

文章编号:1671-8879(2016)04-0086-09

城市物流网络空间结构集聚扩散演化模型

付江月^{1,2}, 张 锦¹, 陈以衡¹, 陈 刚^{1,2}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 贵州大学 管理学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:以城市物流网络空间结构为研究对象,运用复杂网络方法构建了以经济机制为驱动、网络总成本最小为目标,考虑网络规模动态变化、空间距离限制等条件的拓展加权 BA 模型(无标度网络模型),对其集聚扩散演化进行了研究;并设计了演化算法,利用 MATLAB 进行了仿真试验和分析。研究表明:集聚经济是城市物流网络空间结构集聚形态(集聚演化)的形成机制,集聚不经济是分散、均衡形态(扩散演化)的形成机制;演化中集聚机制的作用更明显;物流节点比通道更能体现集聚扩散演化特征。所构建的模型能够模拟和分析城市物流网络空间结构集聚扩散演化的过程与特征,并揭示经济性演化机制的作用机理。

关键词:交通工程;城市物流空间;演化机制;集聚经济;集聚扩散;加权网络;BA 模型;成本偏好
中图分类号:U491,F252 **文献标志码:**A

Agglomeration and dispersion evolution model for spatial structure of urban logistics network

FU Jiang-yue^{1,2}, ZHANG Jin¹, CHEN Yi-heng¹, CHEN Gang^{1,2}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;
2. School of Management, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Taking spatial structure of urban logistics network as research object, to investigate its agglomeration and dispersion evolution, an extended and weighted BA model was established based on complex network method. The evolution model was driven by economic mechanism and established to minimize the total cost of urban logistics network. The proposed model also took dynamic change of network scale and spatial distance into consideration. Evolutionary algorithm was designed and MATLAB was used to conduct numerical simulation and analysis. The results show that agglomeration economy is the driving force of agglomeration evolution of urban logistics spatial pattern. While agglomeration diseconomy is the driving power for the dispersion (or deconcentration, sprawl) and balance of urban logistics spatial pattern. Effect of agglomeration economy is more obvious in the evolving process, and the logistics nodes can reflect the polarization-sprawl evolution characteristics better than the logistics channels. The constructed model can simulate and analyze the agglomeration and dispersion evolution process and characteristics of urban logistics spatial network structure and to uncover mechanism of economic motive power. 7 figs, 30 refs.

收稿日期:2016-01-20

基金项目:国家社会科学基金项目(11BJL054);四川省软科学计划项目(2014ZR0032);贵州省教育厅人文社会科学研究基地项目(2015JD022)

作者简介:付江月(1986-),女,重庆云阳人,贵州大学讲师,西南交通大学工学博士,E-mail:fujiangyue2783@163.com。

Key words: traffic engineering; urban logistics spatial pattern; evolution mechanism; agglomeration economy; agglomeration and dispersion; weighted network; BA model; cost preference

0 引言

物流节点与物流通道在信息的有机联系下构成城市物流网络,而物流节点与通道在城市地理空间上的组合关系与分布形态,即为城市物流网络的空间结构。研究表明,城市中物流节点(设施)的空间分布具有显著的集聚特征与扩散趋势,也表现出明显的集聚扩散演化规律^[1-5]。在探析集聚扩散演化机理的基础上,将演化机制抽象并建立数学模型模拟城市物流网络空间结构的演化,能够分析演化机制对城市物流网络空间结构集聚扩散的影响与作用,为城市物流网络布局、城市物流设施规划提供科学的分析工具和指向。

在理论探讨城市物流网络空间结构集聚扩散演化机理方面,秦璐等认为城市内部空间结构发展变化是城市物流空间结构演化的基础,城市物流空间结构演化是城市物流功能空间分异的结果,遵循“分散、集聚、再扩散、再集聚”的循环过程,物流节点并非均匀集聚与扩散,表现出与交通运输轴线和城市产业空间耦合发展的规律^[6];严熹对物流节点与通道关联下的演化进行了分析,以城市发展阶段为基础将城市物流演化分为低水平均衡布局、极化集聚式布局、扩展式发展布局和高水平均衡布局 4 个阶段^[7]。现有研究侧重于城市或城市空间集聚扩散演变对城市物流网络空间结构集聚扩散演化的影响,但城市物流活动作为经济活动,其网络空间布局总会服从利润最大化这一经济目标,因而经济效益目标对城市物流网络空间结构集聚扩散至关重要。

在建立模型阐述城市物流网络空间结构集聚扩散演化机理方面,秦璐将城市内部物流空间视为一个复杂开放的巨系统,以自组织理论为基础,运用非平衡统计力学思想建立广义流集聚模型,通过在微观上研究子系统相互作用的过程揭示了城市物流空间结构的宏观特征,说明了其分形机制^[8]。这种方法本质上是一种模式识别方法,需要借助其他方法来分析演化特征以及动力机制的作用,而复杂网络理论与模型将刻画结构特征、揭示演化机制、优化物流网络等集于一体,既能直观地认识城市物流网络空间结构的演化机理,又能分析演化机制或影响因素的作用,还能有效衔接城市物流网络的优化研究,

其在物流网络的结构特征、网络演化与优化等方面的应用也越来越多,在城市物流网络的演化方面也有所涉及,但目前尚无研究运用复杂网络方法来阐述城市物流网络空间结构集聚扩散演化^[9-14]。

鉴于此,本文以城市物流网络空间结构为研究对象,首先探析集聚扩散演化的经济机理,包括演化形式、规律、过程以及动力机制;然后在分析其复杂网络特征的基础上,将经济机理进行抽象,建立复杂网络演化模型,设计相应的演化算法来模拟集聚扩散演化的过程;最后通过仿真试验分析证明模型的有效性,并分析动力机制在城市物流网络空间结构演化过程中的作用。

