

基于步行性与污染物暴露空间格局比较的 建成环境健康效应 ——以南京为例

陈曦, 冯建喜*

(南京大学建筑与城市规划学院, 南京210093)

摘要:在雾霾问题日益严重的中国,通过提高建成环境的步行性以增加居民户外体力活动的同时,也会增加居民的污染物暴露度,最终的健康效应不一定为正。针对这一悖论,论文以南京为例,通过步行指数测度步行性,基于土地利用回归模型和插值模拟 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度的空间分布,在此基础上比较步行性与污染物暴露的空间关系,从而对建成环境健康效应进行评价。研究表明:确实存在高步行性但同时也是高污染物暴露的城市空间,这部分空间主要分布在城市中心区,在这些地区片面强调提高步行活动其实是存在很大健康风险的;城市郊区则呈现低步行性且低污染物暴露的特征,其健康效应亦难以直接判断;靠近城市中心但又距其有一定距离的大面积绿地周边地区呈现高步行性且低污染物暴露的特征,其健康效应为正;而城乡交界的半城市化地区容易成为低步行性且高污染物暴露的健康效应为负的空间。研究结果可以为精准制定健康城市的土地利用政策提供参考依据。

关键词:步行指数;健康城市; $PM_{2.5}$; O_3 ; 南京

改革开放以来,快速城镇化给中国带来巨大经济发展的同时,也改变了城市建成环境的特征。城市空间的低密度、蔓延式发展增加了小汽车出行的比例,改变了居民的出行方式,居民体力活动随之减少。相关研究表明,步行性的降低会增大居民肥胖、动脉硬化、心率不齐等慢性疾病的风险(Yang et al, 2013),从而直接影响城市居民的健康。因而,近年来以健康为主题发表的文章和申请基金的数量呈现出爆炸式增长势头,与欧美国家的大部分研究相似,这些研究将焦点集中于步行性对健康的影响(马静等, 2017)。然而需要警醒的是,与西方国家不同,中国城市面临着严峻的空气污染问题,而空气质量的恶化同样威胁城市居民健康(Brunekreef et al, 2002; Brauer et al, 2007)。这就存在一种悖论,提高步行性以增加居民户外体力活动的同时也会带

来更大的污染物暴露,最终的结果不一定能提高城市居民的健康水平。因此需要综合评估城市健康环境对健康的影响,从而精准地识别城市中高步行性低污染暴露的空间,判断其特征,从而为更有针对性的政策制定提供科学依据。

目前步行性的主流测度方法一般从步行环境、步行空间可达性和社会文化3种视角切入。其中,基于步行环境视角的测度方法主要包括英国交通研究实验室于2001年开发的行人环境评价系统(PERS)(引自黄建中等, 2016)、Charles等(1957)提出的基于心理学的测定方法语义差别法(SD法)以及丹麦著名规划师Gehl等(1996)创建的公共生活-公共空间(Public Life and Public Space, PLPS)调查法等,基于步行空间可达性的测度方法以步行指数(Walk Score)最具代表性,基于社会文化因素的测度

收稿日期:2018-05-16;修订日期:2018-12-27。

基金项目:国家自然科学基金项目(41871135);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(090214380017)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41871135; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 090214380017.]

第一作者简介:陈曦(1993—),男,广东汕头人,硕士生,主要从事城市与区域规划研究。E-mail: nju_xichen@163.com

*通信作者简介:冯建喜(1983—),男,陕西定边人,副教授,主要从事健康城市研究。E-mail: jxfup@nju.edu.cn

引用格式:陈曦, 冯建喜. 2019. 基于步行性与污染物暴露空间格局比较的建成环境健康效应: 以南京为例 [J]. 地理科学进展, 38(2): 296-304.
[Chen X, Feng J X. 2019. Health effects of built environment based on a comparison of walkability and air pollution: A case study of Nanjing City. Progress in Geography, 38(2): 296-304.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.02.012

方法则主要包括美国的邻里质量生活研究(NQLS)(Sallis et al, 2009)和澳大利亚的聚居地与社会环境的身体活动研究(PLACE)(Owen et al, 2007)。

城市大气环境中,对人口健康有重要影响的污染物有PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、O₃、VOCs等,其中PM_{2.5}和O₃对人体的危害尤为严重(王叶晴等, 2012),且两者的健康效应有所不同。研究表明,长期暴露于PM_{2.5}会加剧呼吸系统疾病和心脏病患者的病情,敏感人群主要为哮喘、慢性肺功能障碍、支气管炎、肺炎等呼吸系统疾病患者。O₃暴露对人体的呼吸系统和肺功能会产生消极影响,其潜在健康影响目前仍处于研究阶段。现有研究显示,长期暴露于O₃会触发哮喘病,其危害程度不亚于PM_{2.5}(游燕等, 2012)。对污染物空间分布的模拟方法则以插值法和土地利用回归模型(LUR模型)为主(Hoek et al, 2008; Fang et al, 2011)。插值法是基于污染物监测点的数据利用不同的插值方法从而得出污染物面状浓度的方法。土地利用回归模型首先选取与污染物浓度相关的地理因子,利用双变量相关分析得到高度相关的因子,进行多元线性回归分析得到回归方程,最后代入相应地理数值得到污染物浓度的空间分布情况(焦利民等, 2015)。

