基于健康视角的步行指数评价优化研究： 以上海市静安区为例

Improvement of Walk Score from the Perspective of Public Health: Jing'an District of Shanghai as a Case Study

顾浩 周楷宸 王兰
Gu Hao, Zhou Kaichen, Wang Lan

摘要：可步行性是城市步行友好程度的重要表征，也是健康城市规划的重要内容。当前可步行性评价方法中，步行指数是研究和应用最为广泛的方法之一。针对人体健康，本文探讨从环境和社会两个维度，进一步优化步行指数的测评方法。在环境维度建议考虑空气污染与步行活动的关系；在社会维度考虑人口对潜在步行出行的影响。本文提出选择这两个维度的具体指标和数据类型，主要增加交通污染数据、人口密度和年龄结构数据，建构纳入路径和计算方法。在此基础上，选取上海市（原）静安区为研究对象，对其整体路网按路段进行评测，比较纳入新要素后的测度结果与原有测度结果的不同。通过分析新要素纳入的必要性和显著性，本文对道路的可步行性进行深入分析，为提升步行活动和促进公共健康提供基础。

Abstract: Walkability presents the level of pedestrian-friendliness in a city, which is a significant aspect in healthy city planning. Walk score is one of the most popular indicators to measure walkability nowadays. With a consideration of human health, this paper explores a method to improve the measurement of walk score from both environmental and social aspects. It is proposed that the impact of air pollution and population configuration on walkability should be considered. This paper proposes adding traffic pollution, population density and population age structure as key variables in the calculation of walk score. Based on this revision of methodology, Jing'an District of Shanghai is chosen as the study site to measure walk score for its road system. The paper compares the results of the original and proposed calculation methods. Through discovering the necessity and significance of the new method, this paper analyzes walkability of streets in order to promote physical activity and public health.

关键词：可步行性；步行指数；交通污染；人口结构；公共健康

Keywords: Walkability; Walk Score; Traffic Pollution;
Population Configuration; Public Health

国家自然科学基金面上项目 (41871359, 51578384)

作者：顾浩，同济大学建筑与城市规划学院，博士研究生
周楷宸，同济大学建筑与城市规划学院，硕士研究生
王兰（通信作者），同济大学建筑与城市规划学院，教授，博导。
wanglan@tongji.edu.cn

引言

步行友好的城市建成环境有利于促进市民的体力活动，减少慢性非传染性疾病的发病率，从而促进公共健康。针对建成环境步行友好水平的评价从1990年代已经开始，可步行性（walkability）是用来描述步行友好水平的专有名词。欧美各国根据其自身特点开发了针对步行友好水平的评价方法与评价工具，作为改善步行环境的依据^[1]。步行指数（walk score）是当前应用较为广泛的步行性评价指标，其计算方法已引入我国，基于我国城市相关数据有所应用，但其考虑要素的广度和深度有待优化。

针对城市公共健康而言，建成环境通过步行友好促进体力活动，例如步行通勤比例提升一倍，个人肥胖风险即可降低10%^[2]。同时非常有必要考虑空气污染暴露和不安全性等问题。欧洲相关研究表明70%的空气污染物和40%的温室气体排放来源于机动车交通^[3]。基于旧金山湾区的研究发现儿童哮喘和支气管炎的症状与高流量道路之间具有相关性^[4]；针对加拿大安大略省居民的调查也发现，主要道路附近的居民其呼吸系统患病死亡率与区域的空气环境指数息息相关^[5]。欧洲研究对比了骑行、私家车、公交、地铁四类出行方式发现，骑行在交通量小的道路或在自行车专用道上，人体的污染暴露度低；但如果在机动车较多的街道上，由于呼吸速率随骑行运动相应加快，骑行者的污染物暴露剂量是同一路段上小汽车乘客的4~7倍^[6]。与之近似，虽然步行比例提升可以通过体力活动的增加促进公共健康水平，但也可能因为污染暴露而带来负面影响。

同时，居住和就业人群的年龄结构对街道的可步行性存在影响，需要特别针对老年人和儿童的出行进行设计优化。当前关于步行指数的研究主要关注的是设施便捷性与交通空间对于步行的支撑水平，较少考虑人群结构对可步行性的影响。

