

文章编号:1005-0523(2018)05-0044-08

基于 Voronoi 图的物流节点选址研究

郑长江¹,戴 冉¹,郑树青²,李 锐¹

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.桂林电子科技大学建筑与交通工程学院,广西 桂林 541004)

摘要:为合理优化物流配送中心的位置,引入 Voronoi 图的相关特性及其应用,实现物流节点服务范围的动态划分,综合考虑影响物流节点选址的影响因素,并赋予相应的权值,建立改进 P-中值模型,构建总服务成本最小的目标函数。将 Voronoi 图与改进 P-中值模型相结合,在 Voronoi 图动态划分物流节点服务范围的基础上,利用 Matlab 编写模型的优化求解算法,通过不断迭代,求出整个物流系统的节点选址最优布局。结果表明:基于 Voronoi 图的物流节点优化方法是合理的,能够使得配送中心的总花费成本最低,降低物流成本,提高物流效率。

关键词:物流节点;选址优化;P-中值模型;Voronoi 图

中图分类号:U121

文献标志码:A

近年来,我国物流行业迅猛发展,物流节点作为物流系统的核心部分,其选址问题的复杂性也越来越强,因此如何更加科学合理的对物流节点进行布局优化,减少整个物流系统的运营成本成为我国急需解决的问题。孙智源等以土地利用和运输方式的区域可达性作为可行性指标,以铁路、公路便捷度等为最优化指标,提出了基于 GIS 和组合评价法的资源型城市物流节点选址方法^[1]。李利华等将区间运算和遗传算法相结合,研究了连续型不确定性物流网络节点的选址及算法问题^[2]。叶一芄等考虑上层规划使物流系统总费用最小,下层规划建立 Logit 随机用户均衡模型,提出了基于随机路径选择的物流中心选址方法^[3]。苑敬云等基于 OS 理论分析货物在运输及配送过程中的货损成本,建立了冷链物流配送中心选址优化模型^[4]。其中,在物流节点的合理服务范围划分方面,主要采用调查法、引力模型、需求势能理论等方法^[5-6]。在上述物流节点服务范围分析方法的基础上,有关学者还采用重心法、双层规划、鲍姆尔-沃尔夫法和图论等方法,构建了物流节点选址的布局优化模型,系统研究了物流节点数量、规模和选址的优化问题^[7-9]。但上述研究对于每个物流节点的服务范围只是粗略大概的划分,没有反应出物流节点对周边需求点的吸引特征,不能满足动态、系统的规划要求,而且一般侧重于物流节点的建设和对客户的服务成本两方面,但对物流节点本身的特点以及满足物流要素所需的成本没有进行深入考虑,在一定程度上限制了物流节点布局优化的深度和准确性。

国内外学者在设施布局方面应用 Voronoi 图理论取得了一些成就。Efstathios 等基于 Voronoi 图研究了发电机网络区域动态规划问题^[10]。Didandeh 等在新工厂的选址过程中,也提出了基于 Voronoi 图的最佳解决方案^[11]。崔艳等利用地理信息系统空间分析的优势,通过 Voronoi 图和点密度法优化郑州市公共文化设施的空间布局^[12]。上述研究表明,Voronoi 图在影响范围划分和设施选址方面有着一定的优势,可以利用到物流节点选址的优化过程中。

利用 Voronoi 图的特性,实现物流系统空间服务范围的动态划分效果,采用多因素参与决策的方法,综合考虑影响配送中心选址的 4 种因素,同时利用排序倒数法进行权值分配,构建改进 P-中值模型确定不同情况下物流配送中心选址总成本,在此基础上利用 Matlab 编程,提出确定物流配送中心布局优化的迭代算法,对模型进行高效求解。

收稿日期:2018-04-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51508161)

作者简介:郑长江(1966—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为交通运输规划与管理。

1 Voronoi 图的定义与特性分析

1.1 Voronoi 图的定义

1908 年,数学家 Voronoi 按照最临近原则划分平面,通过连接不同相邻两点直线的垂直平分线组成连续多边形,正式提出一组能够定义离散点有效作用区域的 Voronoi 图。具体的数学定义为:假设 $P_k=\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}, 3 \leq n \leq \infty$ 为二维欧氏空间上由 n 个点构成的控制点集,则可以把 P_k 顶点的 Voronoi 区域 $V(P_k)$ 定义为

$$V(P_k)=\{x \in V(P_k) | d(x, P_k) \leq d(x, P_j), j=\{1, 2, 3 \dots, n\}, j \neq k\}$$

