

# 网络 Voronoi 图启发的粒子群空间优化建模

谢顺平, 冯学智, 都金康

(南京大学江苏省地理信息技术重点实验室, 南京大学地理与海洋科学学院地理信息科学系, 南京 210046)

**摘要:**城市化区域多设施空间优化建模是一项实用的关键技术, 可为城市公共资源均衡优化配置和空间决策提供支持。本文提出了网络 Voronoi 图启发的多设施选址粒子群空间优化建模方法, 分别给出了基于常规 Voronoi 图启发的  $p$ -中值选址模型和最大覆盖选址模型, 以及基于网络 Voronoi 面启发的  $p$ -中值选址模型和最大覆盖选址模型。模型采用 Voronoi 图定量提取设施功能覆盖和服务范围内的需求, 并通过最小化重叠覆盖启发空间优化最大化覆盖分布的需求。 $p$ -中值选址模型考虑了需求随路径距离衰减的因素, 最大覆盖选址模型顾及了设施对最大覆盖半径范围以内需求的完全覆盖, 以及对以外区域的部分衰减覆盖。在空间优化粒子群算法中融入遗传进化机制和常规 Voronoi 图模拟的粒子动态邻域结构, 提高了算法的全局搜索和优化性能。通过对实验区多设施进行的  $p$ -中值选址空间优化实验和最大覆盖选址空间优化实验, 验证了本文提出的模型、方法和算法的有效性, 可应用于城市化区域的空间优化决策支持。

**关键词:** 网络 Voronoi 图; 空间优化建模; 图启发式; 多设施选址; 粒子群算法

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2013.00846

## 1 引言

随着城市化区域的发展和扩张, 人口分布变化和快速交通方式的出现, 导致城市各类公共服务设施功能辐射空间发生改变, 现有设施空间布局 and 配置的不合理性逐渐显现, 基本公共服务空间差异化趋势加大, 公共资源利用效率失衡。因此, 亟需新型的空间分析模型和智能空间优化技术, 为城市管理部门提供科学的公共资源配置现状分析与优化方案, 支持城市化区域空间决策。GIS 是以应用为导向和驱动的空间信息技术, 智能化空间分析与决策支持是其发展方向, 人工智能与 GIS 结合应是地理学领域未来解决复杂地理空间问题的主要技术与方法<sup>[1]</sup>。面向城市化区域的多设施空间优化建模是一项实用的关键技术, 具有重要的理论和应用研究价值。网络 Voronoi 图是面向城市化区域的空间分析模型<sup>[2-3]</sup>, 可模拟城市各类公共服务设施的功能辐射空间结构, 划分和提取公共设施功能的服务范围和覆盖需求, 进而为空间优化提供分析依据。城市化区域复杂的空间优化建模需要更具信息度的

空间分析与启发式性能, 以便克服大规模、高精度空间优化过程中的计算瓶颈。粒子群优化算法的出现为解决复杂的空间优化问题带来契机<sup>[4]</sup>, 其独特与简洁的仿生进化机制和突出的寻优能力, 使其具有较强的全局优化能力与鲁棒性<sup>[5]</sup>。

Okabe 等研究发现, 城市化区域网络最短路径分析与欧氏距离分析提取的设施服务域存在显著差异, 在道路方向阻抗差异化的网络中, 设施按网络内向最短路径邻近分配获得的服务域与按外向最短路径邻近分配获得的服务域形态各异<sup>[2-3]</sup>, 并提出含盖 6 类图模型的广义网络 Voronoi 图概念<sup>[2]</sup>。国内外学者在研究面向空间优化计算的 Voronoi 图模型构建算法方面取得了一些进展<sup>[6]</sup>。在利用 Voronoi 图求解选址问题研究方面, Okabe and Suzuki 提出和归纳了利用 Voronoi 图分析与启发求解各类选址优化问题的模型与方法<sup>[7]</sup>; 陈军等研究了应用 Voronoi 图求解连续  $p$ -中值空间优化问题的方法<sup>[8]</sup>。此外, 还出现了将网络 Voronoi 图应用于划分城市商业网点市场域以及评估关联需求<sup>[9]</sup>; 应用网络权重 Voronoi 图分析城市商业中心服务域随地铁交通

收稿日期: 2013-11-20; 修回日期: 2013-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371044、40401046)。

作者简介: 谢顺平(1957-), 男, 南京市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地理信息系统理论与应用、空间分析模型、智能空间优化等研究。E-mail: xiesp@nju.edu.cn

