

区域城镇点-轴系统空间结构的分形模型

蒙莉娜¹, 郑新奇^{1,2}, 赵璐¹, 李志建¹, 杨鑫¹

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083)

摘 要:点-轴系统是我国区域城镇空间结构的主要模式之一。探索城镇点-轴系统空间结构,进而揭示其数理本质,是进行地理空间优化的理论基础。文章从分形理论出发,构建点-轴系统分形模型,明确该模型的地理意义,以此刻画点-轴系统的空间结构。利用 GIS 软件开发了点-轴系统分形模型计算工具。以济南市城镇-交通系统为例,在 GIS 数据环境下计算其分形模型参数,研究结果发现: 区域点-轴系统发育到一定阶段的确呈现分形性质,点-轴系统分形模型可以有效地反映点-轴系统空间结构形态; 无标度性、分形、有序性是地理空间的不同状态,推论得出随着点-轴系统的发展,其空间结构也经历着无序→无标度网络→分形结构→有序→更为复杂的无序的演进过程; 济南市城镇-交通系统已经形成点-轴系统的雏形,城镇点-轴系统处于发展阶段。

关 键 词:区域城镇体系;点-轴系统理论;点-轴系统分形模型;空间结构;分维;济南市

1 引言

区域城镇空间结构是学术界长期关注的热点问题之一^[1-3]。城镇作为人类活动的载体及其集聚形态的反映,其空间结构的优劣关系到区域的可持续发展^[4]。从 1932 年 W. Christaller 提出的中心地理论到 1984 年陆大道提出的点-轴系统理论,再到最近几年的城市空间结构复杂性研究,学者们发表了很有见地的成果^[5-9]。Batty 和 Longley 首先提出城市结构的分形模拟,并定义了用于描述城市结构的边界维数^[10]。Allen 和 Prigogine 等基于耗散结构理论和 Bénard 元胞模拟生成 Christaller - Lösch 中心地空间图式,并发展了若干模型处理城市内部标度及城市空间体系问题^[11-12]。Frankhauser 以德国为中心,对世界主要城市的空间结构进行分维实测,分析后提出这些城市结构表现了某种自相似性,即一个相当紧凑的中心,以及沿着交通轴线延伸出树枝状的城镇体系^[13]。这与区域城镇的点-轴系统空间结构相一致。随后,White 和 Engelen 等利用元胞自动机方法研究分形城市空间形态,成功模拟了城市土地利用图式的时空演化^[14]。此后,随着复杂性科学的兴起,德国学者 Helbing 在《Nature》上发表关于人

类徒步移动路径选择的现实模拟论文,推论区域中交通网络是一个无标度网络,区域交通网络与空间可达性是非线性关系^[15]。刘继生、陈彦光等借助分形思想探索城市系统的空间复杂性,并提出分形结构是判断城市系统空间复杂性的三大判据之一^[16]。

以中心地理论为基础的点-轴系统理论是我国著名的经济地理学家陆大道先生于 1984 年提出的^[17]。城镇-交通系统是典型的区域点-轴系统模式^[9]。相对点-轴系统理论蓬勃的理论研究及广泛的实践应用,区域城镇点-轴系统空间结构的定量模型还有待进一步研究^[17]。已有研究表明,点-轴系统发育到一定阶段呈现分形性质,具有空间复杂性特征^[18]。分形维数是描述空间复杂性的重要参数之一^[16]。那么,是否可以从复杂性的角度分析区域城镇点-轴系统空间结构,通过构建分形模型揭示区域城镇点-轴系统演进过程中其空间结构的变化规律? 为了回答这个问题,本文从点-轴系统理论出发,分析点-轴系统演进过程中,其空间结构的变化及相应的分形特征; 构建度量点-轴系统空间结构的分形模型,明确该分形模型参数的数值变化及其地理意义; 以山东省济南市为研究区域,借助点-轴系统的主要地理载体——城镇-交

收稿日期:2009-07; 修订日期:2009-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(40571119); 国家社会科学基金项目(07BZZ015); 国家科技支撑项目资助课题(2006BAB15B03, 2006BAB15B06, 2006BAJ05A03); 中国地质大学(北京)人才基金资助项目(51900912300)。

作者简介:蒙莉娜(1984-),女,硕士研究生。主要从事土地资源管理、GIS 应用研究。

通讯作者:郑新奇(1963-),男,博士,教授。主要从事 GIS 开发与应用、土地评价与规划、空间数据挖掘、复杂系统仿真、地理计算等研究。E-mail:zxqsd@126.com

通系统进行实证研究,验证点—轴系统空间结构分形模型的科学性和敏感性。我们认为,无标度性,分形,有序性是地理空间的不同状态,随着点—轴系统的演进,其空间结构也经历着无序→无标度网络→分形结构→有序→更为复杂的无序演进过程。

2 研究方法

2.1 点—轴系统的空间结构

地理现象之间是相互作用的^[19]。现实中,各地理要素是非均衡分布的,尤其是海洋、大江大河等地形因素的差异,导致地理空间中的各点对人口等的引力各不相同。因此,我们认为,区域点—轴系统是建立在以下两个假设前提下的:区域是一个非均衡的地表,存在自然地理要素差异;区域上人口集聚及经济活动的初始状态是非均衡分布的。

