

京津冀城市用地形态的双分形特征及其演化

赵静湑, 陈彦光*, 李双成

(北京大学城市与环境学院城市与经济地理系, 北京 100871)

摘要:区域城乡一体化的标志之一是城镇体系结构的一体化,这个过程可以从标度的角度进行描述和评价。分形是标度分析的重要方法,地理空间无尺度分布特征的典型参数是分维。论文以京津冀城镇体系为例,利用遥感图像的解译数据和人口普查数据开展分形分析、位序-规模分布分析和异速标度分析,用以解释1995—2013年间京津冀城镇体系演化的过程。结果表明,京津冀城镇体系及其演化的特征有:①京津冀空间结构和位序-规模分布都表现为自仿射双分形结构;②京津冀区域的城市人口-城区面积异速标度退化为假线性关系;③随着城镇体系的演化,自仿射的双分形结构逐步向自相似分形结构演化。由此得出结论:其一,京津冀城镇体系存在结构性的不协调因素。其空间结构和等级结构具有二元化特征,但演化方向却呈现内在结构一体化的显著趋势。其二,大城市用地不够集约。城市边缘区的无序扩张导致土地利用铺张浪费。地方政府和规划专家可以有意识地利用城镇体系演化的这种特征和趋势制定管理措施和优化规划方案。

关键词:城市土地利用;分形;自仿射性;位序-规模分布;异速标度;京津冀城镇体系

中国快速城镇化取得引人注目的成就,同时也触发了很多前所未有的问题。只有大量学者借助不同的知识和方法从各个角度进行探讨,才可能找到有效的解决问题的途径。城镇化的核心内容涉及城镇体系和城市形态(Knox et al, 2009),研究城市形态和城镇体系的空间结构及其时空演化具有理论和实践双重意义。土地是城市发展的载体,城市的扩张所带来的空间和地方的变化都会反映在城镇用地格局方面。从这个意义上讲,土地问题始终是城镇化进程中的重要问题。京津冀是中国城镇体系问题实证分析的一个典型研究区,作为全国的政治文化中心所在,其发展水平与其他城市群相比存在差异,面临空间上发展不协调、生态环境恶化等问题。为了探索这些问题,需要对京津冀城镇体系的演化特征进行研究。考虑到城市的无尺度性(陈彦光, 2015),城镇体系研究需要以分形、异速

生长等理论为基础开展标度分析(Batty et al, 1994; Frankhauser, 1998)。著名城市理论家Batty(2008)指出,分形、异速和网络理论正在通过思想和方法的集成逐步形成城市分析的新理论。

城市一般规律研究为城市具体问题的探索提供了方法方面的指南。到目前为止,城市地理学形成众所周知的3个基本定律:距离衰减律、位序-规模律和异速生长律(周一星, 1995)。这3个定律都与分形和标度有关(陈彦光, 2008)。本文希望以京津冀城镇体系为研究对象,以城镇用地形态为切入点,采用遥感影像解译数据,以分形几何和异速标度理论为工具,分别利用分维分析、规模分布分析、异速标度分析等方法,从空间形态、等级体系、异速生长3个角度揭示京津冀城镇一体化发展进程中的分形特征及其演化规律。相关结论或可推广到中国其他特大城镇体系。

收稿日期:2018-06-08;修订日期:2018-11-20。

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41590843)。[Foundation: Major Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41590843.]