本文以南京为实证案例,利用步行指数测度研究区步行性,基于LUR模型和反距离权重插值模拟研究区污染物浓度空间分布,并对两者的空间格局关系进行比较分析,识别出高步行性低污染暴露的健康空间,为健康城市规划提供参考。

1 基于步行指数的步行性测度

1.1 研究数据与方法

在考虑南京建成区范围和空气质量监测点分布的基础上,将研究范围具体确定为南京主城区的8区56个街道(图1),总面积为1064.66 km²。在计算步行指数时主要依据卢银桃等(2012)的《美国步行性测度研究进展及其启示》中的方法,该方法考虑的影响因素包括土地利用混合度(以设施服务表征)、交叉口密度和街区尺度,为进一步体现步行环境对步行性的影响,本文将适宜步行道路(主要指支路)占比也纳入考虑因素。首先,确定不同服务设施权重和衰减函数,并基于此得出计算单元的基础步行指数;然后,叠加交叉口密度、适宜步行道路占比和街区尺度3个方面的影响,得出计算单元的

单点步行指数;最后,利用空间插值法,得出整个区域的步行指数。本文的计算单元是1 km×1 km的正方形网格,整个研究区域可以划分出1067单元。

1.1.1 基础步行指数

基础步行指数是依据单元内不同设施的数量和空间分布计算得出,设施的数量越多,步行指数越高。原设施分类表分为杂货店、餐馆、商店、咖啡店、银行、公园、学校、书店共10个小类,并根据不同设施的重要性分别进行权重打分。本文在其基础上增加医院设施并参照其他公共服务设施赋权重为1,最终权重总和为16(表1)。

各设施的POI(point of interest)数据通过百度地图爬取,在此基础上进行距离衰减。参照已有研究(吴健生等, 2014),考虑行人可接受的步行时间,在进行距离衰减时假定:当设施距离出发点在500 m以内不发生距离衰减;当设施距离出发点500~

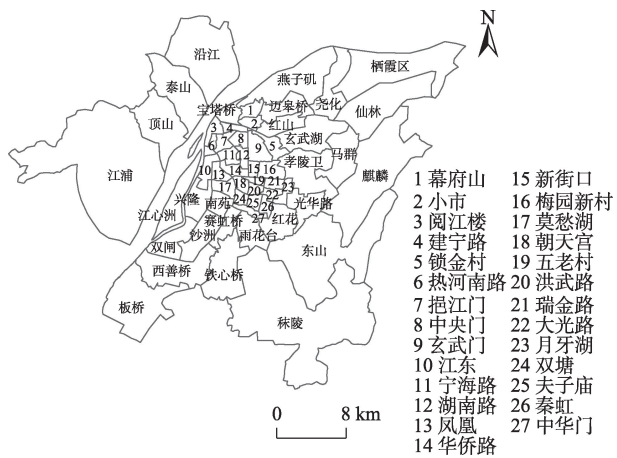


图1 研究区范围

Fig.1 The study area

表1 设施分类及权重

Tab.1 Classification of facilities and weights

设施分类		分类权重	权重
餐饮	餐馆	0.75, 0.45, 0.25, 0.25, 0.225, 0.225, 0.225, 0.2, 0.2	3
	咖啡店	2	2
购物	商场	0.5, 0.45, 0.4, 0.35, 0.3	2
	便利店	3	3
休闲	公园	1	1
	书店	1	1
	娱乐场所	1	1
公共服务	学校	1	1
	银行	1	1
	医院	1	1
总计		16	16

1000 m之间时,衰减率为25%;当设施距离出发点1000~1500 m之间时,衰减率为88%;当设施距离出发点1500 m以上时,认为该设施对步行指数无影响。将各出发点1500 m范围内各设施的权重衰减后相加,即可得到该点的基础步行指数(图2a)。

1.1.2 单点步行指数

基础步行指数只是在POI设施服务的基础上考虑了简单的直线距离衰减,对步行环境并没有充分考虑。如上所述,本文主要考虑了交叉口密度、适宜步行道路占比和街区尺度3个方面对步行指数的影响,其中路网数据由OSM数据提取获得。

参照吴健生等(2014)的研究,将交叉口密度、适宜步行道路占比和街区尺度的衰减率分为6级,三者可衰减的最大值为15%(表2)。考虑步行环境衰减后的步行指数最大值为16,为了便于后面的分析评价,将其等比例放大到100,即扩大5.25倍,最终步行指数是一个0~100之间的数值,计算结果如图2b。

1.1.3 面域步行指数

为得到精度更高的步行指数分布,采用普通克里格法进行空间插值。插值后研究区步行指数最大值为91.3,最小值为0.1,平均值为38.1(图2c)。

1.2 步行性特征

如图2所示,南京市主城区的步行指数呈多中

心轴向衰减的空间格局。4个中心分别是南京大学周边区域、夫子庙周边区域、东山老城区域和学则路周边区域;轴向衰减则是指沿龙蟠中路—双龙大道、凤台路、仙林大道、大桥路、江北大道快速路等城市主要干道向东山、仙林、浦口副城逐步衰减,形成明显的东西向沿江条带和南北向城镇条带。