这与陆大道的区域均质地表的假设前提有所不同^[20]。我们认为,只有基于非均衡的地理要素现状,才能导致区域点—轴系统的非均衡发展。同时,非均衡性假设前提也符合人类社会空间发展历史。

区域城镇点—轴系统的空间结构形成主要有四个阶段^[6]。根据分形理论,点—轴系统空间结构的演变是从整数维到分数维的演进过程^[21]。

随机阶段:地表是非均质的空间,从图 1a 可以看出,点呈随机分布,也没有等级差异,这与农耕社会初期人类聚居点大都首先在适宜耕种的江河冲积平原出现并缓慢发展的情况相一致。对图 1a 进行网格化处理,改变网格尺寸 ε ,有 $N(\varepsilon) \propto \varepsilon^D$,这里 $N(\varepsilon)$ 为被点占据的网格数, D 为点分维数。根据随机

分形的性质及其地理意义可知,图 1a 的点空间分布具有分形性质,且 $0 \leq D < 1$ ^[22-23]。在该阶段,各个点之间没有相互连接,不存在轴。

孕育阶段:点分布发生分异,拥有良好资源与交通区位的聚居点发展为城镇,并在分异点之间形成交通轴线,区域局部开始出现有组织状态。如图 1b 所示,区域空间中的 A、B 两点发生分异,并在 A、B 点之间形成一轴。在市场原则的作用下,分异点沿着 AB 轴线分布,其分形维数可以近似地表示为 $D=1$,这是一个整数维的空间形态。

发展阶段:主要的点—轴系统空间结构框架形成,社会经济演变迅速,空间结构变动幅度大^[4]。如图 1c 所示,点—轴系统的维数由 $D=1$ 逐渐升高,其空间结构开始出现自相似的不规则性。

成熟阶段:点—轴系统高度发育,空间结构趋于稳定。如图 1d 所示,系统地理要素貌似破碎无规,实际上具有无标度性的自相似系统,这是一种分数维的结构,是无标度网络中的一个子集,具有自我优化特性^[24],其分形维数 D 一般满足: $1 < D < 2$ 。

2.2 区域城镇点—轴系统的分形模型

点—轴系统中的点是各级居民点和中心城镇,是各级区域社会经济要素的集聚点,也是带动各级区域发展的中心城镇;点—轴系统的轴,是指由交通、交通干线和能源、水源通道连接起来的“基础设施束”,主要用于连接系统中各点^[4]。成熟的点—轴系统的空间结构中,点点间的连接形成一个无标度网络,大部分城镇点主要通过少数具有大量连接集散城镇点(Hub 点)的合理中转实现最优连接^[17,25]。因此,区域城镇点—轴系统一般表现为沿着连接集散

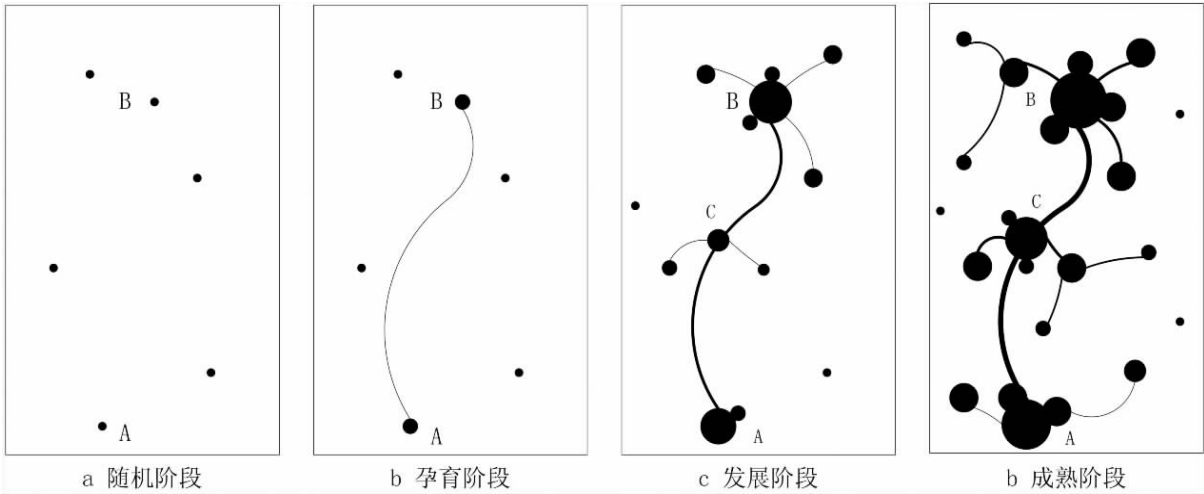


图 1 点—轴系统空间结构发展演化过程(据文献[6]改绘)

Fig.1 The evolvement phases of pole-axis system's spatial structure (modified by reference[6])