其中: x 为平面上任意点, $P_k\{1, 2, 3 \dots, n\}$ 为母点; $d(P_i, P_j)$ 表示点 P_i 与点 P_j 的欧氏距离; $P_i \neq P_j, i \neq j$ 且 $i, j \in I_n \{1, 2, \dots, n\}$ 。

1.2 Voronoi 图的特性分析

1.2.1 影响范围特性

如图 1 所示, Voronoi 图中每个母点对应一个凸多边形, 每个 Voronoi 多边形内任意一点到对应母点的距离相比于其他任意母点是最小的, 且如果将某一母点删除, 对应的影响范围也会消失, 但不会对其他母点造成很大的影响。Voronoi 图的影响范围特性与物流配送中心服务范围划分问题有极大的相似性^[13], 在物流节点选址过程中, 配送点到需求点的运输距离是影响优化效果的重要因素, 当每个 Voronoi 多边形内的所有需求点由对应配送点服务时, 物流运输距离最短, Voronoi 图在考虑运输距离的基础上, 清晰的表示出了物流节点的空间影响范围。

1.2.2 空心圆特性

如图 2 所示, 以 Voronoi 多边形中任意角点 q_i 为圆心作圆 C_i , 当 C_i 过 q_i 的 Voronoi 边所对应的所有母点时, C_i 中不会含有其他母点, 是一个空心圆。结合物流节点的选址, 在空心圆区域内没有对应的配送中心进行配送, 是物流配送环节中较薄弱的地方, 也是在完善物流配送网络过程中应该优先考虑的地方。

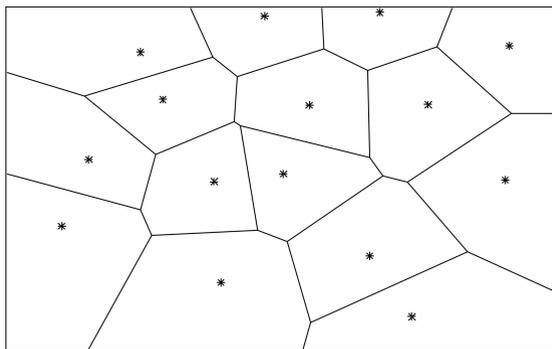


图 1 Voronoi 图的影响范围特性

Fig.1 Influence range characteristics of Voronoi diagram

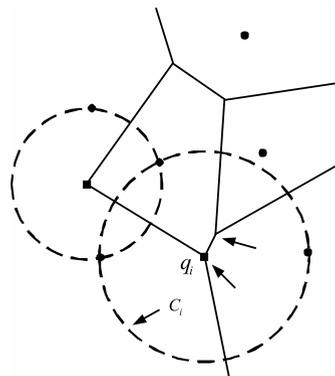


图 2 Voronoi 图的空心圆特性

Fig.2 Hollow circle characteristics of Voronoi diagram

1.2.3 局部动态特性

每个 Voronoi 多边形的平均边数 $n \leq 6$, 当某些配送中心不满足某些条件需要撤除时, 不会影响整个 Voronoi 图区域^[14], 有利于物流节点选址的进一步优化。

2 物流配送中心选址模型的建立

2.1 配送中心选址的影响因素

物流配送中心选址的目标是当配送中心为需求点进行配送时, 消耗的总配送成本最小, 效率最高, 所以配送中心选址的相关因素即为达到该最小目标应考虑的影响因素。在实际情况中, 影响物流配送中心选址的因素有很多, 本文主要考虑以下几个方面。

1) 配送中心周边的交通条件。交通便利条件及运输成本是影响物流配送成本和效率的重要因素,运输是物流配送过程中不可或缺的部分,相关物流活动的进行必须依赖各种运输方式,以便及时准确的将货物运送至目的地。对物流配送中心进行选址时,需考虑该位置是否接近原材料产地、是否靠近消费市场、周边是否具备完善的运输道路等等。