对比图2a、图2b可以看到,基础步行指数和单点步行指数在空间分布上略有差异。基础步行指数是各类设施叠加之后的结果,所以在一定程度上反映了南京城市的空间格局,基本上呈现出多中心的格局(新街口主中心、东山副中心、仙林副中心和浦口副中心)。但当叠加了交叉口密度、适宜步行道路占比和街区尺度3个因素之后,主城区步行指数最高的空间由新街口区域变为南京大学周边区域。这是因为虽然新街口是南京的主中心,其各类设施的密度是最高的,但由于其周边适宜步行道路的比例不高,且过于拥堵,在一定程度上削弱了其最终的步行性。而南京大学周边则兼具生活设施丰富、路网密集、步行系统完善且尺度宜人等优势,成为南京步行指数最高的区域。学则路周边虽然公共服务设施密度相对较低,但由于学则路是联系仙林大学城各校园的关键性商业步行街,优良的步行环境使其最终成为单点步行指数中的一个高值点。五台山片区虽然位于主城中心附近,周边设施

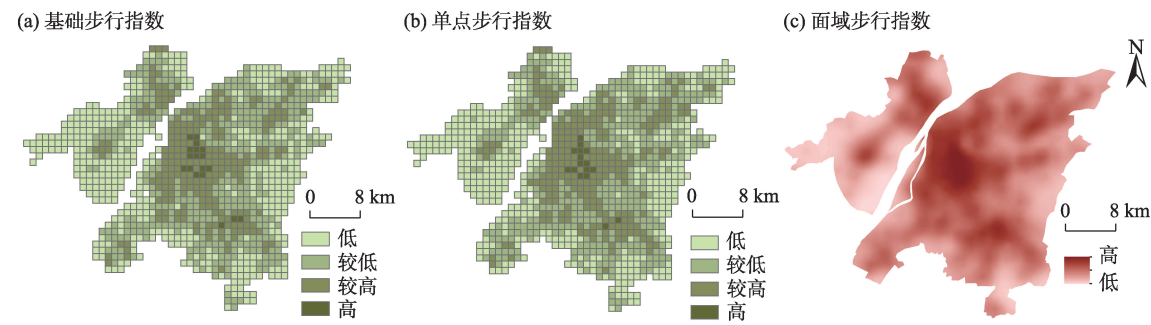


图2 南京市主城区步行指数
Fig.2 Walkability score of the main urban area of Nanjing City

表2 交叉口密度、适宜步行道路占比与街区尺度衰减

Tab.2 Intersection density, percentage of suitable walking roads, block size, and attenuation rates					
交叉口密度/(个/km ²)	衰减率/%	适宜步行道路占比/%	衰减率/%	街区尺度/m	衰减率/%
>77	0	>88	0	<120	0
58~77	1	69~88	1	120~150	1
47~58	2	51~69	2	150~165	2
35~47	3	33~51	3	165~180	3
23~35	4	12~33	4	180~195	4
<23	5	<12	5	>195	5

密度高,但由于其为山地地形,街区尺度偏大,最终步行指数并不突出。

此外,步行指数还存在若干“孔洞”区域,一般认知中紫金山和玄武湖等城市大型生态空间应是步行性较高的区域,但因为其内部几乎没有公共服务设施,且路网密度小,空间尺度大,所以这些空间本身反映在步行指数上反而并不高,这与步行指数计算的标准有关。

2 污染物浓度的空间分布模拟

本文选取PM_{2.5}和O₃作为空气污染物的代表进行研究。相关研究表明城市内部PM_{2.5}浓度具有显著的空间异质性(刘永红等, 2011),故需要借助LUR模型进行区域层面的浓度空间分布模拟。而O₃的空间异质性不明显且与地理要素关系不显著,在模拟区域浓度时一般采用反距离权重法插值即可(Marshall et al, 2008)。

2.1 污染物浓度数据的获取

南京市共有9个空气污染物监测点(图3),分别位于迈皋桥、瑞金路、浦口、奥体中心、中华门、草场门、玄武湖、山西路和仙林大学城。监测点污染物浓度数据来自国家空气质量自动监测点位的空气

质量自动监测实时数据,具有可靠性。本文采用南京9个监测点2017年春季(3—5月)^①空气污染物平均浓度数据(表3)。

2.2 PM_{2.5}浓度空间分布

2.2.1 相关变量的选取

结合LUR模型中常用的地理相关变量和南京的实际情况,选取道路交通、土地利用、人口密度和工业污染影响等4类地理相关变量(陈莉等, 2009)。采用缓冲区内的道路长度表征道路交通情况,缓冲区内的建设用地、水域、植被面积表征土地利用情况,工业污染源排放量与监测点的距离关系表征污染影响。利用双变量相关分析法确定不同缓冲区半径下的显著相关地理变量,从双变量相关分析结果中筛选出相关系数R的绝对值大于0.5的影响因子,其中在不同缓冲区半径下的同类影响因子选择相关性最大的变量。最终选择的变量为500 m半径缓冲区内的道路长度(x₁)、2000 m半径缓冲区内的水域面积(x₈)、1000 m半径缓冲区内的建设用地面积(x₁₀)以及1000 m半径缓冲区内的植被面积(x₁₄),具体见表4。