出现产生的格局演变<sup>[10]</sup>等研究。在粒子群空间优化方面,有学者应用基本粒子群算法和多目标粒子群优化算法进行空间优化研究<sup>[11-12]</sup>;结合网络 Voronoi 图启发式和多智能粒子群算法的最大覆盖空间优化研究等<sup>[13]</sup>。本文对基于网络 Voronoi 图启发式的多设施选址建模及其粒子群空间优化方法进行深入探讨,建立了多种  $p$ -中值模型和最大覆盖模型,并给出相适应的粒子群空间优化算法。实验研究表明,将网络 Voronoi 图启发式与群智能启发式结合起来,可形成一种有效和实用的城市空间优化方法。

## 2 多设施选址模型

### 2.1 $p$ -中值选址模型

连续  $p$ -中值问题(Continuous  $p$ -median problem)通过最小化需求与最近设施的平均距离来优化  $n$  个设施空间配置。该问题可描述为:在给定的平面区域中,对选定的  $p$  个设施按目标要求进行布设,确定它们的空间位置,达到的目标是使这些设施的利用、运行、服务等方面的全部或平均性能最优,如获取服务或提供服务的成本达到最小,具体为总的或平均交通运输距离、时间、费用或综合代价达到最小等,所以又称为最小和问题。这里的距离指分布的需求点与最近设施之间的距离,采用 Voronoi 图模型划分设施的服务范围时,平面任意需求点的最近设施就是该点所在 Voronoi 多边形的发生元所对应的设施。顾及需求量的权重距离指需求点的需求量与最近设施距离的乘积,如果考虑需求随距离衰减的因素,需求权重距离的计算还应考虑距离衰减因子。由于  $p$ -中值问题的目标在于使总的成本达到最低,因此又称“经济效益性”目标。这类选址目标模型适合于解决商贸中心、生产企业、仓储物流等经济型设施的位置配置问题,如果考虑设施的总体利用成本和共享效率,诸如医疗、教育、文化、娱乐、公用事业等公共设施的空间优化也适用  $p$ -中值模型。

Okabe and Suzuki 给出了连续  $p$ -中值问题的求解模型<sup>[7]</sup>,该模型采用常规 Voronoi 图界定邻近设施的需求分布范围,使得连续  $p$ -中值模型具有简洁、便于优化分析和计算的特点。基于常规 Voronoi 图的连续  $p$ -中值数学模型可描述如下:

$$\min \sum_{i=1}^n \int_{v_i} f(p) d(p, s_i) dp \quad (1)$$

其中,  $n$  为参与配置和优化的设施数,  $n$  个设施分别为  $s_1, s_2, \dots, s_n$ ;  $p$  为需求点;  $v_i$  为设施  $s_i$  发生元的常规 Voronoi 图多边形区域;  $d(p, s_i)$  为设施  $s_i$  与  $v_i$  内点需求点  $p$  之间的距离(如欧氏距离、时间距离、费用距离、曼哈顿距离等);  $f$  为点  $p$  处的需求密度;  $dp$  为  $p$  点处的面积微元。

如果考虑需求随距离衰减的因素,则相应改进的连续  $p$ -中值模型为:

$$\min \sum_{i=1}^n \int_{v_i} k(d(p, s_i)) \cdot f(p) \cdot d(p, s_i) dp \quad (2)$$

其中,  $k(d(p, s_i)) = C^{-d(p, s_i)}$  为距离衰减函数;  $C$  为大于 1 的常数。

决定城市化区域需求与设施之间关系的重要因素是两者之间的路径距离,网络 Voronoi 图可以真实界定城市中公共设施与需求之间的邻近关系,运用网络 Voronoi 图对上述模型作适当改进,可得到下面两个  $p$ -中值模型:

$$\min \sum_{i=1}^n \int_{v_i} f(p) \cdot [d_E(p, p_m) + d_N(p_m, s_i)] dp \quad (3)$$

$$\min \sum_{i=1}^n \int_{v_i} k \cdot f(p) \cdot [d_E(p, p_m) + d_N(p_m, s_i)] dp \quad (4)$$

其中,  $n, s_i, k, f, dp$  含义同上;  $v_i$  为设施  $s_i$  的网络 Voronoi 多边形区域;  $d_E(p, p_m)$  为需求  $p$  点到最近道路的直线距离;  $d_N(p_m, s_i)$  为  $v_i$  内分布的需求点  $p$  邻近道路上的最近点  $p_m$  到最近设施  $s_i$  的网络路径距离(路径长度、路径时间或路径代价等)。可以看出,模型(4)的目标函数反映了需求通过道路网络路径到达最邻近设施的权重距离的总和,模型追求所有需求到邻近设施权重距离总和的最小化。

