

# 基于改进高斯两步移动搜索法的深圳市 公园绿地可达性评价

仝 德<sup>1</sup>, 孙裔煜<sup>1</sup>, 谢苗苗<sup>2\*</sup>

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 北京大学(深圳)未来城市实验室, 广东 深圳 518055;

2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

**摘 要:** 公园绿地可达性是衡量城市宜居水平的重要指标。针对传统可达性分析多用统计数据开展评估而导致的供需尺度失衡问题, 论文以深圳为例, 采用公园绿地空间矢量数据和手机信令数据获取供需空间分布, 采用高斯两步移动搜索法计算交通小区(TAZ)尺度公园绿地可达性, 并结合可达性结果及供需、交通情况聚类, 剖析可达性差异化模式及成因。主要结论如下: ① 通过改进传统可达性计算数据源和高斯两步移动搜索模型, 建立城市中微观尺度公园绿地可达性评价及成因研究框架, 可更精确地评估优化城市公园绿地可达性; ② 深圳市公园绿地综合可达性整体水平较高, 但存在明显的从中心向外围递减的趋势, 社区公园可达性差异与公园绿地供需不匹配是造成各区域可达性差异大的重要原因; ③ 根据K均值聚类分析结果, 将深圳市TAZ单元分成低供给低需求低可达性区、中供给低需求中可达性区、高供给高需求中可达性区、高供给低需求高可达性区, 各类区域具有差异化的可达性内涵、特征和成因; ④ 公园绿地可达性提升可针对不同分区特征, 通过公园布局优化、道路建设和居住区规划布局等差异化方式实现。研究充实了城市公园绿地可达性评价案例, 提出的基于手机信令数据和高斯两步移动搜索法的可达性分析方法不仅可应用于城市公园绿地布局与规划, 也可为其他地理现象可达性分析提供思路参考。

**关键词:** 公园绿地; 可达性; 两步移动搜索法; 手机信令数据; 深圳

可达性(accessibility)又称通达性, 是人们克服距离和时间等阻力、到达服务设施或活动场所的愿望和能力的定量表达<sup>[1-2]</sup>, 主要应用于道路网络格局演变对区域发展的影响<sup>[3-4]</sup>、公共服务设施选址和区位评价<sup>[5-7]</sup>、建筑设计及景观评价等领域<sup>[8-9]</sup>。可达性概念以古典区位理论为开端, 内涵不断丰富, 其关注点正逐步由宏观向微观<sup>[10]</sup>、由空间效率向空间公平转变<sup>[11-14]</sup>。公园绿地是城市生态系统的重要组成部分, 可调节小气候、减轻城市热岛效应<sup>[15]</sup>, 为城市居民提供休闲、娱乐、锻炼、交往等场所<sup>[16]</sup>, 其建设情况已经成为评价一座城市宜居水平的重要因

素<sup>[17]</sup>。公园绿地的可达性研究可为生态城市和宜居城市建设提供必要的指标量化基础<sup>[18]</sup>, 已逐渐成为城市研究领域的热点话题。

可达性研究方法主要包括缓冲区分析法<sup>[19]</sup>、网络分析法<sup>[20]</sup>、最小邻近距离法<sup>[21]</sup>、费用加权距离法<sup>[22]</sup>、引力势能模拟法<sup>[23]</sup>和两步移动搜索法(2SF-CA)<sup>[24]</sup>等, 通过方法不断完善以实现更精准计算可达性的目标。缓冲区分析法、网络分析法主要从供给角度研究可达性; 最小邻近距离法、费用加权距离法主要从需求角度对于可达性进行探讨。在供需关系分析基础上建立的引力势能模拟法和两步

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2021-01-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971205, 41771204); 北京大学(深圳)未来城市实验室铁汉科研开放课题基金(201701)。

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41971205 and 41771204; Tiehan Scientific Research Open Fund of Laboratory for Urban Future Peking University, No. 201701.]

第一作者简介: 仝德(1980—), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事城市地理与土地经济研究。E-mail: tongde@pkusz.edu.cn

\*通信作者简介: 谢苗苗(1982—), 女, 河北保定人, 博士, 教授, 主要从事景观生态与土地利用研究。

E-mail: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

引用格式: 仝德, 孙裔煜, 谢苗苗. 基于改进高斯两步移动搜索法的深圳市公园绿地可达性评价[J]. 地理科学进展, 2021, 40(7): 1113-1126.  
[Tong De, Sun Yiyu, Xie Miaomiao. Evaluation of green space accessibility based on improved Gaussian two-step floating catchment area method: A case study of Shenzhen City, China. Progress in Geography, 2021, 40(7): 1113-1126.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.07.004

移动搜索法综合考虑了供给和需求2个方面,可较为全面地对可达性进行分析。两步移动搜索法相较于引力势能模拟法,又具有数据获取难度低、计算简便的特点,因而被广泛应用,特别是在公共服务设施可达性的评价中<sup>[25]</sup>,通过纳入距离衰减<sup>[26]</sup>和多样化的交通模式<sup>[27]</sup>等扩展形式予以优化。其中居民需求主要来源于人口分布的统计数据或调查数据,具有覆盖面积广的优势,但通常最小以街道为统计单元,难以匹配公共服务设施布局的实际尺度,调查数据又因覆盖面小造成认知偏差。获取空间分辨率高、时效性好的需求数据,是当前可达性研究亟待解决的难题<sup>[28]</sup>。近年来,利用大数据修正传统数据处理结果成为地理学研究的新趋势<sup>[29]</sup>,如手机信令数据正越来越多被应用于人口信息识别方面,以改进人口统计数据时效性差等缺陷<sup>[31]</sup>。

本文以中国城市化水平最高的地区深圳市为例,通过手机信令数据识别作为公园绿地需求量的人口信息,建立并改进高斯两步移动搜索模型,分析评价深圳市自然、城市和社区3种类型公园各自及综合可达性,并通过 $K$ 均值聚类分析造成可达性空间差异的原因,以期有效改进传统可达性评估方法体系,并对深圳市公园绿地布局优化提供有价值的决策依据。

## 1 模型与方法

### 1.1 研究框架

本文建立了城市中微观尺度公园绿地可达性评价及成因研究框架,除了考虑传统交通区位条件外,同时注重供给和需求双方空间匹配问题(图1)。主要研究环节包括评价单元确定、需求分析、供给分析、可达性评价与可达性差异化模式分析等。采用社区或居住小区等更微观居住空间为评价单元,利用手机信令数据识别单元人口密度,作为需求分析的主要依据,克服传统以街道为单元的统计数据时效性和精确性的不足。首先,供给源为研究范围内各类公园,可根据公园分类体系提取不同类型公园的供给特征,如通过自然公园、城市公园和社区公园的空间位置及面积信息确定供给量,并确定不同类型公园的服务范围作为搜索阈值。其次,结合道路网络建立沟通供需双方的起始地—目的地(OD)成本矩阵。再次,使用高斯两步移动搜索法计算不同服务范围公园可达性,并汇总得出公园绿地综合可达性。最后,从可达性程度、供需指标特征以及OD成本3个方面开展 $K$ 均值聚类分析,剖析公园绿地可达性差异化的空间分布模式及其成因,为优化公园绿地布局提供参考。

