

空间公平导向的城市医疗设施优化配置模型研究

陶卓霖,戴特奇,宋长青

(北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘要: 城市医疗设施合理布局及其空间公平性是地理学重要议题,最大可达性均等(MAE)模型是空间公平导向优化配置模型的重要进展,但已有研究对于模型空间公平测度指标的探讨仍较缺乏。从公共服务可达性及空间公平内涵出发,选出了国内外研究中常用的10种空间公平测度指标,对MAE模型的优化目标函数进行扩展。以深圳市医疗设施为例,对这些模型进行了应用和综合比较。研究发现:①从空间公平内涵来看,变异系数、基尼系数、平均绝对偏差和帕尔玛比值4个指标较适用于医疗设施空间公平研究。②从模型优化效果来看,基于方差、标准差、变异系数、帕尔玛比值、平均绝对偏差和泰尔指数的MAE模型表现较好。③综合来看,变异系数、平均绝对偏差和帕尔玛比值3个指标能够较好地测度医疗设施空间公平,以这3个指标为目标函数构建改进的MAE模型,能够提升模型优化效果。本文进一步发展了空间公平导向的设施优化配置模型,能够为医疗设施等公共服务设施布局规划提供科学方法支撑。

关键词: 空间公平;优化配置模型;医疗设施;可达性;差异;均等性

DOI: 10.11821/dlxb202302013

1 引言

公共服务是人民群众的基本生活需求,是提升生活质量、促进高质量发展与共同富裕的重要内容。中国经济快速发展伴随着日益严峻的社会不公平问题,一个重要的方面就体现在公共服务的不公平,公平已成为新时代公共政策与空间规划的焦点议题。中国共产党“十九大”报告中作出了“我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾”的重大判断。因此,提升公共服务配置的充分性与平衡性,是当前阶段的一项紧迫任务。自“十一五”时期以来,基本公共服务均等化已上升为国家重要战略,最新编制的《“十四五”公共服务规划》针对这一目标的实现进行了总体部署。

医疗设施等公共设施的优化配置是地理学经典命题^[1-2]。医疗设施空间分布会影响需求者使用行为及效果^[1],是从空间上落实基本公共服务均等化的关键。地理学者在公共设施空间分布特征和布局评价两方面取得了显著进展^[3]。在空间分布特征方面,已有研究从不同尺度分析了公共服务资源的分布特征^[4-6],并探讨其动态演变趋势^[7]与形成机制^[8-9]。在布局评价方面,很多研究利用基于GIS的空间可达性方法,评价设施布局的合理性与公平性^[10-13]。然而,这些研究只能给出改善布局的定性建议,无法定量确定优化方案。为科

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101189); 中国博士后科学基金项目(2021M700457) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42101189; China Postdoctoral Science Foundation, No.2021M700457]

作者简介: 陶卓霖(1990-),男,江西人,博士,讲师,中国地理学会会员(S110015461M),主要从事城市空间结构与公共设施布局研究。E-mail: taozhuolin@bnu.edu.cn

通讯作者: 宋长青(1961-),男,黑龙江人,教授,主要从事地理学研究范式、地理区域综合研究方法等方面的研究。E-mail: songcq@bnu.edu.cn

学确定设施最优布局,国内外地理学、运筹学等学科的研究者提出了一系列优化配置(Location-allocation)模型^[14-16]。经典优化配置模型通常关注效率导向的优化目标,如P-中位模型目标为到最近设施的平均出行距离最近^[16-17],最大覆盖模型目标为覆盖需求人口最多^[18],而位置集合模型目标为覆盖全部人口所需设施数量最少^[19]。虽然公平目标的政策价值突出,但由于建模和求解等难度,空间公平导向的优化配置模型一直是研究难点^[20-22]。

最大可达性均等(Maximal Accessibility Equality, MAE)模型^[20]是空间公平导向优化配置模型的最新进展。该模型将公共服务的空间公平界定为在顾及供给与需求人口空间匹配关系的基础上,各地区居民获取公共服务可达性的差异程度,并通过优化模型使可达性的地区间差异最小化。由于空间公平问题求解涉及到非线性规划问题,该研究将优化问题转换为二次规划问题进而求解^[20]。考虑到已有研究认为可达性的空间差异或群体差异能够较好反映公共资源的“机会公平”,通常以可达性的地区差异为基础测度空间公平^[11-12, 23-24],因此MAE模型能较好地衡量和优化公共服务的空间公平性。MAE模型的理论基础体现在3个方面:①地理学及相关学科对于空间公平理论内涵及测度方法的研究;②作为MAE模型基础的可达性概念,是地理学中对于公共服务供给和需求空间相互作用的综合表述;③空间优化研究关注公共资源空间配置如何达到最优的整体福利水平。

自2013年提出以来,MAE模型迅速得到了大量应用和发展。Tao等^[25]将MAE模型应用于养老设施优化配置研究,并引入粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法来提高求解效率,并后续探讨了基于预测人口的优化研究^[26]。Wang等^[27]探讨了设施区位的优化问题。Li等^[28]基于MAE模型提出了一个两阶段的优化方式,其中第一阶段优化设施区位,第二阶段优化设施资源规模,发现区位优化提升空间公平的效果更显著。Luo等^[29]将传统效率导向的优化配置模型与MAE模型相结合,提出了“提升空间可达性的两阶段优化(2SO4SAI)”方法,通过两阶段的优化兼顾效率与公平目标。戴特奇等^[30]将MAE模型应用于学区配置优化问题,针对“多校划片”随机入学方式中的学位分配进行公平导向优化。Dai等^[31]进一步引入概率方法来衡量就学机会。Liao等^[32]结合就学机会空间公平性和缩短就学距离两方面,构建了多目标优化模型。Li等^[33]则着重关注空间效率和空间公平之间的权衡关系,并将两阶段优化模型与区位选择和资源优化同步优化模型进行比较。空间公平的测度指标是MAE模型的关键。在最初构建的MAE模型^[20]中,采用可达性的方差来测度空间不公平程度,优势是能够转换为二次规划问题进行求解。随后的应用^[25, 28-30]中都沿用了这一空间公平测度指标。然而,正如王法辉等^[21]指出,方差指标对异常值较为敏感,亟待研究不同空间公平测度指标的差异。事实上,空间差异与空间公平的测度指标研究非常丰富^[34-36]。这些测度指标在优化配置模型中表现如何,亟待通过基于真实案例的比较研究来回答。

基于此,本文旨在系统梳理常见的空间公平测度指标,构建并比较基于这些指标的MAE模型。一方面从理论上解析各个测度指标的空间公平内涵;另一方面基于深圳市医疗设施案例,比较各个指标在优化配置研究中的表现。医疗设施是设施优化配置模型的典型应用场景^[1, 20, 22],因此以医疗设施为例具有代表性。本文在方法上的创新在于,针对MAE模型中仅采用方差指标作为目标函数的不足,引入另外9个常用空间公平测度指标作为改进MAE模型的目标函数,并通过比较发现基于变异系数、平均绝对偏差和帕尔玛比值3个指标的改进MAE模型在理论内涵和优化效果方面的综合表现最好。本文进一步推进了空间公平导向设施优化配置模型的发展,对于地理学关于空间公平理论与分析方法的讨论也提供了有益探索。在实践意义方面,为基本公共服务均等化战略的空间落实、公共服务设施布局规划提供了更加科学且可操作的分析方法。

2 数据与方法

2.1 研究区与数据来源

根据第七次人口普查数据,深圳市2020年常住人口达1756万人,相较于2010年增长714万人。由于深汕特别合作区与深圳原辖区距离较远,因此研究中未考虑。研究区包括9个市辖区及1个新区,陆域面积1997 km²(图1)。根据已有研究^[37-38],深圳综合医院的分布不均,医疗可达性呈现明显的不均衡格局,医疗资源供给和需求之间存在空间不匹配的问题。由此可见,医疗资源的空间不公平是深圳医疗资源布局面临的一个重要问题,也使得深圳市医疗设施适宜作为本文的研究案例。