由于连续  $p$ -中值问题模型是非凸函数,尤其当优化的设施数较大时,连续  $p$ -中值问题是典型的 NP 完全问题,常用智能启发式方法优化。一些学者将求解  $p$ -中值问题的启发式方法分为构造性启发式方法,如贪婪法、合成法;局部搜索法,如交替法、交换法;数学规划法,如动态规划法、拉格朗日松弛法、聚合法;元启发式方法,如禁忌搜索法、启发式集中法、蚁群算法、神经网络方法等<sup>[14-16]</sup>

### 2.2 最大覆盖选址模型

最大覆盖问题(Maximal Covering Location Problem, MCLP)最初由 Church 和 ReVelle 提出<sup>[17]</sup>,是研究在设施数目和服务半径已知条件下,如何布局  $n$  个设施使得可接受服务的需求量最大的问题。最初问题将设施的最优选址点限制在网络节点上,

并在确定的关键候选节点集合中通过线性规划或分枝定界法等方法求解。城市中有一类设施的服务受时间和距离制约,如120急救中心、消防站、救援中心等应急服务设施,这类设施提供的服务具有较强的时效性,必须在规定时间内响应请求并提供服务。因此,这类设施须布设在与潜在需求点特定的距离以内,才能提供有效服务,确定这类设施的最佳位置属于最大覆盖问题范畴。由于最大覆盖问题应用广泛,已成为相关领域学者研究的热点<sup>[18-23]</sup>。

在基于响应时间满意的网络最大覆盖选址问题中,将覆盖半径的出发点从设施转变为需求点是较为新颖的尝试<sup>[21]</sup>,如果考虑城市道路通达性能的方向差异性,这种转变可引起覆盖范围的明显变化,关键要视哪种路径方向对设施服务起主导作用,相应的空间分析可以采用外向网络Voronoi图模型或内向网络Voronoi图模型<sup>[2]</sup>。此外,部分覆盖概念对解决设施功能对覆盖半径以外的需求仍有逐步衰减的部分覆盖能力较为实用<sup>[22-23]</sup>。

最大覆盖问题分为平面连续最大覆盖问题、网络连续最大覆盖问题和网络离散最大覆盖问题,其差别在于设施的布局空间是不规则平面域,还是网络路段域或网络结点域。平面空间和网络空间中的连续最大覆盖问题属于NP完全问题,常用智能启发式方法求解。根据最大覆盖问题的性质,为提高有限设施的利用率和覆盖效率,本文规定重叠覆盖的需求不参与最大覆盖和部分覆盖的统计,设施覆盖域完全处于设施的Voronoi图范围以内,以覆盖半径确定完全覆盖域和部分覆盖域。由于目标函数只统计非重叠覆盖需求,在模型优化求解时,过分靠近的设施将导致目标函数值不同程度变小,相应的布局方案因质量低劣而遭淘汰,从而启发最小化重叠覆盖、最大化非重叠覆盖。本文提出的基于常规Voronoi图分析的平面连续最大覆盖问题的数学模型可描述如下:

$$\max \sum_{i=1}^n \int_{v_i} k(d(p, s_i)) \cdot f(p) dp \quad (5)$$

$$\text{其中, } k(d(p, s_i)) = \begin{cases} 1 & d(p, s_i) \leq R \\ \frac{1}{C^{d-R}} & d(p, s_i) > R \end{cases}$$

式(6)中, $n, s_i, f, dp$ 含义同 $p$ -中值模型; $v_i$ 为设施 $s_i$ 的Voronoi多边形区域; $R$ 为覆盖半径; $k(d)$ 为距离衰减函数; $C$ 为大于1的常数(取值为 $10^{1/R}$ )。当距离 $d$ 从 $R$ 变化到 $2R$ , $k$ 则从1变化到0.1。显然, $k$ 的变化模拟了设施功能对覆盖半径以内的需求完

全覆盖和对覆盖半径以外的需求衰减覆盖。

若基于网络Voronoi图分析与启发,相应的最大覆盖模型为:

$$\max \sum_{i=1}^n \int_{v_i} k(d_E(p, p_m) + d_N(p_m, s_i)) \cdot f(p) \cdot dp \quad (7)$$

其中, $v_i$ 为设施 $s_i$ 的网络Voronoi图多边形区域,其他参数与变量的含义与基于网络Voronoi图分析的 $p$ -中值模型中的含义相同。可以看出,模型目标追求布局的一组设施通过道路网络覆盖的需求总量最大化。