因此本研究在步行指数计算中考虑纳入步行活动的健康影响因素,并探讨将周边居住人口与年龄结构纳入评价的计算方式,从而拓展步行指数的内涵,更好地反映空间的可步行性。

1 可步行性及其既有评价方法演进

可步行性这一概念最早出现在 20 世纪末美国的交通研究中,当时主要关注于步行相关的建成环境(居住和交通设施)^[7]。德国的研究者延斯·布克施(Jens Bucksch)和斯文·施耐德(Sven Schneider)将步行性的定义进行了拓展:提出可步行性受建成环境、社会环境、自然环境与信息环境等多方面影响,这些环境的客观结构与居民的主观评价共同构成出行决定^[8]。因此从狭义来讲,可步行性反映了与步行交通相关的物质建成空间的环境质量,仅体现步行交通与建成环境之间的关系;从广义上来说,步行性体现了各类环境与行人的行为和体验之间的相互关系^[1]。总体而言,可步行性是一种空间属性,强调物质空间环境对人的步行出行的引导能力;其核心包含出发地和目的地之间的空间邻近性,以及这两点之间步行的便捷性和舒适性^[9]。因此,可步行性的主要影响因素包含目的地类型和空间布局、出行距离、步行环境三个方面;其中目的地类型和布局是最直接的影响因素,其次是出行距离,最后是步行环境^[8]。步行环境包括多种因素,例如街道设计中的密度、尺度、界面设计、交叉口组织、环境景观小品的布置等^[10],也包含步行空间的开放性、可监视性、安全性等^[11-12];地形、气候等也具有一定影响作用。这些影响因素的明确为测评步行性提供了基础。

针对步行性的评测方法,国内外已经展开了较为广泛的研究,主要可分为两类:一类以主观评测为主,基于使用者的主体评价对地区步行环境水平进行综合评定,典型的方法如邻里环境步行性测量表(NEWS: Neighborhood Environment Walkability Scale);另一类则通过分析步行相关影响因素,构建模型进行客观的定量评测。定量类方法中步行指数是当前影响最大的网络步行性评价系统^[1],也是目前较为通用的国际性量化测度方法,已在美国、加拿大、澳大利亚、英国、新西兰等国家广泛应用^[9]。

成立于 2007 年的步行指数公司最早提出了步行指数计算方法,并在其网站与移动设备端提供特定公寓周边可步行性的评价,作为购房和租房选择的辅助参考^[13]。其步行指数评价包括单点步行指数(walk score for each point)与面域步行指数(walk score for city & neighborhood)两个层面。单点步行指数评价是针对空间具体某个点位的评价,重点关注其步行适宜范围内各类设施分布情况,并考虑出行距离、交叉口密度、街区长度等步行环境的影响。通过设施的可达性(accessibility)计算得到基础评分,采用距离和环境数据进

行评分修正,最终获得单点步行指数的得分。其评价的维度更接近前文所指步行性的狭义定义,即空间环境对于步行的支撑水平,从而预测该点发生步行出行的概率。面域步行指数评价通常基于单点步行指数,以人口规模为依据进行加权,进行由点到面评分的转化。其评价内容是区域的步行引导能力与人口规模的匹配情况,以及区域内发生步行行为的可能性情况。面域步行指数评价可能纳入广义的可步行性要素,预测面上总体步行出行的模拟。步行指数的应用研究开展广泛,例如步行指数与购物活动关系^[14-15],步行指数与房地产价值关系^[16],步行指数与公共健康关系^[17]的相关性研究。同时也有研究致力于对步行指数方法进行本地化,结合地方生活习惯与文化差异考虑不同的设施需求,加强步行者主观感受和需求分析^[18]。

现有对可步行性进行量化测度的研究基本以步行指数公司的计算方法为基础。在步行指数的原始计算方法中,主要测度内容是建成环境中不同类型设施的可达性和多样性;强调服务设施便捷性对于出行的影响。随后大量实证研究增加了环境对步行影响的考虑,针对城市空间特点的变量有所增加。因此,当前步行指数研究主要集中在优化设施服务便捷程度评价方法和增补环境对步行影响的计算方法。例如,在设施便捷程度评价中,有研究采用街道功能混合度,而不是设施密度,对设施便捷性进行评价^[19]。在步行环境影响评价中,有研究以步行路权形式、步行道宽度、过街道宽度、沿线机动车出入口个数、沿街空间积极程度作为五大主要影响因素,量化分级纳入模型^[20];也有研究引入林荫率指标,深化街道绿化环境对于步行指数的影响,或通过步行指数评价结果与手机信令反映的实际人口密度进行比对,进一步检验了评价模型的解释水平^[20]。