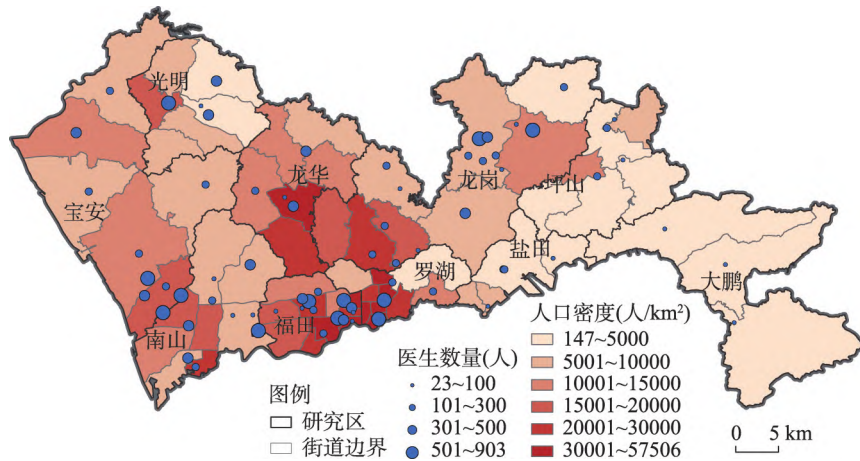


图1 深圳市行政区划及人口和现状医疗设施分布

Fig. 1 Distribution of administrative divisions, population and healthcare facilities in Shenzhen

研究数据主要包括3类:①人口数据来源于深圳各区第七次人口普查数据公报中的街道尺度常住人口数据,共74个街道单元。②医疗设施数据,包括地址及医生数属性,来源于深圳市卫生健康委员会,收集时间为2021年7月,并采用百度地图地址编码应用编程接口(Application Programming Interface, API)转换为标准地理坐标。研究中仅考虑已定级的71家综合医院,总医生数量为19924人。③出行时间数据,采用百度地图路线规划API测算。为反映城市居民出行方式的多样性,分别采用驾车规划和公交规划API测算了两种交通方式的出行时间。由于街道单元面积较大,容易增大分析误差,本文在社区尺度测算出行时间。社区列表及人口数据来源于深圳市2010年第六次人口普查,共包括771个社区。首先,以社区服务中心为出发点,医院为目的点,测算每个社区到每家医院的驾车、公交方式最短出行时间;然后,根据社区人口规模进行加权平均,得到各街道到医院的出行时间;最后,根据各区机动化出行中驾车和公交方式的分担率^[39],得到多交通方式的平均出行时间。

2.2 研究方法

2.2.1 空间可达性评价方法 空间可达性是指各地区居民获取公共服务等资源的潜在机会和难易程度^[1],测度方法非常多样,如最近距离法、供需比例法、累积机会法、重力模型法、两步移动搜寻法等^[10, 13]。可达性受到多方面因素的影响,包括土地利用因素(即设施分布)、交通因素、时间因素和个人因素^[40]。其中,设施分布及其与需求分布的关系和交通方式是空间可达性研究中的关键因素^[1]。两步移动搜寻法(Two-step Floating

Catchment Area, 2SFCA) 是应用最广泛的空间可达性评价方法之一, 具有考虑因素较为综合、计算过程和结果易于理解等优势^[1]。针对传统 2SFCA 方法忽略搜寻区内可达性差异的不足, 很多研究提出改进, 加入了不同形式的距离衰减函数^[13, 41-42]。本文中采用高斯型 2SFCA, 即加入高斯型距离衰减函数的改进 2SFCA 方法, 该方法具有距离衰减效应强度适中、仅有一个参数的优势^[13, 41]。

高斯 2SFCA 方法原理包括两个步骤: 首先, 根据需求点规模及距离衰减函数值, 将每个设施的资源分配给搜寻区内的需求点; 其次, 将每个需求点从其搜寻区范围内可达设施能够竞争得到的资源进行求和, 即可得到需求点的可达性值, 含义为平均每个需求者可获得的潜在服务资源量。该方法的计算公式为:

$$A_i = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq D_0\}} \frac{S_j f(d_{ij}, D_0)}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq D_0\}} P_k f(d_{kj}, D_0)} \quad (1)$$

式中: A_i 是需求点 i 的可达性值; S_j 是设施 j 的服务规模, 本文中为医生数; P_k 是需求点 k 的需求量, 即常住总人口; d_{ij} 和 d_{kj} 分别是需求点和设施之间的交通成本, 由综合驾车和公交模式的出行时间表示; D_0 为设施的搜寻区半径; f 为高斯型距离衰减函数, 可表示为:

$$f(d_{ij}, D_0) = \begin{cases} \frac{e^{-1/2 \times (d_{ij}/D_0)^2} - e^{-1/2}}{1 - e^{-1/2}} & d_{ij} \leq D_0 \\ 0 & d_{ij} > D_0 \end{cases} \quad (2)$$

重力模型法与 2SFCA 法都具备加权平均值恒定性质, 即可达性的需求人口加权平均值恒等于研究区的总供给与总需求之比^[43-44]。高斯型 2SFCA 也继承了这一性质, 这为 MAE 模型的构建与求解提供了便利。在目标函数的方差指标中, 采取人口加权平均可达性作为可达性均值, 在优化模型求解中可以用总供需比替代, 该比值是一个常数。

2.2.2 最大可达性均等(MAE)模型 MAE 模型的基本原理是, 在满足设施资源投入量和可达性计算规则等约束条件下, 寻求最优的设施布局方案, 以使得目标函数所表征的空间公平指标最大化, 即可达性差异程度最小化。在 MAE 模型中, 采用方差来测度可达性的空间差异或空间公平程度, 方差越小则空间公平程度越高。MAE 模型的目标函数是使可达性方差最小化, 可表达为:

$$\text{Minimize } \sum_i P_i \left(A_i - \frac{\sum_i P_i A_i}{\sum_i P_i} \right)^2 \quad (3)$$

式中: A_i 是可达性, 由高斯型 2SFCA 计算; P_i 是需求规模; n 是需求点数量; 待求解的决策变量为可达性计算中的供给变量 S_j 。MAE 模型由公式 (1)~(3) 以及对决策变量 S_j 的约束条件构成。在应用中, S_j 的设定有 3 种方式: ① 采取给定的设施候选点 (即可配置设施的区位) 及给定的设施总规模, 对 S_j 的数值组合进行优化, 称为设施资源分配优化问题^[20, 25]; ② 考虑在现状设施基础上新增一定数量的设施, 对新增设施的区位 (即 S_j 取值为 0 或 1) 进行优化, 称为区位优化^[27]; ③ 将上述两种方式相结合, 先进行区位优化, 再进行设施资源优化^[28]。然而, 后两种问题的求解难度大, 且对于新增设施区位和数量的确定需要较多论证。考虑到本文的主要目的是模型比较研究, 且深圳市目前综合医院的分布较为分散, 因此仅考虑设施资源分配优化问题。MAE 模型的求解采取粒子群优化算法, 该算法的有效性和效率已在研究^[25-26, 45]中得到验证。需指出的是, 本文根据各个模型中采用的空间公平目标函数形式, 对粒子群优化算法的适应函数进行了修正。

2.2.3 空间公平及其测度指标 空间公平是一个内涵丰富但无统一定义的概念。社会公平主要关注不同群体之间的差异,而空间公平则通常关注不同地区之间的差异^[46]。本文中医疗服务公平性主要是指空间公平。均等(equality)和公平(equity)是两个联系密切但又存在差异的概念,均等强调不同社会经济状况的个体或群体应获得同等的机会,而公平则强调应向社会经济状况较差的个体或群体提供更多的机会,以让他们达到同样的结果;因此,公平通常难以形成统一定义且难以测度,而均等则更加易于量化研究^[46]。也有研究指出均等是实现公平的基础,公平的内涵包括资源利用的均等、按需分配、可达性的均等以及结果的均等4个维度^[35]。

