
- [2] Skinner R. City Profile: Bogotá[J]. Cities, 2004, 21(1): 25–22.
- [3] Cervero R. Progressive Transport and the Poor: Bogotá's Bold Steps Forward[J]. Access, 2005 (27): 24–30.
- [4] Wright L, Hook W. Bus Rapid Transit Planning Guide[R]. New York: Institute for Transportation & Development Policy, 2007.
- [5] Peñalosa E. Urban Transport and Urban Development: A Different Model[R]. Berkeley, CA: University of California, Center for Latin American Studies, 2002.
- [6] Beatley T. Green Urbanism: Learning from European Cities[M]. Washington DC: Island Press, 2000.
- [7] Rietveld P, Daniel V. Determinants of Bicycle Use: Do Municipal Policies Matter?[J]. Transportation Research A, 2004, 38(7): 531–550.
- [8] Rietveld P. Non-Motorized Modes in Transport Systems: A Multimodal Chain Perspective for the Netherlands[J]. Transportation Research D, 2000, 5(1): 31–36.
- [9] Instituto Distrital Para la Recreación y el Deporte. Sistema Distrital de Parques y Escenarios de Bogotá[R]. Bogotá: Instituto Distrital Pa-
- ra la Recreación y el Deporte, 2006.
- [10] World Health Organization. Fifty Seventh World Health Assembly: Global Strategy on Diet, Physical Activity, and Health[R]. Geneva: WHO, 2005.
- [11] Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia[R]. Bogotá: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2005.
- [12] Handy S, Boarnet M, Ewing R, Killingsworth R. How the Built Environment Affects Physical Activities: Views from Urban Planning[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2002, 23(2): 64–73.
- [13] Frumkin H, Frank L, Jackson R. Urban Sprawl and Public Health: Designing, Planning, and Building for Healthy Communities [M]. Washington DC: Island Press, 2004.
- [14] Cervero R, Duncan M. Walking, Bicycling, and Urban Landscapes: Evidence from the San Francisco Bay Area[J]. American Journal of Public Health, 2003, 93(9): 1478–1483.
- [15] Frank L, Schmid T, Sallis J, Chapman J, Saelens B. Linking Objectively Measured Physical Activity with Objectively Measured Urban Form: Findings from SMARTRAQ [J]. American Journal of Preventive Medicine, 2005, 28(2): 117–125.
- [16] Frank L, Engelke P. The Built Environment and Human Activity Patterns: Exploring the Impacts of Urban Form on Public Health[J]. Journal of Planning Literature, 2001, 16(2): 202–218.
- [17] Aytur S, Rodríguez D, Evenson K, Catellier D, Rosamond W. Promoting Active Community Environments through Land Use and Transportation Planning[J]. American Journal of Health Promotion, 2007, 21(4): 397–407.
- [18] Hallal P, Azevedo M, Reichert F, Siqueira FAraujo, Vicgora C. Who, When, and How Much? Epidemiology of Walking in a Middle-Income Country[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2005, 28(2): 156–161.
- [19] Gómez L, Sarmiento O, Lucumí D, Espinosa G, Forero R. Prevalence and Factors Associated with Walking and Bicycling for Transport Among Young Adults in Two Low-In-

- come Localities of Bogotá, Colombia[J]. *Journal of Physical Activity and Health*, 2005, 2(4): 445–459.
- [20] Humpel N, Owen N, Leslie E. Environmental Factors Associated with Adults' Participation in Physical Activity[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2002, 22(3): 188–199.
- [21] Bedimo-Rung A, Mowen A, Cohen D. The Significance of Parks to Physical Activity and Public Health: A Conceptual Model[J]. *American Journal of Physical Activity*, 2005, 28(2): 159–168.
- [22] Rodríguez D, Targa F. Value of Accessibility to Bogotá's Bus Rapid Transit System[J]. *Transport Reviews*, 2004, 24(5): 587–610.
- [23] Rodríguez D, Mojica C. Land Value Impacts of Bus Rapid Transit: The Case of Bogotá's Transmilenio[J]. *Land Lines*, 2008(2): 2–7, 24.
- [24] Craig C, Marshall A, Sjostrom M. International Physical Activity Questionnaire: 12-Country Reliability and Validity[J]. *Medical Science Sports Exercise*, 2003, 35(8): 1381–1395.
- [25] Sallis J, Cervero R, Ascher W, Henderson K, Kraft M, Kerr J. An Ecological Approach to Creating Active Living Communities[J]. *Annual Review of Public Health*, 2006, 27: 297–322.
- [26] Cervero R, Kockelman K. Travel Demand and the 3 Ds: Density, Diversity, and Design[J]. *Transportation Research D*, 1997, 2(3): 199–219.
- [27] Selvin S. Epidemiologic Analysis: A Case-Oriented Approach[M]. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [28] Boarnet M. The Built Environment and Physical Activity: Empirical Methods and Data Resources[R]. Washington DC: Committee on Physical Activity, Health, Transportation, and Land Use, Transportation Research Board and Institute of Medicine, US National Academies, 2004.
- [29] Raudenbush S, Bryk A, Congdon R. HLM 6: Hierarchical Linear & Nonlinear Modeling [R]. Chicago: Scientific Software International, 2004.
- [30] Snijders T, Bosker R. Multilevel Analysis [M]. London: Sage, 1999.
- [31] Rundle A, Roux A, Free L, Miller D, Neerman K, Weiss C. Mailman School the Urban Build Environment and Obesity in New York City: A Multilevel Analysis[J]. *American Journal of Health Promotion*, 2007, 24(4s): 326–334.
- [32] Troped P, Saunders R, Pate R, Reininger B, Ureda J, Thompson S. Associations Between Self-Reported and Objective Physical Environmental Factors and Use of a Community Rail- Trail[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2001, 34(3): 191–200.
- [33] Vernez Moudon A, Lee C, Cheadle A, Collier C, Johnson D, Schmid T, Weather R. Cycling and the Built Environment: A US Perspective[J]. *Transportation Research D*, 2005, 10(3): 245–261.
- [34] Krizek K, Johnson P. Proximity to Trails and Retail: Effects on Urban Cycling and Walking[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2006, 72(1): 33–42.
- [35] Tilahun N, Levinson D, Krizek K. Trails, Lanes, or Traffic: Valuing Bicycle Facilities with an Adaptive Stated Preference Survey [J]. *Transportation Research A*, 2007, 41(4): 287–301.
- [36] Brownson R, Baker E, Housemann R, Brennan L, Bacak S. Environmental and Policy Determinants of Physical Activity in the United States[J]. *American Journal of Public Health*, 2001, 91(12): 1995–2003.
- [37] Ainsworth B, Mannell R, Behrens T, Caldwell L. Perspectives of Public Health and Leisure Studies on Determinants of Physically Active Leisure[J]. *Journal of Physical Activity & Health*, 2007, 4(S1): 24–35.
- [38] Putman R. Bowling Alone: The Collapse and Revival of American Community[M]. New York: Simon & Schuster, 2000.
- [39] Ewing R, Cervero R. Travel and the Built Environment: A Synthesis[J]. *Transportation Research Record*, 2001, 1780: 87–114.
- [40] Bell A, Ge K, Popkin B. The Road to Obesity or the Path to Preservation: Motorized Transportation and Obesity in China[J]. *Obesity Research*, 2002, 10(4): 277–283.