### 3 粒子群空间优化算法

Kennedy和Eberhart提出的粒子群算法为解决复杂的多设施空间优化问题创造了新的途径<sup>[4]</sup>,该算法对目标函数及约束条件连续性和凸性没有严格要求,具有突出的全局优化性能、易控制、自组织、并行性和扩展性等特点<sup>[5,24]</sup>。近年来,面向各种应用的改进粒子群算法研究成为热点<sup>[25-28]</sup>。由于平面连续空间与网络连续空间的差异性,粒子群算法必须进行适应性改进才能在网络连续空间优化中有效发挥其内在的启发式导向机制。为此,本文应用线集广义Voronoi图将粒子飞行坐标分量(单个设施坐标)转换为路网道路上坐标,模拟粒子的设施坐标分量在网络空间飞行。本研究在带惯性权重的粒子群算法的基础上融入遗传交叉机制和动态邻域结构,以提高优质粒子产生的概率和算法的全局优化性能。

#### 3.1 粒子群空间优化算法

算法中粒子群的规模表示了每轮参与问题求解试探方案个数,即每一个粒子的坐标表示一组设施的一种空间布局方案,对于 $n$ 个设施空间选址问题,粒子位置坐标可表示为 $(s_1, s_2, \dots, s_n)$ ,其中, $s_k$ 为设施 $k$ 的坐标点 $(x_k, y_k)$ , $k=1, \dots, n$ ,粒子的位置向量可表示为 $(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)$ 。显然,算法模拟粒子在 $2n$ 维空间飞行。如果考虑不同的粒子个体,则粒子 $i$ 的位置向量表示为: $(x_{i1}, y_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, \dots, x_{in}, y_{in})$ ,其速度向量表示为 $(v_{i1}^x, v_{i1}^y, v_{i2}^x, v_{i2}^y, \dots, v_{in}^x, v_{in}^y)$ ,其历史最好位置表示为 $(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ ,整个群体或邻域子群的历史最好位置表示为 $(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 。带惯性权重粒子群空间优化算法的速度迭代模型和位置迭代模型如下:



$$\begin{aligned} v_{ij}^x(t+1) &= wv_{ij}^x(t) + c_1r_{1j}(t)[p_{ij}^x(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[p_{gj}^x(t) - x_{ij}(t)] \\ v_{ij}^y(t+1) &= wv_{ij}^y(t) + c_1r_{3j}(t)[p_{ij}^y(t) - y_{ij}(t)] + c_2r_{4j}(t)[p_{gj}^y(t) - y_{ij}(t)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + v_{ij}^x(t+1) \\ y_{ij}(t+1) &= y_{ij}(t) + v_{ij}^y(t+1) \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $(v_{ij}^x, v_{ij}^y)$  表示为粒子  $i$  坐标中包含的第  $j$  个设施的位置坐标;  $t$  表示算法迭代次数;  $w$  为速度的动态惯性权重;  $w$  随迭代进程从开始时的 0.9 线性连续变化到结束时的 0.4;  $c_1$ 、 $c_2$  为加速常数(学习因子), 通常在 0~2 间取值;  $r_1 \sim U(0, 1)$ 、 $r_2 \sim U(0, 1)$ 、 $r_3 \sim U(0, 1)$ 、 $r_4 \sim U(0, 1)$  为 4 个相互独立的随机函数。 $(x_{ij}, y_{ij})$  为粒子  $i$  的第  $j$  个设施位置的坐标,  $(p_{ij}^x, p_{ij}^y)$  为粒子  $i$  历史最优位置上第  $j$  个设施的坐标,  $(p_{gj}^x, p_{gj}^y)$  为粒子群体最优或邻域子群最优位置上第  $j$  个设施的坐标。

### 3.2 算法性能增强改进

为提高粒子群算法的空间优化性能, 在算法中引入遗传进化机制, 用群体中较优粒子间交叉产生的后代替换群体中较差的粒子。在粒子群算法每一次迭代后, 对所有粒子进行位置解码并计算其所表示布局方案的适应值, 按适应值从优到劣排序, 对后 20% 较差粒子按遗传交叉机制更新, 算法在较优粒子中随机选择出占群体总数 20% 的粒子, 通过将它们随机地两两交叉, 产生相同数量后代粒子取代群体中的较差粒子。如果用  $a$  和  $b$  表示被选择的两个参与交叉的粒子指针, 交叉算法的计算公式表示如下:

$$C_a(t+1) = r_i C_a(t) + (1.0 - r_i) C_b(t) \quad (10)$$

$$C_b(t+1) = r_i C_b(t) + (1.0 - r_i) C_a(t) \quad (11)$$

$$V_a(t+1) = \frac{V_a(t) + V_b(t)}{|V_a(t) + V_b(t)|} |V_a(t)| \quad (12)$$

$$V_b(t+1) = \frac{V_a(t) + V_b(t)}{|V_a(t) + V_b(t)|} |V_b(t)| \quad (13)$$

其中,  $C$  为粒子坐标分量( $x$  或  $y$ );  $V$  为粒子飞行速度分量;  $r_i \sim U(0, 1)$ 。经过交叉操作, 由两个父代粒子的位置按随机的遗传比例产生了两个子代粒子的位置。