医疗服务的公平可分为机会公平和结果公平,前者关注居民获取医疗服务的潜在机会是否公平,而后者强调医疗服务的结果或效果的公平^[21, 46-47]。如前所述,可达性指标常用于衡量不同地区居民获取医疗服务的潜在机会数量,由医疗服务空间分布及其与需求人口的空间关系决定。因此,可达性的公平程度能够较好地反映医疗服务的机会公平,且易于与空间规划中对医疗设施的布局规划相衔接。此外,一些研究也表明,医疗服务可达性确实能够显著促进居民就医^[48]和改善居民健康状况^[49]。因此,可达性所反映的机会公平,也能够一定程度上促进医疗服务的结果公平。

在空间公平导向的设施优化配置研究中,着力点是尽可能缩小公共服务可达性在不同地区之间的差异性,提高可达性的均等程度,以促进公共服务的空间公平。事实上,在MAE模型命名采用的是“equality”一词。尽管在此前研究^[21, 26]中将MAE模型译为“最大可达性公平模型”,本文认为应保持中英文概念的一致性,译为“最大可达性均等模型”。由于空间可达性指标通常综合考虑了医疗服务的需求、供给及供需之间的空间关系和交通成本,因此基于空间可达性的均等性来界定空间公平,实际上是在寻求提升医疗服务供给与需求的空间匹配程度。

原始MAE模型中采用方差指标来测度可达性的空间公平程度,使得构建的优化模型可以转换为二次规划问题进行求解^[20]。除方差指标外,还有有很多种指标可以测度空间公平,已有多项研究^[21, 33-36]对这些指标进行了总结。然而,目前对于方差指标的效果,尤其是与其他指标相比较时的表现,仍然缺乏研究。本文选出表1所列的10种测度指标,并根据空间公平的内涵进行解读和调整。通过各个模型优化效果的比较,选择效果最好的空间公平指标,替换MAE模型中作为目标函数的方差指标,以对模型进行改进。

方差和标准差是用于测度数据差异程度的基础指标。本文对方差和标准差指标进行了两处调整:①用可达性的人口加权平均值表示平均值,如前所述,人口加权平均可达性恒等于总供给与需求之比;②对每个单元的可达性与加权平均可达性偏差的平方项进行人口加权,以考虑不同单元的人口规模差异,反映基于“人”而不是空间单元的空间公平。类似地,在变异系数和平均绝对偏差指标中,也对各单元的可达性差异值进行人口加权平均,以更好地反映基于人的空间公平,在后文中不再赘述。

变异系数由标准差除以平均值所得,可以消除数据量纲的影响。对于MAE模型应用而言,可达性数据是给定的,因此变异系数和标准差的作用应是等价的。

上述3个指标中,都包含可达性与均值偏差的平方项,对于可达性高值和低值较为敏感^[21]。相比之下,平均绝对偏差指标利用偏差的绝对值来衡量差异,具体是以人口为权重对各单元可达性与加权平均可达性的绝对偏差进行加权平均。

基尼系数是收入差距等领域应用最广泛的指标之一,有两种不同算法:第一种是根据洛伦兹曲线进行计算^[50],原理易于直观理解,但不便于进行数值计算;另一种是如表1所示的公式,原理是比较任意两个单元可达性之间的绝对差异,求和之后除以相应平衡项。基尼系数取值范围为0~1,取值越大说明可达性的差异越大。

表1 主要空间公平测度指标
Tab. 1 Selected measures of spatial equity

指标	公式	指标	公式
方差(VAR)	$\frac{\sum_i^n P_i (A_i - \bar{A})^2}{\sum_i^n P_i}$	标准差(SD)	$\sqrt{\frac{\sum_i^n P_i (A_i - \bar{A})^2}{\sum_i^n P_i}}$
变异系数(CV)	$\frac{\sqrt{\frac{\sum_i^n P_i (A_i - \bar{A})^2}{\sum_i^n P_i}}}{\bar{A}}$	平均绝对偏差(MAD)	$\frac{\sum_i^n P_i A_i - \bar{A} }{\sum_i^n P_i}$
基尼系数(Gini)	$\frac{\sum_{i,j} A_i - A_j }{2n^2 \bar{A}}$	最大偏差(MaxD)	$\max_i (A_i - \bar{A})$
值域(Range)	$\max_{i,j} A_i - A_j $	最小值最大化(MaxMin)	$\min A_i$
帕尔玛比值(Palma)	$\frac{\text{前10\%单元所占可达性份额}}{\text{后40\%单元所占可达性份额}}$	泰尔指数(Theil)	$\sum_i \frac{P_i}{P} \frac{A_i}{\bar{A}} \log\left(\frac{A_i}{\bar{A}}\right)$

注: A_i 和 A_j 是需求点 i 和 j 的可达性; \bar{A} 是可达性的人口加权平均值; P_i 是需求点 i 人口数量; A 和 P 是可达性和人口的总和; n 是需求点数量。

上述指标都考虑了所有空间单元的可达性情况,而在最大偏差、最小值最大化、值和帕尔玛比值4个指标中,只考虑可达性的部分特殊值。最大偏差指标衡量各空间单元可达性与平均值的最大绝对偏差,可能来源于最大值或最小值。值域指标衡量可达性的取值范围,即最大值与最小值之间的间隔。最小值最大化指标则不关注高于平均值的部分,只关注可达性的最小值,在优化中旨在使可达性最小值的最大化。帕尔玛比值反映的是收入最高的10%人口所占收入份额与最差40%人口所占份额的比值,在近些年的收入差距研究中逐渐替代基尼系数^[51]。

泰尔指数是一种常用的基于信息论的不确定性测度指标,通常也用于测度数据的差异程度。它的一个重要优势是能够将总体差异分解至多个空间尺度,但在本文中暂不需要使用这一性质。在10个指标中,只有最小值最大化指标对空间公平的作用方向为正,即指标值越大意味着空间公平程度越高,其他指标均相反。因此,在优化模型的目标函数中,对最小值最大化指标进行最大化,对其他指标则进行最小化。

2.2.4 不同模型优化结果的比较方法 从两个方面对不同模型的优化结果进行比较,以综合评价各模型的效果。一是利用最大值、最小值、中位数和标准差等统计指标,对不同模型优化后设施规模和可达性的分布进行比较。此外,还绘制可达性的分布曲线和洛伦兹曲线,可以全面考察可达性的分布情况。二是对不同模型的优化结果进行交叉比较。具体思路为,每个模型的优化可达性是在该模型的空间公平测度指标最优化目标下,得到的最优可达性。在交叉比较中,将每个模型的优化可达性都采用10个空间公平测度指标分别进行评价,从而反映各个模型结果在不同空间公平测度指标下的综合表现,选出总体优化效果最好的指标和优化模型。

3 结果分析

3.1 现状可达性的空间公平评价

本文采用高斯2SFCA测算了深圳市现状医疗服务可达性,作为后续分析的基础,分

布如图2所示。深圳现状医疗服务可达性分布并不均衡,总体上呈现中心城区优于外围地区、东部地区优于西部地区的特点。市域西北部是医疗可达性最薄弱的地区,包括光明区及宝安区和龙华区的北部。这说明目前深圳医疗资源配置与人口之间存在较明显的空间不匹配问题。

表2中展示了深圳市基于不同指标测度的现状医疗服务可达性空间公平结果。从基尼系数来看,通常认为基尼系数大于0.4时意味着明显的收入差距,因此深圳现状医疗服务可达性呈现一定的空间差异,但差异程度较为适中。标准差衡量的是平均意义上每个评价单元可达性与加权平均可达性的差异程度,是加权平均可达性(1.139×10^{-3} 人)的0.319倍。变异系数正好是该比值,可以较为直观地理解其数值。平均绝对偏差与标准差的含义类似,但处理方式不同,相较于标准差和方差对偏差的敏感性较为适中,从指标取值看平均绝对偏差确实比标准差更小。最大偏差、值域和最小值最大化3个指标的原理类似,3个指标都只考虑可达性的极值,没有考虑所有单元的可达性水平。在收入差距领域,现实的帕尔玛比值通常大于1,因此帕尔玛比值意味着深圳现状医疗可达性的差异程度相对适中。