同时,在步行指数计算的空间单元方面,已有研究指出,单点基础步行指数计算中“与设施空间距离”指标只能用空间直线距离而非实际步行距离,而我国街坊偏大、居住社区较为封闭往往导致较大的绕行情况,因此该指标计算可能不准确^[9]。因此,部分研究以线性的街道为空间单元进行评价,而不是面域评价^[19-20]。街道空间是步行发生的主要场所,以街道线性空间作为步行指数计算单元存在研究基础和合理性。

本研究认为,步行作为居民日常体力活动的主要活动类型之一,受到个体的经济社会属性、环境质量和空间特征等多种因素影响,衡量地区的可步行性不仅要关注空间要素特征,还应将步行活动的环境质量和诱发本地居民进行步行活动的潜力纳入可步行性评价中。基于健康城市理念,本研究从减少居民步行的污染暴露和提高步行活动水平出发,选取街道作为评价的空间单元,通过环境和社会两个维度优化步

行指数的测评方法。

目前步行指数的可视化方法是在单点设施便利度得分基础上,通过空间插值推算面域空间的步行指数得分。此方法虽然能够较为完整、直观地显示城市不同地区可步行性差异,但是插值方法的选择和检验存在较多限制,且不同国家地区之间的空间要素分布特征存在显著差异。因此,本研究采用街道作为衡量可步行性的空间单元,一方面能够较为准确地反映实际的空间移动轨迹;另一方面便于研究机动车交通带来的步行环境污染暴露问题,并可对人口数据进行聚合计算,从而实现在环境维度和社会维度两个方面的优化。其中,在环境维度中,街道空间是步行活动发生的主要场所,也是交通行动相对集聚并有人体暴露的区域。而街道中的机动车车流量是影响街道空间步行环境品质的主要因素,因此本研究通过获取开放地图的实时路况信息数据,估算街道机动车流量,将交通污染物暴露水平纳入可步行性评价体系。在社会维度中,考虑到居民的步行出行频率受到年龄等个人因素以及居住地的居住密度等客观空间因素的影响,而老年人口更是步行出行比例高且集中在住地附近。因此,为进一步评估本地老年居民步行出行的分布,本研究采用上海市第六次人口普查数据,将地区人口密度和老年人口比例的影响纳入评价体系。

2 实证研究：上海市静安区步行评价指数优化

为验证步行指数计算方法优化的可行性和必要性,本研究选取上海市原静安区(下称静安区)范围作为案例,开展三步计算与分析:第一步采用通用的计算方法,得到静安区各条街道的基本步行指数;第二步将道路交通污染分布按照一定方法纳入计算,叠加得到受污染影响衰减的静安区街道步行指数;第三步则纳入人口密度及其年龄结构特征,进一步计算针对特定年龄对象的步行指数,最终得到考虑了交通污染的特定年龄对象的步行指数。

2.1 街道步行指数计算

参照步行指数原有计算方法,本研究首先基于静安区兴趣点(POI: Point of Interest)数据进行设施分类,涵盖杂货

店、餐馆、公园、学校等类型,共计1.8万条数据。研究随后基本按照步行指数公司的指标,对各类设施赋予不同的权重,并结合我国城市设施特点有所调整(表1)。最后按照400 m、800 m、1 200 m、1 600 m、2 400 m的缓冲区范围,统计街道周边POI类型的权重总得分。同时,不同缓冲区圈层内的权重乘以相应的衰减系数。为便于计算,本研究采用分段函数,设定不同距离缓冲区衰减系数的方法:400 m内设施服务无衰减,400~800 m衰减系数为0.9,800~1 200 m衰减系数为0.55,1 200~1 600 m衰减系数为0.25,1 600~2 400 m衰减系数为0.08,距离超过2 400 m则认为超过设施服务范围^[20]。

根据相关研究的结论,道路交叉口与街区长度对于步行影响明显,因此本次评价也纳入了步行指数中道路交叉口和街区长度的衰减计算,其衰减率各分为六级(表2)。当交叉口密度大于200个每平方英里并且街区长度小于120 m时,衰减系数为0。交叉口密度统计范围为街道长度中点为中心的1平方英里内交叉口个数,街区长度为街道本身长度。