城镇点的某种交通轴线分布且相互联系的城镇—交通体系。基于此,本文以城镇—交通系统为载体,探讨区域城镇点—轴系统空间结构分形特征。

2.2.1 点分形维数

视研究区长、宽均为单位长度 1,对区域进行尺度为 ε 的网格化,考察被城镇占据的网格数 $N(\varepsilon)$,改变网格尺寸 ε 的大小, $N(\varepsilon)$ 随之改变。已有研究表明区域城镇空间结构具有自相似性^[26],即有:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-a} \quad (1)$$

$$\text{从而: } D_h = a = \frac{\ln N(\varepsilon) - A}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (2)$$

根据 Hausdorff 维数公式可知, A 为常量, $D_h=a$ 为分形维数,是一种广义容量维数^[21]。由于容量维数不能反映空间不均衡性,而用于刻画空间均衡性的 Shannon 熵已被证明与 Hausdorff 维数等价^[16,26]。因此, ε 尺度下网格依次编号 j ,设第 j 个网格其中的城镇个数为 $N_j(\varepsilon)$, N 为区域内城镇总个数, I 为常量,城镇落入第 j 个网格的概率为 $p_j = N_j(\varepsilon)/N$,根据信息量公式有:

$$I(\varepsilon) = -\sum_j^k P_j(\varepsilon) \ln P_j(\varepsilon) \quad (3)$$

式中: $k=1/\varepsilon$,为 ε 尺度下区域边长的分段个数,根据信息维数定义,得: $I(\varepsilon) = I_0 - D_i \ln(1/\varepsilon)$ (4)

$$\text{即: } D_i = \frac{I_0 - I(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, I_0 为常数, D_i 为信息维数。研究表明^[22],信息维数 $D_i \in [0,2]$,它反映区域城镇空间分布的均匀性。当 $D_i=0$ 时,表示所有城镇集中于一点,区域内只有一个城市;当 $D_i \rightarrow 2$ 时,表示区域城镇均匀分布,标准的中心地模型就是这种情况; D_i 越大,表示区域城镇空间分布越均衡。一般情况下, $D_i \in (0,2)$,且 $D_i < D_h$,在城镇空间均衡分布的情况下, $D_i = D_h \rightarrow 2$ 。

2.2.2 轴分形维数

地理空间中城镇主要通过连接集散城镇点的交通轴线而相互作用,因此可以用分形理论中的关联维数定义城镇—交通系统的轴分形维数^[27]。其基本模型如下:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_i^N \sum_j^N \theta(r - d_{ij}) \quad (i \neq j) \quad (6)$$

式(6)中, $C(r)$ 为空间关联维数, N 为区域城镇总个数, r 为距离尺度, d_{ij} 为城镇 i, j 之间的距离, θ 为 Heaviside 函数,其基本性质:

$$\theta(r - d_{ij}) = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq r \\ 0, & d_{ij} > r \end{cases} \quad (7)$$

因此,式(6)可以简化为:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} N(r) \quad (8)$$

式(8)中, $N(r)$ 为两城镇间距离小于或等于距离尺度 r 的城镇个数,其余参数含义同式(6)。

由于区域城镇分布具有无标度性,从而有:

$$C(r) \propto r^{D_c} \quad (9)$$

式(9)中, D_c 即为空间关联维数, $D_c \in (0,2)$ ^[28]。将式(9)两边取对数并求解 D_c ,有:

$$D_c = \frac{\ln N(r) - A}{\ln r} \quad (10)$$

式(10)中, A 为常量,其余参数含义同上。当两城镇间的距离 d_{ij} 取其直线距离时,基于直线距离的空间关联维数 D_l 反映区域城镇空间分布的均衡性,当两城镇间的距离 d_{ij} 取其交通距离时,基于交通距离的空间关联维数 D_t 反映了区域城镇体系的空间连接性。 $D_l, D_t \rightarrow 0$ 表示区域城镇高度集中,空间连接性强,但系统整体呈集聚分布; $D_l, D_t \rightarrow 2$ 表示区域城镇均匀分布,空间连接性弱; $D_l, D_t \rightarrow 1$ 表示区域城镇集中分布在一条直线上(通常为交通线)^[23]。一般情况下, $D_l > D_t$,当 $D_l = D_t$ 时表示在当前区域城镇空间结构下,区域城镇间的空间连接性最强。

陆大道认为,以主要交通干线连接各区域中心点,其他各点通过区域中心点的合理中转可以实现系统的最大可达性,即空间连接性^[6]。因此,我们认为当交通距离的空间关联维数 $D_t \rightarrow 1$ 时,区域城镇间的呈轴向分布且连接紧密。

2.2.3 点—轴系统分形模型

点—轴系统理论的基本思想是将区域的点、轴进行统一考虑,用于规划布局,以形成最佳区域空间结构,而以往研究分形多将点和轴割裂研究^[26-27]。在点—轴系统的形成发展过程中,点系统空间结构的形成要先于轴系统空间连接性形成,因此区域内点系统的空间结构决定着轴系统的空间连接性,而轴系统的空间连接性对点系统空间结构的进一步优化具有反作用力。具体到区域城镇—交通系统空间结构,一方面受居民点的选址和演化的影响,另一方面受连接这些居民点的道路的影响,二者交互作用共同影响区域城镇—交通系统的空间结构。如

