

王诚,张云彬,陈静媛,等.基于改进两步移动搜索法的合肥市中心城区综合公园可达性评价[J].华中农业大学学报,2024,43(1):89-99.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.01.010

## 基于改进两步移动搜索法的合肥市 中心城区综合公园可达性评价

王诚,张云彬,陈静媛,李丹,朱萌

安徽农业大学林学与园林学院,合肥 230036

**摘要** 为提高城市综合公园布局均衡性地定量评估的准确性,以合肥市中心城区为例,提出一种基于改进多出行模式的两步移动搜索法,利用高德地图的路径规划模型,结合双变量局部空间自相关、洛伦兹曲线以及基尼系数等方法,在手机信令数据的基础上对不同时间阈值下的城市综合公园的可达性及供需情况进行分析,进一步揭示中心城区综合公园布局的合理性。结果显示:合肥市中心城区综合公园的可达性空间差异显著,可达性较高区域通常分布在新城区以及综合公园周边地区,并且随着时间阈值的提高,可达性水平的空间分布呈现均衡态势;合肥市中心城区在15 min与30 min时间阈值下均只有近5%的居住网格处于供需匹配状态;近7%的居住网格处于供需显著不匹配状态,主要集中于老城区西部以及滨湖区北部区域,居住区密度与综合公园数量是影响供需匹配的重要原因。研究结果表明,通过利用手机信令数据与高德路径规划数据作为数据源对传统可达性的计算方法以及两步移动搜索模型进行改进,建立微观尺度下城市综合公园的可达性评价框架,能够精确地评估城市综合公园的可达性;通过优化城市交通的通达程度以提高居民综合公园游憩出行的阈值,能够显著促进城市综合公园整体的空间分布合理性。

**关键词** 手机信令数据;绿地;综合公园;可达性;两步移动搜索法;合肥市

**中图分类号** TU986.5    **文献标识码** A    **文章编号** 1000-2421(2024)01-0089-11

公园绿地对城市居民健康水平的提高<sup>[1]</sup>和生活质量的改善<sup>[2]</sup>具有重要作用,合理的公园绿地配置决定了城市居民能否公平、有效地获取公园各项服务<sup>[3]</sup>,与其他公园相比,综合公园面积较大且娱乐和服务设施较为完善,能够满足居民多种游憩休闲需求,对提高居民福祉尤为重要<sup>[4-5]</sup>。近几十年来,随着我国社会与经济的快速发展,城市中各类问题逐渐凸显,城市空间的居住分异使得城市公共空间资源的分配呈现出空间不正义现象<sup>[6]</sup>。在这样的背景下,对现有城市综合公园空间布局的合理性与均衡性展开研究,对消除社会分异,改善人民生活福祉有重要的意义<sup>[7]</sup>。

传统绿地规划中以人均绿地面积、绿地率、绿化率等指标开展的公园绿地服务评价难以反映实际的公园绿地服务质量与布局的合理性<sup>[8]</sup>。可达性是指从空间任意一点克服空间阻力到达空间另一点的相

对或绝对难易程度<sup>[9]</sup>,是评价公共服务设施布局合理性的有效手段<sup>[10]</sup>,近年来越来越多的学者开始将可达性这一概念纳入城市公园绿地布局的评价中,并且利用如最小邻近距离法<sup>[11]</sup>、统计指标法<sup>[12]</sup>、引力模型法<sup>[13]</sup>、两步移动搜索法<sup>[13]</sup>等进行测度,其中两步移动搜索法通过将非空间属性融入到空间可达性研究中,在计算可达性的过程中同时考虑到供给点规模、需求点规模以及供给点和需求点之间的相互作用,能够克服其余可达性计算方法的缺点<sup>[6]</sup>,在公园绿地可达性评价中被广泛应用<sup>[7,14-18]</sup>。

虽然目前利用两步移动搜索进行关于公园绿地可达性的研究较多,但大多以城市全体绿地为研究对象,缺少针对特定公园类型如综合公园的研究。此外,两步移动搜索法也存在着以下局限性:首先是区域人口数据的获取,通常以人口普查或实地调查获取的区域人口数表示区域绿地需求量,优点在于

收稿日期:2022-10-16

基金项目:2020年度安徽省重点研发项目(202004a06020014);安徽农业大学自然科学青年基金项目(K2137001)

王诚,E-mail:20721286@stu.ahau.edu.cn

通信作者:陈静媛,E-mail:jingyuanchen@ahau.edu.cn

能够获取大范围的人口数据,但统计数据时效性较差且无法反映真实的居住情况,导致最终计算出的可达性与真实情况出入较大<sup>[18]</sup>;其次是道路空间数据,一般通过建立路网模型获取空间距离数据,对于通行过程中遇到的阻力则以经验值估算<sup>[19]</sup>,存在较大的主观性,容易使计算的结果产生较大的误差<sup>[16]</sup>;最后是出行方式的选择,不同属性的人群对出行模式的选择是不同的,以单一的出行方式对绿地可达性进行估算难以反映实际的绿地可达性,需要考虑多种出行模式的公园绿地可达性测度方法<sup>[20]</sup>。

相比较于利用人口分布的统计数据获取居民绿地需求而存在的准确性低、时效性差等缺点,手机信令数据具有空间分辨率高、时效性好等优点<sup>[21]</sup>。因此,本研究采用手机信令数据作为数据源,以合肥市中心城区综合公园为研究对象,采用多种交通出行方式构建多出行模式的两步移动搜索模型,分别从15 min时间阈值与30 min时间阈值对中心城区综合公园的可达性进行研究,并利用双变量局部空间自相关以及洛伦兹曲线、基尼系数等对中心城区综合公园绿地的供需情况进行分析,以期能够准确揭示中心城区综合公园布局的合理性,为未来合肥市中心城区公园绿地的布局优化提供重要的指导依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

合肥市位于中国华东地区,是中国长三角城市群副中心城市以及综合性国家科学中心,总面积为11 445 km<sup>2</sup>,人口达到936万(中国国家统计局,2020年)。本研究以中心城区为研究范围,依据《合肥市城市总体规划(2011—2020)》对于中心城区范围的界定,中心城区北起长丰县行政边界,南至巢湖岸边,西起肥西县与南岗镇行政边界,东至大圩镇、淝河镇、大兴镇等行政边界,总面积约486 km<sup>2</sup>,包含蜀山区、瑶海区、庐阳区与包河区等4个行政区,其中图1来自国家测绘局网站,审图号:皖合S(2022)10号。

### 1.2 数据来源与预处理

1)公园绿地数据。本研究使用的公园绿地数据来源于高德地图,同时参照《合肥市绿地系统规划(2007—2020)》和《合肥市总体规划(2013—2020)》等官网公开信息,结合地图与实地调查,共得到中心城区各类公园50处。参考GB/T 51346—2019《城市绿地规划标准》,选择位于城市建设区内部,且面积