2.2.2 模型建构与模拟

以监测点PM_{2.5}平均浓度为因变量,以相关性较高的地理变量(x₁, x₈, x₁₀, x₁₄)为自变量,构建多元线性回归方程如下:

$$Y=0.804x_1-6.328x_8-6.458x_{10}-14.590x_{14}+61.743$$

(1)

方程R²=0.944,说明该方程的拟合优度较高,不被解释的变量较少。对线性回归方程进行F检验,检验统计量F=16.702,显著性水平Sig.=0.009,小于0.01,说明被解释变量与解释变量全体的线性关系是显著的,可建立线性方程。线性回归方程与各监测点PM_{2.5}浓度拟合效果较好,大部分监测点的预测误差率在2%以下(表5)。

在研究区范围内同样以1000 m为间隔构建正方形格网点阵数据,将网格点的相应相关地理变量

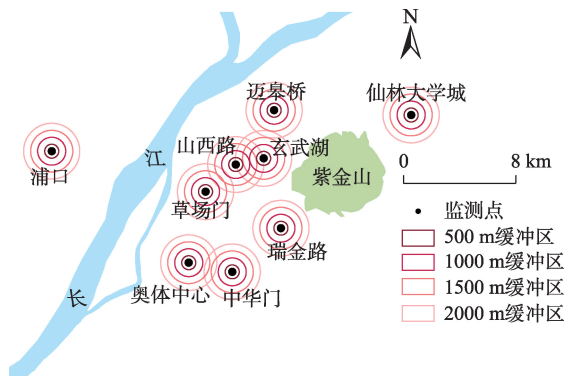


图3 南京空气污染监测点分布
Fig.3 Distribution of air pollution monitoring sites
in Nanjing City

表3 空气污染物平均浓度
Tab.3 Average concentration of air pollutants (μg/m³)

污染物	迈皋桥	瑞金路	浦口	奥体中心	中华门	草场门	玄武湖	山西路	仙林大学城
PM _{2.5}	42.77	47.77	38.54	48.39	41.66	33.31	32.83	42.26	40.73
O ₃	85.99	90.71	92.25	75.63	92.39	105.87	90.04	111.21	92.96

① PM_{2.5}的污染情况在每年冬季至次年春季相对严重,但O₃在冬季污染情况不严重,之后随着气温升高污染情况逐渐加重,由于本文选取PM_{2.5}与O₃作为代表性空气污染物,需要同时考虑二者不同季节的污染情况,最终选用春季数据进行研究。

代入多元线性回归方程后得到网格点处 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的预测值。采用普通克里格法插值后即可得到研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的模拟图(图4a)。

2.2.3 分布特征

总体上看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现从单中心向四周衰减的空间格局:浓度最大的区域是城市中心新街口区

域,距离越远,浓度越小。大型生态基底对 $\text{PM}_{2.5}$ 有显著的削减作用:长江两侧的浓度相对较低;城市东北部的紫金山和西南部的牛首山两大都市绿心成为中心城区两侧的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低值中心,并围绕其形成2个由中心向周边 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐渐上升的圈层带,最终使得中心城区的 $\text{PM}_{2.5}$ 形成由西北向东南延伸的高浓度条带。

2.3 O_3 浓度空间分布

利用各监测点所监测的 O_3 浓度进行反距离权重法插值,得到研究区范围内的 O_3 浓度分布(图4b)。其分布在南京由城市中心向郊区呈现高一低—高圈层式分布的特点。 O_3 浓度最高的地区是鼓楼区的山西路到草场门一带,而城市中心外围的迈皋桥、瑞金路、奥体中心一带浓度急剧降低,成为低值圈层,到了郊区的浦口和仙林大学城又有所升高。这些分布特征与 O_3 的形成机制有关, O_3 在城市中心形成之后会与其他污染物发生反应消耗,然后随风飘向郊区后在氧气充足、日照强烈的条件下又反应生成 O_3 。

3 步行性与污染物暴露空间格局比较

3.1 步行性与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的比较

对比图2、图4,步行指数和 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分布有显著差异。为了能更加直观地展示它们的空间分

表4 双变量相关分析结果

Tab.4 Results of the bivariate correlation analysis

影响因子	与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关系数 R
道路长度_500 m (x_1)	0.585*
道路长度_1000 m (x_2)	0.167
道路长度_1500 m (x_3)	0.159
道路长度_2000 m (x_4)	0.072
水域面积_500 m (x_5)	-0.557
水域面积_1000 m (x_6)	-0.627*
水域面积_1500 m (x_7)	-0.623*
水域面积_2000 m (x_8)	-0.629*
建设用地面积_500 m (x_9)	0.713**
建设用地面积_1000 m (x_{10})	0.793**
建设用地面积_1500 m (x_{11})	0.710**
建设用地面积_2000 m (x_{12})	0.402
植被面积_500 m (x_{13})	-0.510
植被面积_1000 m (x_{14})	-0.784**
植被面积_1500 m (x_{15})	-0.679**
植被面积_2000 m (x_{16})	-0.550
人口密度(x_{17})	0.168
工业污染影响(x_{18})	0.232

注:*,**分别表示在0.10、0.05水平上显著。

表5 监测点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度拟合结果

Tab.5 Difference between model prediction and actual concentration of $\text{PM}_{2.5}$ at the monitoring sites