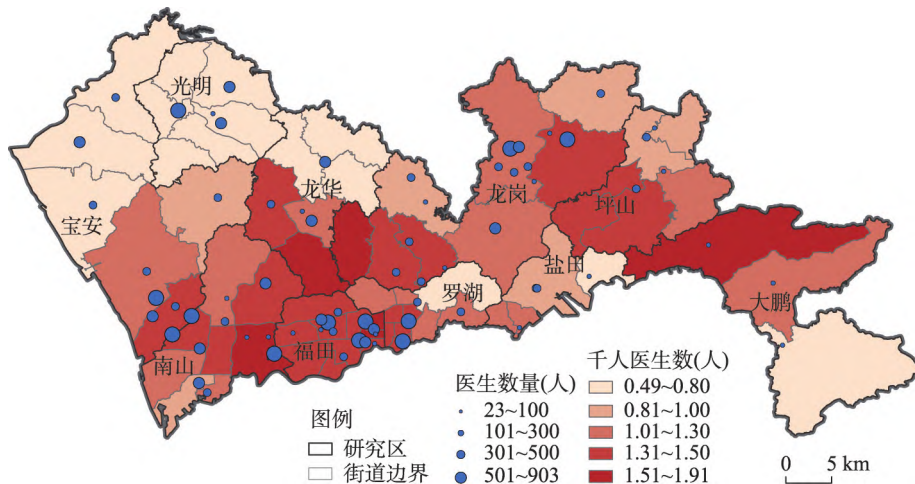


图2 2020年深圳市现状医疗可达性分布

Fig. 2 Distribution of actual healthcare accessibility in Shenzhen in 2020

表2 深圳现状医疗服务可达性的空间公平测度

Tab. 2 Results of the spatial equity of actual healthcare accessibility in Shenzhen

指标	方差(VAR)	标准差(SD)	变异系数(CV)	平均绝对偏差(MAD)	基尼系数(Gini)
结果	1.323×10^{-7}	3.638×10^{-4}	0.319	2.874×10^{-4}	0.325
指标	最大偏差(MaxD)	值域(Range)	最小值最大化(MaxMin)	帕尔玛比值(Palma)	泰尔指数(Theil)
结果	7.758×10^{-4}	1.4×10^{-3}	4.942×10^{-4}	0.522	0.078

3.2 不同模型优化结果比较

图3中利用箱型图对不同模型优化设施规模和可达性的分布情况进行比较。箱形图的优势是能够排除异常值,图中方框上下边界分别反映指标的上、下四分位数,方框中红色横线表示中位数,方框外的黑色横线表示非异常数值的上限和下限,红色“+”表示异常数值。如图3a所示,在VAR、SD、CV和Theil模型中,优化设施规模的中位数非常接近下四分位数,说明优化结果中有很多小规模(接近模型设定的规模下限20个医生)的设施,优化结果与实际中的医疗设施规模分布不符合。其他6个模型的优化设施规模

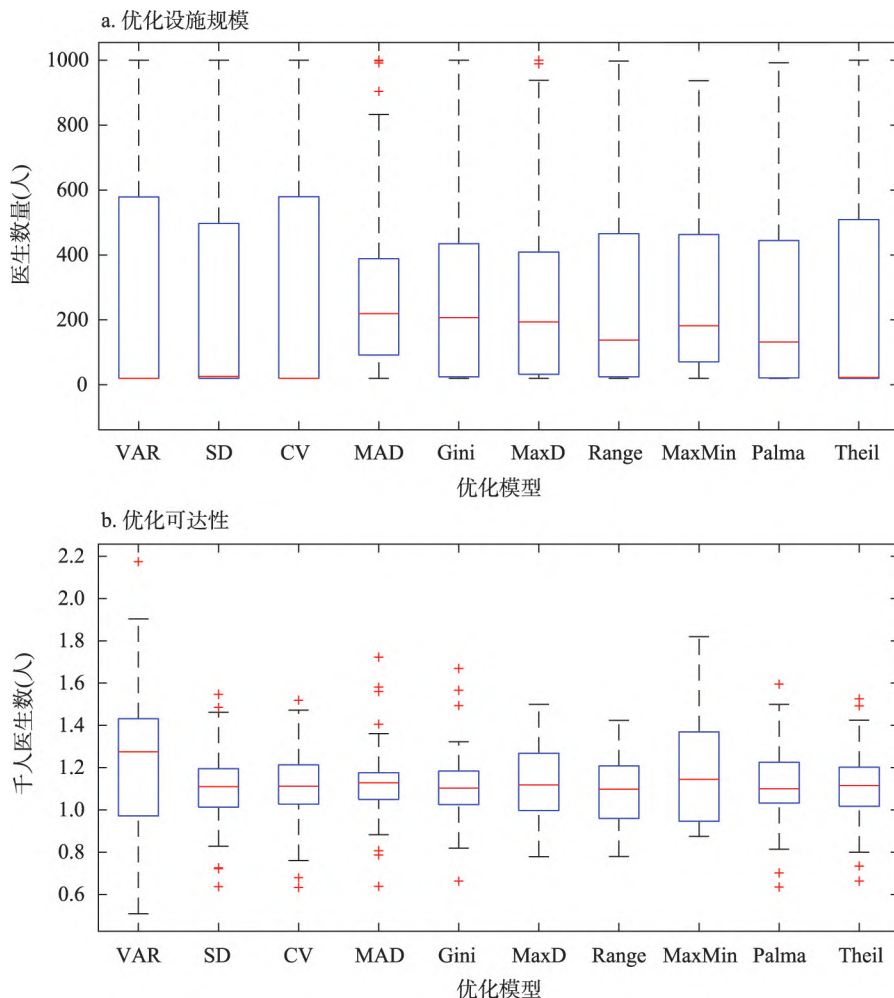


图3 不同模型的优化设施规模和可达性统计比较

Fig. 3 Comparisons of optimal facility sizes and accessibility of various models

分布则较为合理。如图3b所示,在MAD、Gini和Palma模型中,优化可达性分布较为紧凑,其次是SD、CV和Theil模型,前2个模型的分布非常类似。综合这两方面,MAD、Gini和Palma 3个模型的优化结果表现较好。

图4展示了10个模型得到的优化可达性之间的相关系数,以比较模型优化结果之间的相关性。VAR、SD和CV 3个模型的优化可达性高度相关,因为3个模型的空间公平测度指标在数学上可以直接转换。Palma和Theil模型的优化可达性与上述3个模型结果也呈高度相关。此外,MAD与Gini模型、MaxD与Range模型之间相关性较高,而MaxMin模型优化结果与其他模型的相关性相对较低。图4最后一列统计了每个模型优化结果与其他模型相关系数的平均值,可以反映每个模型与其他模型的总体相关情况。总体而言,VAR、SD、CV、Palma和Theil 5个模型的优化可达性结果非常类似,MAD和Gini模型为第二梯队,MaxD和Range模型为第三梯队,MaxMin模型与其他模型结果相关性最低。

本文绘制了每个模型优化可达性的洛伦兹曲线,但由于优化可达性的差异程度都较小,洛伦兹曲线形状较接近,难以直观比较。因此,本文绘制了各个模型优化可达性的帕尔玛比值分布图,包括前10%和后40%空间单元的可达性占比、两者之间的比值(即