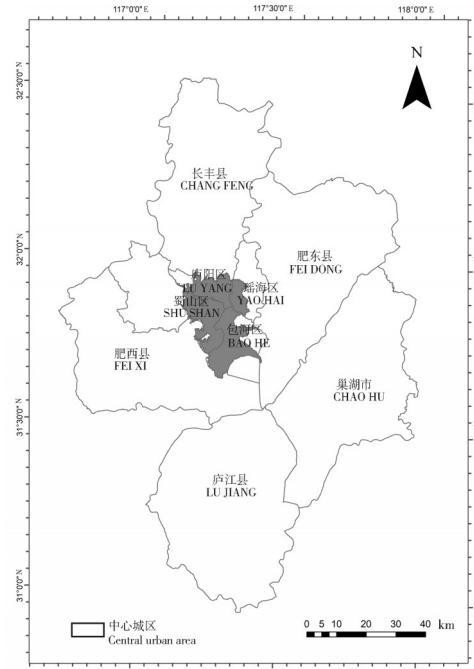


图1 合肥市中心城区范围  
Fig.1 The central urban area of Hefei

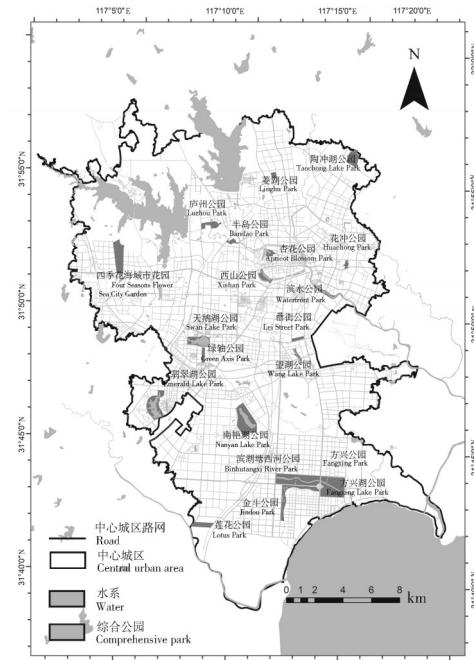


图2 合肥市中心城区综合公园绿地分布  
Fig.2 Distribution of comprehensive park green space in downtown Hefei

大于10 hm<sup>2</sup>的公园,剔除其中包括植物园、遗址公园、历史名园在内的各种专类公园,最终筛选出20个综合公园作为本次研究的对象(图2)。在ArcGIS中将公园绿地面状要素转换为点状要素。提取其质心作为供给点<sup>[14]</sup>,得到20个综合公园供给点。

2)人口活动数据。与传统统计数据相比,手机信令等大数据因具有较高的时效性、精确性等优势而越来越多被应用于人口信息识别中<sup>[22]</sup>。本研究采用2021年5月份的合肥市中国联合网络通信集团有限公司(以下简称:中国联通)用户的手机信令脱敏数据,数据来源于中国联通智慧足迹,截至2021年底,中国联通用户约为0.95亿,市场份额占19%,考虑到数据的准确性,本研究仅以中国联通手机用户数据为本次研究的人口数据,不依据人口普查数据进行数据扩样处理。利用手机信令基站对用户进行定位,其数据精确度远高于街道、区县等统计数据。当用户手机与中国联通基站进行通信连接时,基站会对用户进行定位,并记录和用户的交互信息,记录内容包括用地ID、交互时间、基站编号、事件类型(接听电话、接收、发送短信、位置更新)等<sup>[23]</sup>。中国联通在合肥市中心城市内建设约1.3万个基站,每个基站均有各自的覆盖范围,我们将1个基站连同其覆盖范围称为1个基站单元。中国联通用户的活动在不同的基站单元内进行,其中发生该用户居住行为的网格称为该用户的居住网格单元;每个用户均拥有1个独一无二的ID。游憩用户是指2021年5月份曾经在合肥市中心城区综合公园活动过的中心城区居住用户,我们基于用户ID将居住用户与游憩用户进行连接,之后进行居住用户与游憩用户的识别。具体步骤如下:①将2021年5月份在合肥市同一基站单元内驻留超过10 d的用户标记为合肥市常住人口,统计21:00至第2天08:00在各个基站单元内的停留时长,停留时间最长的基站单元标记为该用户的居住地<sup>[24]</sup>。②统计合肥市2021年5月份08:00至21:00期间在中心城区综合公园绿地范围内单次驻留时长在30 min以上的联通用户,标记为综合公园的游憩用户;③分别统计居住地的居住人数以及游憩用户在综合公园的游憩次数、游憩活动时长等数据并汇总至基站点。

本研究选取利用手机信令数据识别的2021年5月份合肥市各行政区(县)居住人口数据,与合肥市第七次全国人口普查中各行政区(县)的人口数据进行相关性分析,并计算其Pearson相关系数,结果为0.966,在0.01水平呈显著正相关,表明本研究使用的手机信令数据样本具有代表性和有效性。

研究表明,正六边形在6个方向上的点到质心距离相同,可减少由于格网形状的边界效应带来的样本偏差,也更适合进行空间分析<sup>[25]</sup>。因此,本研究选

择边长为500 m的正六边形,在ArcGIS10.2中建立居住蜂窝网,将落在正六边形内的基站点聚合于网格质心,在此基础上进行空间分析,得到居住六边形网格827个作为后续分析的居住网格单元。用户拥有独立的ID,可以根据用户ID追溯网格用户的活动轨迹,从而确定用户的游憩地与居住网格单元。

最后获取用户到达游憩地花费的时间和距离,据此可以计算出用户的出行速度,依据居民到达综合公园的出行速度判断其出行采用的交通方式,其中出行速度为0~5 km/h判断为步行到达;出行速度5~15 km/h判断为通过骑行到达;出行速度为15~60 km/h判断为通过车行(包含公共交通、地铁、私家车等交通方式)到达,并计算各种交通方式的占比情况,作为不同交通方式在可达性计算中的叠加权重。

3)交通距离数据。本研究通过高德API(application programming interface)中的路径规划2.0接口,求得各综合公园供给点与居住需求点的最短出行路径,此方法能够依据实时交通路口获取最短出行路径。为了避免道路交通拥堵情况对出行路径采集的影响,选择在避开通勤高峰期的工作日15:00—16:00分别获取步行、电动车以及机动车的出行路径,具体步骤如下:首先利用坐标转换接口将公园绿地供给点与居住需求点的GPS坐标转换为高德坐标;其次利用路径规划2.0接口,在工作日15:00—16:00分别以起止点坐标为参数,发起步行、电动车以及机动车的路径规划调用请求,利用Python获取不同出行方式下的时间距离数据作为供给点与需求点之间的实际距离数据。

