

建成环境对行人安全性和步行性的影响： 文献综述和案例分析

The Impact of the Built Environment on Pedestrian Safety and Walkability: A Literature Review and Case Study

张 昊 尹 力 ZHANG Hao, YIN Li

摘 要 为更有效地建设步行社区,提升公共健康水平,拓展对建成环境和行人安全关系的理解十分重要。在系统性文献综述的基础上,归纳了应用广泛的“D指标”,全面梳理建成环境对步行性和行人安全性两方面的影响。在案例分析中,通过控制空间自相关,论证了行人安全性与D指标的相关性,指出步行指数对于步行性和行人安全的意义的差异。城市规划师和政策制定者应进一步评估传统意义上的步行友好场所是否给行人提供了足够的安全保障,未来开展促进步行的研究时,应同时考虑提高行人安全的有效途径。

Abstract It is important to extend the understanding of the relationship between the built environment and pedestrian safety for building walkable communities and improving public health. By conducting a systematic literature review, this study summarizes the "D variables" to comprehensively capture the impact of the built environment on walkability and pedestrian safety. By controlling for spatial autocorrelation in a case study area, the paper also demonstrates the association of pedestrian safety with the D variables, and points out the conflicting impact of Walk Score on walkability and pedestrian safety. Therefore, this study suggests for urban planners and policymakers to evaluate whether traditionally recognized walkable places are also safe for pedestrians. It is necessary to propose effective approaches to improve pedestrian safety and walkability together in future research.

关键词 建成环境;行人安全;步行指数;空间分析

Key words built environment; pedestrian safety; Walk Score; spatial analysis

文章编号 1673-8985 (2020) 02-0044-05 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20200208

作者简介

张 昊
SUNY布法罗大学建筑与城市规划学院
博士研究生
尹 力
SUNY布法罗大学建筑与城市规划学院
副教授,博士生导师

1 研究背景

世界卫生组织 (WHO) 的数据显示,全世界成年人口中,至少1/3的人属于超重,1/10的人属于肥胖。肥胖愈发成为席卷全球的公共健康危机之一。当前许多学者提出并证明了以“D指标”(Density密度, Design设计, Diversity多样性, Destination accessibility目的地可达性)为代表的建成环境要素与减少肥胖和提高居民运动量相关^{[1]88,[2-3]}。为进一步

降低肥胖率,研究者们通过探讨D指标与健康的关系,提出设计、维护、改造建成环境的具体措施,为社区居民步行和运动提供了保障^[4-5]。目前,众多研究关注建成环境对健康的影响,而建成环境对行人安全影响的研究则相对较少。以美国为例,行人交通事故是导致年轻人死亡的主因之一,放眼世界范围内亦是如此^[6-7]。因此,开展促进步行研究的同时,必须考虑提高行人安全的有效途径。

相关文献探索了一系列行人安全的影响因子。其中,涵盖的主要领域包括环境要素(自然环境和建成环境)和人口社会要素(司机和行人的特点)^{[8]、[9]、[872]}。就建成环境而言,现有资料关注街道和路口的设计。例如,研究设置信号灯的路口和环岛对行人安全的影响^[10]。本文从促进步行和行人安全两个方面,系统地梳理了当前的研究文献,目的在于归纳出相应的环境影响因子。具体而言,希望通过研究对步行性和行人安全都有影响的D指标,深化对建成环境和行人安全的关系的理解。

众所周知,安全的环境是促进步行和改善健康的前提和保障。我们认为,步行研究中常用的D指标对行人安全也非常重要。此外,作为覆盖北美的步行友好评价指数——步行指数(Walk Score),在研究和实践中均得到广泛应用。参考步行指数的相关文献有益于增进对建成环境和行人安全的关系的认识。需要指出的是,在受空间影响的相关性研究中,将空间自相关考虑在内是十分必要的。目前只有少量研究行人安全的文献考虑了空间自相关^{[11]、[654]、[12]、[13]、[306]}。通过系统的文献综述和基于美国纽约州布法罗市的案例研究,笔者探讨建成环境与步行性和安全性两者的关系;并通过引入步行研究中的D指标,进一步深化对影响行人安全的环境要素的认知。

2 文献综述

2.1 研究方法

系统性地梳理建成环境对步行性和安全性影响的相关文献,并讨论了步行指数的相关研究。近年来,越来越多的学者引入了地理学中的空间自相关概念进行空间分析。基于此,我们对控制空间自相关在行人安全研究中的重要性进行了探讨,并从PubMed, Google Scholar, Web of Knowledge网站选取了50篇文章。这些网站涵盖了城市规划、安全、公共卫生等众多领域的前沿学术成果。文献时间跨度为1988年—2019年,大部分研究发表于2000年后,包括学术论文、出版书籍、政府机