1 演化机理

集聚(或极化)是物流活动在城市地理空间上特定区域的集中,是城市物流设施的重要特征;扩散是物流设施从城市中心区移向外围郊区的运动过程,已成为城市物流设施的重要空间格局和分布特征。城市物流网络空间结构的演化并不是简单的集聚和(或)扩散(郊区化),而是更加复杂的过程^[15]。可简要归纳为:在专业化分工、再分工等多种因素的作用下,城市物流网络空间结构最初为分散分布,然后经集聚过程形成空间集中分布,再经集聚、扩散的循环过程,经历从“集中到再集中”的循环往复,如图 1 所示。

最初,物流活动潜隐于城市社会经济活动中,物流资源、设施分散布局在城市空间和社会经济活动

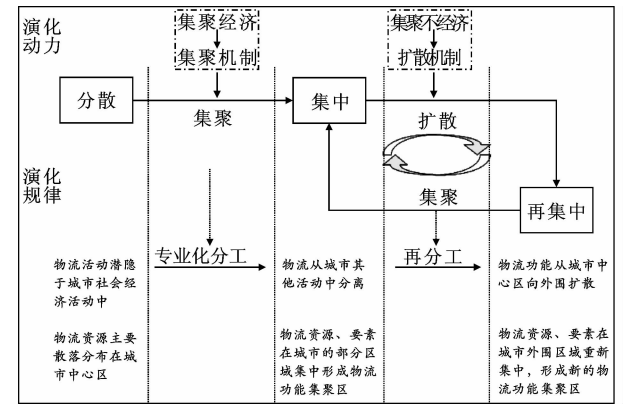


图 1 城市物流网络空间结构集聚扩散演化经济机理
Fig. 1 Agglomeration-dispersion evolution economic mechanism of urban logistics network spatial structure

的多个部门,物流功能单一,主要为运输和仓储,且通常只服务于隶属部门。随着专业化分工和城市社会经济的发展,物流活动逐渐从城市经济活动中分离出来,物流服务功能变得更加专业化。城市物流资源、要素等在具有区位、经济优势的区域聚集,能够获得良好的经济效益、改善物流效率,并能减少环境影响,在集聚区内的物流企业相较于单个物流企业具有更低的成本、更突出的服务能力^[16]。这种集聚经济效益便是物流活动与资源在城市空间上不断集中的根本动力。集聚产生的经济效益主要包括:①规模经济,由于规模扩大而导致的单位运输费用和单位处理成本降低;②节约效应,由于集聚所带来的城市物流网络建设、经营和运作、信息与交流等成本减少。但并不是任意或者无限程度的集聚都能获得这种经济效益。当城市社会经济、再分工进一步发展,城市化进程加快,城市物流需求迅猛增长;当物流资源与活动的集聚规模过大时,就不能够再继续获得集聚经济效益。当集聚不再经济时,为了降低成本,同时减小其对城市交通、环境等的影响,物流资源、设施等在城市空间上扩散,主要表现为迁向城市郊区,城市物流网络空间结构呈扩散(郊区化)态势。集聚不经济也体现在 2 个方面:一是当集聚规模超过限度时,产生了规模负效益;二是由于物流服务产品、服务市场、环境资源、基础设施等拥挤效应的凸显,物流活动平均成本增长。

有研究指出,城市物流空间结构演化是城市物流功能空间分异的结果,遵循“分散、集聚、再扩散、再集聚”的循环过程,演化形式为城市物流节点空间变迁^[6]。借鉴集聚经济理论相关研究,本文认为:①集聚、扩散是城市物流网络空间结构演化的 2 种基本表现形式,两者对立统一,在城市物流网络空间结构发展演化的全过程中相互促进、相互制约;②集聚扩散演化是城市物流网络不断追求集聚经济、避免集聚不经济的结果,集聚经济、集聚不经济分别为集聚演化、扩散演化的经济动力,可称为集聚机制、扩散机制,它们在演化过程中体现为城市物流网络单位(或平均)成本的减小或增加。

2 演化模型

2.1 复杂网络特征分析

城市物流网络空间结构具有如下复杂网络的典型特征。

(1)节点数目较多,组成要素具有多样性和异质性。城市中的物流节点和通道数量大、类型多样,不

同节点的功能、处理能力、服务对象、服务范围、技术水平等各不相同,不同通道的功能、运输与配送能力、交通状况等也不相同。

(2)网络结构具有复杂性、多层次性和非均衡性^[16-17]。不同类型物流节点、通道的功能、空间位置不同,它们之间的联系程度、频率也不同,而且物流节点数量大、类型多,节点之间的连接形式多样、关系复杂且随时间变化,节点之间的连接具有不同的权重和方向,节点和通道在城市地理空间上的分布还具有非均质性。

(3)具有动态时空演化性。物流功能从单一功能发展更替为专业化、多样化功能,结构动态演变表现为物流节点、通道数目以及它们处理能力(流量)会增加或减少,物流节点与通道的连接关系变化等。

2.2 模型选择

运用复杂网络方法对城市物流网络空间结构集聚扩散演化进行模拟和分析,构建的模型应当能够体现演化机制的影响,能全面反映网络中节点和边的各种变化机制与动态组合,还要能够反映网络中的客观限制,如地理位置和空间距离等。实践与经验表明,城市中少数枢纽节点拥有大量的连接,而大多数节点只有很少量的连接,城市物流网络空间结构可称为无标度网络。Barabasi 等提出了 BA 模型^[18],将无标度网络的演化机制归纳为增长和择优连接特性,但这 2 个演化机制对解释现实网络的演化来说过于简单,近年来学者们提出了许多改进模型或扩展模型^[19-21]。由于单纯的拓扑结构可能忽略网络的重要特征,节点之间的关系和相互作用强度对网络演化有重要影响^[22]。加权网络定义了节点权重和边权,可以表现节点的重要程度和节点之间关系的强弱程度,学者们也提出了一系列加权网络模型来解释实际网络的演化^[23-25]。