### 1.3 研究方法

1)改进多出行模式的两步移动搜索法。两步移动搜索法能够从公园绿地供给与居住地需求两个角度出发评价公园绿地的可达性,考虑到以单一交通方式计算的可达性难以模拟的实际情况<sup>[15]</sup>。因此,本研究根据居民实际游憩出行所采用的交通方式进行步行、骑行及车行3种交通方式的叠加,构建基于多出行模式叠加的两步移动搜索模型对综合公园的可达性进行计算。参考GB/T 51346—2019《城市绿地规划标准》中关于城市综合公园服务范围的标准以及相关公园可达性的研究<sup>[4,7,14-16]</sup>,本研究将搜索阈值确定为15、30 min,之后进行对比分析以探讨搜索阈值对公园可达性的影响。

公园的质量会对公园服务供给规模产生影响<sup>[7]</sup>,因此,需要对公园供给规模进行修正。本研究根据

居民的游憩特征数据,利用公园的平均游憩时长除以公园面积,并进行标准化得到公园的单位面积游憩强度标准化值,之后构建公园的单位面积游憩强度指数对其服务供给规模进行修正<sup>[16]</sup>,具体计算公式如下:

$$S_j = s_j(1 + T_j) \quad (1)$$

$$T_j = \frac{t_j - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, $S_j$ 为公园j的服务供给规模, $s_j$ 为公园j的面积, $T_j$ 为公园j的单位面积游憩强度标准化值, $t_j$ 为公园j的单位面积游憩强度,用公园的平均游憩时长与公园面积的比值来衡量, $t_{\min}$ 为所有综合

$$R_j = \frac{B_1 \sum_{k \in \{d_{k,j,1} \leq d_0\}} G(d_{k,j,1}, d_0) \times P_{k,1} + B_2 \sum_{k \in \{d_{k,j,2} \leq d_0\}} G(d_{k,j,2}, d_0) \times P_{k,2} + B_3 \sum_{k \in \{d_{k,j,3} \leq d_0\}} G(d_{k,j,3}, d_0) \times P_{k,3}}{B_1 \sum_{k \in \{d_{k,j,1} \leq d_0\}} G(d_{k,j,1}, d_0) + B_2 \sum_{k \in \{d_{k,j,2} \leq d_0\}} G(d_{k,j,2}, d_0) + B_3 \sum_{k \in \{d_{k,j,3} \leq d_0\}} G(d_{k,j,3}, d_0)} \quad (3)$$

式(3)中, $R_j$ 表示公园j的服务能力值; $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 分别表示步行、骑行以及车行的叠加权重; $d_{k,j,1}$ 、 $d_{k,j,2}$ 、 $d_{k,j,3}$ 分别表示居民点k到公园绿地j以步行、骑行、车行方式出行的时间; $d_0$ 表示时间阈值, $P_{k,1}$ 、 $P_{k,2}$ 、 $P_{k,3}$ 分别表示步行、骑行以及车行在阈值范围内居民点k的需求规模,利用居民点k的居住人数表示。 $G(d_{k,j,1}, d_0)$ 、 $G(d_{k,j,2}, d_0)$ 、 $G(d_{k,j,3}, d_0)$ 为高斯函数,以 $G(d_{k,j,1}, d_0)$ 为例,计算公式如下:

$$G(d_{k,j,1}, d_0) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{2} \times \left(\frac{d_{k,j,1}}{d_0}\right)^2} - e^{-\frac{1}{2}}, & d_{k,j,1} \leq d_0 \\ 0^{1-e^{-\frac{1}{2}}}, & d_{k,j,1} > d_0 \end{cases} \quad (4)$$

第二步,计算公园的可达性:

$$\begin{aligned} A_i = & B_1 \sum_{i \in \{d_{i,j,1} \leq d_0\}} G(d_{i,j,1}, d_0) \times R_j + \\ & B_2 \sum_{i \in \{d_{i,j,2} \leq d_0\}} G(d_{i,j,2}, d_0) \times R_j + \\ & B_3 \sum_{i \in \{d_{i,j,3} \leq d_0\}} G(d_{i,j,3}, d_0) \times R_j \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, $A_i$ 为居住点i的公园绿地可达性,其值越大表示公园绿地的可达性越高。

2)双变量局部空间自相关。基于两步移动搜索法计算出公园绿地可达性本质是基于居民和公园之间的距离以及公园的覆盖范围计算出的加权人均公园绿地面积。因此,本研究将在2种时间阈值下计算出的公园绿地可达性作为居住网格单元的绿地供给,居住网格单元的居住人数作为居住点的绿地需求,基于双变量空间自相关<sup>[26]</sup>探讨居住网格单元的绿地供给与绿地需求之间的匹配程度,得到中心城区综合公园的供需平衡关系,计算公式如下:

$$I_{i,k,l} = \frac{Y_{i,k} - \bar{Y}_k}{\sigma_k} \times \sum_{j=1}^n W_{i,j} \times \frac{Y_{j,l} - \bar{Y}_l}{\sigma_l} \quad (6)$$

公园的单位面积游憩强度的最小值, $t_{\max}$ 为所有综合公园的单位面积游憩强度的最大值。

基于以上内容构建改进多出行模式的两步移动搜索模型,分为以下2个步骤:第一步,计算公园的服务能力,由于居民到达综合公园采用的交通方式不同,因此相同时间阈值下,公园的服务范围会因为居民所采用的交通方式而产生改变,本研究根据前面识别的采用步行、骑行以及车行方式到达公园的用户比例乘以累计的经过高斯函数衰减之后的用户数量,并进行叠加以计算公园的综合服务能力值:

$$S_j = \frac{G(d_{k,j,1}, d_0) \times P_{k,1} + G(d_{k,j,2}, d_0) \times P_{k,2} + G(d_{k,j,3}, d_0) \times P_{k,3}}{G(d_{k,j,1}, d_0) + G(d_{k,j,2}, d_0) + G(d_{k,j,3}, d_0)} \quad (3)$$

式(6)中, $I_{i,k,l}$ 表示居住单元网格i公园绿地可达性与居住人数的Moran's I(莫兰指数),Moran's I大于0或者小于0分别表示公园绿地可达性和居住人数存在正、负空间关联性,等于0则表示不存在空间关联性<sup>[27]</sup>; $Y_{i,k}$ 表示居住网格单元i的公园绿地可达性, $Y_{j,l}$ 表示居住网格单元j的居住人数; $\bar{Y}_k$ 表示公园绿地可达性的均值, $\bar{Y}_l$ 表示居住人数的均值; $\sigma_k$ 为公园绿地可达性的方差, $\sigma_l$ 为居住人数的方差; $W_{i,j}$ 为居住网格单元i和居住网格单元j之间的空间权重矩阵,在空间权重矩阵的构建上,以Queen相邻定义邻近关系,阶数为1,即2个居住网格之间若有共同边,则 $W_{i,j}$ 为1,否则为0; $n$ 为居住网格的数量。