果仅考虑居民点,或仅考虑交通线,均不能从整体上把握区域城镇—交通格局及其优化。

从上述分析可知,成熟的点—轴系统数理实质为无标度网络,点—轴系统中的点系统趋向于均衡分布,即 $D_i \rightarrow 2$,轴系统趋向于轴向分布,即 $D_i \rightarrow 1$,两者相互影响且相互制约,最终达到某种均衡状态。基于此,我们尝试构建点—轴系统分形模型,以此刻画点—轴系统的空间结构:

$$\tau = \frac{1-D_i}{2-D_i} \quad D_i \in (0,2), \quad D_i \in (1,2) \quad (11)$$

(11)式中, τ 为点—轴系统分形模型参数。较之区域城镇居民点的选址及其空间结构的形成,基于交通轴线区域城镇间的空间连接性是个快变量,即轴系统更倾向于向优化的点—轴系统空间结构发展。因此,对(11)式进行极限运算,根据无穷小的性质可得:

$$\lim_{\substack{D_i \rightarrow 1 \\ D_i \rightarrow 2}} \tau = \lim_{\substack{D_i \rightarrow 1 \\ D_i \rightarrow 2}} \frac{1-D_i}{2-D_i} = 0 \quad (12)$$

即当点—轴系统空间结构发展到成熟阶段时,该分形模型参数 $\tau=0$ 。 $\tau<0$ 表示区域城镇空间布局均衡但空间连接性较弱, $\tau>0$ 表示区域城镇处于集聚状态但空间连接性较好。 τ 越趋向于 0,表示点—轴系统空间结构越成熟,区域城镇空间布局均衡,城镇间空间连接性强。

2.3 点—轴系统分形模型的 GIS 实现

从点—轴系统分形模型可知,对区域城镇点—轴系统空间结构分形模型的计算涉及到大量空间数据运算,工作量庞大,而 GIS 正好提供了能够处理空间数据运算的平台。因此,通过编程开发基于 GIS 的点—轴系统分形模型计算工具,可以快速地实现区域点—轴空间结构的分形模型计算^[29]。其技术路线是基于 MapInfo Professional 7.0 及其扩展语言 MapBasic 7.0 开发点—轴系统分形模型计算工具。该工具基于 MapInfo 的空间地理运算特性分别统计不同的网格尺度下的被城镇点占据的网格个

数,并将其统计结果保存到相应表中,根据统计结果作双对数曲线图,通过直观法确定城镇点空间分布的无标度区,编程嵌入最小二乘法回归分析模型,自动并显示计算城镇点信息维数。同理,在不同距离尺度下对城镇距离(包括直线距离和交通距离)属性表进行运算。程序的工作流程图如图 2 所示。

3 实证分析

3.1 研究区概况

济南市是山东省省会,位于北纬 $36^{\circ}40'$,东经 $117^{\circ}00'$,南依泰山,北跨黄河,地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上,地形特征明显。地形格局对城镇空间格局有一定影响^[30],研究区内城镇空间分布蕴含大量的分形信息,是一个研究城镇空间结构分形性质的典型区域。济南市行政辖区内乡镇、街道办事处共计 145 个。考察区域点—轴系统的空间连接性时,只选取了济南市各区县政府驻地所在乡镇、街道办事处、省级及以上开发区所在地,共计城镇点 19 个作为集散城镇点,则城镇两两间距离的数据点为 $N^2=19 \times 19=361$ 。济南市城镇点—轴系统的空间分布图见图 3,可见在看似无序分布的一般城镇点空间布局中,集散城镇点主要沿一级轴线(高速公路)分布,形成了纵横分布的两个轴线,一般城镇点主要通过二级轴线(国道等)与其他集散城镇点连接,构成了区域城镇点—轴系统结构的雏形。

3.2 数据来源及预处理

根据《济南市行政区划图》及《济南市交通图》,矢量化济南市行政辖区范围乡镇一级的行政界线及等级以上公路,确定各乡镇、街道办事处、省级及以上开发区的政府(管委会)驻地,形成济南市城镇点—轴系统的空间分布图(图 3)。以图 3 为基础,通过地理计算获取城镇两两间的直线距离,根据《济

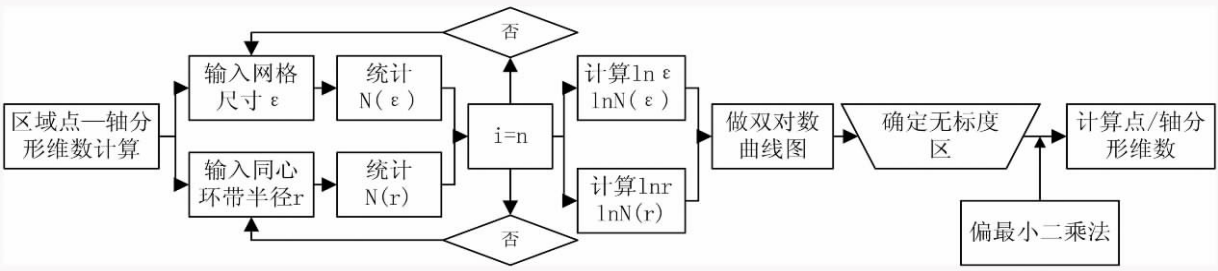


图 2 点—轴系统分形模型计算工具工作流程图

Fig.2 The flow chart of pole-axis system fractal model counting implement

南市交通图》查询相关交通里程表获取 19 个集散城镇点两两间的最短公路交通距离 (表 1)。对 361 个距离数据点进行统计分析,可知直线距离及交通距离数据分布离散程度较高(表 2)。以济南市城镇点的空间分布图及其 19 个集散城镇点对应的直线距离属性表、交通距离属性表为数据基础,通过设置不同的尺度即可进行相应的计算。