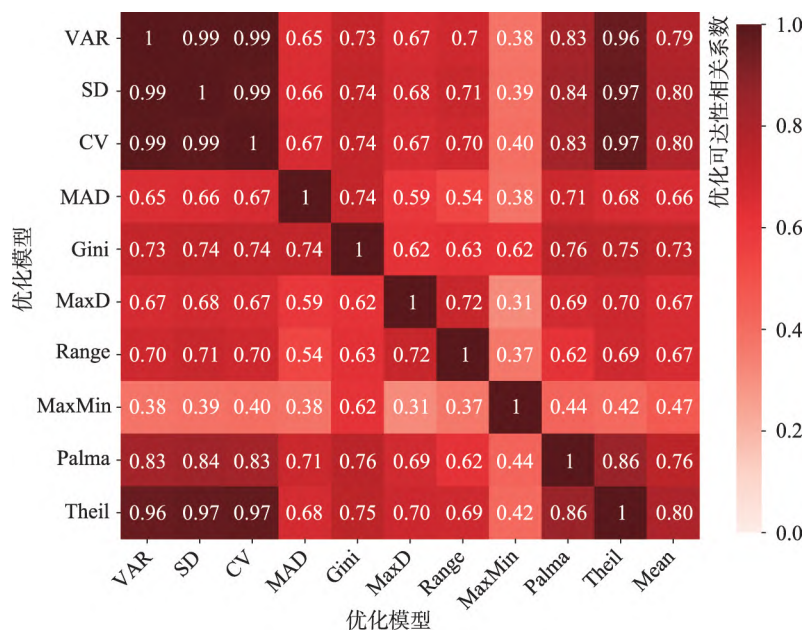


图4 不同模型的优化可达性的相关系数

Fig. 4 Correlations between optimal accessibility of various models

帕尔玛比值) (图5)。帕尔玛比值的优势在于可以揭示较高的不公平程度是来自于高值区还是低值区。可见, Palma模型优化结果中, 后40%单元的可达性占比并非最高, 前10%单元可达性占比也没有明显低于其他模型, 但由于在两个方面表现都较好, 因此帕尔玛比值最小。相比之下, MAD和Gini模型中, 虽然后40%单元的可达性占比较高, 但前10%单元可达性占比也较高, 因此帕尔玛比值较大。而MaxD和Range模型则相反, 较

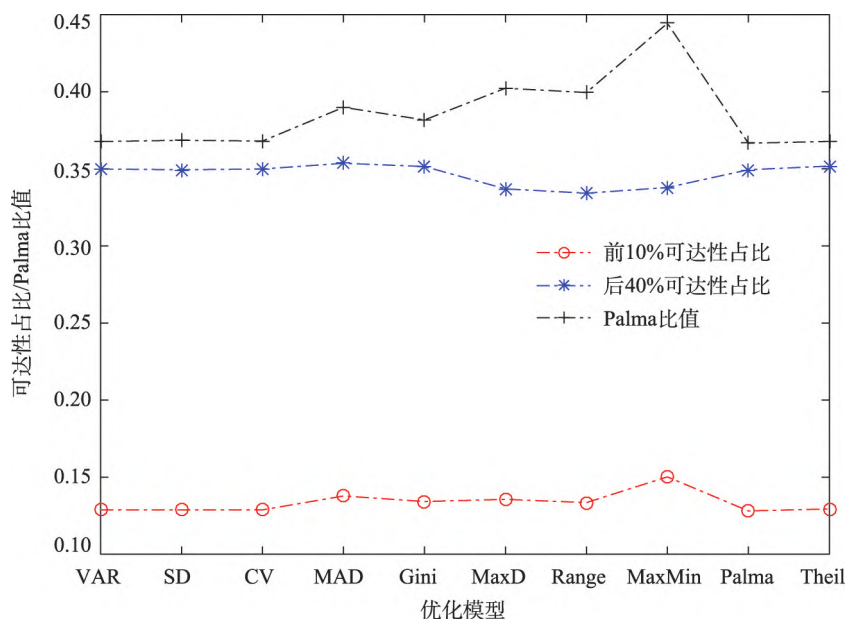


图5 不同模型优化可达性的帕尔玛比值比较

Fig. 5 Comparisons of Palma ratios for optimal accessibility of various models

大的帕尔玛比值主要是由于后40%单元的可达性占比较低。MaxMin模型则在高值区和低值区的表现都较差,因此帕尔玛比值明显大于其他模型,说明该模型虽然尽可能地提高了可达性的最低值,但对于后40%低值区的可达性提升并不明显,同时也加剧了高值区的优势,总体对空间公平的优化效果较差。

进一步对不同模型的优化结果进行交叉评估,即将每个模型的优化可达性,用10个空间公平测度指标进行评估(图6)。由于测度指标的方向不同,MaxMin指标值越大意味着空间公平测度高,而其他指标相反。此外,不同指标的取值范围也存在差异。因此,图6中对所有指标评价价值进行了标准化,标准化后取值范围为0~1,值越大表示空间公平程度越高。可见,不同模型交叉评估结果与图4中的优化可达性相关系数情况较为类似,VAR、SD、CV、Palma和Theil 5个模型的优化效果关联性较强,MAD与Gini模型之间关联较强,MaxD与Range模型关联较强,MaxMin模型与其他模型的关联最弱。从每个模型优化结果在10个测度指标下的平均表现来看,Theil、VAR、SD和CV模型最好,Palma模型其次,Gini、Range和MaxD模型处于第三梯队,MAD模型处于第四梯队,MaxMin模型最差。

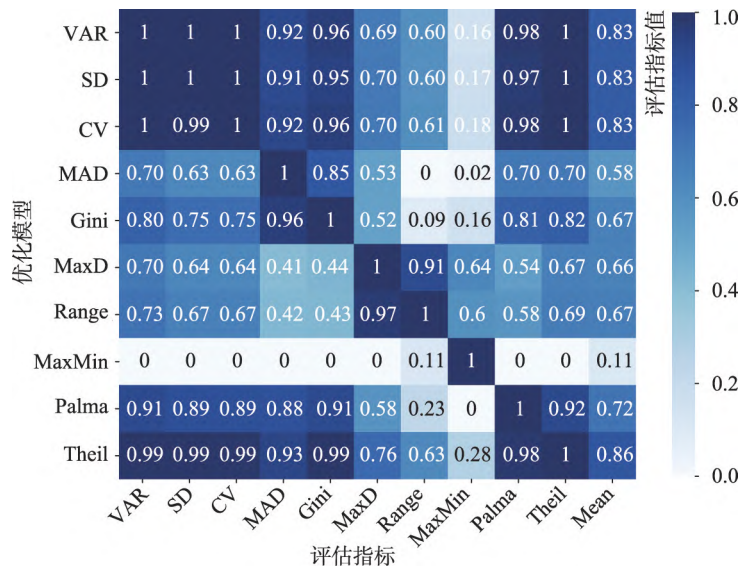


图6 不同模型优化结果与空间公平指标的交叉评估

Fig. 6 Performance of each model in terms of various spatial equity measures

综合上述比较, CV、MAD和Palma 3个模型的总体表现较好。VAR和SD模型与CV在数学原理上等价,评价结果也接近,但CV指标便于进行解读,因此建议这3个模型中优先使用CV模型。Theil模型的表现也较好,与CV、Palma模型类似,但Theil指数没有明确现实含义,不利于进行空间公平的解读,因此本文不作为推荐模型。为更全面地分析各个模型的优化可达性分布情况,图7中绘制了CV、MAD和Palma 3个模型优化可达性的降序分布。此外,MaxMin模型优化结果较为特殊,以及加权平均可达性,也加入图中作为参考。CV、MAD和Palma 3个模型的优化可达性分布与加权平均可达性的契合程度较好,大部分单元的可达性与加权平均可达性较为接近。其中,MAD模型优化可达性在中值区与加权平均可达性的契合程度最高,而CV和MAD模型在高值区和低值区的优化效果较好。相比之下,MaxMin模型虽然很好地提高了可达性最小值,但代价是大部分单元的可达性与加权平均可达性的差异较大。