通过设施便捷程度得分进行交叉口密度衰减、街区长度衰减后,获得街道步行指数评分(图1),计算公式为:

$$\text{walk} = w_i \times (1 - a_{\text{交}} - a_{\text{长}}) \quad (1)$$

其中, w_i 为路段步行指数, $a_{\text{交}}$ 为交叉口衰减系数, $a_{\text{长}}$ 为街区长度衰减系数。

静安区街道的计算结果如图1所示,得分最高的路段(98.7~100)主要集中在南京西路和北京西路;并且南北走向的华山路、常德路、陕西北路、江宁路以及泰兴路等也在与南京西路和北京西路交汇的路段得分最高。这充分表明,南京西路至北京西路之间的地区是静安区功能混合度最高、步行吸引力最强的地区。值得注意的是,南北高架和延安高架沿线道路在途径商业区的部分路段也有较高的步行得分。而得分较低的路段主要分布在静安区北侧的海防路、胶州路和常德路北段,而这类路段周边地区主要为高档封闭式住宅区。同时,一条道路的不同路段由于周围地区的功能分布差异从而导致了步行指数存在一定差异,例如常德路。

此外,从步行指数的数值分布可发现,静安区各个路段

表1 设施分类和权重

设施分类	权重	设施分类	权重	设施分类	权重
杂货店(含便利店)*	3	咖啡店	2	学校	1
餐馆、酒吧	3	银行	1	书店	1
商店	2	公园	1	娱乐场所	1

注:*设施分类标准与权重赋值在其原有计算方法基础上进行部分调整,提高便利店权重,取消茶馆等数量过少的设施。

资料来源:作者根据walkscore.com调整绘制

表2 道路交叉口与街区长度衰减系数

交叉口密度/个/平方公里 (平方英里)	衰减率/%	街区长度/m	衰减率/%
>77 (200)	0	<120	0
58~77 (150~200)	1	120~150	1
46~58 (120~150)	2	120~150	2
35~46 (90~120)	3	165~180	3
23~35 (60~90)	4	180~195	4
<23 (60)	5	>195	5

资料来源:walkscore.com/Walk Score Methodology

步行指数得分整体差异并不显著。主要原因是作为传统浦西七区之一的静安区设施配套完善,道路密度高,基于设施便捷性与道路支撑水平的传统步行指数区分度不高,因此有待纳入其他要素进一步深化分析静安区各个路段之间的可步行性差异,例如其交通污染水平。

2.2 交通污染水平计算及整合评价

交通污染情况的获取最准确与最直接的方法是针对路旁污染程度进行采样与监测,但此方法工作量巨大且需要长时间观测。既有研究已经证明交通污染物浓度与道路等级、车流量以及与道路的距离均存在相关性^[21],其中道路等级一定程度上体现了车辆类型和车流量。针对北京与重庆的研究显示,道路密度、车流量与空气颗粒物浓度呈正相关^{[21][22]}。通过对不同等级道路的可吸入颗粒物浓度分析,已有研究也指出大型工程车辆使用、道路拥堵更易造成高污染的情况。同时,交通污染物分布和到道路的距离显著相关。针对美国加州南部的研究显示,交通相关污染物在距离高速路约 90 m 处有显著减少的趋势^[23];荷兰代尔夫特市的相关研究显示,空气中的交通污染物浓度在距离道路约 150 m 处下降程度明显^[24]。

因此,本研究所考虑的道路交通污染来源主要包含两方面:其一为本路段车流量,代表该路段上交通污染水平;其二为高等级道路车流污染对周边地区的扩散影响。本研究选取上海市核心区内早晚高峰出行时段的道路交通状况,从而基本排除大型工程车辆、运输车辆的影响。同时研究以道路等级为基础,结合道路饱和度进行车流量估算与污染评价,并纳入高等级道路对周边特定缓冲区的扩散污染。