3)洛伦兹曲线和基尼系数法。洛伦兹曲线与基尼系数常被用于定量测度社会收入分配的公平程度,由于收入分配的公平程度在本质上与公园绿地资源分配较为相似,这2种方法也在环境公平领域被广泛应用<sup>[28]</sup>。本研究基于洛伦兹曲线与基尼系数构建公园绿地供需平衡模型,对中心城区整体公园绿地分配的供需平衡进行测度,其中洛伦兹曲线定义为居住点k的累计人口比例 $P_k$ 与其累计获取的绿地资源比例 $C_k$ 之间的函数关系,基尼系数的计算公式如下:

$$G = 1 - \sum_{k=1}^n (P_k - P_{k-1})(C_k + C_{k-1}) \quad (7)$$

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^k A_i r_i}{\sum_{i=1}^n A_i r_i} \quad (8)$$

式(7)~(8)中: $G$ 为中心城区的公园绿地供需平衡指数, $n$ 为中心城区内的居住点数, $k$ 为居住点按照其公园绿地可达性按升序排序后的序号; $A_i$ 为居住

点 $i$ 的公园绿地可达性的值;  $r_i$ 为居住点 $i$ 的人口数;  $C_k$ 为从居住点1到居住点 $k$ 的可达性与居住点人口乘积的累计比例,  $C_0=0, C_n=1, P_k$ 为从居住点1到居住点 $k$ 的累计人口比例,  $P_0=0, P_n=1$ 。根据联合国开发计划署规定<sup>[29]</sup>, 基尼系数的值在[0, 0.2)说明公园绿地资源分配达到绝对平均, 基尼系数的值在[0.2, 0.3)说明公园绿地资源分配比较平均, 基尼系数的值在[0.3, 0.4)说明公园绿地资源分配相对合理, 基尼系数的值在[0.4, 0.6)说明公园绿地资源分配差距较大, 基尼系数的值在[0.6, 1.0]说明公园绿地资源分配差距悬殊。

## 2 结果与分析

### 2.1 综合公园服务供给与居住人口需求分析

将综合公园平均游憩时长以及综合公园服务供给进行可视化, 以分析综合公园的服务供给规模空间分布特征。由图3可知, 综合公园游憩时长呈现西高东低的空间格局, 高值地区集中于中心城区中间至西部边缘区域, 包括西山公园、杏花公园、滨湖塘

西河公园、翡翠湖公园、四季花海城市花园、莲花公园等, 平均游憩时长达到5 h或以上的; 低值地区集中于中心城区中间至东部边缘区域, 包括方心湖公园、罍街公园以及天鹅湖公园等, 平均游憩时长在2.5~3.0 h。

基于用户在综合公园的平均游憩时长以及公园面积对其绿地服务能力的修正, 由图3可知服务供给规模高值地区集中于中心城区西部边缘地区, 包括南艳湖公园、四季花海城市花园、滨湖塘西河公园、方兴湖公园等, 此类公园面积较大, 同时公园建设质量较高, 具有较大的服务供给能力; 低值地区集中于中心城区中间部分, 公园设施较为老旧, 难以提供较大的服务供给, 同时周边游玩设施过多, 公园自身难以对游客形成较大的吸引力。

基于居住网格单元将居住人口以及游憩人次进行可视化, 用以表达居住人口的绿地需求空间分布特征。由图4可知, 中心城区居住人口整体呈现北高南低的空间格局, 其中居住人口主要分布于老城区、政务区、滨湖区等区域, 居住人口较为密集。

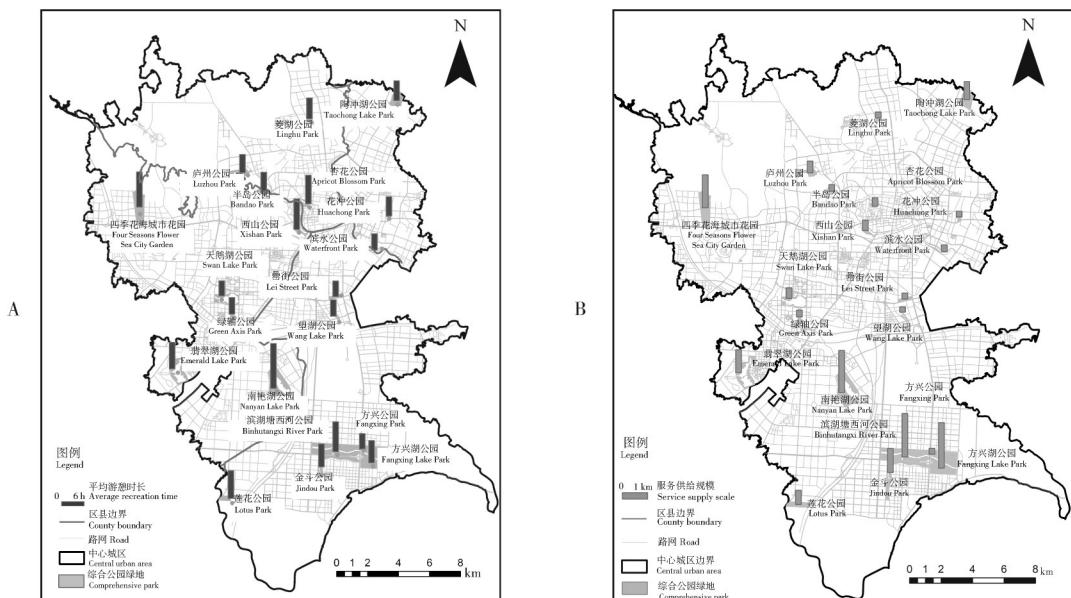


图3 综合公园游憩时长分布图(A)和服务供给分布图(B)

Fig.3 Recreation duration distribution of comprehensive park green space (A) and service supply distribution of comprehensive park green space (B)

由图4可知游憩人次的居住地主要分布于政务区和滨湖区, 区域内综合公园数量较多, 且公园建设质量较高, 因此其游憩人次较多; 老城区虽然居住人数多, 但公园数量较少, 且公园游憩设施老旧, 导致周边地区游憩人数较少。

### 2.2 综合公园可达性分析

通过改进多出行模式的两步移动搜索模型分布计算出15、30 min时间阈值下各居住网格的可达性, 并基于自然断点法将计算结果分为5个等级显示(图5)。依据两步移动搜索法的计算原理, 绿地可达性