第一作者简介:赵静湑(1990—),女,天津市人,硕士研究生,主要从事城市地理研究。E-mail: zhaojingtian@pku.edu.cn

*通信作者简介:陈彦光(1965—),男,河南罗山人,博士生导师,重点研究地理分形和自组织城市网络。E-mail: chenyg@pku.edu.cn

引用格式:赵静湑, 陈彦光, 李双成. 2019. 京津冀城市用地形态的双分形特征及其演化[J]. 地理科学进展, 38(1): 77-87. [Zhao J T, Chen Y G, Li S C. 2019. Bi-fractal structure and evolution of the Beijing-Tianjin-Hebei region urban land-use patterns. Progress in Geography, 38(1): 77-87.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.007

1 理论模型

1.1 空间结构与分形标度律

相关研究已经证明城市具有分形的特征,而分形体不能用一般的测度度量。为了进行定量描述和研究,科学家引入特征参数分形维数(fractal dimension)来刻画分形体。分形是可以最有效的占据空间的复杂结构。借助分形的思想不仅可以来规划城镇用地形态,从而更科学、高效地利用土地和城市空间,使得人地关系变得和谐、可持续发展,而且可以评判城市用地的合理性,从而解释城市或者城镇体系存在的结构性或者功能性问题。

分形理论的基础是一种标度关系。以 ε 为尺度对土地进行空间度量,每个 ε 都会对应一个测度 $m(\varepsilon)$,若 ε 和 $m(\varepsilon)$ 满足如下伸缩不变关系(刘式达等, 1993):

$$m(a\varepsilon) \propto a^\beta m(\varepsilon) \quad (1)$$

即可认定土地利用形态是分形的,式中的 a 为尺度比, β 为标度指数($\beta=D$)。如果城市形态满足式(1),则空间结构的特征与尺度无关,服从标度不变律。城镇用地的分维可以刻画城市的形态和结构,据之可以定量判断城市空间结构的优化程度。分维代表城市土地利用填充度、均衡度和复杂度。分维越大表明城市土地利用程度越高,在一定范围内的均衡度也越高,城市空间分布的复杂度可能因此也更高。

测量分维的方法有很多种,研究目标不同,视角不同,采用的方法往往也不尽相同。目前运用频率较高的是盒子计数法,由此得到的分维叫做盒子维数(陈涛, 1995; Benguigui et al, 2000; Shen, 2002; 姜世国, 2004; Feng et al, 2010; 王洁晶, 2011; Chen et al, 2013; Sun et al, 2013)。盒子维数测算的原理如下:若城市土地利用形态具有无尺度性,那么有如下关系:

$$N(r) \propto r^{-D_0} \quad (2)$$

转化为双对数形式为:

$$\ln N(r) = \ln N_0 + D_0 \ln(1/r) \quad (3)$$

其中 D_0 即为容量维, $N(r)$ 为尺度为 r 的非空盒子数, N_0 为比例系数。形式上,地理空间分析的盒子法可以采用网格法处理。设行号为 i 、列号为 j 的网格中城镇用地的面积为 S_{ij} ,研究区域总的城镇用地面积为 S ,则该网格中城镇用地的分布概率为 $p_{ij}=S_{ij}/S$ 。根据公式

$$I(r) = - \sum_i \sum_j p_{ij}(r) \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

可以计算信息量 $I(r)$,公式中的 n 代表矩形的边被分割的段数,若城市土地利用形态具有标度性,那么有如下关系:

$$I(r) = I_0 + D_1 \ln(1/r) \quad (5)$$

式中: D_1 是信息维; I_0 为常数。容量维和信息维是多分维谱中最基本、最重要的2个参数。在正常情况下,容量维的数值高于信息维。容量维忽略城市土地利用的细节,描述整体格局;信息维则关注细节的差异,更精致地刻画城市形态的空间特征。

1.2 等级结构与位序-规模律

城镇体系的层次性表现为城镇体系的递阶结构特征。城市位序-规模分布是层次性研究的重要内容,属于城市等级体系的研究范畴(Batty et al, 1994; Pumain, 2006)。城市等级体系研究与城市形态研究在统计平均意义上可以联系起来。从理论上可以证明,城市位序-规模分布的Zipf指数 q 等于城市形态平均分维 D_a (局部参数的平均)与城市网络分维 D_n (全局参数)之比,即有 $q=D_a/D_n$ (Chen, 2014)。如果采用城市人口规模测度位序-规模分布,则 D_a 表示各个城市人口空间分布形态分维的平均值;如果采用城区面积测度位序-规模分布,则 D_a 表示各个城市用地形态分维的平均值。至于 D_n ,在理论上可以是中心地的分维(Chen et al, 2006)。利用分形思想,城市规模分布分析与城市形态研究可以集成到一个逻辑框架。从这个意义上讲,城市形态研究可以结合位序-规模分布研究,反之亦然。