2) 经营环境因素。在进行物流配送中心选址时,应充分考虑所选位置的法律法规、税收政策是否对物流企业的经济效益产生重要影响。此外,配送中心的租金费用和占地面积大小等也是物流设施选址的重要因素,在考虑现有租金费用及未来增长的情况下,结合未来的发展需求,来决定最合适的配送中心占地面积,同时还要考虑土地拆迁、征用等费用。

3) 自然环境因素。物流设施选址过程中,考虑到配送中心的仓储功能,应妥善选择合适的位置,如尽量选择避开风口防止商品老化等。配送中心的使用年限一般较长,应考虑周边的地质水文条件,地址条件应符合建筑承载力要求,同时要远离容易泛滥的河川流域以及上溢地下水的区域等。

2.2 模型假设

为使建立的模型更加合理可行,本文做出如下假设:

1) 配送中心到各需求点之间都是可达的,物流节点与需求点之间的运输距离为欧式距离,运输费用与运输距离成正比;

2) 运输过程中不考虑交通状况、天气等对运输成本的影响;

3) 在配送中心的服务范围内,消费者的需求已知,且配送中心的容量能够满足该范围内的所有需求量;

4) 每个配送中心的车辆运载能力满足配送线路上的客户需求量;

5) 忽略由送达延误产生的额外费用。

2.3 改进 P-中值选址模型的构建

传统的 P-中值模型是以总距离、费用或时间最少为目标,在 n 个候选点中选出 p 个配送中心对 m 个需求点服务,但一般 P-中值问题的目标函数中只涉及运输费用,考虑的影响因素单一,与实际物流情况不符。

2.3.1 改进 P-中值模型介绍

本文对传统 P-中值模型进行改进,采用多因素参与决策的方法,使物流节点位置的确定更加准确合理,在上述所涉及到的影响因素中,选取配送中心与需求点之间的总运输距离、物流成本、配送中心的租金以及占地面积这 4 个具有代表性的影响因素,纳入目标函数中,并分别赋予一定权重,构建总选址费用最小的目标函数如下

$$C_{ij}=w_1D_{ij}+w_2L_i+w_3R_i+w_4S_i, (i \in N, j \in M) \quad (1)$$

$$C=\sum_{i \in N} C_i \quad (2)$$

式中: C_{ij} 为第 i 个候选配送中心为第 j 个需求点进行配送所需要的成本; C_i 为第 i 个配送中心所花费的成本; C 为满足所有需求点时的总费用; N 为物流配送中心点的集合, $N=\{1, 2, \dots, n\}$; M 为需求点的集合, $M=\{1, 2, \dots, m\}$; D_{ij} 为候选配送中心 i 到需求点 j 之间的运输距离,取两点之间的欧式距离; L_i 为第 i 个候选配送中心的物流成本; R_i 为第 i 个候选配送中心所在区域的租金; S_i 为第 i 个候选配送中心的占地面积; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 分别为各影响因素的权重值。

2.3.2 权重确定

权重系数表示在指标系统中该项指标的重要程度,即当其他指标不变时,该指标的改变对结果的影响大小,在确定权重时应综合考虑各影响因素之间的关系。本文采用排序倒数法确定各因素的权重值大小,按照对选址优化的影响大小将上述影响因素降序排列,分别对总运输距离、物流成本、租金和占地面积赋值序

号,其中,1代表最重要的影响因素,以此类推,4表示最不重要的,利用式(3)计算各决策因素的权重值

$$w_i = \frac{1/r_i}{\sum_{i=1}^4 1/r_i} \quad (3)$$

式中: w_i 为第*i*个决策因素的权重值; r_i 为第*i*个影响因素的序号赋值数。

2.3.3 数据标准化处理

目标函数中的总运输距离、物流成本、租金和占地面积的量纲不一致,不能简单相加,需要对数据进行标准化处理消除量纲的影响。本文采用离差标准化法,将某变量的观察值减去最小值,再除以该变量的极差,如式(4)所示,离差标准化后的数据是没有单位的纯数量,范围均落在0~1之间,可以与权重相乘后求和计算选址总成本