构统计报告、博士毕业论文、网站数据等。笔者全面阐述文献中的研究思路、研究方法和研究结论,并诠释研究中的亮点和不足。

2.2 研究成果

2.2.1 建成环境对步行的影响

众多研究系统地论证了建成环境对步行的影响。其中,D指标常被用来量化影响交通行为的环境特征^{[1]、[93]、[14]、[15]}。具有代表性的包括3D模型(密度、多样性、设计)和5D模型(密度、多样性、设计、目的地可达性、公交站点距离)。其中,密度通常指单位区域内的人口或就业数量;多样性指用地混合度,即某一地区不同的用地类型及互补程度;设计指街道通达性,即路网中某一点到另一点的可选路径;目的地可达性指到达目的地(比如工作场所)的难易程度;公交站点距离指从住宅或工作场所到最近公交站点的最短路线的平均值,也有研究使用公交线路密度、公交站点间距、单位面积的站点数进行该指标的量化。D指标通常用于步行范围内的研究,常用的步行范围则介于400—800 m之间^{[16]、[18]}。

近来,一些学者从城市设计的微观视角研究建成环境对步行的影响。Boarnet等^[19]指出,人行道、街道特征、人行横道、交通信号等设施与步行相关,而自然元素及建筑特征(历史建筑的比例等)对步行的影响较小。Ewing等^[20]论证了影响步行的3类城市设计要素,包括沿街活动比例、街道设施数量和临街开窗比例。该研究表明,城市设计,尤其是街景,对行人活动具有一定影响。通过增加街道座椅等路面设施,可以激发公共空间的使用,促进街道与行人的互动。Yin & Wang^[21]着眼于视觉围合感,提出可视的天空区域受行道树和建筑物的影响,并且影响步行性。该研究通过对Google街景图像进行处理和分析,客观测量了一系列与步行相关的建成环境特征。然而,很少有研究系统地影响步行的环境因子涵盖在行人安全相关讨论中。开展此类研究可以揭示同时影响步行性和安全性的环境因素,为政策制定提供理论依据。

2.2.2 建成环境对行人安全的影响

关于建成环境对行人安全影响的研究主要集中在环境要素和社会人口要素两方面。环境要素指街道特征,如单行道、振动带、减速带等,以及路口密度和类型,如三向路口、四向路口、交通环岛、信号控制路口^{[9]、[874]、[22]、[12]}。研究显示,位于四向路口的交通事故率远高于三向路口^{[23]、[350]}。社会人口要素指社区人口特征以及司机和车辆特征,具体包括社区财富水平、司机血液酒精浓度、车辆类型等^[24]。研究表明,建成环境对车流量有一定影响,从而进一步影响交通安全^{[11]、[655]}。既有文献显示车流量尤其是公交车和卡车的数量与行人交通死亡率有关;位于路口的平均车流量越大会加剧当地的行人交通事故率^{[25]、[26]}。

大量研究已经证实D指标影响人们的出行距离和出行方式,从而直接或间接地影响行人安全。当前,行人安全相关文献已引入一些D指标,包括密度、多样性、设计和公交站点距离^{[9]、[875]、[22]、[17]、[27]、[125]}。Clifton and Kreamer-Fulfs^{[29]、[710]}指出,位于公立学校周边的公交可达性、商业用地率、人口密度与行人交通事故率正相关。LaScala等^{[27]、[130]}发现,位于高人口密度和高路口密度的地区,行人交通事故率更高。高人口密度的地区常位于就业中心附近,因此不但受当地车辆的影响,还受来自其他地区车流的影响,这将增加事故发生的概率^{[23]、[355]}。基于相关研究,当前文献提出了通过改善行人安全促进步行的具体措施,如优化街道设计、提升窄车道利用率、完善道路安全设施(减速凸面等)、增加车道两侧绿化^[29]。综上所述,行人安全研究中讨论的建成环境因素包括了一些D指标,如人口密度、用地类型、路口密度等。然而,大部分行人安全研究基于传统交通理论,偏重道路设计、路口密度、交通流量等方面的考量。有鉴于此,本文系统地论证了步行性研究的D指标对行人安全的作用,以及相应的城市规划与设计措施。