城市等级结构的基本特征的抽象结果是Zipf定律。该定律认为,城市规模与位序的乘积为常数,或者规模与位序之间为反比关系(Zipf, 1949)。根据标度思想,如果一个城市的规模分布服从位序-规模法则,则其等级具有分形结构(陈勇等, 1993)。考虑一个区域中规模不等的若干城市分布,它们构成一个城镇体系。设规模大于 S 的城市个数为 $N(S)$,若 S 和 $N(S)$ 之间满足如下Pareto分布关系:

$$N(S) \propto S^{-D} \quad (6)$$

即可判断这个城镇体系的规模分布是分形结构的,式中的 D 为城市等级体系的分形维数,在一定时期内为常数(陈彦光等, 1998)。变换式(6)可以得到Zipf模型:

$$S(k) = S_1 k^{-q} \quad (7)$$

式中: k 为城镇规模的位序($k=1, 2, 3, \dots$); $S(k)$ 代

表第 k 位城市的规模; S_1 即首位城市的规模; q 为 Zipf 维数,它与分维互为倒数:

$$q = 1/D \quad (8)$$

通过 Zipf 维数 q 和1的相对大小关系,可判断城镇体系的空间层次结构特征(陈勇等, 1993)。若 $q \approx 1$,满足 $S(k) = S_1/k$,为双曲型分布,首位城市与最小城市的人口数之比恰为区域城市总数,城市等级性态良好;若 $q > 1$,城市规模分布较分散,规模差异较大,首位城市垄断特征明显,环境压力比较大;若 $q < 1$,城市规模间差异小,等级分布比较均衡,中间位序的城市数量比较多,整体经济效益较低(陈彦光, 2008)。理论上来说,具备一定规模的城镇体系,随着经济发展和城市演化, q 有逐渐接近于1的趋势。

1.3 城市生长与异速标度律

异速标度是地理学研究中的重要规律之一。系统的局部与整体,以及两个相关要素之间都可能服从异速生长关系。异速标度有纵、横之分:纵向异速基于时间序列,而横向异速则基于位序-规模分布,其中后者可以转换为等级异速。理论上,城市规模分布是城市生长过程的投影(Batty et al, 1994),从而横向异速可以视为纵向异速的投影(陈彦光, 2008)。异速标度和城镇用地形态分维之间存在着密切联系。城市人口-城区面积的异速生长定律可以从城市人口和用地规模分布的 Zipf 定律推导出来。两个 Zipf 分布支撑一个异速标度关系(Chen, 2014)。从理论上可以证明,城市人口-城区面积的异速标度指数 b 等于城市形态分维 D_f 与城市人口分维 D_p 之比(Chen, 2014)。就平均意义而言,城市形态分维趋近于1.7,即有 $D_f \approx 1.7$ (Batty et al, 1994)。如果城市人口密度分布服从 Clark(1951)模型,则城市人口分布的维数视为 $D_p = d = 2$ (Chen et al, 2012)。因此,异速标度指数在平均水平上趋近于 $b = 0.85$ (陈彦光, 2008)。借助分维,异速标度分析与城市形态研究可以在逻辑上统一起来。从这个意义上看,城市形态研究可以纳入异速标度分析,反之亦然。