$$L_i' = \frac{L_i - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (4)$$

3 配送中心选址布局优化算法设计

配送中心选址布局优化问题可描述为:在现有*n*个配送中心候选点的位置、物流费用、租金和占地面积已知的情况下,以整个方案的总成本最小为目标函数,选出*p*个配送中心对*m*个需求点进行配送,确定更加科学合理的位置布局,并得到优化后配送中心的服务范围。为节省计算时间,本文采用 Matlab 软件编程高效迭代算法,结合 Voronoi 图,对改进 P-中值模型求最优解,优化具体步骤如下:

第1步:假设当前选中的配送中心数 $k=n$,即所有 *n* 个物流配送中心候选位置都被选中,以此为生长点画出 Voronoi 图,确定每个物流配送中心的服务范围;

第2步:根据式(1),式(2)分别计算每个 Voronoi 多边形范围内的成本费用;

第3步:从当前候选点集中确定一个取走点,该点满足:当删除取走点时,原先该点 Voronoi 多边形范围内的需求点由剩余配送点服务,且物流花费的总成本相比于删除其它点而言是最小的,令 $k=k-1$,删除点后转到第1,第2步,得到 $k=k-1$ 时选址优化方案,直至 $k=3$;

第4步:当配送中心需求数 $p=2$ 时,求解 k_n^2 种方案下的选址总费用并比较,得到 $p=2$ 时最优解,其中,每个需求点只由一个离它最近的配送中心服务;

第5步:当配送中心需求数 $p=1$ 时,求解 *n* 种方案下的总运输距离、物流成本、租金和占地面积,分别数据标准化处理后得到选址总费用并比较,得到 $p=1$ 时的最优解;

第6步:将 $p=1\sim n$ 时的 *n* 种优化方案数据标准化处理后,计算总成本费用进行比较,得到模型的最优解,算法结束。

4 实证验证

4.1 数据处理

以南京市的物流配送中心布局优化为例进行实证分析,查找南京市现有 10 个物流配送中心作为候选点,分别用 A~J 来表示,具体位置的坐标如表 1 所示,其中,*X*,*Y* 为经纬度转换成平面坐标的值。以大型超市、住宅小区等为需求点,共拟选取了 35 个需求点,现有物流配送中心和需求点分布如图 3 所示。

本文考虑的 4 个主要影响因素中总运输距离、物流成本、租金和占地面积都可以定量表示,其中,当 $3 \leq k \leq n$ 时,采用 Voronoi 图分析每个配送中心的最短总运输距离,即为该服务影响范围内所有需求点到配送中心的欧式距离之和, $k=1$ 或 2 时,每个需求点直接由离它最近的配送点服务,租金和占地面积的具体数值通过属性查询来获得,采用德尔菲法分别对 10 个配送中心赋予物流成本的数值,其中表 2 为所有候选点被选中时 10 个物流配送中心的影响要素赋值情况。

表 1 物流配送中心候选点坐标
Tab.1 Candidate point coordinates of logistics distribution centers

坐标	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
X	867	1 161	1 208	1 672	1 089	1 408	1 312	1 373	889	772
Y	1 000	307	78	383	722	1 006	531	512	971	352