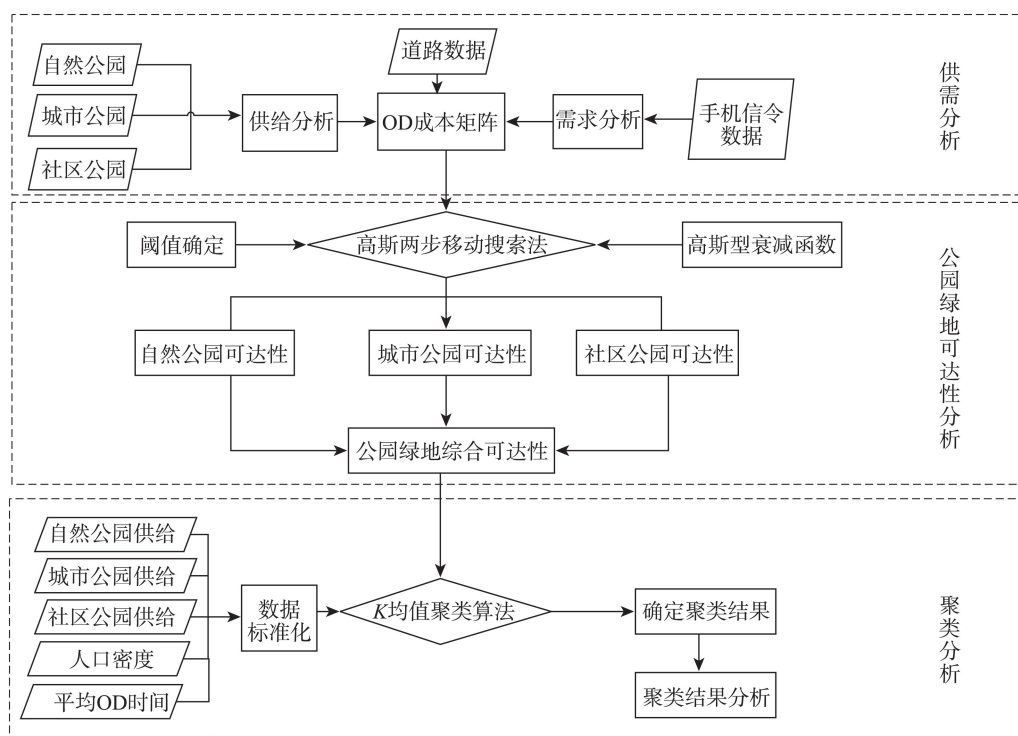


图1 公园绿地可达性研究框架

Fig.1 Research framework of park green space accessibility

## 1.2 基于高斯两步移动搜索法的可达性评价

两步移动搜索法同时考虑供给和需求2个方面因素,可以全面、简便地对公园绿地可达性进行计算。其中,利用高斯函数建立空间衰减规则,是各种扩展形式中最为常用的方法<sup>[32-33]</sup>。本文在数据源、OD成本计算规则等方面对常用的高斯两步移动搜索法进行改进,具体步骤如下:

第一步,对小型公园(如社区公园)提取其质心、大型公园(如自然公园和城市公园等)提取其入口作为公园绿地供给点 $j$ ,以人们前往公园绿地的路网极限距离 $d_0$ 为半径建立搜索域 $j$ ,汇总搜索域 $j$ 内所有的人口数量,利用高斯函数按照距离衰减规律赋以权重,并对这些加权后的人口进行加和汇总,计算供需比 $R_j$ :

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} G(d_{kj}) D_k} \quad (1)$$

式中: $D_k$ 是每个需求单元 $k$ 的人口数, $d_{kj}$ 为位置 $k$ 、 $j$ 之间的路网距离,对于有多个入口的公园,选取需求单元到最近入口的路网距离,单元 $k$ 需落在搜寻域内(即 $d_{kj} \leq d_0$ ); $S_j$ 为公园绿地 $j$ 的面积; $G(d_{ij})$ 是考虑空间摩擦问题的高斯衰减函数,其具体形式可表示为:

$$G(d_{ij}) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \times \left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right)^2} - e^{-\frac{1}{2}}}{1 - e^{-\frac{1}{2}}} \quad (d_{ij} < d_0) \quad (2)$$

第二步,以任一入口位置 $i$ 为需求点,以人们前往公园绿地的路网极限距离 $d_0$ 为半径,建立搜索域 $I$ ,然后查找所有搜索域内的公园绿地 $j$ ,将这些公园绿地的供需比 $R_j$ 在高斯衰减函数的基础上汇总求和,得到居民点 $i$ 的基于距离成本的公园空间绿地可达性 $A_i^D$ ,其值越大表示可达性程度越高:

$$A_i^D = \sum_{j \in \{d_i \leq d_0\}} G(d_{ij}) R_j \quad (3)$$

第三步,传统高斯两步移动搜索法是基于距离成本的可达性计算模型,而通行成本可以分为距离成本和时间成本,时间成本可通过供需两点之间的通行时间来表示,因其考虑了道路等级、通达性、交通拥堵等情况,更能反映可达性的实际内涵<sup>[34]</sup>。本文将时间成本纳入可达性计算模型,用前往公园的极限通行时间 $t_0$ 替代路网极限距离 $d_0$ 作为搜寻域,将供需两点之间的路网通行时间 $t_{ij}$ 作为衡量OD通行成本的指标,对可达性模型进一步改进:

$$A_i^T = \frac{\sum_{j \in \{t \leq t_0\}} G(t_{ij}) S_j}{\sum_{k \in \{t_{kj} \leq t_0\}} G(t_{kj}) D_k} \quad (4)$$

式中: $A_i^T$ 为基于时间成本的公园绿地可达性。

第四步,两步移动搜索法计算出的公园绿地可达性结果具有广义人均绿地面积的含义,因此可与城市人均绿地面积相比作为评价可达性高低、尤其是开展区域内不同单元横向比较的依据<sup>[34]</sup>。公园绿地可达性与研究区人均公园绿地面积相除,大于1的视为研究区内相对可达性高值区,小于1的视为相对低值区,还可进一步将高值区和低值区通过数值几何间隔划分出可达性低、较低、较高和高的等级。

## 1.3 K均值聚类分析

聚类分析可以将某些特征相似的数据进行分类组织,有助于探索数据之间内在结构的差异<sup>[36]</sup>。 $K$ 均值聚类分析是一种迭代求解的聚类分析算法,具有算法简单、可高效处理大数据集等优点<sup>[37]</sup>,利用 $K$ 均值聚类分析可获得供给和需求不同组合模式下可达性的差异类型,聚类指标包括:表征评价单元可达性程度的指标,如由不同类型公园可达性汇总所得的公园绿地综合可达性;需求指标以评价单元内人口密度指标为表征,通过手机信令数据计算得到评价单元人口数;以评价单元中心为起始地、各类公园为目的地计算OD时间的平均值,表征评价单元的交通条件;通过各类公园在服务阈值内经距离衰减计算后落在每个评价单元的面积加总,表征各类公园绿地供给量。通过 $K$ 均值聚类分析得到研究区公园绿地可达性及其供需组合模式,从供给、需求和交通等方面剖析可达性差异的原因,识别不同空间单元中影响可达性的主要限制性因素,并进而针对不同分区提出针对性的政策建议。

## 2 深圳市公园绿地供需现状

深圳是全国率先规划建设森林城市的城市之一,截至2017年底,全市共有公园942个,建成区绿化覆盖率为45%,公园绿地面积19980  $\text{hm}^2$ ,人均公园绿地面积(按常住人口计算)为16  $\text{m}^2$ ;而同期全国平均城市建成区绿化覆盖率为37.25%,人均公园绿地面积为13.7  $\text{m}^2$ 。整体来看,深圳市公园绿地情况略优于全国平均水平,现存主要问题是空间分布不均衡而导致的空间公平问题,值得利用可达性分析

展开深入评估。

本文数据来源主要有:① 2017年3月中国电信手机信令数据所获得的交通分析小区(traffic analysis zone, TAZ)的居住人口数量,进行需求量分析;② 深圳市公园目录<sup>[38]</sup>(截止日期为2018年6月15日),用于确定各类公园绿地区位、数量和类型;③ 2014年深圳市土地利用变更调查数据,用来确定公园绿地矢量位置和面积;④ 深圳市1:2000基础地理信息数据要素,用于提取各级道路信息;⑤ 2018年Google遥感影像图,用来提取2014年之后新建公园绿地范围和部分道路数据,对公园绿地和道路数据进行更新补充。