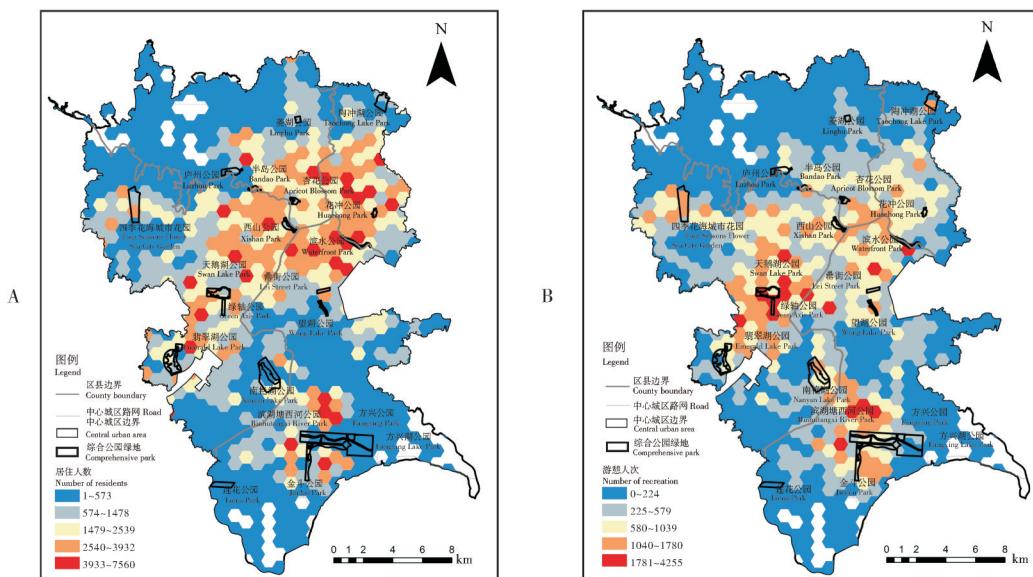


图4 合肥市中心城区居住人口分布(A)和游憩人次分布(B)

Fig.4 Residential population distribution in central urban area (A) and recreational population distribution in central urban area(B)

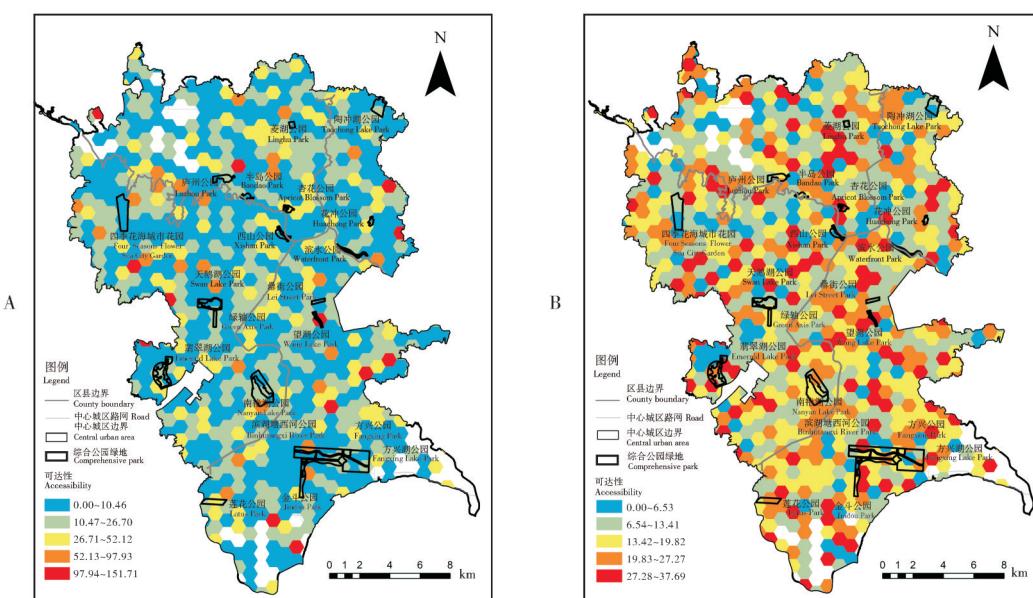


图5 15 min(A)和30 min(B)阈值下综合公园可达性

Fig.5 Accessibility of comprehensive park green space at the 15 minutes threshold(A) and 30 minutes threshold (B)

实际上为加权后的人均绿地面积<sup>[14]</sup>。整体来看,图5显示中心城区南部新城区域在绿地建设、道路建设、居住规划优于中间至北部老城区域的情况下,其综合公园可达性普遍高于老城区域。中心城区中包河区以及蜀山区的城市综合公园的可达性要高于瑶海区及庐阳区,主要由于城市综合公园规模较大,且周边路网通达性较好。瑶海区的城市综合公园可达性

最低,其原因主要是公园的数量较少,且公园周边居住密度较大,在人口密度较大带来的城市综合公园高需求下,区域内的公园供给不能满足居民需求,因此呈现较低可达性。由于城市综合公园的建设需要有一定的自然资源基础,因此,其可达性的提升只能依靠提高周边地区道路建设水平以及合理安排居住地来实现。

在 15 min 时间阈值下,可达性较高(52.13~151.72)区域较少,占比为 4.96%,主要沿着庐州公园、四季花海城市花园、花冲公园、望湖公园以及滨湖塘西河公园等综合公园周边区域,呈点状分布;可达性一般(26.71~52.12)区域占比有所上升,为 14.63%,平均分布于菱湖公园、杏花公园、西山公园、翡翠湖公园、莲花公园以及南艳湖公园等综合公园周边区域,呈点状与线状分布;可达性较低(0.00~26.70)区域较多,占比为 80.41%,分布于陶冲湖公园、天鹅湖公园、绿轴公园、半岛公园、方兴公园、方兴湖公园、罍街公园、滨水公园以及金斗公园等综合公园周边区域,呈线状与面状分布,说明合肥市中心城区大量地区都处于综合公园可达性低值区,需要加强城市综合公园的均衡布局。

通过对比 15、30 min 时间阈值可以发现，搜索阈值的增大虽然会降低整体的可达性，但是会显著提高可达性分配的平均程度，同时，虽然 15 min 时间阈值下的可达性远大于 30 min，但以中低值居

多,而30 min时间阈值下的可达性虽然整体较低,但是较高(19.83~37.69)区域大幅度增多,占比为31.80%,且平均分布于各综合公园周边地区;可达性一般(13.42~19.82)区域略有增多,占比为26.36%,主要分布于中心城区中间偏南部区域;可达性较低(0.00~13.41)区域大幅度减少,占比为41.84%,主要分布于中心城区中间至北部区域。

## 2.3 综合公园供需情况分析

利用Geoda软件进行综合公园可达性与居住人口的双变量局部空间自相关分析,以揭示中心城区的综合公园供给与需求匹配特征。在0.05的显著性水平上,两者之间的空间关联情况如图6所示,高-高表示居住网格的可达性与人口数都处于高值;高-低表示居住网格的居住人数较多但是可达性较低;低-高表示居住网格的可达性较高,但是居住人数较少;低-低表示居住网格的可达性与人口数都处于较低的水平。