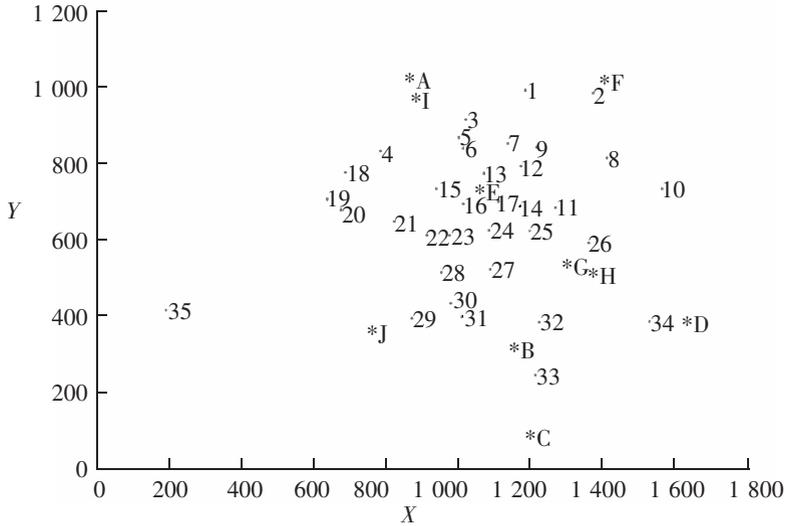


图 3 现有物流配送中心和需求点分布图

Fig.3 Distribution graph of existing logistics distribution centers and demand points

表 2 各物流要素成本
Tab.2 Cost of each logistics factor

点号	运输距离/m	物流成本/(yuan·d ⁻¹)	租金/(yuan·m ² ·d ⁻¹)	占地面积/m ²
A	0	4.5	0.5	70 000
B	591	5	0.7	104 000
C	0	8	0.9	16 800
D	146	2.5	1.3	24 000
E	1 893	2.5	2.6	3 600
F	464	4	1.8	14 400
G	380	2.5	1.5	120 000
H	289	2.5	1.3	1 500 000
I	1 121	7	1	16 200
J	1 270	7	1.3	39 600

按照对选址优化的影响大小,分别对总运输距离、物流成本、租金和占地面积四个影响因素降序排列,并赋值序号 1,2,3 和 4。根据式(3)计算出 w_1, w_2, w_3 和 w_4 分别为 0.48, 0.24, 0.16 和 0.12。最终改进 P-中值选址模型的目标函数如下所示

$$C_{ij}=0.48D_{ij}+0.24L_i+0.16R_i+0.12S_i, (i \in N, j \in M) \tag{5}$$

$$\min C = \sum_{i \in N} C_i \tag{6}$$

4.2 配送中心选址布局优化求解

在本实例中的 10 个配送中心的布局方案中通过迭代算法选出更加合理的布局方案,并确定新方案中

每个配送中心的服务范围。本算法求解模型的具体步骤如下:

第 1 步:令 $k=10$,将 10 个候选点全部选中,以现有配送中心为生长点,画出 Voronoi 图,确定每个配送中心的服务范围,结果如图 4 所示,A、C 两个候选点中没有任何需求点,删除两点后,重新生成 Voronoi 图,这时候候选点集 $P_8=\{B,D,E,F,G,H,I,J\}$,分别计算每个 Voronoi 多边形范围内的总运输距离、物流成本、租金和占地面积。

第 2 步:从 P_8 候选点集中确认一个取走点,具体步骤为:依次将候选点集中的点删除一遍,每次删除 1 个点后重新生成相应的 Voronoi 图,计算每个 Voronoi 多边形范围内的总运输距离、物流成本、租金和占地面积,将数据标准化处理,根据式(1),式(2)分别计算 8 种情况下物流配送总成本费用,计算结果如表 3 所示,删除 I 点后最终的总成本最小,因此 $k=7$ 时的最优取走点为 I 点。