3.3 数据计算过程

设网格初始边长 $\varepsilon=1/2$, 步长 $\Delta\varepsilon=1/(\varepsilon+1)$ (图 4),度量次数 $n=20$,对研究区进行全域分析,网格化后统计非空网格个数 $N(\varepsilon)$,根据点分形维数计算原理,将点列 $(\ln(1/\varepsilon), \ln N(\varepsilon))$ 、 $(\ln(1/\varepsilon), I(\varepsilon))$ 描绘在双对

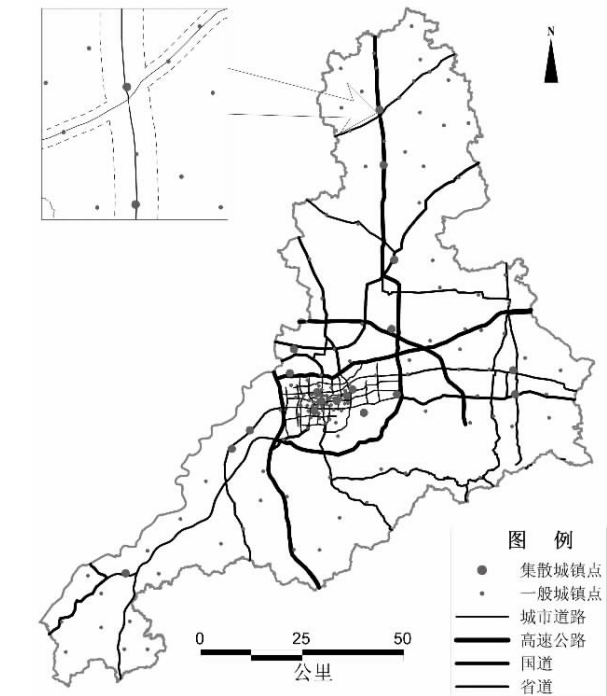


图 3 济南市城镇点—轴系统空间分布图

Fig.3 Map showing spatial distribution of towns in Jinan City, Shandong Province

表 1 济南市 19 个集散城镇点中部分城镇间的直线距离/交通距离半角矩阵(单位 km)

Tab.1 The matrix of Euclidean distance and traffic distance between parts of 19 hub – towns in Jinan (unit: km)

城镇	解放路街办	振兴街街办	平阴镇	明水街办	许商街办	东风街办
解放路街办	0/0*	6/8	67/76	44/51	70/71	4/6
振兴街街办		0/0	61/69	50/57	76/87	10/11
平阴镇			0/0	108/148	131/157	72/91
明水街办				0/0	72/100	40/71
许商街办					0/0	70/78
东风街办						0/0

* 注:表中数据的含义为直线距离/交通距离。

数曲线图上,利用直观法与回归测试法反复测算,最终确定无标度区,在此区间内利用偏最小二乘法进行回归分析,得到点分形维数 D_h 、 D_i 及相应的测定系数 R^2 。同理,根据距离数据分布情况,取初始距离尺度 $r=150\text{km}$,步长 $\Delta r=5\text{km}$,度量次数 $n=30$,根据空间关联维数原理统计数据点(表 3)。

4 结果与讨论

4.1 结果分析

通过对表 3 数据的整理,笔者分别得到如图 5 及图 6 所示的点列及相应的无标度区,对无标度区内的点列以最小二乘法进行回归分析,得到相应的分形维数及相关参数(表 4)。

由表 4 可知,在一定的尺度范围内,济南市城镇点—轴系统存在无标度区间,即系统具有分形性质。回归分析得济南市城镇点—轴系统的容量维数 $D_h=1.440$,测定系数 $R^2=0.999$,信息维数 $D_i=1.250$,测定系数 $R^2=0.996$ 。同理,基于直线距离的关联维数 $D_l=0.824$,测定系数 $R^2=0.994$,基于交通距离的关联

表 2 济南市 19 个集散城镇点距离统计量

Tab.2 Statistics of 19 hub–towns distance in Jinan

距离类型	均值/km	最大值/km	最小值/km	标准差	方差
直线距离	37.07	130.50	0.00	26.95	726.36
交通距离	44.30	157.00	0.00	33.71	1136.25