## 2.1 深圳市公园绿地供给量

可达性计算中的供给量为公园绿地面积,根据“深圳市公园目录”、2014年土地利用变更调查和Google遥感影像数据,共提取25个自然公园、158个城市公园、681个社区公园(图2)。自然公园是以森林、湿地为主,具有较多自然风景名胜的公园,具体又分为森林公园、湿地公园、地质公园、风景名胜,面积集中在250~3000 hm<sup>2</sup>之间;城市公园面积集中在30~500 hm<sup>2</sup>之间,主要是一些为市民服务、有着丰富活动内容的绿地,具体分为综合公园和专类公园;社区公园主要是为一定居住区内的居民服务、具有一定活动内容和设施服务的集中绿地,面积集中在1.5~20 hm<sup>2</sup>之间。由表1可知,深圳的公

园绿地供给以自然公园为主,面积占比超过75%;城市公园提供了全市21.58%的公园绿地面积,成为自然公园的有效补充;社区公园面积最小,仅为3.34%。从空间分布看,全市整体上东部公园面积大于西部,其中大鹏新区、坪山区和盐田区的自然公园总面积均为深圳市各行政区前3位,而龙岗区虽然自然公园面积小,但城市公园总面积为2347.74 hm<sup>2</sup>,为深圳市各区之首。

## 2.2 深圳市公园绿地需求量

本文使用深圳市2017年3月中国电信手机信令数据处理后的用户停留点数据识别居住地即公园需求量,精度为交通分析小区(TAZ)级别。TAZ是城市政府为研究市民交通出行特征,综合考虑行政区划、土地利用与社会经济特性的一致性以及道路、河流、铁路等构造物与天然分割<sup>[40]</sup>形成的管理单元。其划分方法是在乡镇街道界线基础上,使用GIS平台分析道路路网流量等交通影响因素所进行的更细单元划分<sup>[39-40]</sup>,其空间规模介于街道办事处与居住小区之间。以TAZ为单元,既可避免研究区过于细碎带来的属性雷同<sup>[41]</sup>,又能够确保同一单元内具有较高相似度的交通状况,因而常被应用于可达性研究中。本文所使用的TAZ单元是在2016年深圳市规划国土发展研究中心进行居民出行调查所划分的TAZ分区<sup>[42-43]</sup>的基础上,结合手机基站分布位置和公园绿地出行的实际情况剔除一些包

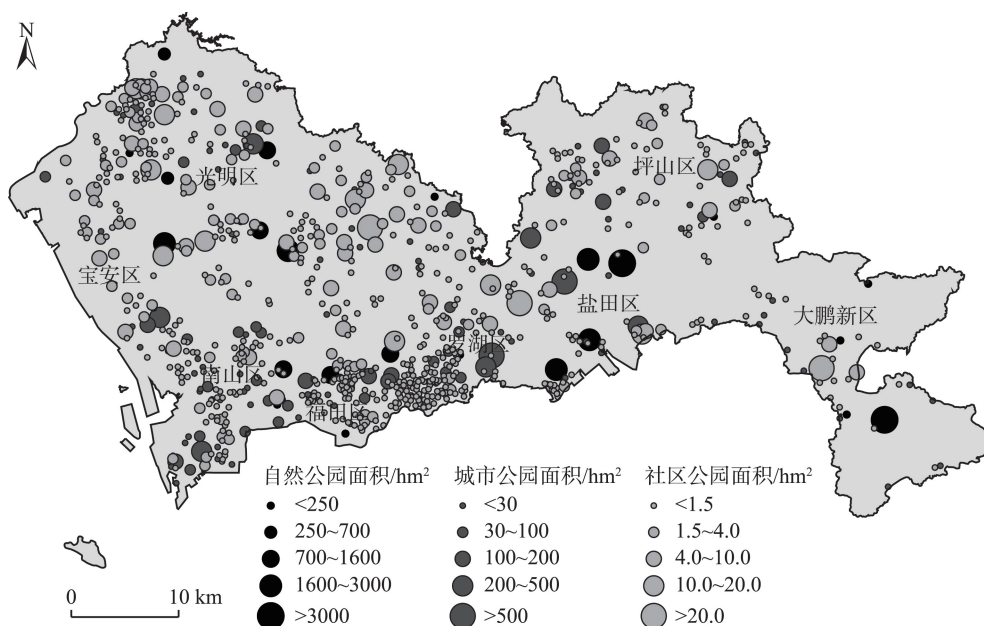


图2 深圳市公园绿地空间分布

Fig.2 Spatial distribution of park green space in Shenzhen City

表1 深圳市各行政区公园绿地面积汇总  
Tab.1 Summary of park green space area in Shenzhen City

区名	自然公园面积/hm <sup>2</sup>	城市公园面积/hm <sup>2</sup>	社区公园面积/hm <sup>2</sup>	总公园面积/hm <sup>2</sup>
大鹏新区	5279.69	125.85	52.53	5458.07
罗湖区	1577.41	1086.06	64.13	2727.60
盐田区	4533.18	461.04	30.93	5025.15
龙岗区	186.28	2347.74	202.91	2736.93
坪山区	4771.17	251.36	40.51	5063.04
福田区	1751.55	788.73	70.44	2610.72
南山区	2473.59	1171.90	74.77	3720.26
宝安区	2752.27	729.60	258.86	3740.73
光明区	1268.12	428.15	85.85	1782.12
龙华区	1407.46	82.37	274.31	1764.14
合计	26000.72	7472.80	1155.24	34628.76
(占比)	(75.08%)	(21.58%)	(3.34%)	(100%)

含无效数据的单元,共计907个,每个TAZ平均面积约为2 km<sup>2</sup>。

手机信令数据是指用户手机不间断与最邻近基站发生信号连接而产生的信息,可实现对用户状态、位置、通信等活动完整连续的记录。2017年3月,中国电信共捕捉到4999759条有效用户数据。结合深圳市电信市场规模占有率和使用者结构调查数据、一人多卡率和人口年龄比例进行扩样,得到深圳市共有居住人口1673.56万人,数据介于统计年鉴给出的1252.83万常住人口<sup>[44]</sup>和政府公布的约1800万实际管理服务人口<sup>[45]</sup>之间,考虑统计口径

不一致,可认为此数据能较客观地反映深圳市相对人口分布现状。在进行人口与TAZ的空间匹配时,将当月每日0:00~5:00时段内出现超过15 d、且驻留时间最长的TAZ小区作为该用户的居住地,再通过用户汇总得到每个TAZ单元居住人口数量。运用ArcGIS中的Feature to point工具,将面文件转化成质点矢量文件,以TAZ质心近似表征该区域的人口质心,将TAZ单元的居住人口数量作为可达性计算中的需求量。如图3所示,深圳市人口主要集中在中西部地区,而东部的盐田区、大鹏新区人口较少,这与公园布局呈现相反的格局。