为保持粒子群算法在优化进程中前期的强探索能力和后期的强开发能力, 本文采用常规 Voronoi 图变阶邻域机制模拟粒子的动态邻域结构, 使粒子的交流邻域随优化进程从一阶邻域逐渐扩大

到整个群体, 从而使算法从开始时的局部版本模型逐步过度到全局版本模型。

## 4 空间优化实验

本研究选择南京市主城区为实验区(图 1), 以交通网络为背景, 按 2008 年统计年鉴公布的南京市主城区 56 个行政街道区划作为基本统计单元, 以单元人口为实验区需求分布依据, 为便于提取设施服务覆盖人口, 各单元范围内的人口视为均匀分布。

优化实验一, 对 11 个商业性设施按  $p$ -中值选址模型进行空间布局优化, 以使实验区内分布的人口需求到最邻近设施的网络路径代价总和达到最小。实验分别采用常规 Voronoi 图和网络 Voronoi 图提取设施邻近范围内的人口需求, 采用相应的  $p$ -中值模型进行优化。基于常规 Voronoi 图分析的  $p$ -中值选址粒子群优化的群体规模为 100, 最大迭代次数 500; 基于网络 Voronoi 图分析的  $p$ -中值选址粒子群优化的群体规模为 30, 最大迭代次数 300。粒子群算法初始化时控制每个粒子各位置分量间的最小间距, 以提高初始解的质量。

图 2 分别列出了两种优化中不带距离衰减函数  $p$ -中值模型的优化结果(图 2(a)、(c)), 和带距离衰减函数  $p$ -中值模型的优化结果(图 2(b)、(d))。从图可以看出,  $p$ -中值模型优化布局的设施位置分布在研究区人口稠密区域, 呈现出与人口从稠密到稀疏相一致的分布结果, 以达到分布的人口需求到邻近设施距离总和最小的优化目标。从图 3 可以看出, 粒子群算法的优化性能较为理想。

优化实验二, 对 15 个急救设施按最大覆盖模型进行空间优化, 优化目标是使布局的 15 个设施功能覆盖尽可能多的人口需求, 通过最小化重叠覆盖达到非叠覆盖的最大化, 即最大限度的提高公共急救设施的空间配置效率。最大覆盖模型采用 Voronoi 图提取设施邻近范围内的人口需求, 并按 2.5km 最大覆盖半径界定设施完全覆盖的需求和部分覆盖的需求, 模型不重复统计重叠覆盖的需求。本次优化实验中基于常规 Voronoi 图启发的最大覆盖选址粒子群优化的群体规模为 100, 最大迭代次数 500, 基于网络 Voronoi 图启发的最大覆盖选址粒子群优化的群体规模为 30, 最大迭代次数 300。粒子群算法对迭代中每个粒子表示的 15 个设施的一种布局方案, 计算相应的 Voronoi 图并获取各设施覆盖的