城市人口-城区面积的异速生长关系是中国地理学者研究较多的一个模型,且与分形维数间接相关(陈彦光, 2008)。模型形式如下:

$$A = aP^b \quad (9)$$

式中, A 是城区面积, P 是城市人口规模, a 是比例系数, b 是标度指数。通过对比标度指数,就可以分析出城市不同时期的人口增长及城区面积扩张间的

相对速度关系,从而从异速生长角度来判断城镇用地的合理性。若 $b > 1$,则属于正异速生长,即城镇用地的扩张速度比人口规模增大速度快;若 $b < 1$,则属于负异速生长,即城镇用地的扩张速度比人口规模增大速度慢;若 $b = 1$,则属于同速生长,即城镇用地的扩张速度和人口规模增大速度相同(Lee, 1989)。现实世界中 $b < 1$ 才合理(陈彦光, 2008)。

2 方法和结果

2.1 城镇用地形态的双分形特征分析

城市用地形态的空间特征可以采用盒子维数描述。研究区为京津冀行政区,时间范围为1995—2013年,尽可能与人口普查年份对应。TM影像数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所,通过监督分类解译得到,空间分辨率为30 m。盒子维数的测算可通过 ArcGIS 软件实现,步骤如下:第一步,选择合适的分析区域。本文选取一个研究区域覆盖京津冀全区域所有城镇用地。2013年的城镇用地范围包含了其他4个年份的城镇用地范围,因此以包含2013年全部城镇用地的正南正北方向的矩形框为四至范围(图1)。第二步,生成网格。基于图像分辨率方面的考虑,网格层次为10。利用 Arc-

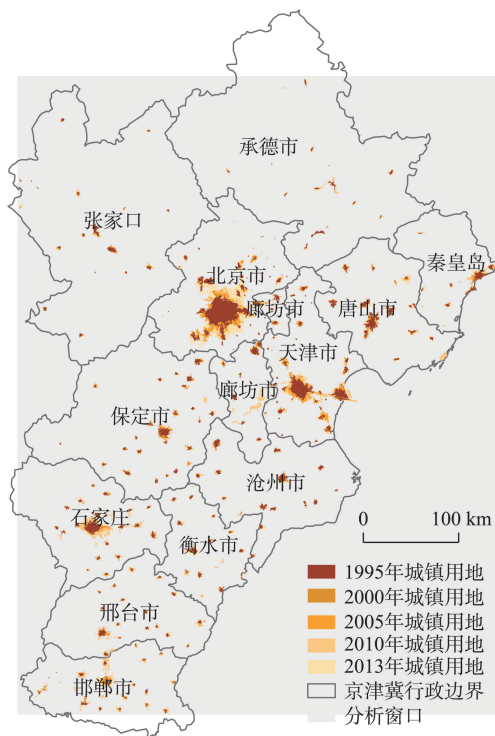


图1 全区域盒子维数计算的研究区范围

Fig.1 The study area of the Beijing-Tianjin-Hebei systems

GIS工具包中的fishnet工具分别生成 $r_0=1$ 至 $r_9=1/2^9$ 共计10个矩形网格。第三步,提取空间数据。将城镇用地.shp文件进行融合(ArcToolbox→Data Management Tools→Generalization→Dissolve),分别和每一次等分生成的网格文件进行intersect操作(ArcToolbox→Analysis Tools→Overlay→Intersect);计算非空格子的个数 $N(r)$,并计算每个小格子中城镇用地的面积。第四步,计算盒子维。借助 $\ln(1/r)-\ln N(r)$ 散点图,观测变化趋势,并进行双对数线性拟合,得到5个年份的5个回归模型,利用式(3)估计容量维。根据每个非空网格中城镇用地的面积,利用式(4)计算信息量 $I(r)$,然后参照 $\ln(1/r)-I(r)$ 散点图进行单对数线性拟合,运用式(5)得到信息维(表1)。借助双对数坐标图考察盒子维的测算结果,可以揭示京津冀城镇体系用地结构的分形特征。一方面,京津冀城镇体系用地形态5个年份的对数线性趋势明显,但却表现出标度间断的特点: $1/r-N(r)$ 双对数曲线有2个标度区,呈现双分形(bi-fractals)结构(Benguigui et al, 1991; White et al, 1993)。另一方面,动态地看,1995—2013年,双分形结构逐渐向单分形结构演变。双分形代表自仿射特征,反映城市用地扩展的各向异性;单分形具有自相似特征,反映城市空间扩展的各向同性(陈彦光, 2017)。这表明京津冀城镇体系自仿射性逐渐向自相似性演化。容量维和信息维的变化趋势一致,下文以容量维为例,具体说明。