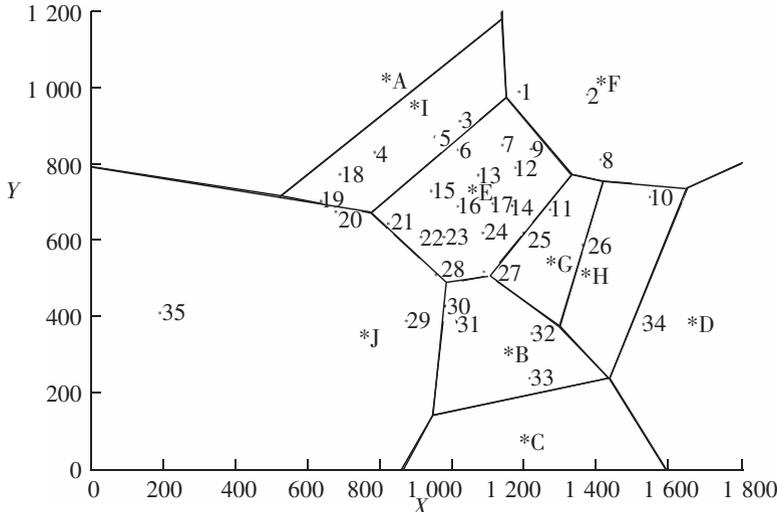


图 4 10 个配送中心候选点服务范围划分

Fig.4 Service range division of ten distribution center candidates

表 3 7 个物流配送中心的成本费用计算表

Tab.3 Cost calculation for seven logistics distribution centers

删除点号	运输距离/m	物流成本/(yuan·d ⁻¹)	租金/(yuan·m ² ·d ⁻¹)	占地面积/m ²	总成本费用/yuan
B	0.185	0.444	1	0.933	0.468
D	0.017	1	0.684	0.986	0.476
E	1	1	0	1	0.840
F	0.265	0.667	0.421	0.993	0.474
G	0.004	1	0.579	0.922	0.445
H	0	1	0.684	0	0.349
I	0.186	0	0.842	0.992	0.343
J	0.288	0	0.684	0.976	0.365

第 3 步:按第 2 步的方法不断进行迭代,分别依次取走 I、J、F、B、H 点,直至得到 $k=3$ 时的最优方案。

第 4 步:计算 $k=2$ 时,通过最短路径分析,每个需求点由距离它最近的配送中心服务,求解 C_n^2 种方案下的选址总费用并比较得到最优解, $k=1$ 时直接求解 n 种方案下的最优解。

第 5 步:将 $k=1\sim n$ 时的 n 种优化方案数据标准化处理后,计算总成本费用,比较得到模型的最终最优解,算法结束。

4.3 配送中心选址布局优化结果

为更好的表现每次迭代后总成本的变化趋势,采用如图5所示的直方图表示不同剩余配送点数情况下的选址总成本费用变化。

通过每次迭代后的总成本趋势变化图可以看出,第5次迭代,即 $P=3$ 时,在D、E、G 3个候选点处建立配送中心时总成本费用最小,且D、E、G 候选点处物流规模较大,具备比较完善的设施和服务,虽然租金较高,却大大缩减了物流运输的距离,提高了运输效率,方案是比较理想的,各配送中心的服务范围如图6所示。