监测点	草场门	中华门	瑞金路	玄武湖	迈皋桥	山西路	仙林大学城	奥体中心	浦口
预测值	34.95	41.44	47.45	32.61	40.12	44.01	40.18	48.73	38.74
差值	1.64	-0.22	-0.32	-0.22	-2.65	1.75	-0.55	0.34	0.20
误差率/%	4.92	-0.52	-0.68	-0.66	-6.20	4.13	-1.35	0.70	0.51

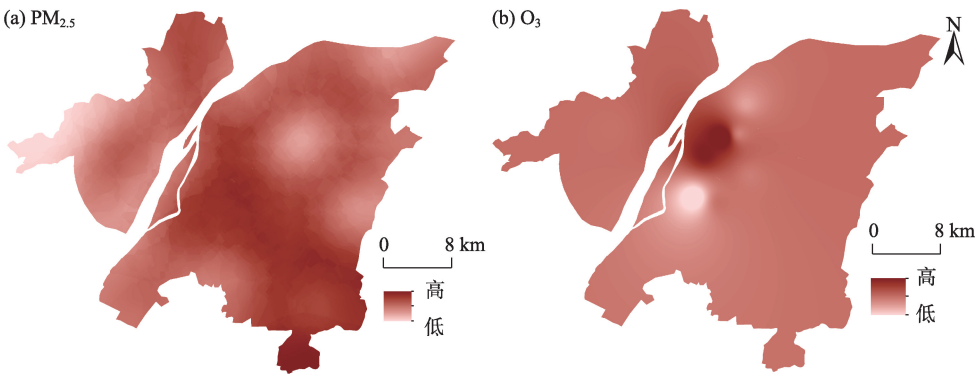


图4 南京主城区污染物浓度分布

Fig.4 Simulation results of pollutant concentration in the main urban area of Nanjing City

布关系,将空间分为4类:高(步行指数)-高($\text{PM}_{2.5}$ 浓度)、高(步行指数)-低($\text{PM}_{2.5}$ 浓度)、低(步行指数)-高($\text{PM}_{2.5}$ 浓度)和低(步行指数)-低($\text{PM}_{2.5}$ 浓度)。显然,高步行指数且低污染物浓度(高-低类空间)的城市空间对健康的影响是正向的,也是规划所寻求的建成空间;低步行指数且污染物浓度高(低-高类空间)的区域不利于居民健康,是规划应减少的空间;而高-高和低-低类空间的健康效应不能直接判断,需要进一步研究(图5a)。

高-高类空间集中分布在城市主中心区以及城市副中心周边。城市中心区的路网密度高、步行系统完善、各项生活服务设施完备,这些都意味着具备更高的步行性。但同时城市中心附近往往伴随着高密度的汽车尾气排放和密集的人类活动, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也会升高。可见,虽然这些区域的建成环境可以促使人们进行更多的步行活动和其他有利于健康的体力活动,但同时也增加了人们暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 的风险,最终并非会像人们通常预想的那样,一定能产生正向的健康效应。所以,片面强调建成环境的步行性可以促进健康是有风险的。低-低类空间主要分布于郊区:大街区尺度与低服务设施覆盖导致低步行性,同时低建设强度也使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低。这类空间的健康效应也不是可以直接判断的,需要进行更为细致的研究。

高-低类空间分布的显著特征是位于城市大面积绿地周边,郊区的产业和教育新城也有分布。紫金山、燕子矶、栖霞山、老山周边区域都呈现出高步行性低污染物暴露的特点。这是由于大面积绿地具有调节区域微气候、改善空气质量的作用,会形成污染物浓度的低值点,而靠近城市中心区的绿地周边往往配套有完善的生活设施和相对人性化的道路系统,因而同时具备较高的步行性。这说明在

城市绿地系统的规划中,不仅需要强调绿地的数量与合理布局,更要重视绿地周边的配套设施和慢行系统,同时强化大型绿地之间的串联,以更好地发挥城市绿地的健康效应。

低-高类空间主要分布在城乡交界的半城市化地区,这类城市型半城市化地区(何为等, 2012)的形成动因是过快的城市扩张与滞后的配套设施不匹配。一方面,在土地财政的驱动下,城市在快速扩张中的超理性开发行为导致城市边缘地区土地利用的粗放低效,而在城市中心区的“退二进三”中,这部分区域也往往成为低端制造业的承接者,因此这类空间也具有较高的空气污染物浓度;另一方面,由于基本公共服务设施的缺位和机动化主导的路网体系,这类空间的步行性也往往较低。针对这类不利于居民健康的空间,规划一方面需要进行用地存量精致化提升,逐步实现基本公共服务设施人性精准配套;另一方面需要严格控制城市增长边界,抑制城市低效无序扩张。

3.2 步行性与 O_3 浓度分布的比较

类似地,本文也分析了步行指数和 O_3 的空间分布关系(图5b)。由于 O_3 浓度的空间分布特征与 $\text{PM}_{2.5}$ 不同,由城市中心到郊区呈现出高一低一高的圈层式分布特征,因此4类空间也呈现出不同的空间特征。高-高类空间依然分布在城市中心和新城中心,但范围有所收缩;高-低类有利于健康的空间面积占比则明显扩大,集中在靠近城市中心但并非城市中心的第2圈层,具体为城南至江宁片区和下关片区;低-高类不利于居民健康的空间主要分布在东郊和西北郊,主要原因是郊区土地利用混合度低、步行环境差而 O_3 浓度高;低-低类空间主要分布在南郊。