用图 $G=(V, E)$ 来描述城市物流网络空间结构, V 是节点(即物流节点)的集合, E 是边(即物流通道)的集合。考虑到城市中各物流节点的处理能力不同、各物流通道的运输能力不同,故认为 $G=(V, E)$ 中的节点和边都存在权重;又由于城市物流网络空间结构集聚扩散演化过程具体表现为物流节点和通道的数量与位置在城市空间上的集中与分散变化,节点与通道上物流量的集中与分散状态变化等,故将节点与通道上的物流量视为节点权重和边权。暂不考虑物流量的流向问题,那么可将城市物流网络空间结构抽象为加权无向网络。

由上述经济机理与复杂网络属性的分析可知,

城市物流网络空间结构演化具有以下基本特征:①网络规模增长,物流节点、通道的数量和规模扩大;②网络规模动态变化,节点与通道的数量、能力(即权重)有增有减;③集聚程度高的节点、通道空间位置变迁;④节点连接和通道选择具有择优特性;⑤演化目标为网络总成本最小。综上,以成本最小为演化目标,考虑网络的规模增长、结构与规模动态变化以及择优连接等特征,建立拓展的加权 BA 模型来模拟城市物流网络空间结构的集聚扩散演化。

2.3 模型假设

集聚经济和集聚不经济共同作用于城市物流网络空间结构的集聚扩散,它们在演化过程中表现为城市物流网络单位物流成本的增减。将城市物流网络成本分为节点成本和通道成本,在成本函数中对2种机制进行统一考虑。节点单位成本 $C_n(s_i)$ 和通道单位成本 $C_e(f_{ij})$ 为^[26]

$$C_n(s_i) = \lambda \frac{\theta}{s_i} + (1-\lambda) \left(\frac{s_i}{s_0} \right)^4 \quad (1)$$

$$C_e(f_{ij}) = \lambda f_{ij}^\gamma + (1-\lambda) C_e^0 \alpha \left(\frac{f_{ij}}{V_{ij}} \right)^\beta \quad (2)$$

式中: $s_i = \sum_j a_{ij} f_{ij}$ 为节点强度,即点权,表示物流节点的物流量处理能力, a_{ij} 为邻接矩阵中的元素,当 i, j 两点连接时, $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$; s_0 为点强度上限; λ 为集聚扩散度(即集聚经济权重), $0 \leq \lambda \leq 1$, 取1时集聚度最大,取0时扩散度最大; f_{ij} 为边权,表示通道上的物流量规模; θ 为常数; C_e^0 为边(通道)的平均单位成本; γ 为通道规模经济指数,通常取0.5; α, β 为修正系数,参考美国联邦公路局 BPR 函数; V_{ij} 为通道能力上限。

物流节点与通道处于城市具有限制性的地域范围内,节点的位置及相互之间的距离对空间结构的演化也有重要影响,如新节点加入网络时需要考虑与已有节点之间的空间距离,与已有节点距离较近意味着建立连接时可获得更多的成本优势,但如果距离太近处于其他节点的辐射范围中,新节点的生长会受到限制,因而节点之间的物理距离(欧式距离)也是决定网络中节点连接的重要因素。新节点加入网络时需满足 $d_{\min} \leq d_{ij} \leq d_{\max}$, $j = 1, 2, \dots, n$ ^[27], d_{ij} 为新节点 i 加入网络时与已有节点 j 之间的距离, n 为此时网络中节点的个数。令节点 i, j 坐标分别为 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) , 则节点 i, j 的距离为

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

在上述考虑的基础上,模型假设如下:

(1)既考虑新节点的加入和成长,也考虑旧节点

的衰退;

(2)新节点加入网络进行连接时,既考虑成本又考虑距离,倾向于连接单位成本较小的节点,同时需满足距离要求,单位成本较小的边更有可能增加流量改变权重;

(3)节点和通道均具有规模上限,节点强度超过极限时,不再接受新节点的连接,单位成本高的点发生衰退。

2.4 模型构建

2.4.1 初始状态

将城市物流网络空间结构的初始状态抽象为 N_0 个节点、 e_0 条边的随机网络,各节点坐标为 (x, y) , 每条边初始权重为 f_0 , 节点与通道的规模上限分别为 s_0, V_{ij} 。

2.4.2 节点增长

每个时间间隔 t , 随机生成 N_1 个度为 m 的新节点,为每个新节点分配坐标 (x, y) 。每个新节点与 m 个旧节点相连,加入 m 条边,这 m 条边初始权重为 f_0 , 新节点择优连接概率为

$$\prod_{n-i} [C_n(s_i), d_{ij}, a, b] = \frac{[1/C_n(s_i)]^a d_m^b}{\sum_j [1/(C_n(s_j))]^a d_m^b} \quad (4)$$