2.2.3 步行指数相关研究

步行指数算法包含了两类D指标(设计和目的地可达性),如街区长度、路口密度、便利

设施的临近程度等。该指数通过衰减函数以量化街道的步行适宜程度^[30]。具体而言,步行指数衡量的设施包括:杂货店、餐馆、购物/零售中心、咖啡店、银行、公园、学校、书店、娱乐场所等^{[31]4166}。步行指数为公众提供了街道步行性优劣的量化评分。同时,有学者在研究和实践中参考步行指数,衡量研究区域的步行性。文献表明,步行指数可针对性地评价社区步行性,关注零售服务密度、休闲与开放空间密度等指标,强调社区相对目的地的可达性^{[32]411}。

高人口密度地区的步行指数与步行性之间的相关性更强。步行指数尤其适用于步行相关的环境研究,例如零售目的地、路口密度和居住密度等^{[31]4172, [32]413}。针对步行指数的批判和质疑在于该指标过于强调实用性质的步行,而忽略了休闲娱乐性质的步行^[33-34]。此外,一些与步行相关的建成环境要素可能未被纳入步行指数算法中,例如多样性和公交可达性。然而,步行指数的优点也显而易见。步行指数易于获取且涵盖范围广泛,将其纳入行人安全模型中,可以高效地收集步行环境评估数据,还可以不受地理范围等条件的限制。因此本文认为,在行人安全相关研究中引入步行指数,可以深化对影响行人安全的环境要素的理解。

2.2.4 控制空间自相关的重要性

空间自相关是变量间相互空间关系的研究^[35-36]。随着研究用到的空间数据的增加,学者们认识到控制空间自相关是建构空间模型的基础。Goodchild^[37]认为空间自相关是地理数据的主要特征,因此,在空间模型中需要控制空间自相关。目前,一些行人安全的文献已经讨论了在模型创建和解释中控制空间自相关的重要性^{[11]656, [13]309}。然而,大多数关于建成环境对行人安全影响的研究较少考虑空间自相关效应。从行人安全的角度出发,当某一位置发生的事故数量和严重程度可能受到相邻环境的影响时,就应将空间自相关纳入考量。引入地理加权回归(GWR)模型,可以从统计学上分析事故与环境因素之间的关系,同时考虑事故的空间位置^[38]。为了系统论证环境对行人安全的空间影响,本文应用地理加权泊松

回归(GWPR)模型控制空间自相关,探讨了以D指标为代表的建成环境对行人安全的影响。

2.2.5 小结

为探讨建成环境如何同时影响安全性和步行性,本文在传统行人安全研究以及建成环境与步行性研究的基础上,系统梳理相关文献资料,并指出现有文献的不足之处:(1)较少研究统筹论证步行相关的建成环境因素对行人安全的影响;(2)建成环境对行人安全的影响伴随着空间自相关效应,较少研究将其纳入考虑。通过参考步行性和行人安全的最新研究,本文在控制空间自相关的同时,使用D指标定量论证了建成环境对行人安全的影响。由于步行指数衡量两类D指标,因此,本文进一步扩展了步行指数在评估行人安全方面的适用性。通过分析建成环境与行人安全的关系,以期城市规划师和政策制定者提供有针对性建设步行友好和安全人居环境的建议(见图1)。

3 案例分析

3.1 研究方法

纽约州布法罗市被步行指数网站评为步行优异的全美前10城市,然而近年来该市的行人交通事故却不断增加^[39]。本文从纽约州交通部网站收集2012年—2016年车流量和行人交通事故的数据,从纽约州GIS Clearinghouse收集2015年街道中心线数据。其他数据诸如人口密度、非裔人口密度、就业密度等,分别从纽约州、美国人口普查局、Walk Score网站获取。本文比较了普通最小二乘(OLS)模型和GWPR模型的结果,诠释了建成环境对行人安全的空间影响。同时通过地理加权回归软件(GWR4.0)对行人事故和建成环境之间的空间关系进行建模。

本文评估了在两类直线半径(400 m和800 m)内,建成环境与行人安全的关系。借鉴传统交通安全研究,选取三向和四向两种路口密度进行深入分析。基于街网度量和空间句法的相关理论^[40-42],构建了整合度指标来衡量街