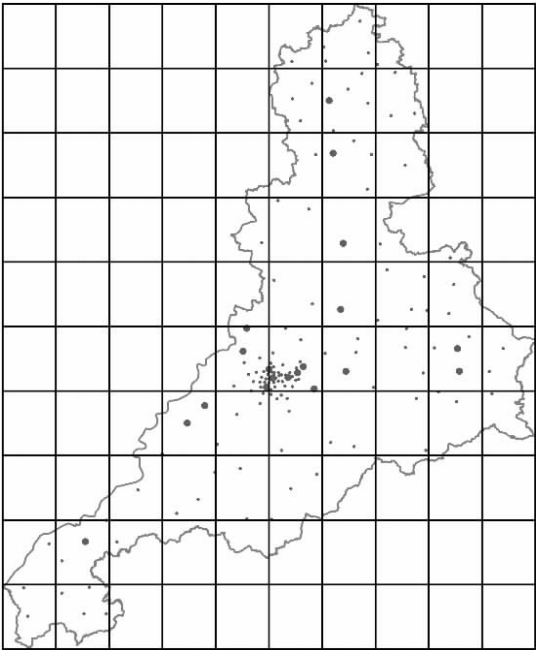


图 4 网格化过程($r=1/10$)

Fig.4 The process of gridding ($r=1/10$)

表 3 部分度量尺度及相应的统计量

度量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
网格尺度 e	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10	1/11	1/12
距离尺度 r/km	150	145	140	135	130	125	120	115	110	105	100
基于网格 $N(e)$	4	7	11	14	18	25	29	35	41	48	52
基于网格 $I(e)$	1.11	1.52	1.93	2.13	2.43	2.67	2.78	2.88	3.13	3.17	3.41
基于直线距离 $N(r)$	359	355	355	355	355	353	351	351	347	341	337
基于交通距离 $N(r)$	361	361	361	361	359	359	359	357	357	353	351

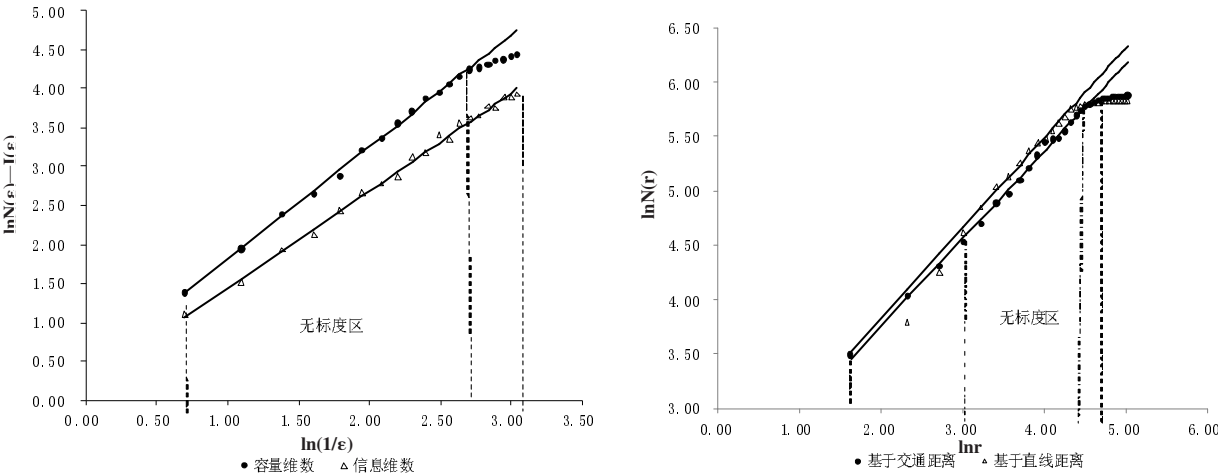


图 5 济南市城镇点—轴系统空间结构分形维数双对数曲线图

Fig.5 The ln-ln graph of fractal dimensions of pole-axis system spatial structure in Jinan

维数 $D_i=0.801$,测定系数 $R^2=0.998$ 。将 D_i 、 D_t 代入式 (11)中,得到点—轴系统分形模型参数 $\tau=0.235$ 。

分析图 5 及计算结果,可知: 点—轴系统分形模型参数 $\tau>0$ 且趋近于 0,表明济南市城镇空间结构呈现分形性质,区域城镇整体处于集聚状态,集散城镇点之间的空间连接性较强。济南市城镇的容量维数 $D_h>$ 信息维数 D_i ,表明济南市城镇点空间分布的不均衡性,信息维数 D_i 趋近于 1 也进一步验证了济南市城镇点系统处于轴向集聚状况。济南市集散城镇点基于交通距离的空间关联维数 D_t 略小于 1,表明其集散城镇点间连接结构紧密,连接性较强。因此,济南市城镇体系应处于点—轴系统的发展阶段,在现有城镇点空间布局的基础上,集聚城镇点已经初步形成了轴向结构并反作用于城镇点系统,促进城镇趋于均衡分布,系统开始具有自相似性及自我优化性。

4.2 讨论

从表 4 可知,虽然城镇点系统的无标度区范围比交通轴系统的宽广,但是后者的空间布局的分形结构优于前者,且交通轴系统的分形维数的拟合优度(测定系数 R^2)略优于城镇点系统的拟合优度,表明交通轴系统的无标度性优于城镇点系统的无标度性,这一结论与陈彦光的关于城市自组织网络的