可以发现,如果考虑 O_3 浓度对高步行性低污染

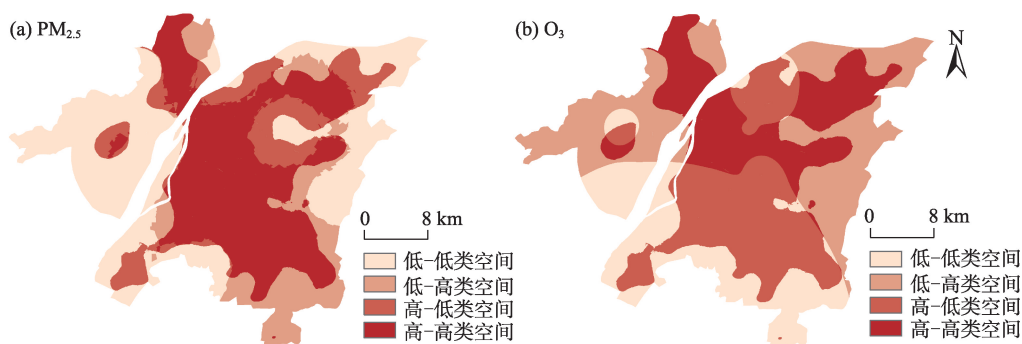


图5 步行性与污染物暴露关系的4类空间识别

Fig.5 Identification of four types of space of walkability and air pollution

物暴露空间识别的影响,在仅考虑 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时属于高-低类空间的老山、栖霞山周边区域由于郊区的高 O_3 浓度不再是对健康有正效应的空间,而紫金山、玄武湖、燕子矶周边区域由于处于 O_3 浓度空间分布的第2圈层, O_3 浓度较低,依然属于高-低类空间。这说明综合来看,靠近城市中心但又距城市中心有一定距离的大面积绿地周边更容易成为高步行性低污染物暴露的健康正效应空间。

4 结论与讨论

近年来关于建成环境对健康的影响机理及效应的研究呈现出爆炸式增长势头。已有研究表明:建成环境的某些特征确实可以通过增加体力活动(冯建喜等, 2017),进而减少肥胖,降低冠心病、高血压、高血脂、焦虑、抑郁等慢性病的发病率,进而促进人群健康(Feng, 2016)。因此世界范围内关于建成环境与体力活动以及人群健康关系的研究已成为多学科参与的研究热点。然而,体力活动水平提高的同时,也增加了居民污染空气暴露的范围和强度,会对其健康产生不利影响。对于中国这样空气污染非常严重的发展中国家,这种不利的影响将会更为显著。因此需要谨慎对待建成环境对居民健康影响的多重路径和影响效应,对建成环境的健康效应进行综合评估。从体力活动影响和空气污染暴露2个方面对建成环境影响健康的机制和效应进行综合评价,可提高建成环境的健康“净获益”,为制定合理、有效的城市土地利用和交通供给、管理政策以及其他公共政策提供理论支持和指导。

基于这样的研究目的,本文以南京为例,通过步行指数测度步行性,通过LUR模型和插值模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度的空间分布,在对步行性与污染物暴露空间关系比较的基础上,对建成环境的健康效应进行评价。发现有很多城市空间虽然有很高的步行性,但其污染物暴露风险同样也很高。比如城市中心区,由于具有较高的功能混合度、路网密度和良好的健康设施布局,其步行指数很高,也因此会被认为这样的健康环境具有正向的健康效应(张延吉等, 2018)。然而,城市中心区污染物的浓度也经常是最高的,如果同时考虑污染物暴露的因素,其健康效应未必为正。在这些地区片面强调通过建成环境提高步行活动进而促进健康是存在很大风险的(陈泳等, 2016)。而在城市的郊区,虽然其污染物浓度比较低,但由于步行指数也不高,这类空间

的健康综合效应也难以直接判断。

研究发现城市建成环境中存在所谓的甜点区域(Sweet-spot Location, 即高步行性且低污染物暴露的城市空间)和酸点区域(Sour-spot Location, 即低步行性且高污染物暴露的城市空间)(Nazelle et al, 2009)。显然,甜点区域的健康效应为正,而酸点区域的健康效应为负。对南京的具体分析显示:靠近城市中心但又距其有一定距离的大面积绿地周边更易成为高步行性低污染物暴露的健康正效应空间。而在城乡交界的半城市化地区由于过快的工业扩张与滞后的服务配套不匹配,容易成为低步行性高污染物暴露的健康负效应空间。建议未来的规划中应重视生态绿地的合理布局,并通过人性化的慢行系统和精致化的设施配套提高绿地周边的步行性,充分发挥城市绿地的健康效应。

研究还对比了2种在当前中国最为常见的污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的空间分布特征。而两者在空间分布上的差异表明需要对不同的污染物进行更有针对性和更加精准的应对措施,也彰显了实际政策制定的难度。