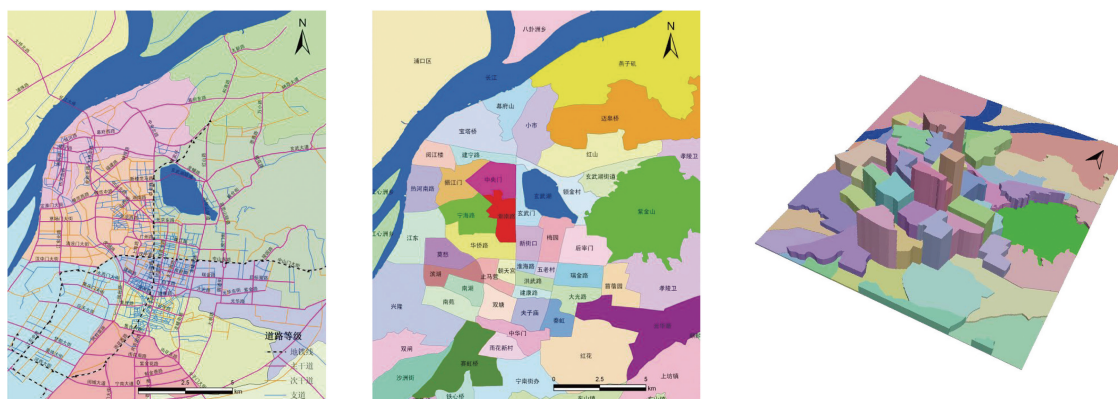
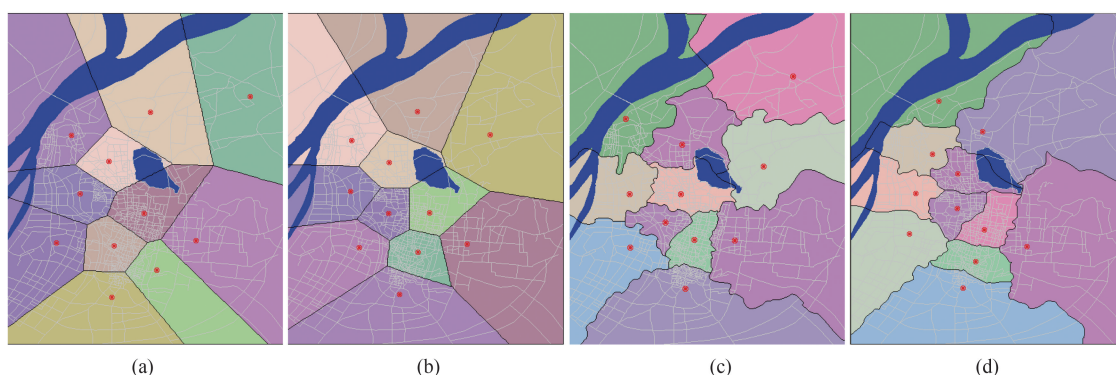
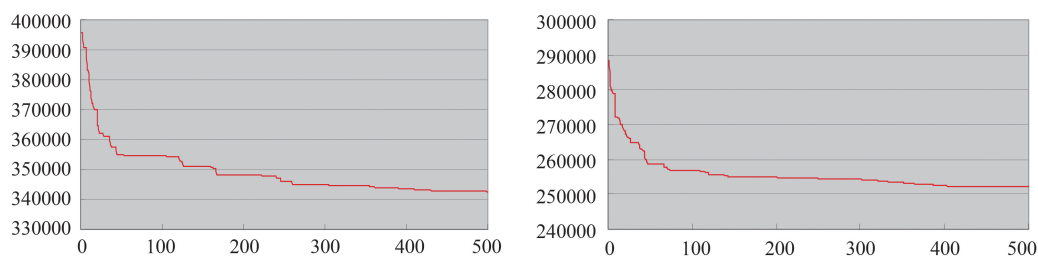


图1 南京市交通网络、行政单元和人口分布

Fig.1 Traffic network, district units and population distribution of Nanjing City

图2 对11个设施采用 $p$ -中值模型和粒子群算法的优化结果Fig.2 Results for 11 facilities using  $p$ -median model and PSO图3  $p$ -中值模型的微粒群算法优化过程Fig.3 Process of PSO for network  $p$ -median model

需求信息,通过计算粒子的适应值评价各粒子质量的优劣,算法按照预定的优化机制迭代更迭整个粒子种群。

图4为基于常规Voronoi图启发的最大覆盖模型的优化结果(图4(a)、(b)),和基于网络Voronoi图启发的最大覆盖模型的优化结果(图4(c)、(d))。图中白色部分为设施功能最大覆盖范围,可以看出,优化配置后的设施主要布设在人口稠密区域,基本无重复覆盖情形出现,反映出模型的空间优化追求最大限度地无重叠覆盖尽可能多的人口需

求。图5给出了粒子群算法进行最大覆盖空间优化的目标函数变化曲线,反映出算法具有较好的性能。

## 5 结论

本文就基于网络Voronoi图启发式的粒子群空间优化建模方法进行了深入讨论,给出了若干改进的 $p$ -中值模型和最大覆盖模型以及相应的粒子群空间优化方法,通过对实验区典型设施所做的空间