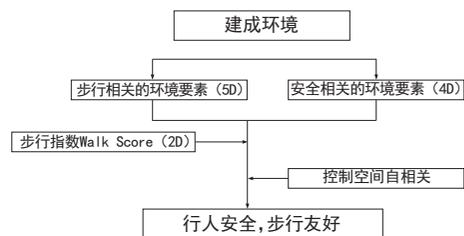


图1 研究思路
资料来源:笔者自绘。

道在路网内的集成程度。对于用地混合度,通过计算熵值进行量化。这也是建成环境和土地利用研究中的常用方法^[43]。案例分析的因变量是行人交通事故,自变量包括三向和四向路口密度、人口密度、非裔人口密度、就业密度、用地混合度、车流量、整合度和步行指数(见表1)。

3.2 研究成果

GWPR模型的结果优于OLS模型的结果,表明前者空间分析的适用性和解释力更强,显示了控制空间自相关效应的重要性。位于400 m半径内的自变量影响均显著。位于800 m半径内除人口密度外的其他自变量影响均显著。人口密度在不同半径内对行人安全影响有差异,400 m内行人更多,交通事故也相应较多^{[28]712, [44]}。相比而言,800 m内较高的人口密度未必意味着更多的行人,人们可能选择其他交通工具(如公交或地铁)来代替步行出行。

本文证实了车流量、三向和四向路口密度、人口密度、用地混合度与行人安全性负相关,这与世界范围内已有的研究结论一致^{[27]131, [45-49]}。就业密度与行人安全性正相关,这与现有文献结论有矛盾。产生这一差异的原因可能是位于布法罗市区(就业密度最高的地区)的步行设施(人行道、交通信号灯、停车标志等)维护良好,为行人安全提供了有力保障。步行指数与行人安全性负相关。步行指数较高意味着该地区路口较密集,而研究表明路口密度与行人安全性负相关^{[23]361, [30]}。需要指出的是,步行指数与步行性正相关,而与行人安全性负

表1 变量指标一览表

变量	定义	数据来源
因变量	行人交通事故	研究半径内行人交通事故数量 纽约州交通部
	三向、四向路口密度	研究半径内路口数量 纽约州GIS Clearinghouse
自变量	人口密度	每平方英里内的居民数(1 000人为单位) 2010年美国人口普查
	非裔人口密度	每平方英里内的非裔居民数(1 000人为单位) 2010年美国人口普查
	就业密度	每平方英里内就业数(1 000工作岗位为单位) 2010年美国人口普查
	用地混合度	利用5种用地类型(零售、娱乐、健康、教育、服务)计算熵值 2010年美国人口普查
	步行指数	用0—100的数值衡量任一地点的步行性 Walk Score 网站
	车流量	路口平均单日车流量 纽约州交通部
	整合度	研究半径内单一街道在路网内的集成程度 纽约州GIS Clearinghouse

资料来源:笔者自制。

相关。非裔人口密度与400 m半径内的行人安全性负相关,与800 m半径内的行人安全性正相关。这是由于400 m内较高的非裔人口密度可能意味着更多的行人,而800 m内的非裔人群可能选择步行以外的其他方式。大多数非裔美国人与低收入和贫困存在统计上的相关性,而社会经济因素对行人安全存在一定影响^[50]。与之类似,整合度与行人安全的关系也受距离影响。整合度在400 m内与行人安全性负相关,在800 m内与行人安全性正相关。

4 结论与讨论

本文通过对当前文献的梳理总结,以及基于布法罗市的案例分析,融合安全研究和步行研究中的D指标,深化了对建成环境影响行人安全和步行性机制的理解。针对现有文献的不足,笔者系统论证与步行相关的建成环境因素,尤其是广泛应用的D指标对行人安全的影响。通过案例分析,建立空间模型,评估建成环境对行人安全的空间影响,强调控制空间自相关的重要性。研究表明,一系列建成环境要素(包括D指标)与行人安全显著相关。该结论丰富了相关领域的理论成果。通过梳理步行指数的相关文献及其在案例中的应用,拓展步行指数在不同地理区域和不同

空间尺度上评估行人安全的适用性。值得注意的是,步行指数与行人安全负相关,而与步行性正相关。这就为建设步行友好和安全的人居环境提供了新思路,应进一步评估传统意义上的步行友好场所是否也为行人提供了足够的安全保障。此外,本文还揭示了空间距离差异对安全性和步行性的意义。

本文为城市规划师和政策制定者提供了通过城市规划和设计改善行人安全性的策略。具体包括:(1)应在人口聚集、多路口和车流量繁忙的场所增加人行道、交通信号等安全设施;(2)应进一步完善建设既适宜步行又安全的人居环境的合理方案;(3)应更多地关注弱势群体,例如低收入人群;(4)行人安全受其相邻区域环境的影响,因此应关注整个地区行人安全的持续改善。