在具体计算方法中,路段车流量通过道路理论通行能力叠合道路饱和度得到。其中,道路理论通行能力(C)的主

要影响因素包括车道数、车速、交叉口折减及车道宽度折减等;道路饱和度(S)是指车道实际交通量与车道通行能力的比值,反映了路段交通服务水平。本研究所采用的道路饱和度数据是通过获取连续一周内静安区早晚高峰时间(早上 8 点和晚上 6 点两个时间点)的百度路况拥堵程度进行赋值推算,并除以天数(7 天)进行均值计算,得到每条道路的饱和度(图 2)。在此基础上,可计算各路段预测车流量情况 T (图 3),计算公式为:

$$T=C \times S \quad (2)$$

$$C=\sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

$$C_i=C_0 \times \beta_{\text{条}} \times \beta_{\text{交}} \times \beta_{\text{车道}} \quad (4)$$

其中路段预测车流量(T)是指高峰状态下预估该路段的车流量水平,由路段通行能力(C)与路段饱和度(S)乘积得到。路段通行能力(C)指该路段在单位时间内所有

图 2 静安区道路早晚高峰平均饱和度

资料来源:作者根据上海交通出行网数据绘制

图 1 静安区街道基础步行指数得分

资料来源:作者绘制

图 3 静安区道路车流量估算

资料来源:作者绘制

车道通过的车辆数的总计，利用路段各个车道的通行能力 (C_i) 叠加进行计算。车道通行能力 (C_0) 指单车道的通行能力，利用理论通行能力进行车道折减 ($\beta_{\text{条}}$)、交叉口折减 ($\beta_{\text{交}}$)、车道宽度 ($\beta_{\text{车道}}$) 折减后获得。道路饱和度 (S) 取值标准按照饱和度水平常用范围中位数选取。

同时考虑交通污染的扩散影响，本研究针对快速路和主干路，按照既有研究经验所提出的 150 m、90 m 的环境影响范围，对位于该范围内的路段进行污染情况的叠加计算。例如华山路与快速路延安西路交叉，因此华山路与延安西路沿线 100 m 缓冲区范围的交汇路段需要增加这一部分污染影响；其步行指数将低于华山路其他路段（图 4）。

根据已有研究，道路的交通状况对步行出行概率具有显著影响，OR（优势比）约为 1.5，即暴露在安全交通环境的居民步行出行概率是暴露在不安全步行出行概率的 1.5 倍^[25]。因此，若以道路交通对步行出行的总影响为 1 计算，道路交通状况对步行出行概率解释力为 0.6，对未发生出行概率解释力为 0.4。因为本部分关注道路污染对出行的影响，所以选定其对可步行性的影响系数为 0.4。沿用步行环境对于基础步行指数修正的思路，本研究利用衰减系数的方法来整合污染情况对于步行指数的修正。根据路段的污染情况划分为 10 个等间隔的衰减等级，赋予 0~0.4 等间隔分级的影响系数；即标化后交通污染水平最低的路段其步行指数的衰减率为 0.04，标化后交通污染水平最高路段的步行指数衰减率为 0.4。叠加交通污染水平的街道步行指数计算方法如下：

$$\text{walk}_p = \text{walk} \times (1 - a_{\text{污}}) \quad (5)$$

其中，walk 为基于设施便利度的步行指数得分， walk_p 为叠加上污染的步行指数， $a_{\text{污}}$ 为路网污染衰减系数。

结果如图 5 所示，当考虑到机动车数量导致的步行环境污染时，静安区各路段得分与仅考虑设施便利性的步行指数

图4 静安区道路交通污染水平
资料来源：作者绘制

出现较大差异。可步行性得分最高的路段主要分布在愚园路、南阳路、安远路、余姚路、奉贤路等，这类道路的道路等级大多为支路，车流量较少，并且远离机动车拥堵度较高的南北高架和延安高架。而得分衰减最明显的路段主要分布在南北高架和延安高架沿线道路、华山路、南京西路和北京西路等，并且高架路对沿线路段和与其交汇的路段具有明显的衰减效应。此类道路虽然拥有较高的设施便利度得分，但由于路段车流量较多，且靠近城市高架，导致空气污染较高，从而影响了步行环境品质。

2.3 基于人口出行水平计算及整合评价

为了进一步探索步行指数的优化，考虑周边居住区居民年龄结构对步行环境的要求，研究建议将人口密度和特定人群比例纳入计算，从而表征街道周边区域特定人群步行活动的可能强度和需求。本研究以老年人为例，因为老年人出行目的倾向于生活型而非通勤型，出行方式更加偏向步行^[26]；老年人出行目的及出行习惯决定其活动空间更多集中在住地周边；同时对于步行环境更为敏感，因此需要给予更多的关注及倾向性的服务配套。