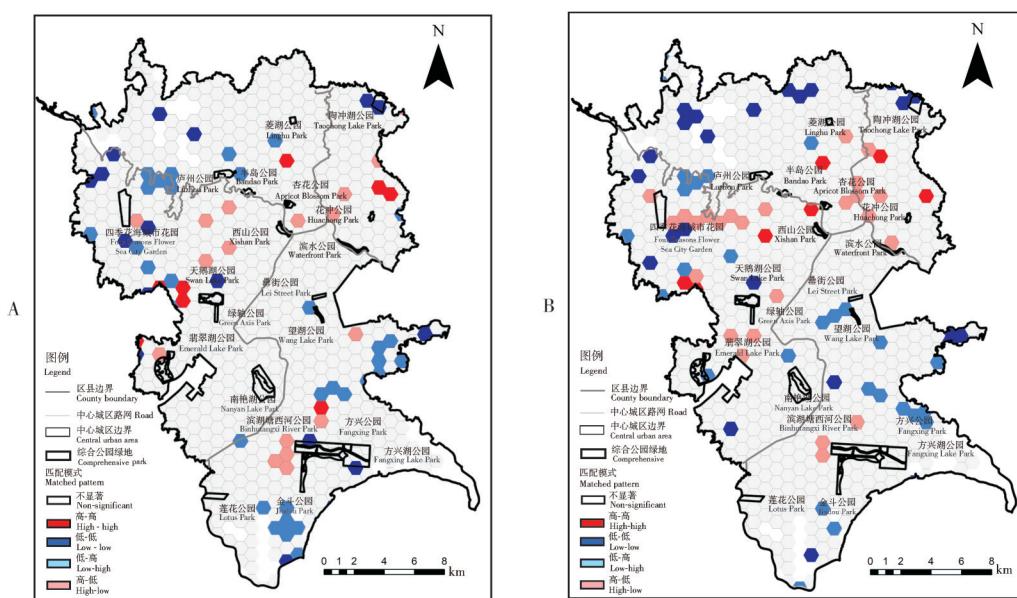


图6 15 min(A)和30 min(B)阈值下综合公园可达性与居民需求匹配模式  
 Fig.6 Matching model of comprehensive park green space accessibility and residents demand at the 15 minutes threshold (A) and 30 minutes threshold (B)

在 15 min 时间阈值下,有 34 个网格显示为“低-高”聚集,出现“高供给-低需求”的现象,占全部居住网格的 4.11%,分布于中心城区西北以及东南综合公园的周边区域;有 17 个网格显示为“高-低”聚集,占全部居住网格的 2.06%,分布于中心城区中间以及南部区域。30 min 时间阈值下,除局部居住网格的聚集

状态有所变化外,大部分居住网格的聚集状态与15 min时间阈值下相比变化较小,综合来看,中心城区只有近5%的居住网格处于供需匹配状态,近7%的居住网格处于供需显著不匹配状态,供需不匹配的居住网格主要集中于老城区西部以及滨湖区北部区域,老城区西部区域人口较为密集,但综合公园数量

较少,因此出现需求大于供给的局面,而滨湖区北部区域公园供给充足,人口稀疏,因此出现供给大于需求的局面,在未来的绿地建设中需要重点关注此类区域的供需匹配问题。

采用洛伦兹曲线及基尼系数分析中心城区公园绿地资源的供需情况后发现,对比15 min时间阈值和30 min时间阈值下的公园绿地资源分配洛伦兹曲线(图7),两者曲线弯曲程度都较大,说明中心城区

公园绿地资源分配整体上差异较为明显。采用几何法计算公园绿地资源分配的基尼系数,15 min时间阈值下为0.525 7,按照基尼系数的划分,属于差距悬殊,因此在15 min时间阈值下,中心城区综合公园资源分配的供需平衡程度较低;30 min时间阈值下的基尼系数为0.303 6,属于相对合理的范畴,因此,在30 min时间阈值下,中心城区综合公园资源分配的供需平衡程度较高。

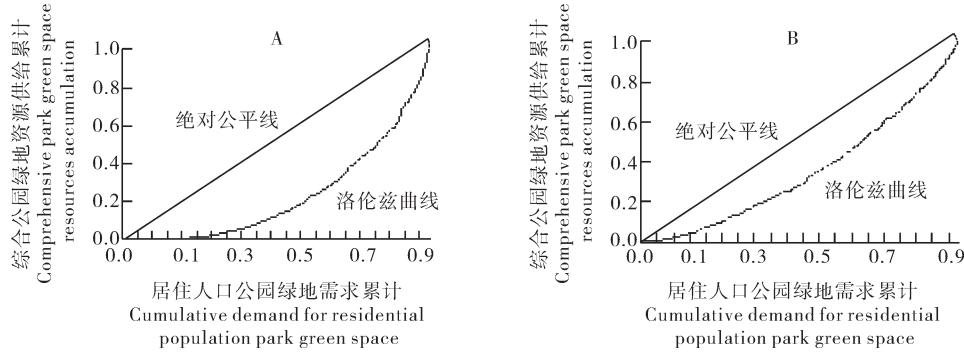


图7 15 min(A)和30 min(B)阈值下综合公园绿地资源分配的洛伦兹曲线

Fig.7 Lorentz curve of resource allocation of comprehensive park green space at the 15 minutes threshold (A) and 30 minutes threshold (B)

### 3 讨论

本研究基于手机信令数据以及高德地图路径规划数据,构建改进多出行模式的两步移动搜索模型,通过运用双变量局部空间自相关以及洛伦兹曲线、基尼系数等方法,分析合肥市中心城区综合公园的可达性空间特征。结果显示:①综合公园资源的服务水平呈现西高东低的空间格局,较高区域主要分布于中心城区中间至西部边缘部分,而综合公园资源的需求呈现北高南低的空间格局,需求较高区域主要分布于老城区、政务区、滨湖区等地;②综合公园可达性较高区域通常分布在新城区以及综合公园周边地区,并且随着时间阈值的提高,可达性的空间分布趋于平均化;③中心城区在15 min与30 min时间阈值下均只有近5%的居住网格处于供需匹配状态,近7%的居住网格处于供需显著不匹配状态,主要集中于老城区西部以及滨湖区北部区域,老城区西部区域人口较为密集,但综合公园数量较少,因此出现需求大于供给的局面,而滨湖区北部区域公园供给充足,人口稀疏,因此出现供给大于需求的局面,在未来的绿地建设中需要重点关注此类区域的供需匹配问题;④中心城区公园绿地资源分配整体上差异较为明显,相较于15 min时间阈值,30 min时