表 4 济南市城镇点—轴系统空间结构分形维数及相关参数
Tab.4 The fractal dimensions and correlative parameters of towns' pole-axis system spatial structure in Jinan

类型	无标度 区间	无标度区 的点数	分形 维数	测定系 数 R^2
容量维数 D_h	0.69-2.71	14	$D_h=1.440$	0.999
信息维数 D_i	0.69-3.04	20	$D_i=1.250$	0.996
基于直线距离的关联维数 D_l	3.00-4.32	12	$D_l=0.824$	0.994
基于交通距离的关联维数 D_t	1.61-4.50	18	$D_t=0.801$	0.998

研究结论一致^[9]。同时 $|2-C_i|>|1-C_i|$,表明较之城镇点系统的空间分布,交通轴系统的空间连接性自我优化能力更好。这是因为优化交通轴系统的空间连接性往往可以通过修建连接集散城镇点间的交通线而快速实现,而优化城镇点系统的空间布局往往涉及到自然、社会、经济因素,是个长期而缓慢的过程。不容置疑的是,优化的交通轴系统可以促进城镇点系统空间布局的优化,两者是相互影响,相互促进的过程。

近年来的研究表明,无标度网络与分形结构、空间复杂性有着深刻的内在关系^[16, 31-32]。分形是一种无标度现象,分形结构是无标度系统的子集^[2],而无标度网络即复杂网络。具体到地理空间而言,城镇体系是典型的空间复杂系统^[33]。已有研究结果表明,分维是刻画空间复杂性的主要系统参量之一,只是空间复杂性研究关注的问题不是分形本身,而

是城镇地理系统的分形结构和具有分形结构的混沌吸引子是如何实现出来^[16]。问题回归到区域城镇点—轴系统空间结构的分形研究,点—轴系统的成熟阶段,城镇点系统的空间分布趋于均衡性,系统内全部城镇点的相互联系通过有限个集散城镇点的合理中转而实现,从而满足区域最大可达性的要求。根据无标度网络的定义可知,成熟的点—轴系统空间结构是一个无标度网络^[24]。而根据前文 2.2.3 部分的分析,当点—轴系统发展到定义的理想状态时,其空间分维值的为整数维,即其空间结构由复杂转化为有序。随着经济社会客体要素的发展,当另一个混沌吸引子发展并实现作用于该点—轴系统时,系统的有序状态出现对称破缺,并由有序转为更为复杂的无序状态。因此,点—轴系统空间的发展,经历着无序→无标度网络→分形结构→有序→更为复杂的无序的演进过程。可见,构建点—轴系统分形模型,探索区域城镇点—轴系统空间结构演化的分形性质,进而揭示其空间结构演进过程分形体变化及数理本质,具有重要的理论意义和实践价值,只有明确揭示地理空间复杂系统的内在机制才能建立有效的地理空间优化理论基础。

5 结论

综合上述研究,可以得到以下几点结论:

(1)区域城镇点—轴系统发育到一定阶段的确呈现分形性质。本文在已有研究成果的基础上,构建点—轴系统分形模型,探索点—轴系统空间结构演进过程中的分形性质。一般而言,点—轴系统模型参数 $\tau \rightarrow 0$ 表示点—轴系统空间结构趋于成熟,区域城镇空间布局均衡,城镇间空间连接性强; $\tau < 0$ 表示区域城镇空间布局均衡但空间连接性较弱, $\tau > 0$ 表示区域城镇处于集聚状态但空间连接性较好。

(2)无序、无标度性及分形是地理空间复杂性的不同状态。随着点—轴系统的发展演化,其空间结构也经历着无序→无标度网络→分形结构→有序→更为复杂的无序的演进过程。

(3)以济南市城镇—交通系统实证本文的理论分析。济南市城镇点—轴系统分形模型参数 $\tau = 0.235$,表明济南市城镇整体处于集聚状态,集散城镇点之间的空间连接性较强。济南市城镇体系应处于点—轴系统的发展阶段,在现有城镇点空间布局的基础上,集散城镇点间的交通轴线已经初步形成

了轴向结构并反作用于城镇点系统,促进城镇趋于均衡分布,系统开始具有自相似性及自我优化性。

为了简化计算,本研究计算过程中,忽略了点—轴系统内部的等级差异。在进一步研究中,可进一步搜集相关资料,结合位序—规模分布规律,进一步完善区域点—轴系统空间结构的分形研究。