研究纳入上海市第六次人口普查数据，通过静安区各路段两侧居委会人口密度与静安区平均人口密度的比值，计算路段步行服务需求水平。通过人口密度和 60 岁以上老年人口占比这两个指标计算老年人口出行需求。

计算公式为：

$$E = (M_i / \bar{M}) \times R_j \quad (6)$$

$$\text{walk}_{PE} = \text{walk}_p \times E \quad (7)$$

其中，E 为居委会内老年人口出行潜力， M_i 为路段周围居委会的人口密度， $\bar{M}$ 为静安区整体范围人口密度， R_j 为路

图5 静安区各路段叠加交通污染的步行指数得分
资料来源：作者绘制

段周围居委会 60 岁以上老人比例。 $walk_{PE}$ 为叠加污染衰减的老年人步行指数。

根据人口密度与老年人比例加权后, 获得研究范围内整合交通污染与针对老年人口的步行指数 (图 6)。根据具体结果可知, 经过加权后, 得分较高的路段主要分布在武定西路与胶州路北段、延安中路与乌鲁木齐北路。这说明区内居住的老年人口, 在这些区域具有更高的步行需求, 应考虑对这些路段进行适老化的专门设计。

3 结论与讨论

可步行性是城市步行友好程度的重要表征, 也是健康城市规划的重要内容。步行指数是可步行性评价中应用最为广泛的方法之一; 而街道是步行相对集聚并且人体的污染暴露程度较高的区域。因此本研究选取上海市静安区各条街道作为分析空间单元。针对人体健康, 研究从环境和社会两个维度进行步行指数的优化计算。在环境维度, 以机动车交通作为高密度城区主要的污染来源, 结合道路等级和道路交通饱和度计算污染度, 纳入步行指数。在社会维度, 纳入居住人口密度和特定人群比例, 明确各个路段特定人群的步行潜力情况。基于上海市静安区街道步行指数的三步计算, 得到各个街道路段针对特定年龄人群的步行指数, 能够更加全面反映街道的可步行能力和特定年龄人群步行需求的分布。比较纳入新要素后的测度结果与原有测度结果的不同, 明确了纳入的必要性和显著性。空气污染的纳入使步行指数不仅仅是评价设施步行可达的便利性、支撑步行的物质空间的友好程度, 并且能够反应步行活动的健康影响情况。居民密度和老年人口比例的纳入可以体现出哪些街道具有较大的老年人口步行需求, 并可针对该人群的步行需求分析结果开展相应的

街道设计优化。这是针对不同特征人群的步行指数评价的尝试, 为根据具体对象需要、进行不同特征人群的步行指数分析提供了方法基础。

因此研究对步行指数的计算方法进行了优化。在步行指数计算中纳入交通污染、居民密度和年龄结构的优化方法, 可结合使用也可以根据需要单独使用, 用以评价地区步行环境与步行需求的不同特征, 从而为街道设计提供了依据。

步行是重要的体力活动, 街道可步行性的提升将显著促进人们的体力活动。街道空间的可步行性设计是健康城市的重要方面, 不仅需要考虑功能目的地的设置, 以及路径过程中的人体污染暴露, 也需要根据空间使用者开展具有针对性的设计优化。步行指数计算方法中纳入污染和人口结构, 将有利于全面评估路段的可步行性, 提出更加精准的设计要求或改造目标。本研究测算了交通污染水平, 对于其主要影响因素车流量进行了计算, 此方法适用于大范围评测。进一步的精准评价可安置仪器, 开展污染水平的直接测量, 也可通过统计车流量和车型情况来计算。同时, 基于人口密度及年龄结构的步行指数计算具有方法论方面的意义, 能够体现不同的出行目的, 后续研究可以进一步纳入就业人口的数据, 也可对城市街道可步行性进行人群细分, 从而进行有针对性的街道设计, 提升街道的可步行性。UPI