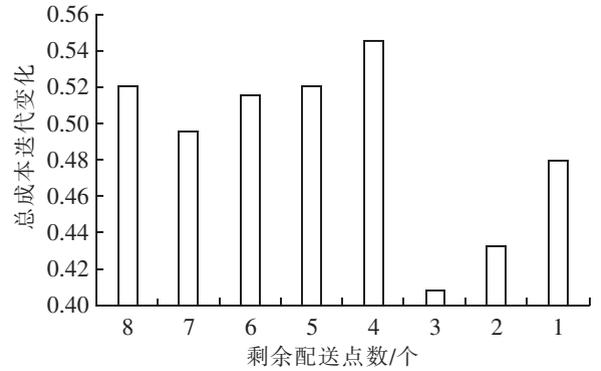


图5 选址总成本

Fig.5 Total cost of location selection

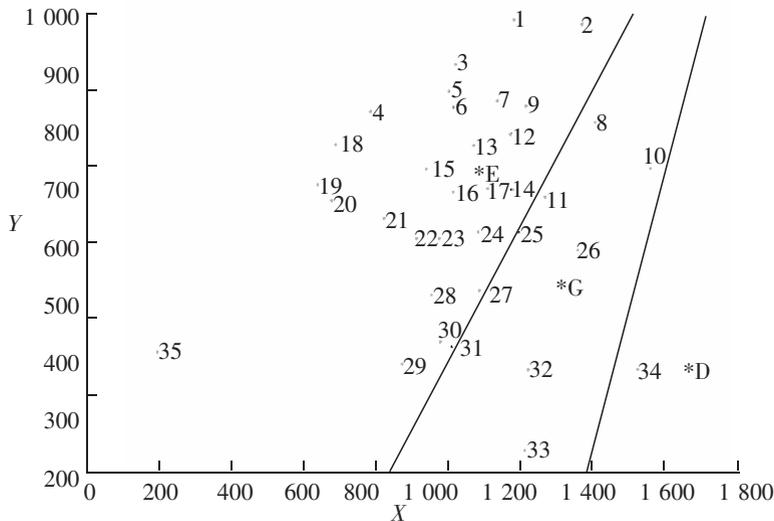


图6 优化后配送中心的服务范围

Fig.6 Service range of the optimized distribution centers

5 结论

随着经济的快速发展,物流运输的压力越来越大,对物流配送中心进行布局优化并确定其服务范围有助于整个城市物流系统的和谐发展。Voronoi 图的特性在设施选址方面存在一定的优势,可以实现合理物流节点服务范围的动态划分;在此基础上,考虑影响物流配送中心选址的多因素参与决策的方法,构建以整个物流系统总成本最小为目标的改进P-中值模型,利用 Matlab 编程对模型进行高效求解,确定整个物流系统的最优节点布局,并确定了优化后各配送中心的服务范围。以南京市进行算例分析,本方法计算效率高,大大减少了物流配送中心选址的总成本,结果合理,模型可行,能实现物流配送中心的选址优化。

参考文献:

- [1] 李利华,符卓,胡正东,等. 基于区间迭代遗传算法的物流节点决策[J]. 计算机应用研究,2012,29(10):3713-3716.
- [2] 孙智源,秦璐,于丽娜,等. 基于 GIS 和 CEM 的资源型城市物流节点选址研究[J]. 物流科技,2009(9):25-27.
- [3] 叶一芄,张小宁. 基于随机运输路径选择的物流中心选址模型[J]. 管理科学学报,2017,20(1):41-52.
- [4] 苑敬云,王玉红,闫永平. 冷链物流中心选址优化模型研究[J]. 现代商贸工业,2018(3):22-23.

- [5] 邱慧芳,郝生跃. 基于引力模型的配送中心服务范围研究[J]. 物流技术,2010(2):82-84.
- [6] 赵海茹,陈玲. 改进 MOPSO 在物流节点选址模型中的应用[J]. 计算机工程与应用,2016,52(12):239-245.
- [7] 张树,朱莲美. 基于层次分析法的煤炭物流节点选址方法研究[J]. 南京理工大学学报,2015,39(3):301-305.
- [8] 闫文涛,覃燕红. 地下物流节点选址的双层规划模型及算法研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(4):870-874.
- [9] 张得志,李双艳. 物流节点动态布局优化模型及其求解算法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(5):96-100.
- [10] EFSTATHIOS BAKOLAS,PANAGIOTIS TSIOTRAS. An optimal algorithm for constructing the weighed voronoi diagram in the plane[J].Pattern Recognition, 201, 17(2): 251-257.
- [11] ARMAN DIDANDEH,BAHRAM SADEGHI BIGHAM. The maximal covering location problem based on voronoi diagram[J].Papers of the Regional Association, 2013(32): 101-118.
- [12] 崔艳,戚鹏程. 基于 GIS 的郑州市公共文化设施空间布局研究[J]. 现代经济信息,2012(7):165-166.
- [13] 施路,崔异. 物流中心服务范围界定方法研究[J]. 铁道运输与经济,2011,33(2):69-73.
- [14] 王伟,封学军. 基于加权 Voronoi 图的连续型物流节点布局优化[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(6):1103-1107.

Research on Logistics Node Location Based on Voronoi Diagram

Zheng Changjiang¹, Dai Ran¹, Zheng Shuqing², Li Rui¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To rationally optimize the location of logistics distribution centers, the related characteristics and application of Voronoi diagram were introduced to realize the dynamic division of the logistics node service range. Considering the influencing factors which affect the logistics node location, and giving the corresponding weight value, this paper established the improved P-median model, and built up the objective function with the minimum total service cost. Combining Voronoi diagram with the improved P-median model, based on dynamic service range division of the logistics node in the Voronoi diagram, the optimization algorithm of the model with Matlab programming was used to solve the optimal node location layout of the whole logistics system through continuous iteration. The research results show that the optimization method of logistics node based on Voronoi diagram is reasonable, which can make the total distribution cost minimum, reduce the logistics cost and improve the logistics efficiency.

Key words: logistics node; location optimization; P-median model; Voronoi diagram