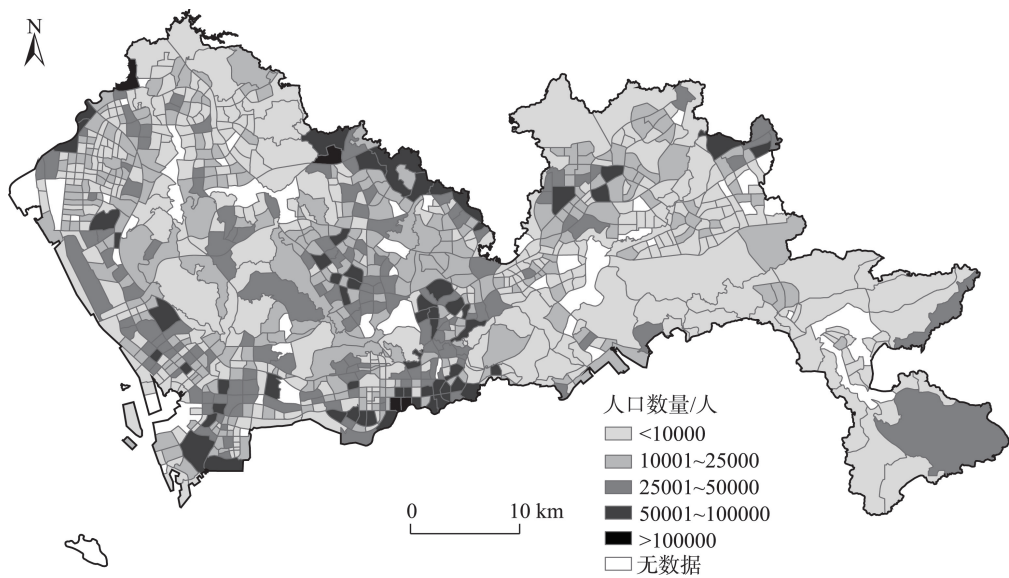


图3 深圳市人口分布  
Fig.3 Population distribution in Shenzhen City

### 3 结果与分析

考虑到不同类型公园功能和服务能力的差异,设定社区公园以步行方式到达,30 min 步行时间(2500 m 路网距离)为其空间搜索阈值<sup>[46]</sup>;自然公园和城市公园以机动交通到达,空间搜索阈值设置为全市供需点之间的最长通行时间。根据深圳市道路交通运行指数系统2017年6月的高峰时段平均行车速度,将全市道路划分为高速路、快速路、干路、支路4级道路(图4),通行速度分别设为75、45、30和20 km/h。将供给量、需求量和OD成本代入高斯两步移动搜索法计算公式,分别计算深圳市自然公园、城市公园和社区公园的可达性,并分析其综合可达性和可达性供需组合模式。

#### 3.1 自然公园可达性评价

深圳市有520个TAZ单元自然公园可达性大于全市人均自然公园面积,占TAZ单元总数的57.3%,说明深圳市自然公园可达性整体较优。可达性评价结果的平均值为15.39,标准差是1.86,呈现较明显的空间分异(图5a)。深圳市中部和东部地区自然公园可达性要高于西部地区。龙岗区、坪山区、罗湖区自然公园可达性普遍较高,主要由于自然公园数量多、面积大,且周边路网密度高。宝安区西北部自然公园可达性较低的原因主要是公园数量较少,且公园面积与周边道路通达性不相匹配,面积较小的公园周边路网密布,而大面积公园

周边道路通达性差,在人口密度高带来的高需求下,此区域内公园供给不能满足当地人口的需求,呈现较低的可达性。大鹏新区虽然自然公园供给充足且人口少、需求量不大,但道路建设相对稀疏导致自然公园可达性较低。由于自然公园供给主要依托自然资源本底,相对难以改变,其可达性提升只能通过增加道路建设和就近安置人口实现。

#### 3.2 城市公园可达性评价

深圳市有507个TAZ单元城市公园可达性大于全市人均城市公园面积,占TAZ单元总数的55.8%,说明深圳市自然公园可达性整体较优。城市公园可达性的平均值为4.74,标准差为4.42,空间分异比自然公园剧烈(图5b)。深圳市中部福田区、罗湖区和南山区作为中心城区,城市公园数量多、规模大,因而可达性水平最高。东南部坪山区和大鹏新区属于城市发展起步区,城市公园供给量小、道路系统不发达,虽人口密度低、需求量不大,但城市公园可达性水平整体较低。城市西北部宝安部分地区城市公园数量虽多,但面积较小,同时人口密度大,供需不匹配,人均获得公园绿地资源不均造成此区域城市公园可达性较低。城市公园虽无需过分依赖自然资源本底,但由于其占地规模相对较大同样难以在短期内大幅提升供给,主要应通过完善城市道路系统提升可达性。在人口密度大、需求量高的地区,也需规划增量城市公园,以提升城市公园可达性。



图4 深圳市交通道路

Fig.4 Roads of Shenzhen City

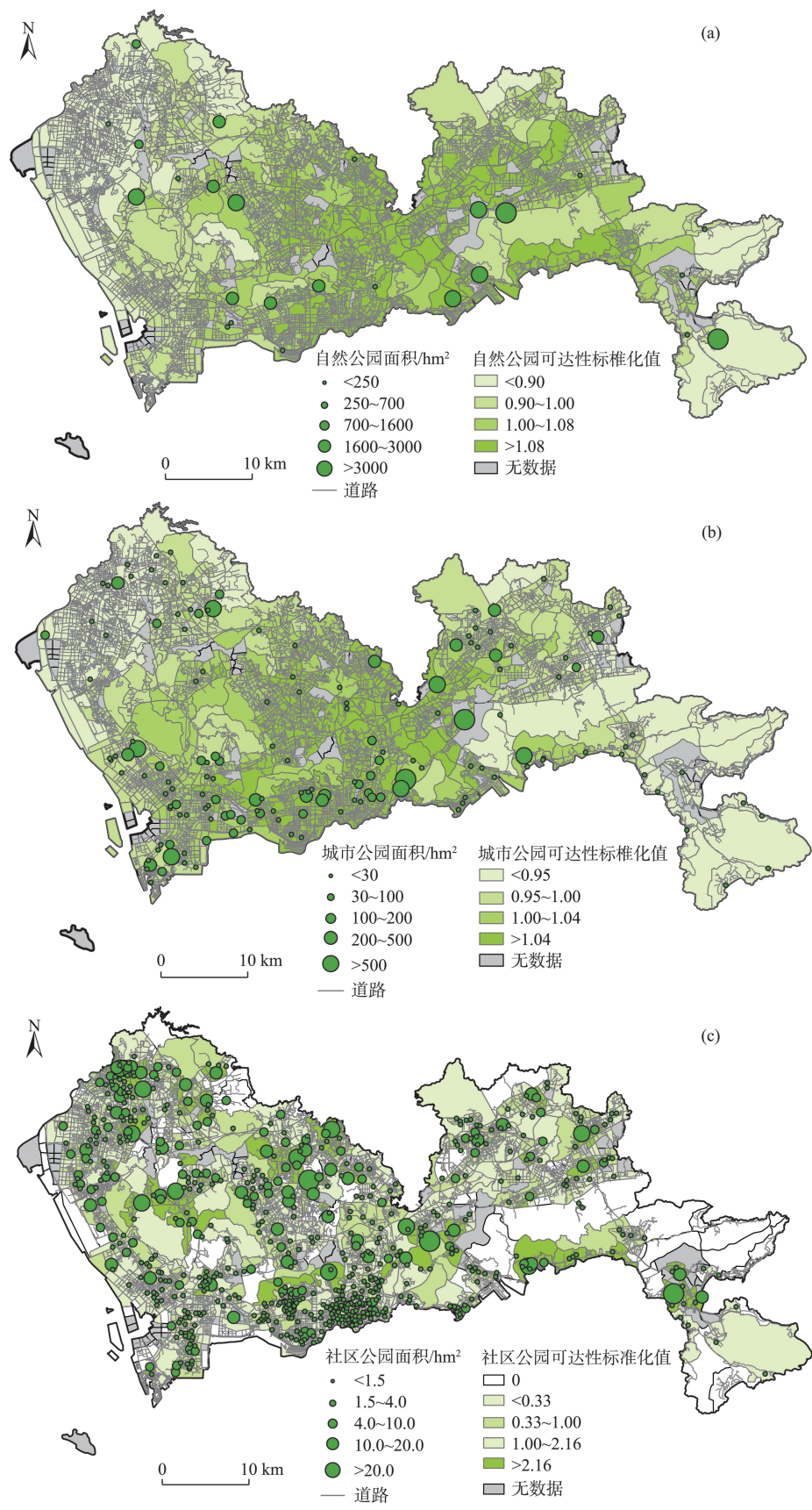


图5 自然公园、城市公园和社区公园可达性结果

Fig.5 Accessibility results of nature parks, city parks and community parks in Shenzhen City