参考文献

- [1] Volchenkov D, Blanchard P H. Scaling and universality in city space syntax: between Zipf and Matthew. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2008, 387(10): 2353–2364.
- [2] Michele G, Funaro M. Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2007, 31 (3): 527–536.
- [3] 陈彦光,王义民,靳军. 城市空间网络: 标度、对称、复杂与优化——城市体系空间网络分形结构研究的理论总结报告. 信阳师范学院学报 (自然科学版), 2004, 17 (3): 311–317.
- [4] 陆大道. 关于“点—轴”空间结构系统的形成机理分析. *地理科学*, 2002, 22(1): 1–6.
- [5] 克里斯塔勒. 德国南部中心地原理. 常正文译. 北京: 商务印书馆, 1998.
- [6] 陆大道. 区域发展及其空间结构. 北京: 科学出版社, 1995.
- [7] White R, Engelen G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use pattern. *environment and planning A*, 25: 1175–1191.
- [8] 陈彦光. 中心地体系空间结构的标度定律与分形模型: 对 Christaller 中心地模型的数学抽象与理论推广. 北京大学学报 (自然科学版), 2004, 40(4): 626–734.
- [9] 陈彦光,周一星. 基于三角点阵模型的自组织城市网络探讨. 北京大学学报 (自然科学版), 2005, 41(2): 258–264.
- [10] Batty M, Longley P A. Urban shapes as fractals. *Area*, 1987, 19: 215–221.
- [11] Allen P M, Sanglier M. Urban evolution, self-organization and decision making. *Environment and Planning A*, 1981, 13: 169–183.
- [12] J Portugali. *Self-organization and the City*. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [13] Frankhauser P. La fractalité des structures urbaines. Pairs: Collection Villes, Anthropos, 1994.
- [14] White R, Engelen G. Urban system dynamics and cellular automata: Fractal structures between order and chaos. *Chaos, Solitons and Fractals*, 1994, 4: 563–583.
- [15] Helbing D, Keltsch J, Molnar P. Modelling the evolution of human trail systems. *Nature*, 1997, 388(6637): 47–50.

- [16] 刘继生,陈彦光. 城市、分形与空间复杂性探索. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(3): 62-69.
- [17] 陆玉麒. 论点—轴系统理论的科学内涵. 地理科学, 2002, 22(4): 136-143.
- [18] 刘继生,陈彦光,刘志刚. 点—轴系统的分形结构及其空间复杂性探讨. 地理研究, 2003, 22(4): 447-454.
- [19] 杨吾扬. 区位论原理. 兰州: 甘肃人民出版社, 1989.
- [20] 陆大道. 论区域的最佳结构与最佳发展: 提出“点—轴系统”和“T”型结构以来的回顾与再分析. 地理学报, 2001, 56(2): 127-135.
- [21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] 陈涛. 城镇体系随机聚集的分形研究. 科技通报, 1995 (2): 98-101.
- [23] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法. 1999, 18(2): 171-178.
- [24] 车宏安,顾基发. 无标度网络及其系统科学意义. 系统工程理论与实践, 2004(4): 11-16.
- [25] 王林,戴冠中. 复杂网络的度分布研究. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 405-409.
- [26] 伍世代, 王强. 福建省城镇体系分形研究. 地理科学, 2007, 27(4): 493-498.
- [27] 陈彦光,罗静. 河南省城市—交通网络的分形特征. 信阳师范学院学报(自然科学版), 1998, 11(2): 171-177.
- [28] 刘继生, 陈彦光. 交通网络空间结构的分形维数及其测算方法探讨. 地理学报, 1999, 54(5): 471-478.
- [29] 郑新奇,王爱萍,李新运. 基于空间数据库的分形计算方法改进软件设计. 科学研究月刊, 2006, (2): 1-3.
- [30] Chen Chingju, Lee Tzongyeang, Huang Y M, et al. Extraction of characteristic points and its fractal reconstruction for terrain profile data. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 39(4): 1732-1743.
- [31] Fritzke Bernd, Erkki Oja, Samuel Kaski. Kohonen maps [M/OL]. Amsterdam: Elsevier science B. V. 1999: 131-144[2009-4-26]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8559-4NXB839-S/2/a41a2165b7c53a38e61d79745a4dd1ac>.
- [32] Baas, Andreas C W. Fractal and self-organization in coastal geomorphology: Simulating dune landscape in vegetated environments. Geomorphology, 2002, 48 (1): 309-328.
- [33] Wilson A G. Complex spatial system: Challenges for modelers. Mathematical and Computer Modeling, 2002, 36(3): 379-387.

Study on Fractal Model of Regional Urban Pole-Axis System Spatial Structure

MENG Lina¹, ZHENG Xinqi^{1,2}, ZHAO Lu¹, LI Zhijian¹, YANG Xin¹

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Land Resources Information Development Research, Beijing 100083, China)

Abstract: Pole-axis system is one of the main modes of Chinese regional spatial structure. It is an academic element for geographical space optimization to research urban pole-axis system spatial structure and reveal its mathematics nature. Based on pole-axis system theory, a fractal model of pole-axis system was built, and then its geographical meaning was illuminated. According to the mathematic elements of pole-axis system fractal model, this paper developed counting program of fractal model by GIS software. Taking urban-traffic system in Jinan City, Shandong Province as an example, this paper counted the parameter of its fractal model by using GIS data format. The results showed that: (1) The pole-axis system presented a fractal nature indeed when developing to a certain stage, and the fractal model of pole-axis system can effectively reflect the spatial structure of pole-axis system. (2) Fractal, scale-free and order is the different states of geo-spatial. We deduced that its spatial structure has experienced an iterative process of disorder → scale-free → fractal → order → a more complex disorder with the development of pole-axis system. (3) The urban-traffic system in Jinan City, Shandong Province had shaped the rudimental structure of pole-axis system, which was in the developing stage.

Key words: regional urban system; pole-axis system theory; a fractal model of pole-axis system; spatial structure; dimension; Jinan City