本文同时考虑步行性与空气污染物暴露的影响,更加系统、完整地检验建成环境对健康的作用机理,完善了现有建成环境对健康影响类的研究框架。但囿于数据的限制,本文还存在以下不足:在步行指数的计算上,有些对步行指数有重要影响的步行环境因子,如林荫道长度、建筑后退距离等没有被列入步行指数计算的考虑范围内,这会导致研究结果在某种程度上与实际体验存在一定偏差;在模拟研究区污染物浓度的过程中,受到监测点数量的限制,构建回归方程时样本量偏少,导致分析精度较低,对最终结果也会产生一定影响。在未来的研究中,可以依托空气污染决策支持系统(APDSS)(Leung et al, 2018)等新平台获取分辨率更高、属性更多的城市环境污染数据进行更为精准判断。

此外,本文是基于静态的建成环境及污染物浓度空间分布特征进行健康效应评估的,没有从个体行为的视角判断建成环境对健康的综合影响效果。随着研究精细化发展,未来将尝试从个体行为-活动的角度研究具体的健康环境特征所造成的健康效应,获取更为精准的研究结论。另一方面,随着研究精细化程度的提高,对健康公平性的关注必将成为未来研究的重点(陈曦等, 2018)。本文揭示了不同空间(特别是甜点区域和酸点区域)的不同健康效应,在此基础上,未来对比不同目标人群(年

龄、性别、收入等)的空间分布格局,特别是弱势群体所在区域的建成环境综合健康效应,揭示可能存在的健康公平性问题,将是另外一个重要研究方向。

参考文献(References)

- 陈莉,白志鹏,苏笛,等. 2009. 利用LUR模型模拟天津市大气污染物浓度的空间分布[J]. 中国环境科学, 29(7): 685-691. [Chen L, Bai Z P, Su D, et al. 2009. Application of land use regression to simulate ambient air PM₁₀ and NO₂ concentration in Tianjin City. China Environmental Science, 29(7): 685-691.]
- 陈曦,冯建喜,Pinna Plaut. 2018. 基于暴露视角的城市健康空间公平性研究:以南京为例[J]. 城乡规划, (3): 27-33. [Chen X, Feng J X, Pinna P. 2018. Urban health equity from the exposure perspective: A case study of Nanjing. Urban and Rural Planning, (3): 27-33.]
- 陈泳,毛婕,奚文沁,等. 2016. 机动化时代大城市居民步行行为特征与需求分析:以上海中心城区为例[J]. 现代城市研究, (7): 103-112. [Chen Y, Mao J, Xi W Q, et al. 2016. Pedestrian travel behavior and needs in large Chinese cities in the motorization age: A case study of the Shanghai central city. Modern Urban Research, (7): 103-112.]
- 冯建喜,黄旭,汤爽爽. 2017. 客观与主观建成环境对老年人不同体力活动影响机制研究:以南京为例[J]. 上海城市规划, (3): 17-23. [Feng J X, Huang X, Tang S S. 2017. Comparing the influences of objective and subjective built environments on physical activities participation among the elderly: A case study of Nanjing, China. Shanghai Urban Planning Review, (3): 17-23.]
- 何为,黄贤金. 2012. 半城市化:中国城市化进程中的两类异化现象研究[J]. 城市规划学刊, (2): 24-32. [He W, Huang X J. 2012. Incomplete urbanization: A research on China's urbanization. Urban Planning Forum, (2): 24-32.]
- 黄建中,胡刚钰. 2016. 城市建成环境的步行性测度方法比较与思考[J]. 西部人居环境学刊, 31(1): 67-74. [Huang J Z, Hu G Y. 2016. Comparison and thinking of the walkability measure methods on urban built environment. Journal of Human Settlements in West China, 31(1): 67-74.]
- 焦利民,许刚,赵素丽,等. 2015. 基于LUR的武汉市PM_{2.5}浓度空间分布模拟[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 40(8): 1088-1094. [Jiao L M, Xu G, Zhao S L, et al. 2015. LUR-based simulation of the spatial distribution of PM_{2.5} of Wuhan. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 40(8): 1088-1094.]
- 刘永红,余志,黄艳玲,等. 2011. 城市空气污染分布不均匀特征分析[J]. 中国环境监测, 27(3): 93-96. [Liu Y H, Yu Z, Huang Y L, et al. 2011. Characteristic analysis on uneven distribution of air pollution in cities. Environmental Monitoring in China, 27(3): 93-96.]
- 卢银桃,王德. 2012. 美国步行性测度研究进展及其启示[J]. 国际城市规划, 27(1): 10-15. [Lu Y T, Wang D. 2012. Walkability measuring in America and its enlightenment. Urban Planning International, 27(1): 10-15.]
- 马静,柴彦威,符婷婷. 2017. 居民时空行为与环境污染暴露对健康影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 36(10): 1260-1269. [Ma J, Chai Y W, Fu T T. 2017. Progress of research on the health impact of people's space-time behavior and environmental pollution exposure. Progress in Geography, 36(10): 1260-1269.]
- 王叶晴,段小丽,李天昕,等. 2012. 空气污染健康风险评价中暴露参数的研究进展[J]. 环境与健康杂志, 29(2): 104-108. [Wang Y Q, Duan X L, Li T X, et al. 2012. Inhalation exposure factors in health risk assessment. Journal of Environment and Health, 29(2): 104-108.]
- 吴健生,秦维,彭建,等. 2014. 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, (10): 49-56. [Wu J S, Qin W, Peng J, et al. 2014. The evaluation of walkability and daily facility distribution reasonability of Futian District, Shenzhen based on walk score. Urban Development Studies, (10): 49-56.]
- 游燕,白志鹏. 2012. 大气颗粒物暴露与健康效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 7(2): 123-132. [You Y, Bai Z P. 2012. Research advances in exposure to ambient particulate matter and health effects. Asian Journal of Ecotoxicology, 7(2): 123-132.]
- 张延吉,秦波,唐杰. 2018. 基于倾向值匹配法的城市建成环境对居民生理健康的影响[J]. 地理学报, 73(2): 333-345. [Zhang Y Z, Qin B, Tang J. 2018. The impact of urban built environment on residential physical health: Based on propensity score matching. Acta Geographica Sinica, 73(2): 333-345.]
- Brauer M, Hoek G, Smit H A, et al. 2007. Air pollution and development of asthma, allergy and infections in a birth cohort[J]. European Respiratory Journal, 29(5): 879-888.
- Brunekreef B, Holgate S T. 2002. Air pollution and health[J]. Lancet, 360: 1233-1242.
- Charles E O, George J S, Percy H T. 1957. The measurement of meaning[M]. London, UK: Urbana, University of Illinois Press.
- Fang T B, Lu Y. 2011. Constructing a near real-time space-time cube to depict urban ambient air pollution scenario[J]. Transactions in GIS, 15(5): 635-649.
- Feng J X. 2016. The built environment and active travel: Evidence from Nanjing, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13(3): 301-314.
- Gehl J, Gemzoe L. 1996. Public space public life[M]. Copenhagen, Denmark: The Danish Architectural Press.
- Hoek G, Beelen R, Hoogh K D, et al. 2008. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution[J]. Atmospheric Environment, 42(33): 7561-7578.
- Leung Y, Leung K S, Wong M H, et al. 2018. An integrated