### 3.3 社区公园可达性评价

深圳全市共有824个TAZ单元可实现在30 min内步行到达社区公园,占研究区的90.8%,其他没有实现通达的地区多为人口较少的山区。但仅有222个TAZ单元的社区公园可达性大于全市人均社区公园面积,占TAZ单元总数的24.4%,说明大量地区都处于社区公园可达性低值区,需加强社区公园均衡布局。全市社区公园可达性平均值为1.14,远低于自然公园和城市公园;然而,社区公园可达性标准差高达9.02,远高于自然公园和城市公园,空间差异巨大。如图5c所示,深圳社区公园可达性并不具有明显的分区特征,公园空间分布不均匀且服务范围小导致可达性空间分布不均衡现象明显。从城市宜居角度讲,社区公园是与居民日常活动结合最密切的公园,其主要用途是为周边居民提供日常休憩场所。考虑到自然公园和城市公园规模相对难以变动,适度增加社区公园在中部和西部的数量和规模,有助于改善深圳市公园绿地资源与人口分布的空间不匹配。同时,建议增加居住人口较为密集的TAZ小区附近的社区公园供给量,以保障社区居民平等享用社区公园绿地资源的权利,例如南山区和福田区社区公园规模较小,而该地区人口稠密,对社区公园需求较高,可采取针对性措施增加社区公园建设。

### 3.4 综合可达性评价

两步移动搜索法计算出的公园绿地可达性结果,实际内涵是考虑距离衰减要素的广义人均公园绿地面积,因此不同类型公园绿地的可达性数值可直接加和,得到公园绿地综合可达性。综合可达性越高,表示该地区越容易享受公园绿地资源。从各类公园绿地可达性数值的贡献看,深圳市整体层面的高可达性主要源于数量多、面积大、分布广的自然公园和城市公园,而社区公园可达性明显的空间分异则是造成综合可达性空间差异大的重要因素。

如图6所示,深圳市有507个单元综合可达性数值大于人均公园绿地面积,占TAZ总数的55.8%,主要分布在深圳市的中部和东部地区。全市公园绿地综合可达性平均值为20.97,标准差为9.24,可达性的分布上呈现明显的由中心向外围递减的趋势。深圳中部地区的福田和罗湖区属于深圳中心城区,虽人口相对密集,但道路稠密、各类公园供给充足,因而综合可达性较高;西部的宝安区人口数量中等,路网也相对发达,但由于自然公园

和城市公园数量少、规模小,综合可达性水平较低;东南部的大鹏新区发展相对滞后,人口和道路稀疏,但分布着大鹏国家地质公园等大型自然公园,同时部分滨海栈道社区公园规划建设过大,导致辖区内部分地区出现公园绿地综合可达性极高、而全区整体综合可达性水平不高的情况。

### 3.5 公园绿地可达性及影响因子聚类分析

为进一步识别并剖析深圳公园绿地可达性差异及成因,对深圳905个TAZ单元(扣除无数据和2个综合可达性极高区域)开展K均值聚类,将可达性差异的影响模式落实到具体的研究单元中,从而更全面、更有针对性地提出可达性优化的政策建议,参与聚类的指标包括各TAZ单元公园绿地综合可达性、人口密度、到各类公园的平均OD时间,以及3类公园各自供给量等6项标准化后的数值。表2为K均值聚类结果,各类型空间分布如图7所示,全市公园绿地供需状况可分为4种类型,根据各项指标均值评价该类区域公园绿地综合可达性、供给和需求、OD通达水平的高低,并对分区类型进行命名:低供给低需求低可达性区、中供给低需求中可达性区、高供给高需求中可达性区、高供给低需求高可达性区。

低供给低需求低可达性区主要分布在深圳的远郊区,包括西部的光明区、宝安区和东部的大鹏新区,共有344个TAZ单元属于此类,占TAZ单元总数的37.9%。该类地区各类公园资源匮乏、人口密度低、交通条件差、公园绿地综合可达性在4类地区最低,是各方面发展水平在全市都相对落后的地区。未来随着郊区人口增加,对公园需求增大,该地区将面临更严峻的低可达性压力,需在公园建设、交通发展等多方面全面发展以提升居住品质,吸引更多居民落户。建议在公园建设方面,适当增加布局城市公园和社区公园从而提升供给量;在交通建设方面,除了增加建设公园周边城市道路和居住区到社区公园的步行道路,还可以通过增设大型公园出入口及其与城市道路连接线,以缩短该区域的OD通行成本,提升综合可达性。

中供给低需求中可达性区主要分布在深圳中部的龙华、南山、龙岗和盐田区,共有415个单元属于此类,占TAZ单元总数的45.8%。该类公园在自然公园和城市公园的供给上均相对充足,居住人口密度适中,但由于社区公园供给最为匮乏,导致综合可达性不高。建议充分利用周边零星低效用地

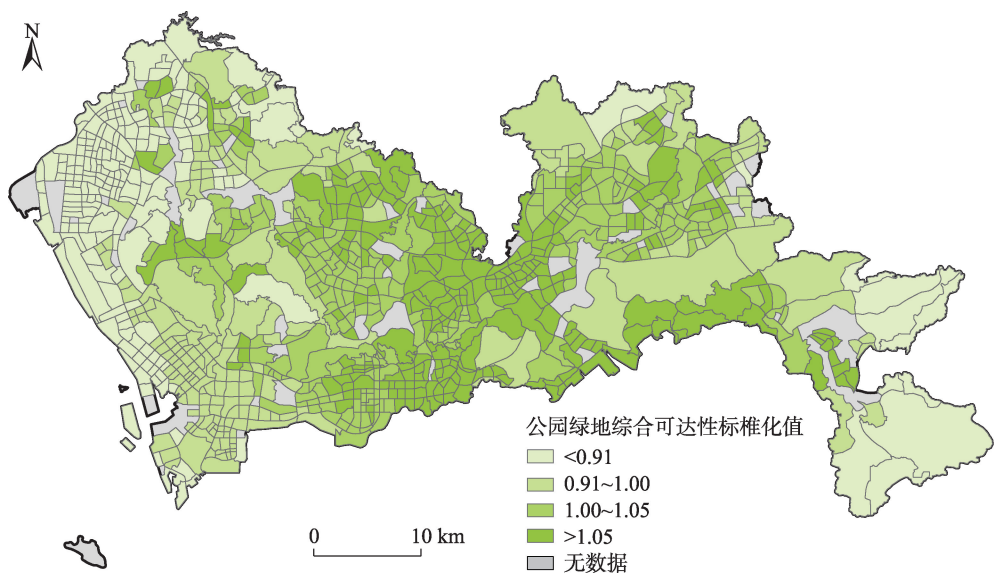


图6 公园绿地综合可达性结果

Fig.6 Comprehensive accessibility of park green space

表2 公园绿地可达性及其影响因子最终聚类中心

Tab.2 Final cluster centers of accessibility and influencing factors of park green space							
类别	TAZ个数	综合可达性	人口密度	平均OD时间	自然公园供给	城市公园供给	社区公园供给
低供给低需求低可达性区	344	-0.25	-0.33	0.94	-0.99	-1.06	-0.13
中供给低需求中可达性区	415	0.08	-0.28	-0.53	0.67	0.69	-0.21
高供给高需求中可达性区	122	0.03	1.93	-0.81	0.42	0.69	0.20
高供给低需求高可达性区	24	0.59	-0.21	-0.33	0.43	0.32	4.31