3.3 优化结果的空间分布

图8展示了CV、MAD和Palma 3个模型优化可达性的空间分布，类似地也加入了MaxMin模型的结果作为参照。图8中均以可达性的加权平均值加减标准差作为分段值。在CV、MAD和Palma 3个模型的结果中，大部分街道单元的优化可达性都位于可达性加权平均值加减标准差的取值范围内，可达性空间公平程度较高。此外，3个模型中的可达性高值和低值区较为一致，反映出模型优化结果的稳定性。其中，高值区可能是由于现状医疗设施较密集、交通可达性较好；而低值区则相反，需要新建医疗设施或改善交通条件才能进一步提升医疗服务可达性。在3个模型中，Palma模型优化结果中的高值区和低值区最少。作为对比，在MaxMin模型结果中高值区和低值区都较多，对空间公平的优化效果较差。

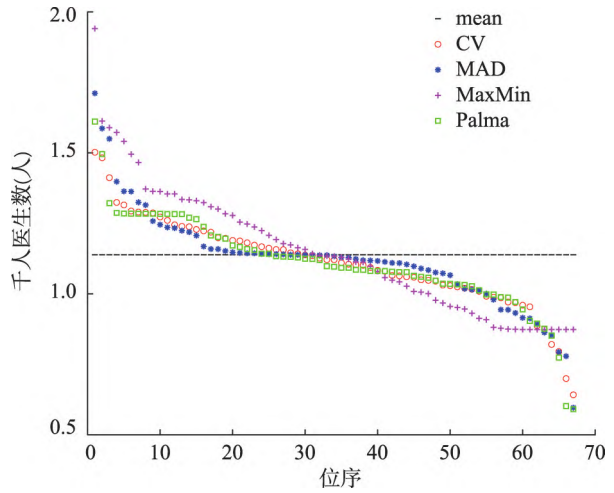


图7 部分模型优化可达性的降序分布对比
Fig. 7 Distribution of optimal accessibility in descending order of selected models

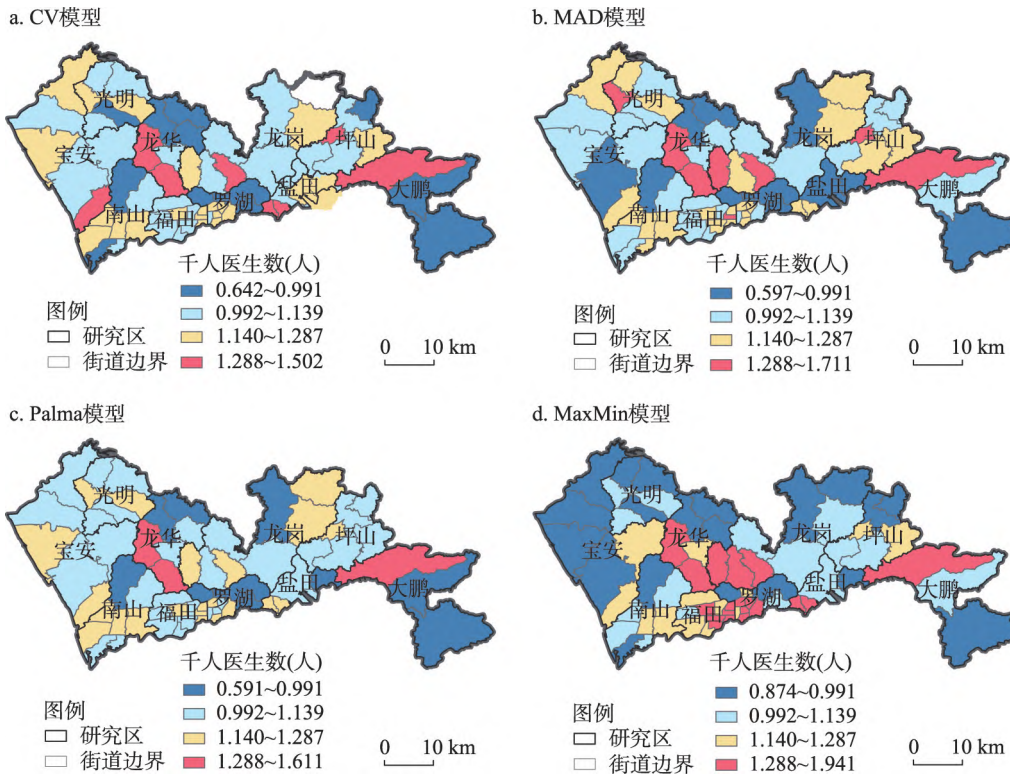


图8 部分模型优化可达性的空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of optimal accessibility of selected models

4 结论与讨论

空间公平导向的设施优化配置模型是地理学参与基本公共服务均等化战略的重要途径,最大可达性均等(MAE)模型是该领域的重要方法进展。但目前MAE模型应用中主要是基于方差指标,对于其他空间公平测度指标的探讨仍较缺乏,使得优化配置模型的理论基础和科学性均较薄弱。本文系统梳理了国内外研究中提出的空间公平测度指标,从医疗服务空间公平的角度对这些指标的内涵进行了分析,并以深圳市医疗设施为例对基于这些指标的MAE模型进行了应用和综合比较评估,以识别出综合优化效果较好的空间公平测度指标和优化模型。模型构建涉及的可达性、空间公平等关键概念对于医疗设施以外的其他类型点状公共服务设施也具有通用性,因此研究中对MAE模型的改进对于其他公共服务设施优化配置也具有应用前景。

(1)从空间公平内涵来看,方差、标准差、变异系数、基尼系数、平均绝对偏差和泰尔指数等指标都考虑了每个空间单元的可达性差异程度,能够较好地从业达性总体差异的角度反映公共服务空间公平。但这些指标对差异程度的衡量方式不同:方差、标准差和变异系数都依赖于可达性差异的平方项,因此对可达性高值和低值较为敏感;平均绝对偏差指标采用绝对值计算来衡量可达性差异,对可达性差异的敏感性较为适中;基尼系数指标对任意两个单元间的可达性差异都予以考虑,是收入差距等社会经济领域公平性研究中最常用的指标;泰尔指数基于信息论方法来衡量可达性差异,但评价结果的现实含义不易于理解。此外,帕尔玛比值虽然没有考虑所有空间单元,但考虑最关键的两部分空间单元(即可达性水平前10%和后40%单元)的可达性情况,因此也能较好反映公共服务的空间公平。最后,最大偏差、值域和最小值最大化3个指标只考虑可达性的极值情况,对所有空间单元可达性差异的考虑较为片面,适用于某些特殊的应用情景。总体而言,根据指标内涵方面的讨论,本文建议变异系数、基尼系数、平均绝对偏差和帕尔玛比值等4个指标较为适用于公共服务的空间公平优化研究。

(2)通过优化设施规模和可达性分布、相关系数和优化结果交叉评估等角度,对10个优化模型的实际效果进行了综合比较。总体而言,基于方差、标准差、变异系数、帕尔玛比值、平均绝对偏差和泰尔指数的MAE模型表现较好,基于最小值最大化指标的模型表现明显差于其他模型。

综合上述两个方面的优势,本文认为变异系数、平均绝对偏差和帕尔玛比值3个指标的综合表现最好,能够较好地测度公共服务可达性空间公平,基于这3个指标的最大可达性均等模型能够得到较好的优化效果,明显提升公共服务可达性的空间公平性。以这3个指标替换传统MAE模型中作为目标函数的方差指标,可以得到优化效果更好的改进MAE模型。表3中总结了3个改进模型的表达形式和优势。

如前所述,空间公平是一个难以统一定义的概念,在学术讨论中也仍存在不同观点。本文着重从不同地区可达性总体差异的角度来测度公共服务空间公平。在分析的10个空间公平测度指标中,也有一些指标关注可达性极值对空间公平的影响,如最大偏差、值域和最小值最大化指标。但根据模型效果评估,这3个指标虽然较好地优化了可达性极值,但对于可达性总体差异的优化效果相对其他指标更差。尽管如此,不同空间公平测度指标可能适用于不同政策情景,对多个指标进行组合运用也可能提升综合优化效果,对于这些问题还需更深入的研究来探讨。