- web-based air pollution decision support system—a prototype [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(9): 1-28.
- Marshall J, Nethery E, Brauer M. 2008. Within-urban variability in ambient air pollution: Comparison of estimation methods [J]. *Atmospheric Environment*, 42(6): 1359-1369.
- Nazelle A D, Rodríguez D A, Crawfordbrown D. 2009. The built environment and health: Impacts of pedestrian-friendly designs on air pollution exposure [J]. *Science of the Total Environment*, 407(8): 2525-2535.
- Owen N, Cerin E, Leslie E, et al. 2007. Neighborhood walkability and the walking behavior of Australian adults [J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 33(5): 387-395.
- Sallis J F, Saelens B E, Frank L D, et al. 2009. Neighborhood built environment and income: Examining multiple health outcomes [J]. *Social Science & Medicine*, 68(7): 1285-1293.
- Yang J, French S. 2013. The travel-obesity connection: Discerning the impacts of commuting trips with the perspective of individual energy expenditure and time use [J]. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 40(4): 617-629.

Health effects of built environment based on a comparison of walkability and air pollution: A case study of Nanjing City

CHEN Xi, FENG Jianxi*

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Haze problem is becoming increasingly more serious in China. Improving walkability of cities to increase outdoor physical activities of urban residents may also increase their exposure to air pollution, and the health effect is not necessarily positive. In view of this paradox, by taking Nanjing City as an example, this study measured walkability and simulated air pollutant concentration based on a land use regression model and spatial interpolation. It then compared these to evaluate the health effects of the built environment. The calculation of the walkability score includes three steps: 1) Assign weights and distance attenuation of the concerned service facilities, based on which the basic walkability score of the point of interest (POI) is obtained. 2) Obtain the single-point walkability score of the POI, considering the impact of the walking environment. 3) Obtain walkability score by spatial interpolation. It was found that the walking index of the main urban area of Nanjing City showed a multi-center axial attenuation pattern. $PM_{2.5}$ and O_3 were selected as representative air pollutants for concentration simulation for their significant hazard. The concentration of $PM_{2.5}$ was mainly simulated by establishing a regression model with relevant geographic variables, and the O_3 concentration was simulated by spatial interpolation because it showed different characteristics in space. The result indicates that there is a large area of high walkability and high pollutant exposure. These areas are mainly distributed in the urban center. In such areas, it is risky to emphasize the improvement of walking activities through modifying the built environment to promote health. The area of low walkability and low pollutant exposure is mainly distributed in the suburbs, and it is difficult to directly assess the health effects of such areas. Health-promoting area of high walkability and low $PM_{2.5}$ concentration is mainly distributed around the city's large green areas. Areas of high walkability and low O_3 concentration are distributed in the second circle of the city center but not inside the center. Therefore, the surrounding area of green space that is close to the city center but not at the center is more likely to become space of high walkability and low pollutant exposure, which has positive health effects. On the other hand, the semi-urbanized areas at the junction of urban and rural areas tend to become space of low walkability and high pollutant exposure because industrial expansion does not match the lagging service provision. Such areas have negative health effects. The results can provide a reference for the accurate formulation of land use policies for healthy cities.

Keywords: walkability; healthy city; $PM_{2.5}$; O_3 ; Nanjing City