未来的研究建议从微观尺度如街景的视角分析建成环境对行人安全的影响,针对行人步行目的展开更深入的探讨,并涵盖国际不同地区的案例分析与比较。

参考文献 References

- [1] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment: a synthesis[J]. Transportation Research Record, 2001, 1780(1): 87-114.
- [2] PAPAS M A, ALBERG A J, EWING R, et al. The built environment and obesity[J]. Epidemiologic Reviews, 2007, 29(1): 129-143.
- [3] ZHANG H, YIN L. A meta-analysis of the literature on the association of the social and built environment with obesity: identifying factors in need of more in-depth research[J]. American Journal of Health Promotion, 2019, 33(5): 792-805.
- [4] 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.
- [5] SAELENS B E, MOUDON A V, KANG B, et al. Relation between higher physical activity and public transit use[J]. American Journal of Public Health, 2014, 104(5): 854-859.
- [6] World Health Organization. World report on road traffic injury prevention[EB/OL]. (2004-02-09) [2019-03-25]. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42871/9241562609.pdf;jsessionid=A2CEBB40637D1ADEB13616F4F6EDF9AC?sequence=1>.
- [7] NHTSA. Traffic safety facts[EB/OL]. (2018-03-19) [2019-03-19]. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812681>.
- [8] GARDNER P E. The impact of speed and other variables on pedestrian safety in Maine[J]. Accident Analysis & Prevention, 2004, 36(4): 533-542.
- [9] TEFFT B C. Impact speed and a pedestrian's risk of severe injury or death[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 50: 871-878.
- [10] AGARWAL N K. Estimation of pedestrian safety at intersections using simulation and surrogate safety measures[D]. Lexington: University of Kentucky, 2011.
- [11] LASCALA E A, GERBER D, GRUENEWALD P J. Demographic and environmental correlates of pedestrian injury collisions: a spatial analysis[J]. Accident Analysis and Prevention, 2000, 32(5): 651-658.
- [12] TRUONG L T, SOMENAHALLI S V. Using GIS to identify pedestrian-vehicle crash hot spots and unsafe bus stops[J]. Journal of Public Transportation, 2011, 14(1): 99-114.
- [13] BLAZQUEZ C A, CELIA M S. A spatial and temporal analysis of child pedestrian crashes in Santiago, Chile[J]. Accident Analysis and Prevention, 2013, 50: 304-311.
- [14] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 1997, 2(3): 199-219.
- [15] 张昊,尹力. 创建健康城市: 规划空间技术在公共