注：表中数据除了TAZ个数外，标准化方法为Z-score标准化，已转变为标准正态分布。

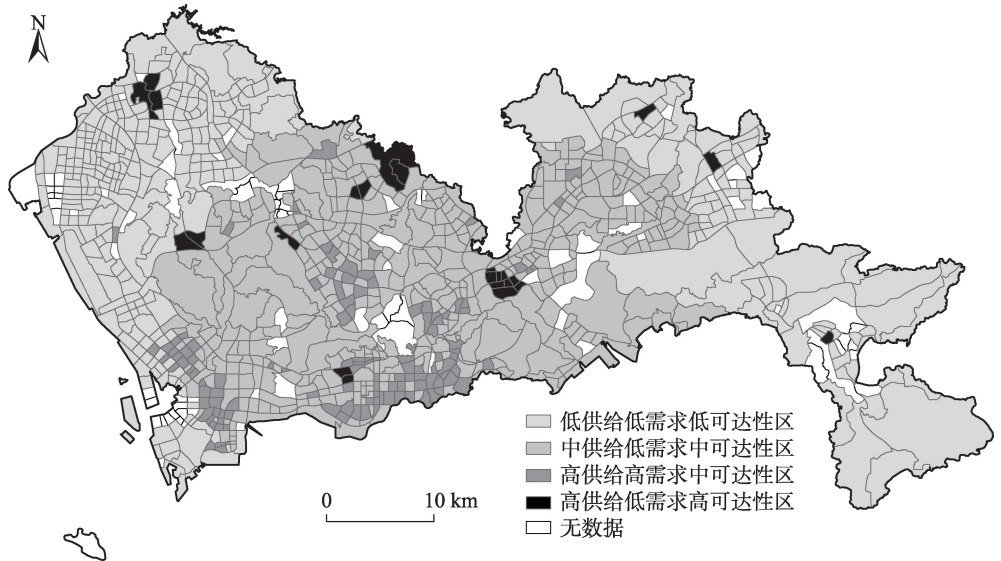


图7 公园绿地可达性供需组合模式分类

Fig.7 Classification of accessibility supply and demand patterns of park green space

改建社区公园或增加现有自然和城市公园交通通达性以提升其综合可达性。

高供给高需求中可达性区主要位于深圳市中

心城区的福田、罗湖和南山区，共有122个单元，占TAZ单元总数的13.4%。该类地区主要是人口高度集聚的城市居住区，虽然交通条件优越、各类公园

供给相对充足,但由于人口密集导致的高公园绿地需求,综合可达性一般。在这类城市高密集区增加布局城市公园难度较大,但可通过开放社区、空中花园等社区公园创新供给方式,提升公园资源的供给量。同时,该区域包含不少城中村,建设密度过大、居住环境较差,未来可通过城市更新或社区综合整治疏解人口分布、增加社区公园绿地面积,以适当降低需求提高供给,从而提升综合可达性。

高供给低需求高可达性区是全市公园绿地可达性最高的区域,分布较为零散且仅有24个单元,占TAZ单元总数的2.6%,该类区域在自然公园和城市公园供给、人口密度和交通条件方面与第二类差别不大,但周边具有高质量的社区公园,大大提升了其综合可达性,这些地区也成为了深圳生活品质最高、最宜居的居住地。

## 4 结论与讨论

本文以深圳为例,针对自然公园、城市公园和社区公园等不同类型的公园设立不同搜索半径,以手机信令数据评估居住人口对公园绿地的需求量,采取高斯两步移动搜索法,开展公园绿地可达性评估,并通过K均值聚类进一步剖析可达性差异及其成因。得出如下结论:

(1) 使用高斯两步移动搜索法改进了传统两步移动搜索法忽略距离衰减因素的弊端,同时通过时间成本替代距离成本,对不同公园类型设定不同阈值,利用手机信令数据落实更适宜评估单元,提升可达性中需求量获取的精度和时效性,从供需两方面提升公园绿地可达性评估精度。在城市TAZ尺度更细致地比较了公园绿地可达性的空间格局、差异及成因,为其他公共设施可达性以及大数据在其他城市规划领域的应用提供了思路。

(2) 深圳市公园绿地综合可达性整体水平较高,但有着明显的从中心向外围递减的趋势,社区公园可达性差异大与公园绿地供需不匹配是造成深圳市各区域可达性空间失衡的重要原因。经济实力和基础设施建设都相对完善的中部地区,有较为密集的人造公园资源(城市公园和社区公园)和发达的交通网络,因而综合可达性整体上优于东部和西部地区。而宝安区和大鹏半岛东南部公园绿地综合可达性最差,其中,宝安区长期作为深圳市的老工业区,公园资源相对较少且人口相对密集是导

致公园绿地综合可达性低的主要原因。大鹏半岛东南部作为深圳尚待开发的资源保护地区,道路稀疏极大地增加了居民出行成本而降低了公园绿地可达性,不过大鹏新区西部社区公园供给充足,加之人口稀疏成为深圳综合可达性最高的区域。

(3) 根据综合可达性、供需特征和OD成本等因素,深圳公园绿地可分为低供给低需求低可达性区、中供给低需求中可达性区、高供给高需求中可达性区、高供给低需求高可达性区。针对不同区域的实际情况,公园绿地可达性提升可通过公园布局优化、道路建设和居住区规划布局等差异化方式实现。首先,在公园绿地供给不足的地区应增加绿地空间规划供给,但由于自然公园和城市公园相对难以调整,而社区公园有较大灵活性,可以通过街心花园、开放社区和空中花园建设等方式创新社区公园供给模式,缓解各区域绿地面积紧缺的难题。其次,城市道路交通建设除考虑增量外,还需高度重视各类公园绿地与居住区的连通问题,可通过增设大型公园出入口和快速路连接线、完善社区公园与周边居住区步行道等方式完善城市道路体系,增加公园和居住区间的可达性。再次,在开展居住区规划布局时,充分评估周边公园绿地资源和交通可达性,因地制宜引导城市内人口居住布局,从而缓解公园绿地资源供需不匹配的困境。

本文在公园绿地可达性评估方法和模式成因剖析等方面具有一定创新,但建模时还存在一定不足,如仅以公园绿地面积和居住人口数表征供需量,没有考虑公园内部基础设施与生态环境状况影响下服务供给能力的差异,以及不同人群对于公园绿地资源需求的差异,得到的可达性计算结果也没有在TAZ单元内部进行进一步细分,而是以其质心的可达性数值表示;同时,由于缺乏居民真实出行方式(公共交通、小汽车、自行车、步行等)和路线数据,模型与实际情况存在差异。未来研究可通过居民行为数据获取真实公园绿地使用情况,并与模型计算结果相比较,以验证可达性评价的精度和实际价值,为公园绿地布局优化提供更有价值的决策依据。

## 参考文献(References)

- [1] 沈青, 张岩, 张峰. 内城区的区位特征与低收入者的就业可达性[J]. 国际城市规划, 2007, 22(2): 26-35. [Shen Qing, Zhang Yan, Zhang Feng. Location characteristics of

- inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Urban Planning International*, 2007, 22(2): 26-35. ]
- [2] Van Herzele A, Wiedemann T. A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63(2): 109-126.
- [3] 李平华, 陆玉麒. 可达性研究的回顾与展望 [J]. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 69-78. [Li Pinghua, Lu Yuqi. Review and prospectation of accessibility research. *Progress in Geography*, 2005, 24(3): 69-78. ]
- [4] Linneker B, Spence N. Road transport infrastructure and regional economic development [J]. *Journal of Transport Geography*, 1996, 4(2): 77-92.
- [5] 胡瑞山, 董锁成, 胡浩. 就医空间可达性分析的两步移动搜索法: 以江苏省东海县为例 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1600-1607. [Hu Ruishan, Dong Suocheng, Hu Hao. A two-step floating catchment area (2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary healthcare service in China: A case study of Donghai County in Jiangsu Province. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1600-1607. ]
- [6] 宋伟轩, 涂唐奇, 尹上岗, 等. 南京义务教育资源的社会—空间可达性差异及效应研究 [J]. *地理研究*, 2019, 38(8): 2008-2026. [Song Weixuan, Tu Tangqi, Yin Shanggang, et al. The differentiation and effects of social-spatial accessibility in compulsory education resources in Nanjing. *Geographical Research*, 2019, 38(8): 2008-2026. ]
- [7] 桑丽杰, 舒永钢, 祝炜平, 等. 杭州城市休闲绿地可达性分析 [J]. *地理科学进展*, 2013, 32(6): 950-957. [Sang Lijie, Shu Yonggang, Zhu Weiping, et al. Accessibility of urban green spaces in Hangzhou City. *Progress in Geography*, 2013, 32(6): 950-957. ]
- [8] 卢昕. 基于用户生成数据的旅游路线规划 [D]. 天津: 天津大学, 2010. [Lu Xin. Travel route planning based on user-generated content. Tianjin, China: Tianjin University, 2010. ]
- [9] 陈洁, 陆锋, 程昌秀. 可达性度量方法及应用研究进展评述 [J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5): 100-110. [Chen Jie, Lu Feng, Cheng Changxiu. Advance in accessibility evaluation approaches and applications. *Progress in Geography*, 2007, 26(5): 100-110. ]
- [10] 刘贤腾. 空间可达性研究综述 [J]. *城市交通*, 2007(6): 36-43. [Liu Xianteng. General description of spatial accessibility. *Urban Transport of China*, 2007(6): 36-43. ]
- [11] 俞孔坚, 段铁武, 李迪华, 等. 景观可达性作为衡量城市绿地系统功能指标的评价方法与案例 [J]. *城市规划*, 1999(8): 8-11. [Yu Kongjian, Duan Tiewu, Li Dihua, et al. Landscape accessibility as a measurement of the function of urban green system. *City Planning Review*, 1999(8): 8-11. ]
- [12] Ingram D R. The concept of accessibility: A search for an operational form [J]. *Regional Studies*, 1971, 5(2): 101-107.
- [13] Wang F H, Onega T. Accessibility of cancer care: Disparities, outcomes and mitigation [J]. *Annals of GIS: Geographic Information Sciences*, 2015, 21(2): 119-125.
- [14] Kwan M P, Murray A T, O'Kelly M E, et al. Recent advances in accessibility research: Representation, methodology and applications [J]. *Journal of Geographical Systems*, 2003, 5(1): 129-138.
- [15] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 广州市城区公园对周边环境的降温效应 [J]. *生态学报*, 2010, 30(18): 4905-4918. [Su Yongxian, Huang Guangqing, Chen Xiuzhi, et al. The cooling effect of Guangzhou city parks to surrounding environments. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 4905-4918. ]
- [16] 温海珍, 李旭宁, 张凌. 城市景观对住宅价格的影响: 以杭州市为例 [J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1806-1814. [Wen Haizhen, Li Xuning, Zhang Ling. Impacts of the urban landscape on the housing price: A case study in Hangzhou. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1806-1814. ]
- [17] 邱婴芝, 陈宏胜, 李志刚, 等. 基于邻里效应视角的城市居民心理健康影响因素研究: 以广州市为例 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 283-295. [Qiu Yingzhi, Chen Hongsheng, Li Zhigang, et al. Exploring neighborhood environmental effects on mental health: A case study in Guangzhou, China. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 283-295. ]
- [18] 刘常富, 李小马, 韩东. 城市公园可达性研究: 方法与关键问题 [J]. *生态学报*, 2010, 30(19): 5381-5390. [Liu Changfu, Li Xiaoma, Han Dong. Accessibility analysis of urban parks: Methods and key issues. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19): 5381-5390. ]
- [19] 施拓, 李俊英, 李英, 等. 沈阳市城市公园绿地可达性分析 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1345-1350. [Shi Tuo, Li Junying, Li Ying, et al. Analysis of urban park accessibility in Shenyang City. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(5): 1345-1350. ]
- [20] Moyano A, Martínez H S, Coronado J M, et al. From network to services: A comparative accessibility analysis of the Spanish high-speed rail system [J]. *Transport Policy*,

- 2018, 63: 51-60.
- [21] 白永平, 张文娟, 王治国. 基于POI数据的医药零售店分布特征及可达性: 以兰州市为例 [J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 77-83. [Bai Yongping, Zhang Wenxian, Wang Zhiguo. Distribution characteristics and accessibility of pharmaceutical retail industry based on POI data: A case study of Lanzhou City. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 36(1): 77-83. ]
- [22] 陈永生, 黄庆丰, 章裕超, 等. 基于GIS的合肥市中心城区绿地可达性分析评价 [J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 229-236. [Chen Yongsheng, Huang Qingfeng, Zhang Yuchao, et al. GIS-based analysis and evaluation for the accessibility of urban green in the central city of Hefei. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(2): 229-236. ]
- [23] Joseph A E, Bantock P R. Measuring potential physical accessibility to general practitioners in rural areas: A method and case study [J]. Social Science & Medicine, 1982, 16(1): 85-90.
- [24] 李鑫, 马晓冬, 薛小同, 等. 城市绿地空间供需评价与布局优化: 以徐州中心城区为例 [J]. 地理科学, 2019, 39(11): 1771-1779. [Li Xin, Ma Xiaodong, Xue Xiaotong, et al. Spatial supply-demand evaluation and layout optimization for urban green space: A case study of Xuzhou central district. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(11): 1771-1779. ]
- [25] Radke J, Mu L. Spatial decompositions, modeling and mapping service regions to predict access to social programs [J]. Annals of GIS: Geographic Information Sciences, 2000, 6(2): 105-112.
- [26] Wang F H. Measurement, optimization, and impact of health care accessibility: A methodological review [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2012, 102(5): 1104-1112.
- [27] Mao L, Nekorchuk D. Measuring spatial accessibility to healthcare for populations with multiple transportation modes [J]. Health & Place, 2013, 24: 115-122.
- [28] 岳邦佳, 林爱文, 孙铖. 基于2SFCA的武汉市低收入者公园绿地可达性分析 [J]. 现代城市研究, 2017(8): 99-107. [Yue Bangjia, Lin Aiwen, Sun Cheng. The analysis of low-income people's park green space accessibility based on 2SFCA in Wuhan. Modern Urban Research, 2017(8): 99-107. ]
- [29] 冯健, 钟奕纯. 基于居住环境的常州城市居民生活质量空间结构 [J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1237-1255. [Feng Jian, Zhong Yichun. The spatial structure of urban residents' quality of life in Changzhou based on residential environment. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1237-1255. ]
- [30] 丁亮, 钮心毅, 宋小冬. 基于个体移动轨迹的多中心城市引力模型验证 [J]. 地理学报, 2020, 75(2): 268-285. [Ding Liang, Niu Xinyi, Song Xiaodong. Validating gravity model in multi-centre city: A study based on individual mobile trajectory. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(2): 268-285. ]
- [31] 宋少飞, 李玮峰, 杨东援. 基于移动通信数据的居民居住地识别方法研究 [J]. 综合运输, 2015(12): 72-76. [Song Shaofei, Li Weifeng, Yang Dongyuan. Research on the methods of home identification based on mobile phone data. China Transportation Review, 2015(12): 72-76. ]
- [32] 王绮, 修春亮, 魏冶, 等. 基于高斯两步移动搜索法的沈阳市就业可达性评价 [J]. 人文地理, 2015, 30(2): 78-82. [Wang Qi, Xiu Chunliang, Wei Ye, et al. Evaluation of job accessibility of Shenyang using Gaussian based 2-step floating catchment area method. Human Geography, 2015, 30(2): 78-82. ]
- [33] 李孟桐, 杨令宾, 魏冶. 高斯两步移动搜索法的模型研究: 以上海市绿地可达性为例 [J]. 地理科学进展, 2016, 35(8): 990-996. [Li Mengtong, Yang Lingbin, Wei Ye. Improved Gaussian based 2-step floating catchment area method: A case study of green space accessibility in Shanghai. Progress in Geography, 2016, 35(8): 990-996. ]
- [34] 李平华, 陆玉麒. 城市可达性研究的理论与方法评述 [J]. 城市问题, 2005(1): 69-74. [Li Pinghua, Lu Yuqi. Metropolitan accessibility: Literature review and research progress in the West. Urban Problems, 2005(1): 69-74. ]
- [35] 宋正娜, 陈雯, 张桂香, 等. 公共服务设施空间可达性及其度量方法 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(10): 1217-1224. [Song Zhengna, Chen Wen, Zhang Guixiang, et al. Spatial accessibility to public service facilities and its measurement approaches. Progress in Geography, 2010, 29(10): 1217-1224. ]
- [36] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究 [J]. 软件学报, 2008(1): 48-61. [Sun Jigui, Liu Jie, Zhao Lianyu. Clustering algorithms research. Journal of Software, 2008(1): 48-61. ]
- [37] 韩晓红, 胡彧. K-means聚类算法的研究 [J]. 太原理工大学学报, 2009(3): 236-239. [Han Xiaohong, Hu Yu. Research of K-means algorithm. Journal of Taiyuan univer-