此外,本文也还存在一些不足:①本文仅针对深圳市医疗设施案例进行了模型应用与比较,研究结论对于其他地区或其他类型设施是否具有普适性还需后续研究的进一步

表3 建议的3个改进 MAE 模型
Tab. 3 Three recommended modified MAE models

模型名称	CV-MAE 模型	MAD-MAE 模型	Palma-MAE 模型
目标函数	Minimize $CV = \sqrt{\frac{\sum_i^n P_i (A_i - \bar{A})^2}{\sum_i^n P_i \bar{A}}}$	Minimize $MAD = \frac{\sum_i^n P_i A_i - \bar{A} }{\sum_i^n P_i}$	Minimize $Palma = \frac{\text{前10\%单元所占可达性份额}}{\text{后40\%单元所占可达性份额}}$
可达性模型	$A_i = \sum_{j \in \{d_{ij} \leq D_0\}} \frac{S_j f(d_{ij}, D_0)}{\sum_{k \in \{d_{ik} \leq D_0\}} P_k f(d_{ik}, D_0)}$	$f(d_{ij}, D_0) = \begin{cases} e^{-1/2 \times (d_{ij}/D_0)^2} - e^{-1/2} & d_{ij} \leq D_0 \\ 0 & d_{ij} > D_0 \end{cases}$	
决策变量	S_j	S_j	S_j
约束条件	S_j 取值区间; 资源总量 $\sum_j S_j$	S_j 取值区间; 资源总量 $\sum_j S_j$	S_j 取值区间; 资源总量 $\sum_j S_j$
模型优势	CV 指标消除了可达性量纲影响, 应用于不同案例时具有一定可比性; 是常用的差异测度指标; 对可达性高值和低值的优化效果较好	MAD 指标与可达性量纲一致; 对可达性差异的敏感性较为适中, 对中间段大部分单元的公平性优化效果较好; 表达形式和含义较简单	帕尔玛指标是目前收入研究中流行的指标; 考虑最好和最差的一部分人群之间的差距, 对于社会公平有较为直接但有效的反映; 易于理解

验证。② 虽然本文中考虑了已有研究中 10 种讨论较多的空间公平测度指标, 但还有一些指标尚未涉及, 在后续研究中有待进一步补充。③ 本文的主要目的是进行模型比较, 因此优化情景设置较为简单, 后续研究需进一步完善优化情景设置, 以更好地与公共服务设施规划实践相结合。④ 本文关注了可达性的空间公平, 对于公平内涵的反映仍局限于机会公平, 后续研究应进一步关注公共服务的结果公平。

参考文献(References)

[1] Wang F H. Measurement, optimization and impact of health care accessibility: A methodological review. *Annals of the Association of American Geographers*, 2012, 102(5): 1104-1112.

[2] Tong D Q, Murray A T. Spatial optimization in geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 2012, 102(6): 1290-1309.

[3] Zhan Dongsheng, Zhang Wenzhong, Chen Li, et al. Research progress and its enlightenment of urban public service facilities allocation. *Progress in Geography*, 2019, 38(4): 506-519. [湛东升, 张文忠, 湛丽, 等. 城市公共服务设施配置研究进展及趋向. *地理科学进展*, 2019, 38(4): 506-519.]

[4] Liu H M, Fang C L, Fan Y P. Mapping the inequalities of medical resource provision in China. *Regional Studies, Regional Science*, 2020, 7(1): 568-570.

[5] Liu Helin, Zheng Tianming, Nie Jingxin. On the spatial allocation of the quantity and diversity of basic urban public service facilities: A case study of Wuhan inner city. *City Planning Review*, 2021, 45(2): 84-91. [刘合林, 郑天铭, 聂晶鑫. 城市基本公服设施数量与多样性空间配置研究: 以武汉市主城区为例. *城市规划*, 2021, 45(2): 84-91.]

[6] Zhao Lin, Zhang Yushuo, Jiao Xinying, et al. The spatial pattern and effect of basic public service quality in Henan Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1495-1504. [赵林, 张宇硕, 焦新颖, 等. 河南省基本公共服务质量空间格局与空间效应研究. *地理科学*, 2016, 36(10): 1495-1504.]

[7] Han Zenglin, Zhu Jun, Zhong Jingqiu, et al. Spatio-temporal characteristics and evolution mechanism for the equalization of basic public service in island counties of China. *Economic Geography*, 2021, 41(2): 11-22. [韩增林, 朱珺, 钟敬秋, 等. 中国海岛县基本公共服务均等化时空特征及其演化机理. *经济地理*, 2021, 41(2): 11-22.]

[8] Yuan Zhenjie, Guo Junwanguo, Yang Yunying, et al. Analysis of the spatial structure, mechanism and social-political effects of the high-quality basic educational resources in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(2): 318-331. [袁振

- 杰,郭隽万果,杨韵莹,等.中国优质基础教育资源空间格局形成机制及综合效应.地理学报,2020,75(2):318-331.]
- [9] Song Xueqian, Deng Wei, Zhou Peng, et al. Spatial equity and influences of two-level public healthcare resources: A background to hierarchical diagnosis and treatment reform in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1178-1189. [宋雪茜,邓伟,周鹏,等.两层级公共医疗资源空间均衡性及其影响机制:以分级诊疗改革为背景.地理学报,2019,74(6):1178-1189.]
- [10] 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. [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.地理科学进展,2010,29(10):1217-1224.]
- [11] Sharma G, Patil G R. Public transit accessibility approach to understand the equity for public healthcare services: A case study of Greater Mumbai. *Journal of Transport Geography*, 2021, 94: 103123. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103123.
- [12] Tahmasbi B, Mansourianfar M H, Haghshenas H, et al. Multimodal accessibility-based equity assessment of urban public facilities distribution. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101633. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101633.
- [13] Tao Zhuolin, Cheng Yang. Research progress of the two-step floating catchment area method and extensions. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 589-599. [陶卓霖,程杨.两步移动搜寻法及其扩展形式研究进展.地理科学进展,2016,35(5):589-599.]
- [14] Owen S H, Daskin M S. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 1998, 111(3): 423-447.
- [15] Ding Jinxue, Jin Fengjun, Wang Chengjin, et al. Evaluation, optimization and simulation of the spatial layout of transport hubs in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 504-514. [丁金学,金凤君,王成金,等.中国交通枢纽空间布局的评价、优化与模拟.地理学报,2011,66(4):504-514.]
- [16] Peng Yongming, Wang Zheng. Space operation of rural primary and secondary school location. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(10): 1411-1417. [彭永明,王铮.农村中小学选址的空间运筹.地理学报,2013,68(10):1411-1417.]
- [17] Hakimi S L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 1964, 12(3): 450-459.
- [18] Murray A T. Maximal coverage location problem. *International Regional Science Review*, 2016, 39(1): 5-27.
- [19] Zhong Qing, Dai Teqi. Stratified estimation of the total number and location of Chinese civil airports based on population coverage using revised LSCP and MCLP models. *Progress in Geography*, 2014, 33(12): 1642-1649. [钟晴,戴特奇.中国机场总规模分层优化测算研究:基于人口覆盖角度.地理科学进展,2014,33(12):1642-1649.]
- [20] Wang F H, Tang Q. Planning toward equal accessibility to services: A quadratic programming approach. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2013, 40(2): 195-212.
- [21] Wang Fahui, Dai Teqi. Spatial optimization and planning practice towards equal access of public services. *Journal of Urban Regional Planning*, 2020(2): 28-40. [王法辉,戴特奇.公共资源公平配置的规划方法与实践.城市与区域规划研究,2020(2):28-40.]
- [22] Tao Zhuolin, Cheng Yang, Dai Teqi, et al. Research progress and prospect of public service facilities layout optimization models. *City Planning Review*, 2019, 43(8): 60-68, 88. [陶卓霖,程杨,戴特奇,等.公共服务设施布局优化模型研究进展与展望.城市规划,2019,43(8):60-68,88.]
- [23] Israel E, Frenkel A. Social justice and spatial inequality. *Progress in Human Geography*, 2018, 42(5): 647-665.
- [24] Zhang Jingxiang, Ge Zhibing, Luo Zhendong, et al. Research on equalized layout of urban and rural public facilities: A case study of educational facilities in Changzhou. *City Planning Review*, 2012, 36(2): 9-15. [张京祥,葛志兵,罗震东,等.城乡基本公共服务设施布局均等化研究:以常州市教育设施为例.城市规划,2012,36(2):9-15.]
- [25] Tao Z L, Cheng Y X, Dai T Q, et al. Spatial optimization of residential care facility locations in Beijing, China: Maximum equity in accessibility. *International Journal of Health Geographics*, 2014, 13(1): 33. DOI: 10.1186/1476-072X-13-33.
- [26] Tao Zhuolin, Cheng Yang, Dai Teqi, et al. Spatial optimization of residential care facility locations in 2020 in Beijing: Maximum equity in accessibility. *Progress in Geography*, 2015, 34(12): 1609-1616. [陶卓霖,程杨,戴特奇,等.基于公平最大化目标的2020年北京市养老设施布局优化.地理科学进展,2015,34(12):1609-1616.]
- [27] Wang F, Fu C, Shi X. Planning towards maximum equality in accessibility to NCI cancer centers in the U.S.// Kanaroglou P, Delmelle E, Ghosh D, et al. *Spatial Analysis in Health Geography*. Farnham, Surrey, England: Ashgate, 2015.
- [28] Li X, Wang F H, Yi H. A two-step approach to planning new facilities towards equal accessibility. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2017, 44(6): 994-1011.