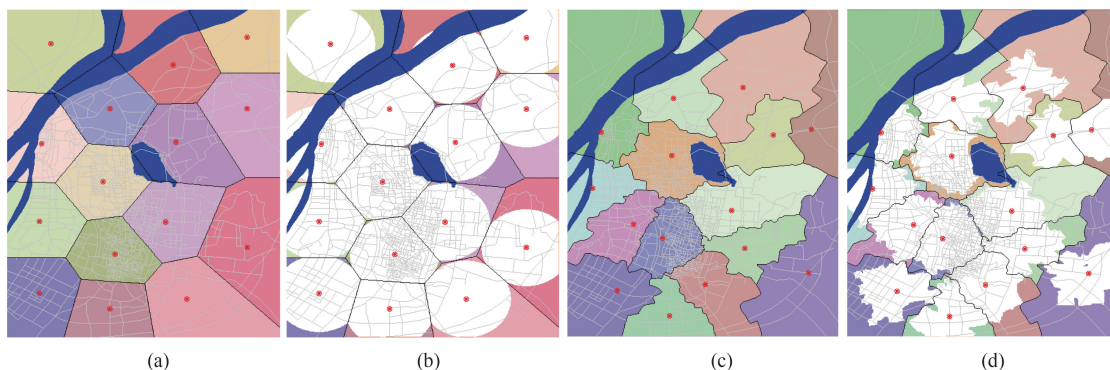


图4 对15个设施采用网络最大覆盖模型和PSO的优化结果  
Fig.4 Results for 15 facilities using network maximal covering model and PSO

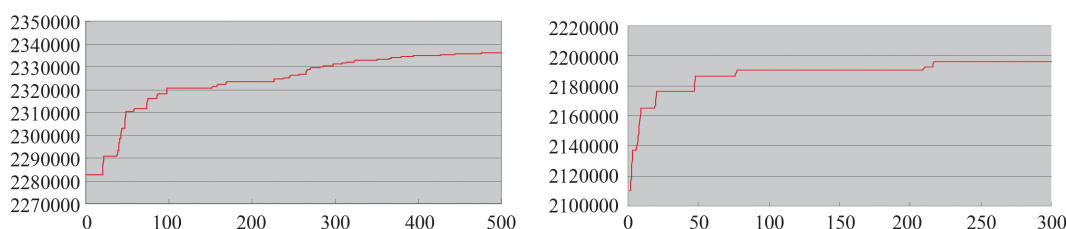


图5 最大覆盖模型的粒子群算法优化过程  
Fig.5 Process of PSO for maximal covering model

优化实验,验证了本文建立的模型和方法是有效的,具体获得以下结论:(1)Voronoi图可以无歧义地模拟由位置产生的空间结构和空间关系,非常适合解决位置产生的相关问题,可以在多设施选址模型构建中发挥重要作用;(2)网络Voronoi图是描述城市化区域公共设施服务域理想的空分析模型,可模拟城市空间的公共设施与需求之间通过交通网络建立的关联,是有效提取设施服务域或功能覆盖域内需求的定量分析工具;(3)网络Voronoi图可以为空间优化提供启发式性能,通过对需求的最小化重叠覆盖、最大化非重叠覆盖,启发空间优化进程趋向最大覆盖的最佳目标;(4)通过对基本粒子群算法的空间优化适应性改进,特别是融入遗传交叉进化机制和动态邻域机制,可以进一步提高粒子群算法解决复杂空间优化问题的能力。

#### 参考文献:

- [1] 黎夏,刘小平,李少英.智能式GIS与空间优化[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] Okabe A, Satoh T, Furuta T, *et al.* Generalized network Voronoi diagrams: Concepts, computational methods and applications[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22(9): 965-994.
- [3] Okabe A, Okunuki K. A computational method for esti-

imating the demand of retail stores on a street network and its implementation in GIS[J]. Transactions in GIS, 2001, 5(3): 209-220.

- [4] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]. Proc of IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, 1995, 1942-1948.
- [5] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources[C]. In: Proc. Congress on Evolutionary Computation. IEEE Service Center. Piscataway, NJ, USA, 2001, 81-86.
- [6] 谢顺平, 冯学智, 鲁伟. 基于道路网络分析的Voronoi面域图构建算法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 88-94.
- [7] Okabe A, Suzuki A. Locational optimization problems solving through Voronoi diagrams[J]. Europe Journal Operation Research, 1997(98): 445-456.
- [8] 陈军, 赵仁亮, 乔朝飞. 基于Voronoi图的GIS空间分析研究[J]. 武汉大学学报×信息科学版, 2003, 28(特刊): 32-37.
- [9] 王新生, 余瑞林, 姜友华. 基于道路网络的商业网点市场域分析[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 85-92.
- [10] 谢顺平, 冯学智, 王结臣, 等. 基于网络加权Voronoi图分析的南京市商业中心辐射域研究[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1467-1476.
- [11] 杜国明, 陈晓翔, 黎夏. 基于粒子群优化算法的空间优化决策[J]. 地理学报, 2006, 61(12): 1290-1298.