式中: $a \geq 0; b \geq 0; C_n(s_i), C_n(s_j)$ 为节点单位成本; d_m, d_{jm} 为节点间距离。

2.4.3 节点衰退

选择网络中 $s_i \geq s_0$ 的所有节点,以概率 p_1 减去与该节点相连的所有边的权重,减少量为 w_1 。

2.4.4 边权演化

除了由节点衰退引起的边权减少外,边权的演化还包括由新节点加入引起的边权增加、旧节点之间的边重连。每个时间间隔 t , 新节点加入后引起网络边权变化,单位成本较小的边有更大的概率增加流量 w_2 , 变化规则为

$$f_{ij} = \begin{cases} f_{ij} + w_2 & \text{概率为 } p_2 \\ f_{ij} & \text{概率为 } 1 - p_2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表示边 e_{ij} 单位成本较低的概率为 p_2 , 即这条边增加流量的概率为 p_2 , 流量不变化的概率为 $1 - p_2$ 。边权增加概率 p_2 是通道单位成本的函数,表示为

$$p_2 = \frac{1/C_e(f_{ij})}{\sum_k \sum_l 1/C_e(f_{kl})} \quad (6)$$

式中: $i, j, k, l \in N$ 。

网络中单位成本较小的旧节点之间也存在边权

的增长^[28],以概率 p_3 在网络中选择 N_2 个旧节点,形成 $N_2/2$ 个节点对,按概率 p_2 为这些边增加权重 w_3 ,概率 p_3 为

$$p_3 = \frac{1/C_n(s_i)}{\sum_j 1/C_n(s_j)} \quad (7)$$

经过时间 T 后,最终形成了节点规模为 N 的网络。

2.5 演化算法

根据演化模型,设计演化算法步骤如下:

(1)初始时刻,生成具有个 N_0 个节点、 e_0 条边的随机网络,在边长为 L 的正方形区域内随机为每个节点分配二维空间坐标 (x, y) ,任意节点之间的距离满足 $d_{\min} \leq d_{ij} \leq d_{\max}$,为每条边赋予初始权重 f_0 ,节点规模、通道流量上限分别为 s_0 、 V_{ij} ,初始网络中边无重连;

(2)每个时间步,检查网络中所有节点的点强度 s_i ,选出所有 $s_i > s_0$ 的节点,以概率 p_1 减少与节点 i 相连的所有边的流量,减少量为 w_1 ;

(3)每个时间步,产生 N_1 个新节点,每个新节点带有 m 条边,每条边初始权重 f_0 ,新节点按照式(4)与网络中旧节点相连;

(4)每个时间步,网络中所有边的权重以式(5)的规则发生变化,变化概率为式(6);

(5)每个时间步,按式(7)在网络中选择 N_2 个旧节点,形成 $N_2/2$ 个节点对,按式(6)为这些节点对的边增加流量 w_3 ;

(6)重复步骤(2)~(5),直到节点数达到 N 。

3 仿真分析

根据研究需要,选取节点度分布、节点强度分布、边权分布等 3 个复杂网络特征参数,以及分布非均衡系数与均衡极化指数 2 个指标,来刻画分析城市物流网络空间结构的集聚扩散特征与规律,以达到以下 2 个目的:①证明模型的有效性和可行性;②揭示集聚机制、扩散机制在演化中的作用^[29-30]。由于影响演化的参数较多,难以得到模型的解析解,因此采用 MATLAB 对模型进行数值仿真。参数设定为 $N = 2\ 000$, $s_0 = 150$, $N_0 = 10$, $m = 2$, $N_1 = 1$, $N_2 = 4$, $L = 3\ 000$, $w_1 = w_2 = w_3 = 1$, λ 分别取 1、0.5、0,初始边权 f_0 在 $[1, 2]$ 间均匀分布。为消除仿真过程中随机因素的影响,对每个仿真过程都进行 20 次独立仿真,再取平均值作为结果。

3.1 演化过程模拟

借鉴 GIS 相关思想,将模型模拟的城市物流网络空间结构集聚扩散演化过程可视化。取 $\lambda = 0.5$,

将边长 $L = 3\ 000$ 的城市空间划分为 30×30 个方格,计算每个方格中所有点的点强度之和,以颜色作为区分,累计点强度由高至低,对应方格颜色由深变浅,如图 2 所示。

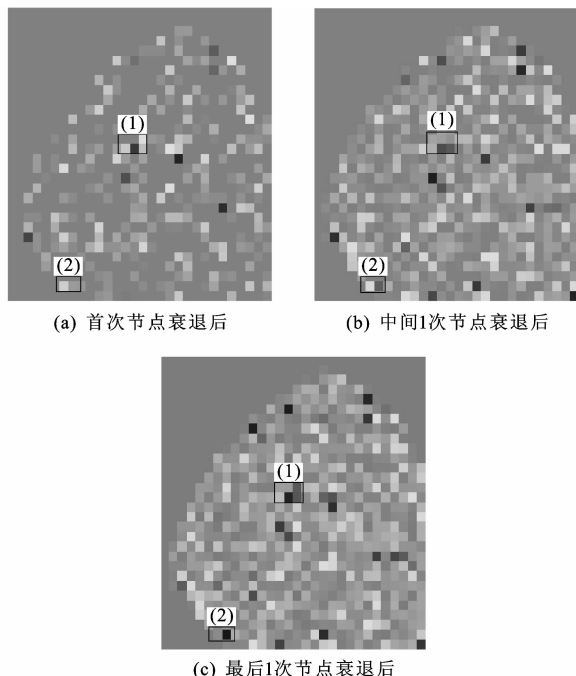


图 2 城市物流网络集聚扩散演化过程

Fig. 2 Agglomeration and dispersion evolution processes of urban logistics network

图 2(a)、(b)、(c)分别代表第 1 次、中间 1 次、最后 1 次发生节点衰退后城市物流网络空间结构的状态,可以看出,城市中的物流集聚中心发生了明显的扩散。图 2(a)中位置(1)的集聚中心点向其周围 2 个节点扩散,也发生了明显的集聚演化,新集聚中心逐渐形成,图 2(a)中位置(2)的 2 个节点集聚强度逐渐增强,最终发展成新的物流集聚中心。