- 健康研究中的应用[J]. 上海城市规划, 2017 (3): 57-62.
- ZHANG Hao, YIN Li. Building healthy cities: applying spatial technology in the public health research[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2017(3): 57-62.
- [16] BARTLETT R. Testing the 'popsicle test': realities of retail shopping in new 'traditional neighbourhood developments'[J]. Urban Studies, 2003, 40(8): 1471-1485.
- [17] CARMONA M, HEATH T, OC T, et al. Public places-urban spaces[M]. London: Routledge, 2012.
- [18] YIN L. Assessing walkability in the City of Buffalo: application of agent-based simulation[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2013, 139(3): 166-175.
- [19] BOARNET M G, FORSYTH A, DAY K, et al. The street level built environment and physical activity and walking: results of a predictive validity study for the Irvine Minnesota inventory[J]. Environment and Behavior, 2011, 43(6): 735-775.
- [20] EWING R, HAJRASOULIHA A, NECKERMAN K M, et al. Streetscape features related to pedestrian activity[J]. Journal of Planning Education and Research, 2016, 36(1): 5-15.
- [21] YIN L, WANG Z. Measuring visual enclosure for street walkability: using machine learning algorithms and Google Street View imagery[J]. Applied Geography, 2016, 76: 147-153.
- [22] EMO A K. Pedestrian impressions of distracted, aggressive, and safe walking behaviors[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2010.
- [23] EWING R, DUMBAUGH E. The built environment and traffic safety: a review of empirical evidence[J]. Journal of Planning Literature, 2009, 23(4): 347-367.
- [24] WANG J. Operating speed models for low speed urban environments based on in-vehicle GPS[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [25] SARKAR S, TAY R, HUNT J D. Logistic regression model of risk of fatality in vehicle-pedestrian crashes on national highways in Bangladesh[J]. Transportation Research Record, 2011, 2264(1): 128-137.
- [26] LEE C, ABDEL-ATY M. Comprehensive analysis of vehicle-pedestrian crashes at intersections in Florida[J]. Accident Analysis and Prevention, 2005, 37(4): 775-786.
- [27] LASCALA E A, JOHNSON F W, GRUENEWALD P J. Neighborhood characteristics of alcohol-related pedestrian injury collisions: a geo-statistical analysis[J]. Prevention Science, 2001, 2 (2): 123-134.
- [28] CLIFTON K J, KREAMER-FULTS K. An examination of the environmental attributes associated with pedestrian-vehicular crashes near public schools[J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(4): 708-715.
- [29] DUMBAUGH E. Safe streets, livable streets: a positive approach to urban roadside design[D]. Atlantic: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [30] SCORE W. Walk Score methodology[EB/OL]. (2019-03-01) [2019-05-28]. <https://www.walkscore.com/methodology.shtml>.
- [31] DUNCAN D T, ALDSTADT J, WHALEN J, et al. Validation of Walk Score® for estimating neighborhood walkability: an analysis of four US metropolitan areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(11): 4160-4179.
- [32] DUNCAN D T, ALDSTADT J, WHALEN J, et al. Validation of Walk Scores and Transit Scores for estimating neighborhood walkability and transit availability: a small-area analysis[J]. GeoJournal, 2013, 78(2): 407-416.
- [33] NYKIFORUK C I, MCGETRICK J A, CRICK K, et al. Check the score: field validation of street smart walk score in Alberta, Canada[J]. Preventive Medicine Reports, 2016(4): 532-539.
- [34] HALL C M, RAM Y. Walk Score® and its potential contribution to the study of active transport and walkability: a critical and systematic review[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018(61): 310-324.
- [35] ANSELIN L. A test for spatial autocorrelation in seemingly unrelated regressions[J]. Economics Letters, 1988, 28(4): 335-341.
- [36] CLIFF A D, ORD J K. What were we thinking?[J]. Geographical Analysis, 2009, 41(4): 351-363.
- [37] GOODCHILD M F. What problem? Spatial autocorrelation and geographic information science[J]. Geographical Analysis, 2009, 41(4): 411-417.
- [38] FOTHERINGHAM A S, BRUNSDON C, CHARLTON M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
- [39] City-Data. Fatal car crashes and road traffic accidents in Buffalo[EB/OL]. (2019-01-01) [2019-05-19]. <http://www.city-data.com/accidents/acc-Buffalo-New-York.html>.
- [40] HAJRASOULIHA A, YIN L. The impact of street network connectivity on pedestrian volume[J]. Urban Studies, 2015, 52(13): 2483-2497.
- [41] KOOHSARI M J, SUGIYAMA T, MAVOA S, et al. Street network measures and adults' walking for transport: application of space syntax[J]. Health Place, 2016(38): 89-95.
- [42] SU S, ZHOU H, XU M, et al. Auditing street walkability and associated social inequalities for planning implications[J]. Journal of Transport Geography, 2019(74): 62-76.
- [43] BROWN B B, YAMADA I, SMITH K R, et al. Mixed land use and walkability: variations in land use measures and relationships with BMI, overweight, and obesity[J]. Health Place, 2009, 15(4): 1130-1141.
- [44] HOEHNER C M, RAMIREZ L K B, ELLIOTT M B, et al. Perceived and objective environmental measures and physical activity among urban adults[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2005, 28(2): 105-116.
- [45] AGRAN P F, WINN D G, ANDERSON C L, et al. The role of the physical and traffic environment in child pedestrian injuries[J]. Pediatrics, 1996, 98(6): 1096-1103.
- [46] BOARNET M G, SARMIENTO S. Can land-use policy really affect travel behaviour? A study of the link between non-work travel and land-use characteristics[J]. Urban Studies, 1998, 35(7): 1155-1169.
- [47] HÍJAR M, TROSTEL J, BRONFMAN M. Pedestrian injuries in Mexico: a multi-method approach[J]. Social Science & Medicine, 2003, 57(11): 2149-2159.
- [48] STANGL P, GUINN J M. Neighborhood design, connectivity assessment and obstruction[J]. Urban Design International, 2011, 16(4): 285-296.
- [49] DELMELLE E C, THILL J C, HA H H. Spatial epidemiologic analysis of relative collision risk factors among urban bicyclists and pedestrians[J]. Transportation, 2012, 39(2): 433-448.
- [50] CUBBIN C, SMITH G S. Socioeconomic inequalities in injury: critical issues in design and analysis[J]. Annual Review of Public Health, 2002, 23(1): 349-375.