- [12] 黎海波, 黎夏, 刘小平, 等. 多目标粒子群算法与选址中的形状优化[J]. 遥感学报, 2008, 12(5):724-733.
- [13] 谢顺平, 冯学智, 都金康. 基于网络 Voronoi 图启发式和群智能的最大覆盖空间优化[J]. 测绘学报, 2011, 40(6): 778-784.
- [14] Mladenović N, Brimberg J, Hansen P, Moreno-Pérez J A. The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches[J]. European Journal of Operational Research, 2007 (179):927-939.
- [15] Sáez-Aguado J, Trandafir P C. Some heuristic methods for solving p-median problems with a coverage constraint [J]. European Journal of Operational Research, 2012 (220):320-327.
- [16] Yaghini M, Karimi M, Rahbar M. A hybrid metaheuristic approach for the capacitated p-median problem[J]. Applied Soft Computing, 2013(13):3922-3930.
- [17] Church R.L., Reville, C.S., The maximal covering location problem[C]. Papers of the Regional Science Association, 1974(32):101-118.
- [18] Alexandris G, Giannikos I. A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities[J]. European Journal of Operational Research, 2010(202): 328-338.
- [19] Karasakal O, Karasakal E K. A maximal covering location model in the presence of partial coverage[J]. Computers & Operations Research, 2004(31):1515-1526.
- [20] Murawski L, Church R L. Improving accessibility to rural health services: The maximal covering network improvement problem[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2008(43):102-110.
- [21] 马云峰, 杨超, 张敏, 等. 基于时间满意的最大覆盖选址问题[J]. 中国管理科学, 2006, 14(2): 45-51.
- [22] Berman O. The p maximal cover-partial center problem on networks[J]. European Journal of Operation Research, 1994(72):432-442.
- [23] Berman O, Drezner Z, Krass D, et al. The variable radius covering problem[J]. European Journal of Operational Research. 2009(196):516 - 525.
- [24] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 粒子群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] Eberhart R C, Shi Y. Particle swarm optimization: Developments, applications and resources. In: Proc. Congress on Evolutionary Computation. IEEE Service Center. Piscataway, NJ, USA, 2001: 81-86.
- [26] 倪庆剑, 邢汉承, 张志政, 等. 粒子群优化算法研究进展[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(3):349-357.
- [27] 李宁, 刘飞, 孙德宝. 基于带变异算子粒子群优化算法的约束布局优化研究[J]. 计算机学报, 2004, 27(7):897-903.
- [28] 陶新民, 刘福荣, 刘玉, 等. 一种多尺度协同变异的粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2012, 23(7):1805-1815.

## Network Voronoi Diagram Heuristic-based Particle Swarm Continuous Spatial Optimization Modeling

XIE Shunping\*, FENG Xuezhi and DU Jinkang

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University,  
Department of Geographic Information Science, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing  
University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** Spatial optimization modeling for multi facilities in urbanized area is a practical and key technique, and it can provide balance configuration optimization and spatial decision support for urban public resource. A method of particle swarm spatial optimization modeling for multi facilities location based on network Voronoi diagram heuristic is proposed in this paper, in which we presented respectively some p-median location models and maximal covering location models by using ordinary Voronoi diagram heuristic and network Voronoi diagram heuristic. Those models can quantitatively extract the demands covered by the function and service of facilities through the Voronoi diagrams, and inspire spatial optimization to maximize the coverage for distributed demands by minimizing overlapped coverage. The proposed p-median location model considers the factor of demand attenuation with path distance, and the proposed maximal covering model takes it into account that facility's service provides full coverage for the demands within maximal coverage radius and partial attenuation cov-

erage for the demands without maximal coverage radius. The genetic evolution mechanism and the dynamic neighborhood structure of particles simulated by ordinary Voronoi diagram are integrated in the particle swarm spatial optimization to improve global search and optimization performance of the algorithm. Through the research of spatial optimization configuration experiments for multi facilities in experimental city, the proposed method has been verified to be the effective and practical, it can be applied for the spatial location optimization decision in urbanized area.

**Key words:** Network Voronoi Diagram; Spatial Optimization Modeling; Diagram Heuristic; Multi-facilities Location; Particle Swarm Optimization

**\*Corresponding author:** XIE Shunping, E-mail: xiesp@nju.edu.cn

---

(上接第 808 页)

out for crime geography. While more and more mathematical models are employed, the percentage of quantitative researches has declined significantly. It is also the same for case studies. What's more, the study areas constricts to Yangtze River Delta, Beijing-Tianjin region, and Pearl River Delta. With emerging research groups and declining share of core authors, crime geography in China has entered a phase of reorganization. In the future, much more efforts will be needed for the further development of crime geography. We should not only try to synthesize multiple theories and conduct more case studies in the Chinese context, but also pay attention to the unification of research norms and cultivation of next-generation core authors.

**Key words:** crime geography; PGIS; situational crime prevention; CPTED; research progress; statistical analysis

**\*Corresponding author:** LIU Lin, E-mail: liulin2@mail.sysu.edu.cn