3.2 分布非均衡系数与均衡-极化指数

3.2.1 分布非均衡系数

分布非均衡系数 δ 可以反映城市物流网络中物流流量在节点上分布的非均衡程度,计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n}} \quad (8)$$

式中: V_i 为节点 i 的物流量占整个城市物流网络物流流量的分布百分比; \bar{V} 为分布百分比的平均值; n 为网络中节点数。

δ 越大,说明物流量越集中在少数节点,即网络中物流量分布越不均衡,网络的集聚程度越高。分布非均衡系数除了能描述城市物流网络中物流量分布非均衡程度外,还能描述城市物流网络空间结构的

集聚程度随时间演变的趋势和特征。分布非均衡系数 δ 变化趋势如图3所示。

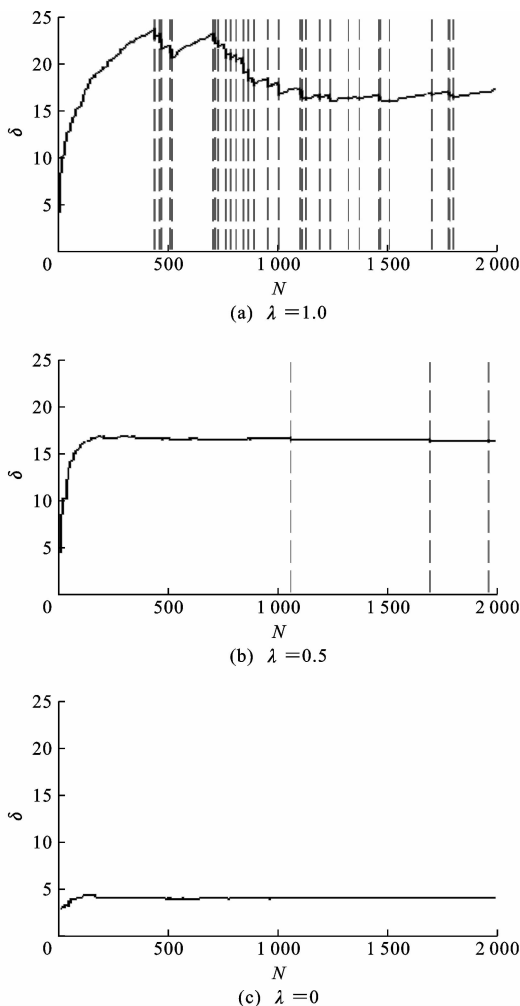


图3 分布非均衡系数 δ 随时间变化趋势

Fig. 3 Variations trends of unbalanced distribution coefficient with time

图3(a)、(b)、(c)为 λ 分别为 1、0.5、0 这3种情况下的分布非均衡系数变化曲线,图3(a)、(b)中虚线标出了 λ 为 1、0.5 演化过程中发生节点衰退的时刻。从图3中可以看出,分布非均衡系数 δ 曲线呈锯齿状,说明城市物流网络空间结构在发展过程中经历了从最初分散状态,然后集聚演化与扩散演化不断循环的演化过程。图3还表明, $\lambda=1$ 时,经过多次剧烈变化,城市物流网络中的物流量分布走向不均衡,网络集聚程度很高; $\lambda=0$ 时,经过一定调整,城市物流网络物流量分布趋向均衡,网络分散程度较高。

3.2.2 均衡-极化指数

采用样方分析法,将1组正方格置于研究区域,计算均衡-极化指数(balanced-polarization index, BPI)可以测度城市物流网络中物流节点空间位置

分布的集中程度,计算公式为

$$I_{\text{BPI}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \left| \frac{N_i}{N_{\Delta t}} - \frac{1}{M} \right| \quad (9)$$

式中: I_{BPI} 为BPI的计算参数; Δt 为某1个时间段; M 为样方单元数; N_i 为第 i 个样方单元内的物流节点数; $N_{\Delta t}$ 为该时间段城市总物流节点数。

$\text{BPI} \in (0, 1)$, 趋近于0说明物流节点在各个样方单元内平均分布,网络分散程度高;趋近于1说明物流节点只分布在少数几个样方单元内,网络集聚程度高。

图4为 λ 取不同值时均衡-极化指数BPI随时间变化的趋势。 $\lambda \neq 0$ 时, BPI最终稳定在0.5左右,说明集聚经济存在时,城市物流网络中节点在空间上总体处于集中分布状态,但集聚强度减弱,最终处于一个集聚度较大的状态; $\lambda=0$ 时, BPI最终小于0.5,说明只有扩散机制作用时,城市物流节点的空间分布将最终处于较为分散的状态。

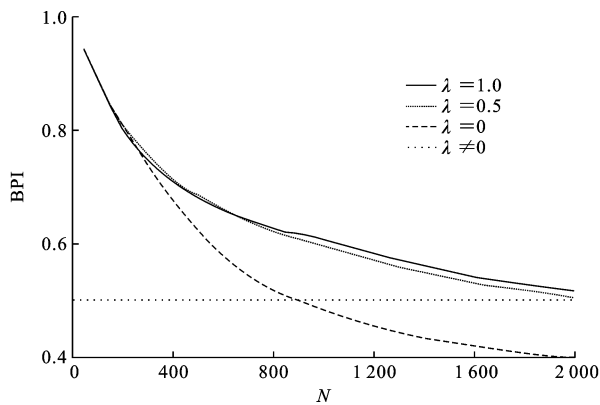


图4 均衡极化指数BPI

Fig. 4 Balanced-polarization index BPI

演化过程的模拟以及分布非均衡系数、均衡-极化指数的分析表明,模型结果和结论符合实践经验与前文所总结的演化规律,所构建的模型能够模拟城市物流网络的集聚扩散演化过程与特征。