- sity of Technology, 2009(3): 236-239. ]
- [38] 深圳市统计局. 深圳市公园名录 [EB/OL]. 2018-06-17 [2020-08-07]. <http://tjj.sz.gov.cn/tjsj>. [Bureau of Statistics of Shenzhen. List of Shenzhen parks. 2018-06-17 [2020-08-07]. <http://tjj.sz.gov.cn/tjsj>. ]
- [39] 王德, 王灿, 谢栋灿, 等. 基于手机信令数据的上海市不同等级商业中心商圈的比较: 以南京东路、五角场、鞍山路为例 [J]. 城市规划学刊, 2015(3): 50-60. [Wang De, Wang Can, Xie Dongcan, et al. Comparison of retail trade areas of retail centers with different hierarchical levels: A case study of East Nanjing Road, Wujiaochang, Anshan Road in Shanghai. Urban Planning Forum, 2015 (3): 50-60. ]
- [40] Xu Y X, Zhou R, Dai L D, et al. Spatial differences and the impacts of the separation between jobs and residential locations: Evidence from household survey data in Luohe City [J]. Urban Development Studies, 2014, 21 (12): 52-58.
- [41] 杨滨毓. 基于多源数据的交通小区划分方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. [Yang Binyu. Research on traffic analysis zones division method based on multi-source data. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2020. ]
- [42] 全德, 高静, 龚咏喜. 城中村对深圳市职住空间融合的影响: 基于手机信令数据的研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 1091-1101. [Tong De, Gao Jing, Gong Yongxi. Impact of urban village on job-housing balance in Shenzhen: A study using mobile phone signaling data. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(6): 1091-1101. ]
- [43] 马亮, 周军. 深圳市居民出行结构演变特征分析及政策启示 [C]// 中国城市规划学会城市交通规划学术委员会. 2019年中国城市交通规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. [Ma Liang, Zhou Jun. Analysis on the evolution characteristics of Shenzhen residents' travel structure and policy implications // Academic Committee on Urban Transport Planning of China Urban Planning Society. China annual conference on urban transport planning. Beijing, China: China Architecture Building Press, 2019. ]
- [44] 深圳市统计局. 深圳市统计年鉴: 2018 [DB/OL]. 2018-08-01 [2020-08-07]. <http://tjj.sz.gov.cn/nj2018/>. [Bureau of Statistics of Shenzhen. Shenzhen statistical yearbook: 2018. 2018-08-01 [2020-08-07]. <http://tjj.sz.gov.cn/nj2018/>. ]
- [45] 深圳市人民政府. 深圳市人民政府关于印发人口与社会事业发展“十三五”规划的通知 [EB/OL]. 2017-01-11 [2020-08-07]. [http://www.sz.gov.cn/zfgb/2017/gb987/content/post\\_5001720.html](http://www.sz.gov.cn/zfgb/2017/gb987/content/post_5001720.html). [Shenzhen Municipal People's Government. Notice of the Shenzhen municipal people's government on the issuance of the 13th five-year Plan for the development of population and social undertaking. 2017-01-11 [2020-08-07]. [http://www.sz.gov.cn/zfgb/2017/gb987/content/post\\_5001720.html](http://www.sz.gov.cn/zfgb/2017/gb987/content/post_5001720.html). ]
- [46] 魏冶, 修春亮, 高瑞, 等. 基于高斯两步移动搜索法的沈阳市绿地可达性评价 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 479-487. [Wei Ye, Xiu Chunliang, Gao Rui, et al. Evaluation of green space accessibility of Shenyang using Gaussian based 2-step floating catchment area method. Progress in Geography, 2014, 33(4): 479-487. ]

## Evaluation of green space accessibility based on improved Gaussian two-step floating catchment area method: A case study of Shenzhen City, China

TONG De<sup>1</sup>, SUN Yiyu<sup>1</sup>, XIE Miaomiao<sup>2\*</sup>

(1. Peking University (Shenzhen) Laboratory for Urban Future, School of Urban Planning and Design,  
Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, Guangdong, China;

2. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Accessibility of park green space is an important indicator of the livability level of a city. In order to solve the problem of scale imbalance between population and park green space distribution data by traditional accessibility analysis, this study used mobile phone signaling data to obtain the spatial distribution of population, and adopted the Gaussian two-step floating catchment area method to calculate the accessibility of park green space at the scale of traffic analysis zone (TAZ) in Shenzhen City. It also conducted a cluster analysis based on the accessibility results, supply and demand, and traffic conditions. The main conclusions are as follows: 1) More refined population information can be obtained through mobile phone signaling data to improve the accuracy of demand assessment. For different types of parks, the Gaussian two-step floating catchment area method represents an improvement in calculating the accessibility of parks in the city. 2) The overall level of comprehensive accessibility of park green space in Shenzhen is relatively high, but there is an obvious decreasing trend from the city center to the periphery. The mismatch between the accessibility of community parks and the supply and demand of park green space is an important reason for the large difference of accessibility among different regions in Shenzhen. 3) According to the results of *K*-means clustering analysis, the TAZ units of the city was divided into low supply low demand low accessibility zone, medium supply low demand medium accessibility zone, high supply high demand medium accessibility zone, and high supply low demand high accessibility zone. 4) The accessibility of park green space can be improved by optimizing park layout, road construction, and residential area planning and layout. By improving data source and model of the traditional accessibility calculation, this study enriches the cases of park green space accessibility evaluation, and the proposed accessibility analysis method based on mobile phone signaling can also provide a reference for the accessibility analysis of other geographic phenomenon.

**Keywords:** park green space; accessibility; two-step floating catchment area method; mobile phone signaling data; Shenzhen City