间阈值下公园绿地资源分配相对合理,中心城区综合公园绿地资源分配的均衡性较高。

从理论方法来看,本研究利用手机信令数据识别出人口的居住地,相较以往采用区(县)级别的数据,计算出来的综合公园需求更加精细、准确。同时本研究在手机信令数据识别出的精细尺度的人口活动特征数据基础上,识别手机用户进行综合公园游憩出行的交通方式,以不同交通方式的占比作为多出行模式的叠加权重,使得计算出来的结果更加符合居民的实际出行情况。但本研究仅根据手机用户到达公园的平均速度判断其出行方式,且只划分为步行、骑行以及车行,对于采用地铁或者混合的出行方式未进行划分,因此,出行数据会存在误差。

从实践角度来看,本研究可以为合肥市综合公园的规划选址以及绿地系统的构建提供一定的参考。按照GB/T 51346—2019《城市绿地规划标准》中的要求,面积在50 hm<sup>2</sup>以上综合公园的服务范围需要大于3 km,即要求公园在其周边3 km范围及更大范围内能够为居民提供较高的公园绿地服务,因此,需要保持综合公园3 km以及更大范围以内的可达性处于较高水平。本研究的10 km的搜索空间距离阈值下,大多数公园无法满足上述要求,而在20

km的搜索空间距离阈值下,仅有南艳湖与滨水公园等综合公园能够满足要求,说明合肥市综合公园建设与空间布局仍有较大提升空间。在综合公园需求较高的老城区,由于其土地资源有限,新建综合公园会存在较大的难度,只能对现有公园绿地的建设质量进行改善,或者采取街心公园、口袋公园等方式创新公园的供给模式,此外大力发展公共交通也是提高老城区内的可达性有效途径;而对于公园绿地需求同样较高的政务区、滨湖区等地,则一方面可以通过新建大型综合公园增加综合公园供给,另一方面可以通过增设大型公园的出入口或者增加居住区与公园的快速路线等方式提高区域的综合公园可达性。

本研究的不足之处在于,研究假设所有人群对于综合公园的需求是相同的,未考虑不同人群综合公园需求的差异对可达性计算的影响,在未来可以考虑加入居民的社会、经济属性数据,探讨不同人群的综合公园游憩特征,以量化不同人群的公园绿地可达性差异。此外,城市综合公园可达性的空间分布差异、均衡性会对于城市居民在健康、生活等方面会产生何种影响,在未来需要进一步研究。

## 参考文献 References

- [1] NUTSFORD D, PEARSON A L, KINGHAM S. An ecological study investigating the association between access to urban green space and mental health [J]. *Public health*, 2013, 127(11): 1005-1011.
- [2] SLATER S J, CHRISTIANA R W, GUSTAT J. Recommendations for keeping parks and green space accessible for mental and physical health during COVID-19 and other pandemics [J/OL]. *Preventing chronic disease*, 2020, 17: 200204 [2022-10-16]. <http://dx.doi.org/10.5888/pcd17.200204>.
- [3] MCGRAIL M R, HUMPHREYS J S. Measuring spatial accessibility to primary health care services: utilising dynamic catchment sizes [J]. *Applied geography*, 2014, 54: 182-188.
- [4] 高文秀,范香,郑芬,等.综合公园及其有效服务范围的空间布局分析[J].*城市规划*,2017,41(11):97-101.GAO W X, FAN X, ZHENG F, et al. Spatial distribution of comprehensive parks and their effective service scope [J]. *City planning review*, 2017, 41(11): 97-101(in Chinese with English abstract).
- [5] 张云彬,吴人伟.欧洲绿道建设的理论与实践[J].*中国园林*, 2007, 23(8): 33-38.ZHANG Y B, WU R W. The theory and practice of greenway construction in Europe [J]. *Chinese landscape architecture*, 2007, 23(8): 33-38(in Chinese with English abstract).
- [6] 曹现强,张福磊.空间正义:形成、内涵及意义[J].*城市发展研究*,2011,18(4):125-129.CAO X Q, ZHANG F L. Spatial justice: context, development and connotation [J]. *Urban studies*, 2011, 18(4): 125-129(in Chinese with English abstract).
- [7] 任家怿,王云.基于改进两步移动搜索法的上海市黄浦区公园绿地空间可达性分析[J].*地理科学进展*,2021,40(5): 774-783.REN J Y, WANG Y. Spatial accessibility of park green space in Huangpu District of Shanghai based on modified two-step floating catchment area method [J]. *Progress in geography*, 2021, 40(5): 774-783(in Chinese with English abstract).
- [8] 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*,1999,23(8):8-11.YU K J, DUAN T W, LI D H, et al. Landscape accessibility as a measurement of the function of urban green system [J]. *City planning review*, 1999, 23(8): 8-11(in Chinese with English abstract) .
- [9] PÁEZ A, SCOTT D M, MORENCY C. Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators [J]. *Journal of transport geography*, 2012, 25: 141-153.
- [10] CHEN J Y, BAI Y Q, ZHANG P, et al. A spatial distribution equilibrium evaluation of health service resources at community grid scale in Yichang, China [J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 1-28.
- [11] 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 C F, LI X M, HAN D. Accessibility analysis of urban parks: methods and key issues [J]. *Acta ecologica sinica*, 2010, 30(19): 5381-5390 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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 T, LI J Y, LI Y, et al. Analysis of urban park accessibility in Shenyang City [J]. *Chinese journal of ecology*, 2016, 35(5): 1345-1350 (in Chinese with English abstract).
- [13] 胡志斌,何兴元,陆庆轩,等.基于GIS的绿地景观可达性研究:以沈阳市为例[J].*沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2005, 21(6): 671-675.HU Z B, HE X Y, LU Q X, et al. Green space accessibility research based on GIS: taking Shenyang as an example [J]. *Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute (natural science)*, 2005, 21(6): 671-675 (in Chinese with English abstract).
- [14] 魏治,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 Y, XIU C L, GAO R, et al. Evaluation of green space accessibility of Shenyang using Gaussian based 2-step floating catchment area method [J]. *Progress in geography*, 2014, 33(4): 479-487(in Chinese with English abstract).