3.3 点度与点强度分布

节点 i 的度 k_i 定义为与该节点相连的其他节点数目,可表示为 $k_i = \sum_j a_{ij} = \sum_i a_{ji}$, 当点 i, j 连接时 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。节点度分布 $P(k)$ 描述了1个随机选择的节点的度刚好为 k 的概率。 λ 变化时城市物流网络空间结构的节点度分布如下页图5所示。

图5中, $\lambda=0$ 时,节点度分布近似为泊松分布, $\lambda=1/0.5$ 时,节点度分布则表现为分段幂律分布,可表示为

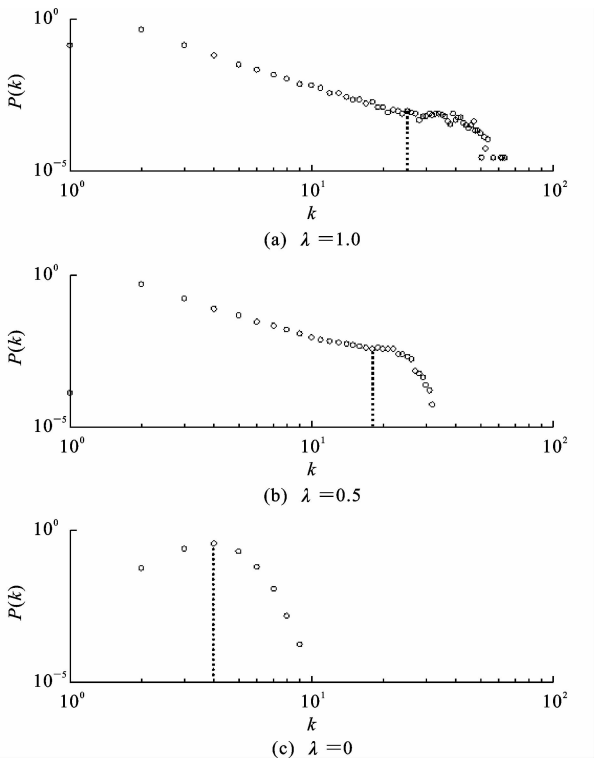


图5 城市物流网络空间结构节点度分布 $P(k)$

Fig. 5 Nodes' degree distributions $P(k)$ of urban logistics network spatial structure

$$P(k) = \begin{cases} k^{-\gamma_1} & k \leq k_0 \\ k^{-\gamma_2} & k > k_0 \end{cases} \quad (10)$$

$\lambda = 1$ 时两段幂律分布的幂指数分别为 1.51、2.27; $\lambda = 0.5$ 时两段幂律分布的幂指数分别为 1.70、2.77。结果表明: $\lambda \neq 0$ 时, 网络中节点的连接能力具有无标度特征, 从节点连接情况来看, 网络集聚程度较高; 而 $\lambda = 0$ 时, 度数中等的节点占比最大, 且多数节点的度数在某个特定值左右, 此时网络结构较为均衡。

节点 i 的强度 s_i 定义为与该节点相连接边所有权重之和, $s_i = \sum a_{ij} f_{ij}$, f_{ij} 为边 (i, j) 上的权重。在城市物流网络中, 边权 f_{ij} 为通过物流通道 (i, j) 上的物流流量大小, 点强度 s_i 为所有流入节点 i 的物流流量之和。点强度分布 $P(s)$ 描述 1 个节点的强度恰好为 s 的概率, λ 变化时城市物流网络空间结构节点强度分布如图 6 所示。

图 6 中, 节点强度分布在 $\lambda = 1/0.5$ 时表现出明显的幂律分布规律, 幂律指数分别为 1.89、2.01, 在 $\lambda = 0$ 时则近似为泊松分布, 说明 $\lambda \neq 0$ 时物流节点中物流量的分布具有无标度特征, 从物流量分布来看, 网络集聚程度高; 而 $\lambda = 0$ 时, 物流量在整个网络中分布较为均衡。

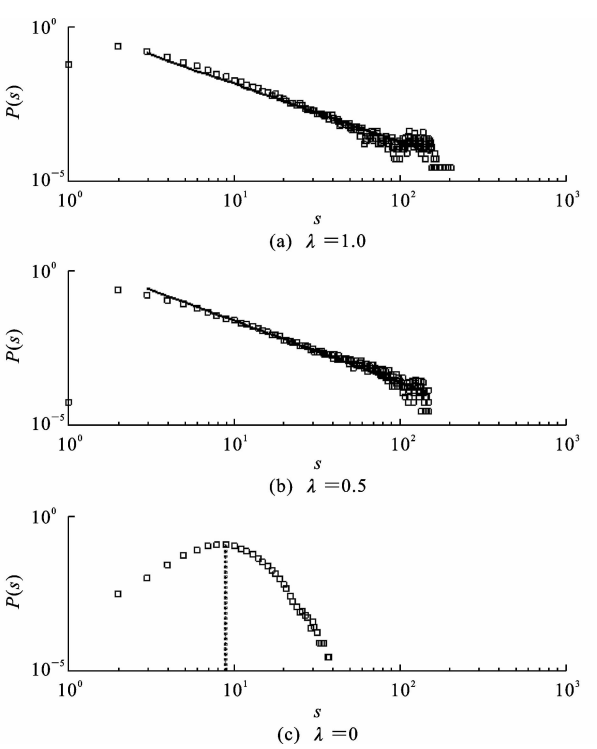


图6 城市物流网络空间结构节点强度分布 $P(s)$

Fig. 6 Nodes' strength distributions $P(s)$ of urban logistics network spatial structure