参考文献

- [1] 刘连连, 尉闻. 步行性评价方法与工具的国际经验 [J]. 国际城市规划, 2018, 33(4): 107-114.
- [2] SMITH K R, BARBARA B B, YAMADA I, et al. Walkability and body mass index density, design, and new diversity measures[J]. American journal of preventive medicine, 2008, 35(3): 237-244.
- [3] ROJAS-RUEDA D, NAZELLE A D, TEIXIDÓ O, et al. Replacing car trips by increasing bike and public transport in the Greater Barcelona Metropolitan Area: a health impact assessment study[J]. Environment international, 2012, 49: 100-109.
- [4] KIM J J, SMORODINSKY S, LIPSETT M, et al. Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay children's respiratory health study[J]. American journal of respiratory & critical care medicine, 2004, 170(5): 520-526.
- [5] FINKELSTEIN M M, JERRETT M, SEARS M R. Environmental inequality and circulatory disease mortality gradients[J]. Journal of epidemiology & community health, 2005, 59(6): 481-487.
- [6] KARANASIOU A, VIANA M, QUEROL X, et al. Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities-recommendations and policy implications[J]. Science of the total environment, 2014, 490(23): 785-797.
- [7] CERVERO R, KOCKELMAN K. Travel demand and the three Ds: density, diversity, and design[J]. Transportation research part d: transport and environment, 1997, 2(3): 199-219.
- [8] Walkability - ein Ansatz der Bewegungsförderung[EB/OL]. [2015-08-01]. <http://www.fuss-ev.de/literatur/102-literatur/519-walkability-bewegungsfoerderung.html>.
- [9] 卢银桃, 王德. 美国步行性测度研究进展及其启示 [J]. 国际城市规划, 2012, 27(1): 10-15.
- [10] 任春洋. 高密度方格路网与街道的演变、价值、形式和适用性分析 [J].

图6 静安区街道叠加污染衰减的老年人步行指数
资料来源: 作者绘制

- 城市规划学刊, 2008(2): 53-61.
- [11] 李怀敏. 从“威尼斯步行”到“一平方英里地图”——对城市公共空间网络可步行性的探讨[J]. 规划师, 2007, 23(4): 21-26.
- [12] 简·雅各布斯. 美国大城市的死与生[M]. 金山衡, 译. 北京: 译林出版社, 2010.
- [13] Walk Score. About walk score[EB/OL]. [2015-08-03]. <https://www.walkscore.com/about.shtml>.
- [14] CARR L, DUNSINGER S, MARCUS B. Validation of walk score for estimating access to walkable amenities[J]. British journal of sports medicine, 2010, 45(14):1144-1148.
- [15] MANAUGH K, EL-GENEIDY A M. Validating walkability indices: how do different households respond to the walkability of their neighbourhood?[J]. Transportation research part d: transport and environment, 16(4): 309-315.
- [16] Sheharyar Bokhari, Redfin Real Estate. How Much is a Point of Walk Score Worth?
- [17] 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 environment research and public health, 2011, 8(11): 4160-4179.
- [18] 吴健生, 秦维, 彭建, 等. 基于步行指数的城市日常生活设施配置合理性评估——以深圳市福田区为例[J]. 城市发展研究, 2014, 21(10): 49-56.
- [19] 龙瀛, 周琅. 街道活力的量化评价及影响因素分析——以成都为例[J]. 新建筑, 2016(1): 52-57.
- [20] 周琅, 龙瀛. 街道步行指数的大规模评价——方法改进及其成都应用[J]. 上海城市规划, 2017(1): 88-93.
- [21] 侯芳, 赵文慧, 李志忠, 等. 北京市城区不同等级道路网对可吸入颗粒物的浓度影响研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(5): 135-137.
- [22] 陈刚才, 潘纯珍, 杨清玲, 等. 重庆市主城区交通干道空气污染特征分析[J]. 地球与环境, 2004, 32(3): 59-62.
- [23] 王征, 邱兆文. 基于 CALINE4 模式的平原地区高速公路机动车尾气污染水平研究[J]. 交通节能与环保, 2015(3): 17-19.
- [24] 李修刚, 王炜, 李方, 等. 公路交通气态污染物扩散模式中的几何参数计算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, 30(2): 131-137.
- [25] WANG Y, CHAU C K, NG W Y, et al. A review on the effects of physical built environment attributes on enhancing walking and cycling activity levels within residential neighborhoods[J]. Cities, 2016, 50: 1-15.
- [26] 黄建中, 吴萌. 特大城市老年人出行特征及相关因素分析——以上海市中心城为例[J]. 城市规划学刊, 2015(2): 93-101.

(本文编辑：许玫)