- [29] Luo J, Tian L L, Luo L, et al. Two-step optimization for spatial accessibility improvement: A case study of health care planning in rural China. *BioMed Research International*, 2017, 2017: 2094654. DOI: 10.1155/2017/2094654.
- [30] Dai Teqi, Liao Cong, Hu Ke, et al. Secondary school allocation optimization towards equal access: A case study on Shijingshan District, Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1476-1485. [戴特奇, 廖聪, 胡科, 等. 公平导向的学校分配空间优化: 以北京石景山区为例. *地理学报*, 2017, 72(8): 1476-1485.]
- [31] Dai T Q, Liao C, Zhao S Y. Optimizing the spatial assignment of schools through a random mechanism towards equal educational opportunity: A resemblance approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 76: 24-30.
- [32] Liao C, Scheuer B, Dai T Q, et al. Optimizing the spatial assignment of schools to reduce both inequality of educational opportunity and potential opposition rate through introducing random mechanism into proximity-based system. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2020, 72: 100893. DOI: 10.1016/j.seps.2020.100893.
- [33] Li M Y, Wang F H, Kwan M P, et al. Equalizing the spatial accessibility of emergency medical services in Shanghai: A trade-off perspective. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2022, 92: 101745. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101745.
- [34] Barbati M, Piccolo C. Equality measures properties for location problems. *Optimization Letters*, 2016, 10(5): 903-920.
- [35] Ogryczak W. Inequality measures and equitable locations. *Annals of Operations Research*, 2009, 167(1): 61-86.
- [36] Liu Hui. Regional inequality measurement: Methods and evaluations. *Geographical Research*, 2006, 25(4): 710-718. [刘慧. 区域差异测度方法与评价. *地理研究*, 2006, 25(4): 710-718.]
- [37] Cheng G, Zeng X K, Duan L, et al. Spatial difference analysis for accessibility to high level hospitals based on travel time in Shenzhen, China. *Habitat International*, 2016, 53: 485-494.
- [38] Jin M H, Liu L, Tong D, et al. Evaluating the spatial accessibility and distribution balance of multi-level medical service facilities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1150. DOI: 10.3390/ijerph16071150.
- [39] Tao Z L, Zhou J P, Lin X B, et al. Investigating the impacts of public transport on job accessibility in Shenzhen, China: A multi-modal approach. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105025. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105025.
- [40] Geurs K T, van Wee B. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 2004, 12(2): 127-140.
- [41] Dai D J. Black residential segregation, disparities in spatial access to health care facilities, and late-stage breast cancer diagnosis in metropolitan Detroit. *Health & Place*, 2010, 16(5): 1038-1052.
- [42] Luo W, Qi Y. An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians. *Health & Place*, 2009, 15(4): 1100-1107.
- [43] Luo W, Wang F H. Measures of spatial accessibility to healthcare in a GIS environment: Synthesis and a case study in Chicago region. *Environment and Planning B, Planning & Design*, 2003, 30(6): 865-884.
- [44] Shen Q. Location characteristics of inner-city neighborhoods and employment accessibility of low-wage workers. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998, 25(3): 345-365.
- [45] Tseng M H, Wu H C. Integrating socioeconomic status and spatial factors to improve the accessibility of community care resources using maximum-equity optimization of supply capacity allocation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(10): 5437. DOI: 10.3390/ijerph18105437.
- [46] Culyer A J, Wagstaff A. Equity and equality in health and health care. *Journal of Health Economics*, 1993, 12(4): 431-457.
- [47] Whitehead J, L. Pearson A L, Lawrenson R, et al. How can the spatial equity of health services be defined and measured? A systematic review of spatial equity definitions and methods. *Journal of Health Services Research & Policy*, 2019, 24(4): 270-278.
- [48] Shen Y, Tao Y H. Associations between spatial access to medical facilities and health-seeking behaviors: A mixed geographically weighted regression analysis in Shanghai, China. *Applied Geography*, 2022, 139: 102644. DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102644.
- [49] Wang F H, McLafferty S, Escamilla V, et al. Late-stage breast cancer diagnosis and health care access in Illinois. *The Professional Geographer*, 2008, 60(1): 54-69.
- [50] Atkinson A B. On the measurement of inequality. *Journal of Economic Theory*, 1970, 2(3): 244-263.
- [51] Palma J G. Homogeneous middles vs. heterogeneous tails, and the end of the 'inverted-U': It's all about the share of the rich. *Development and Change*, 2011, 42(1): 87-153.

Improving spatial equity-oriented location-allocation models of urban medical facilities

TAO Zhuolin, DAI Teqi, SONG Changqing

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Rational configuration and spatial equity of urban medical facilities is an important topic in geography. The Maximal Accessibility Equality (MAE) model is an important progress in the field of spatial equity-oriented location-allocation models. However, existing studies have paid less attention to the spatial equity measures in MAE models. Aiming to fill this research gap, this study attempts to clarify the meaning of spatial equity of medical accessibility. Based on a review of existing studies, 10 spatial equity measures are selected for investigation in this study. The MAE mode is extended by incorporating these measures. Using medical facilities in Shenzhen as a case study, these improved models are applied, evaluated and compared. The following findings are drawn: (1) From the perspective of theoretical foundation behind the measures, the Coefficient of Variation (CV), Gini coefficient, Mean Absolute Deviation (MAD) and Palma ratio are appropriate for public service spatial equity studies. (2) Based on the performance of models, the improved MAE models incorporating Variance, Standard Deviation, CV, Palma ratio, MAD and Theil index are advantageous. (3) Overall, three measures, including CV, MAD and Palma ratio, are suggested for measuring and optimizing the spatial equity of medical services. Improved MAE models adopting these three measures as objective functions can significantly improve the spatial equity of accessibility to medical services. This study contributes to the literature by improving the spatial equity-oriented location-allocation models. It can provide scientific methods for the spatial planning of public service facilities.

Keywords: spatial equity; location- allocation models; medical facilities; accessibility; disparity; equality