综合图 5 和图 6 可知: ① λ 从 1 到 0 变化时, 城市物流网络空间结构的集聚程度(即非均衡性)从强到弱; ② $\lambda \neq 0$ 时, 城市物流网络节点度分布服从分段幂律分布, 节点强度分布服从幂律分布, 说明集聚机制是网络集聚形态的形成机制; $\lambda = 0$ 时, 节点度分布与强度分布近似为泊松分布, 说明扩散机制是城市物流网络空间结构分散、均衡形态的形成机制; ③ $\lambda = 1$ 的幂律指数小于 $\lambda = 0.5$ 时的幂律指数, 说明集聚机制与扩散机制共同作用时, 相较于只有集聚机制作用时, 网络中度或者强度大的节点所占比例减小, 网络结构相对均衡; $\lambda = 0.5$ 时网络具有无标度特征, 而 $\lambda = 0$ 时则无, 说明在演化中集聚机制的作用更明显, 这是城市物流网络空间结构形成多中心集聚的原因, 即 2 种机制共同作用下城市物流网络空间结构最终处于一个集聚度较大的状态。

3.4 边权分布

边权分布 $P(w)$ 刻画了城市物流通道上的流量分布情况, 如下页图 7 所示。

图 7 中 $\lambda \neq 0$ 时, 边权分布虽然并未像节点度与强度分布那样表现出明显的无标度特征, 但仍一定程度地呈现少量通道的流量较大, 大量通道的流量较小的物流量分布状态。可知反映通道能力的边权

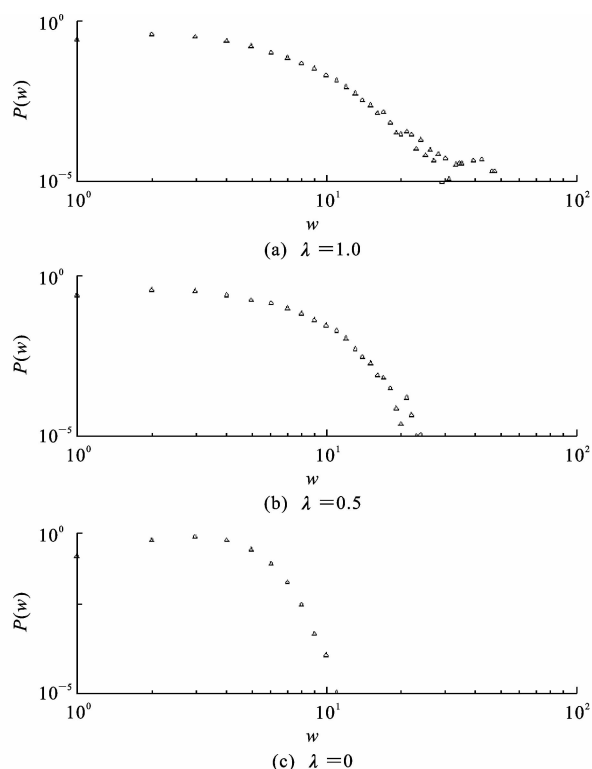


图7 城市物流网络空间结构边权分布 $P(w)$

Fig.7 Edge weights' distributions $P(w)$ of urban logistics network spatial structure

分布(图7),与反映节点连通能力的度分布(图5)、反映节点物流量处理规模的强度分布(图6)相比,演化特征相对不明显,这也说明物流节点更能体现城市物流网络空间结构的集聚扩散特征和规律,通道反映集聚程度和特征的能力相对要弱一些。

4 结 语

(1)集聚、扩散是城市物流网络空间结构演化的2种基本表现形式,两者对立统一,在城市物流网络空间结构发展演进的全过程中相互促进、互相制约;追求集聚经济、避免集聚不经济是城市物流网络空间结构集聚扩散演化的经济性动力机制。

(2)拓展的加权BA模型能够仿真城市物流网络空间结构的集聚扩散演化,所构建的模型对于模拟分析城市物流网络空间结构集聚扩散演化的机理、特征等具有一定的适用性。

(3)集聚机制(集聚经济)是城市物流网络空间结构集聚形态的形成机制,扩散机制(集聚不经济)是其分散、均衡形态的形成机制;演化中集聚机制的作用更明显,这也是城市物流网络空间结构在2种机制共同作用下最终处于一个集聚度较大的状态的原因;物流节点比通道更能体现城市物流网络空间结构的集聚扩散演化规律与特征。

(4)在数据充分的情况下,利用复杂网络方法建立实际城市的演化模型,模拟其物流网络的发展变化,可为城市物流网络布局、物流设施规划提供比较科学的分析工具和方向性的指向。还需根据不同城市的实际情况,进一步开展有针对性的参数、变量方面的研究。

参考文献:

References:

- [1] GILLI F. Sprawl or reagglomeration? the dynamics of employment deconcentration and industrial transformation in greater Paris[J]. Urban Studies, 2009, 46(7):1385-1420.
- [2] DABLANC L, ROSS C. Atlanta: a mega logistics center in the piedmont Atlantic megaregion (PAM)[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 24(3):432-442.
- [3] SAVY M. Logistique et territoire [J]. Espace Géographique, 1993, 22(3):210-218.
- [4] DABLANC L, RAKOTONARIVO D. The impacts of logistics sprawl: how does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it? [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2010, 2(3):6087-6096.
- [5] 韩增林, 郭建科. 现代物流业影响城市空间结构机理分析[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(4):61-65.
HAN Zeng-lin, GUO Jian-ke. Analysis on influence mechanism of modern logistics industry on urban spatial structure[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(4):61-65. (in Chinese)
- [6] 秦璐, 刘凯. 城市物流空间结构演化机理研究[J]. 中国流通经济, 2011, 25(6):30-35.
QIN Lu, LIU Kai. On the evolution mechanism of urban logistics spatial structure[J]. China Business and Market, 2011, 25(6):30-35. (in Chinese)
- [7] 严熹. 城市物流演化因素分析及阶段初步探讨[J]. 四川建筑, 2013, 33(3):16-18, 21.
YAN Xi. Preliminary discussion on evolution factors and stages for urban logistics[J]. Sichuan Architecture, 2013, 33(3):16-18, 21. (in Chinese)
- [8] 秦璐. 城市物流空间结构特征及演化理论研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
QIN Lu. Study on the characteristics and evolution theory of urban logistics spatial structure[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [9] 张旭凤, 张永安. 物流配送网络的无标度网络特征研究[J]. 物流技术, 2011(7):97-100.
ZHANG Xu-feng, ZHANG Yong-an. Analysis of characteristics of logistics scale-free distribution net-

- work[J]. Logistics Technology, 2011(7): 97-100. (in Chinese)
- [10] 陈国荣, 鄢 萍, 彭 军, 等. 一种基于成长的物流网络建模方法[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 24-29, 37.
CHEN Guo-rong, YAN Ping, PENG Jun, et al. A growth-based modeling method of logistics network[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(5): 24-29, 37. (in Chinese)
- [11] 杨光华. 区域物流网络结构的演化机理与优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
YANG Guang-hua. Study on the evolution mechanism and optimization of regional logistics network structure[D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [12] FU J Y, CHEN Y H, CHEN G. Growth evolution model of urban logistics network driven by cost and distance[C]//ZHANG J, ZHANG X Q, YI P, et al. ICLEM 2014: System Planning, Supply Chain Management, and Safety. Reston: ASCE, 2014: 947-953.
- [13] 李国旗. 具有多属性特征的城市物流设施布局优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LI Guo-qi. Study on the layout optimization of urban logistics infrastructures of multi-attribute characteristics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [14] 支 燕. 物流产业集聚的竞争优势研究[J]. 经济与管理研究, 2005(3): 39-42.
ZHI Yan. Competition advantage research of logistics industry agglomeration[J]. Research on Economics and Management, 2005(3): 39-42. (in Chinese)
- [15] CIDELL J. Concentration and decentralization: the new geography of freight distribution in US metropolitan areas[J]. Journal of Transport Geography, 2010, 18(3): 363-371.
- [16] 董微微, 李北伟. 创新集群的形成机理研究——基于复杂网络视角[J]. 科技与经济, 2015, 28(1): 22-26.
DONG Wei-wei, LI Bei-wei. Research on the formation mechanism of innovation cluster from the view of complex network[J]. Science & Technology and Economy, 2015, 28(1): 22-26. (in Chinese)
- [17] 汪小帆, 李 翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG Xiao-fan, LI Xiang, CHEN Guan-rong. Complex network: theory and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [18] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [19] LI X, CHEN G R. A local-world evolving network model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 328(1/2): 274-286.
- [20] BIANCONI G, BARABASI A L. Bose-Einstein condensation in complex networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(24): 5632-5635.
- [21] HOLME P, KIM B J. Growing scale-free networks with tunable clustering[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2002, 65(2): 95-129.
- [22] 汪秉宏, 王文旭, 周 涛. 交通流驱动的含权网络[J]. 物理, 2006, 35(4): 304-310.
WANG Bing-hong, WANG Wen-xu, ZHOU Tao. A weighted complex network model driven by traffic flow[J]. Physics, 2006, 35(4): 304-310. (in Chinese)
- [23] ANTAL T, KRAPIVSKY P L. Weight-driven growing networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2005, 71(2): 199-201.
- [24] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A. Weighted evolving networks: coupling topology and weight dynamics[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(22): 1-4.
- [25] DANILA B, YU Y, MARSH J A, et al. Optimal transport on complex networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2006, 74(4): 159-163.
- [26] 胡一弘, 朱道立, 李 阳, 等. 成本驱动的加权网络演变模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2009, 6(2): 26-32.
HU Yi-hong, ZHU Dao-li, LI Yang, et al. Cost-driven weighted complex networks evolution model[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2009, 6(2): 26-32. (in Chinese)
- [27] 张 怡, 熊 杰, 冯 春. 基于复杂网络的供应链网络鲁棒性分析[J]. 计算机仿真, 2012, 29(11): 370-373.
ZHANG Yi, XIONG Jie, FENG Chun. Robustness analysis of supply chain network based on complex networks[J]. Computer Simulation, 2012, 29(11): 370-373. (in Chinese)
- [28] WANG W X, WANG B H, HU B, et al. General dynamics of topology and traffic on weighted technological networks[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(18): 1-4.
- [29] 杨光华, 邹 敏. 区域物流网络结构演化分析与实证[J]. 物流科技, 2010(8): 40-42, 107.
YANG Guang-hua, ZOU Min. The evolution analysis and relevant empirical of regional logistics network structure[J]. Logistics Sci-Tech, 2010(8): 40-42, 107. (in Chinese)
- [30] 曹卫东. 城市物流企业区位分布的空间格局及其演化——以苏州市为例[J]. 地理研究, 2011, 30(11): 1997-2007.
CAO Wei-dong. Spatial pattern and location evolution of urban logistics enterprises: taking Suzhou as an example[J]. Geographical Research, 2011, 30(11): 1997-2007. (in Chinese)