- [15] 杨文越,李昕,陈慧灵,等.基于多出行模式两步移动搜索法的广州多尺度绿地可达性与公平性研究[J].生态学报,2021,41(15):6064-6074.YANG W Y,LI X,CHEN H L,et al. Multi-scale accessibility of green spaces and its equity in Guangzhou based on multi-mode two-step floating catchment area method (M2SFCA) [J]. Acta ecologica sinica, 2021, 41 (15):6064-6074(in Chinese with English abstract).
- [16] 全德,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 D,SUN Y Y,XIE M M. Evaluation of green space accessibility based on improved Gaussian two-step floating catchment area method:a case study of Shenzhen City, China [J]. Progress in geography, 2021, 40 (7) : 1113-1126(in Chinese with English abstract).
- [17] 郭鹏,孙艳玲.基于互联网地图服务和Ga2SFCA的天津市中心城区公园绿地可达性[J].天津师范大学学报(自然科学版),2020,40(5):63-69.GUO P,SUN Y L.Accessibility of urban green space in downtown area of Tianjin based on Internet map service and Gaussian 2-step floating catchment area method [J]. Journal of Tianjin Normal University (natural science edition), 2020, 40(5):63-69(in Chinese with English abstract).
- [18] 李孟桐,杨令宾,魏治.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 M T,YANG L B,WEI Y.Improved Gaussian based 2-step floating catchment area method: a case study of green space accessibility in Shanghai [J]. Progress in geography, 2016,35(8):990-996(in Chinese with English abstract).
- [19] 赵晓龙,郑权一,刘笑冰,等.基于2SFCA改进模型的城市公园绿地规划配置研究:以深圳福田区为例[J].中国园林,2018,34(S2):95-99.ZHAO X L,ZHENG Q Y,LIU X B,et al. Study on the planning and allocation of urban park green space based on 2SFCA improved model: a case study of Futian District, Shenzhen [J]. Chinese landscape architecture, 2018,34(S2):95-99(in Chinese with English abstract).
- [20] 浩飞龙,张浩然,王士君.基于多交通模式的长春市公园绿地空间可达性研究[J].地理科学,2021,41(4):695-704.HAO F L,ZHANG H R,WANG S J.Spatial accessibility of urban green space in central area of Changchun: an analysis based on the multi-trip model [J]. Scientia geographica sinica, 2021, 41 (4):695-704(in Chinese with English abstract).
- [21] 谢栋灿,王德,钟炜菁,等.上海市建成环境的评价与分析:基于手机信令数据的探索[J].城市规划,2018,42(10):97-108.XIE D C,WANG D,ZHONG W J, et al. Assessment and analysis on built environment of Shanghai: an exploration based on mobile phone signaling data[J].City planning review, 2018,42(10):97-108(in Chinese with English abstract).
- [22] 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,2015,37(12):72-76.SONG S F, LI W F,YANG D Y.Research on the methods of home identification based on mobile phone data [J]. China transportation review, 2015, 37 (12) : 72-76 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈静媛,张云彬,王诚,等.基于手机信令数据的合肥市郊区职住空间特征研究[J].华中农业大学学报,2022,41(3):35-46.CHEN J Y,ZHANG Y B,WANG C,et al.Spatial characteristics of workplace and residence in suburbs of Hefei City based on cell phone signaling data[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2022,41(3):35-46(in Chinese with English abstract).
- [24] 牛强,盛富斌,刘晓阳,等.基于手机信令数据的城内迁居活跃度识别方法研究:以武汉市为例[J].地理研究,2022,41 (8) : 2142-2154.NIU Q,SHENG F B,LIU X Y, et al. Research on the identification method of relocation activity degree in inner city based on mobile phone signaling data: a case study of Wuhan [J]. Geographical research, 2022, 41(8):2142-2154(in Chinese with English abstract).
- [25] 傅例,王勇,曾彪,等.基于改进两步移动搜索法的北碚区医疗设施空间可达性分析[J].地球信息科学学报,2019,21 (10) : 1565-1575.FU L,WANG Y,ZENG B,et al.Spatial accessibility of medical facilities in Beibei district based on modified two-step floating catchment area method [J]. Journal of geo-information science, 2019, 21(10) : 1565-1575(in Chinese with English abstract).
- [26] ANSELIN L, SYABRI I, SMIRNOV O. Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows [C]//New Tools for Spatial Data Analysis: Proceedings of the Specialist Meeting.[S.l.]:[s.n.], 2002.
- [27] 罗雅红,龚建周,简钰清,等.粤港澳大湾区SO<sub>2</sub>平均浓度与制造业、生产性服务业集聚的空间关联特征[J].生态经济,2021,37(2):176-182.LUO Y H,GONG J Z,JIAN Y Q, et al. Spatial correlation characteristics between average concentration of SO<sub>2</sub> and manufacturing and producer services in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Ecological economy, 2021, 37(2) : 176-182 (in Chinese with English abstract).
- [28] 马跃,沈山,史春云.徐州主城区绿地空间布局公平性评价与优化研究[J].现代城市研究,2022,37(7):58-64.MA Y, SHEN S,SHI C Y.Research on the equity evaluation and optimization of urban green space in main urban area of Xuzhou city [J]. Modern urban research, 2022, 37 (7) : 58-64 (in Chinese with English abstract).
- [29] 黄群俊.二元经济结构下的中国基尼系数计算方法[J].统计与决策,2013(9):77-79.HUANG Q J.Calculation method of China Gini coefficient under dual economic structure[J].Statistics & decision,2013(9):77-79(in Chinese).

## Accessibility evaluation of comprehensive parks in central urban area of Hefei City based on improved two-step floating catchment area method

WANG Cheng, ZHANG Yunbin, CHEN Jingyuan, LI Dan, ZHU Meng

College of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

**Abstract** A reasonable layout of urban park green space (UGS) is an important prerequisite for ensuring equal access to green space resources for urban residents and improving the living level of the city. In traditional UGS planning, the evaluation of urban comprehensive park services based on indicators including green space rate or green coverage rate is difficult to accurately and quantitatively evaluate the balance of the layout of urban comprehensive park. A two-step floating catchment area method based on improved multi-transport mode was proposed for the central urban area of Hefei City. The path planning model of Gaode map, combined with the methods of bivariate local spatial autocorrelation, Lorenz curve and Gini coefficient was used to analyze the accessibility and supply and demand of urban comprehensive parks under different time thresholds based on the signaling data of mobile phone. The rationality of the layout of comprehensive parks in the central urban area was further revealed. The results showed that the traditional method of calculating the accessibility and two-step mobile search model was improved by utilizing the signaling data of mobile phone and the path planning data of Gaode map as data sources. The accessibility evaluation framework of urban comprehensive parks at a micro scale was established, which can accurately evaluate the accessibility of urban comprehensive parks. The accessibility of comprehensive parks in the central urban area of Hefei City is significantly different in space. The areas with high accessibility are usually distributed in the new urban area and the surrounding areas of the comprehensive parks. With the increase of time threshold, the spatial distribution of accessibility level presents a balanced trend. Only about 5% of the residential grids in the central urban area of Hefei City are in the state of supply and demand matching under the time threshold of 15 minutes and 30 minutes. Nearly 7% of the residential grids are in a significant mismatch between supply and demand, mainly concentrated in the western part of the old city and the northern part of lakeside area. It is indicated that the density of residential areas and the number of comprehensive parks is important factors that affect the matching of supply and demand. Optimizing the accessibility of urban transportation to increase the threshold for recreational travel in comprehensive parks in residential areas can significantly promote the overall rationality of the spatial distribution of urban comprehensive parks. It will provide important guidance for optimizing the layout of comprehensive parks in the central urban area of Hefei City in the future.

**Keywords** signaling data of mobile phone; green space; comprehensive parks; accessibility; two-step floating catchment area method; Hefei City

(责任编辑:陆文昌)