京津冀城镇用地的容量维的拟合曲线具有斜率不同的2个标度区,呈双标度结构。双标度分为2类:显性双标度(双对数坐标图上可以看到)表明自仿射结构,而隐性双标度(双对数坐标图上看不到)为多分形结构(陈彦光, 2008)。自相似分形是朝各个方向均衡变化的,而自仿射分形是不均衡的,变化前后并非自相似的关系。以1995年的 $\ln(1/r)-$

$\ln N(r)$ 散点图为例(图2),明显发现前5个点形成一个标度区,而后6个点形成另一个标度区(有一个交叉点)。若对全部10个点整体拟合,测定系数 R^2 为0.9647,分维数 D 为1.4613;若分2段拟合,前5个点(固定截距为0)的测定系数 R^2 为0.9973,分维数 D 为1.7874,后5个点的测定系数 R^2 为0.9920,分维数为 D 为1.0439。分段拟合的2段的 R^2 都显著高于整体拟合的 R^2 ,且2段的分维存在显著差异,其他4个年份也有类似特征(图2),这表明京津冀城镇用地的空间形态具有双分形结构。由此可见,京津冀城镇用地形态具有各向异性扩展的分形特征。

分形结构的变化可以通过不同标度区分维值的差异变化反映出来。1995—2013年5个年份的双标度分维数差值分别为0.7435、0.7227、0.6502、0.5619、0.5323,逐年缩小,2个标度区有逐渐向一个标度区变化的显著趋势(图2)。这暗示,各向异性的自仿射特征逐渐减弱,而各向同性的自相似特征逐渐增强。京津冀城镇体系的分形结构从自仿射结构向自相似结构演化,表明京津冀城镇体系空间结构的一体化趋势逐步变强。研究表明,区域层面的自仿射特征往往比城市层面更为明显,区域的自仿射结构表明城镇体系分形演化动因和步调不一致,即大小城市之间的发展速度有差异,自相似的分形结构表明城镇体系中各个城镇之间有较强的空间联系和协作关系。自仿射结构向自相似结构演化,表明京津冀城市之间的发展步调日趋协调,城镇体系一体化水平提高,系统结构优化,功能加强,以致社会经济效益提升。城镇体系是一种自组织系统,城镇体系的时空演化通常是不以人的意志为转移的自组织过程(Allen, 1997; Portugali, 2000)。城市演化着眼于大系统的优化与效益的升高。1995—2013年,京津冀城市之间的空间联系和协作关系变强,一体化趋势日趋明显,全区域整体的效率上

表1 5个年份的京津冀区域城镇体系的盒子维测算结果

Tab.1 Fractal dimension values of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system based on functional box-counting methods

年份	容量维 D_0						信息维 D_1		
	整体		第一标度区		第二标度区		整体		
	D_0	R^2	$D_{(1)}$	R^2	$D_{(2)}$	R^2	$D_{(1)}-D_{(2)}$	D_1	R^2
1995	1.4613	0.9647	1.7874	0.9973	1.0439	0.9920	0.7435	1.3072	0.9940
2000	1.4582	0.9662	1.7829	0.9970	1.0602	0.9908	0.7227	1.3108	0.9933
2005	1.4823	0.9732	1.7848	0.9967	1.1346	0.9911	0.6502	1.3405	0.9958
2010	1.5288	0.9816	1.7878	0.9970	1.2259	0.9956	0.5619	1.4024	0.9960
2013	1.5397	0.9834	1.7911	0.9969	1.2588	0.9955	0.5323	1.4107	0.9975

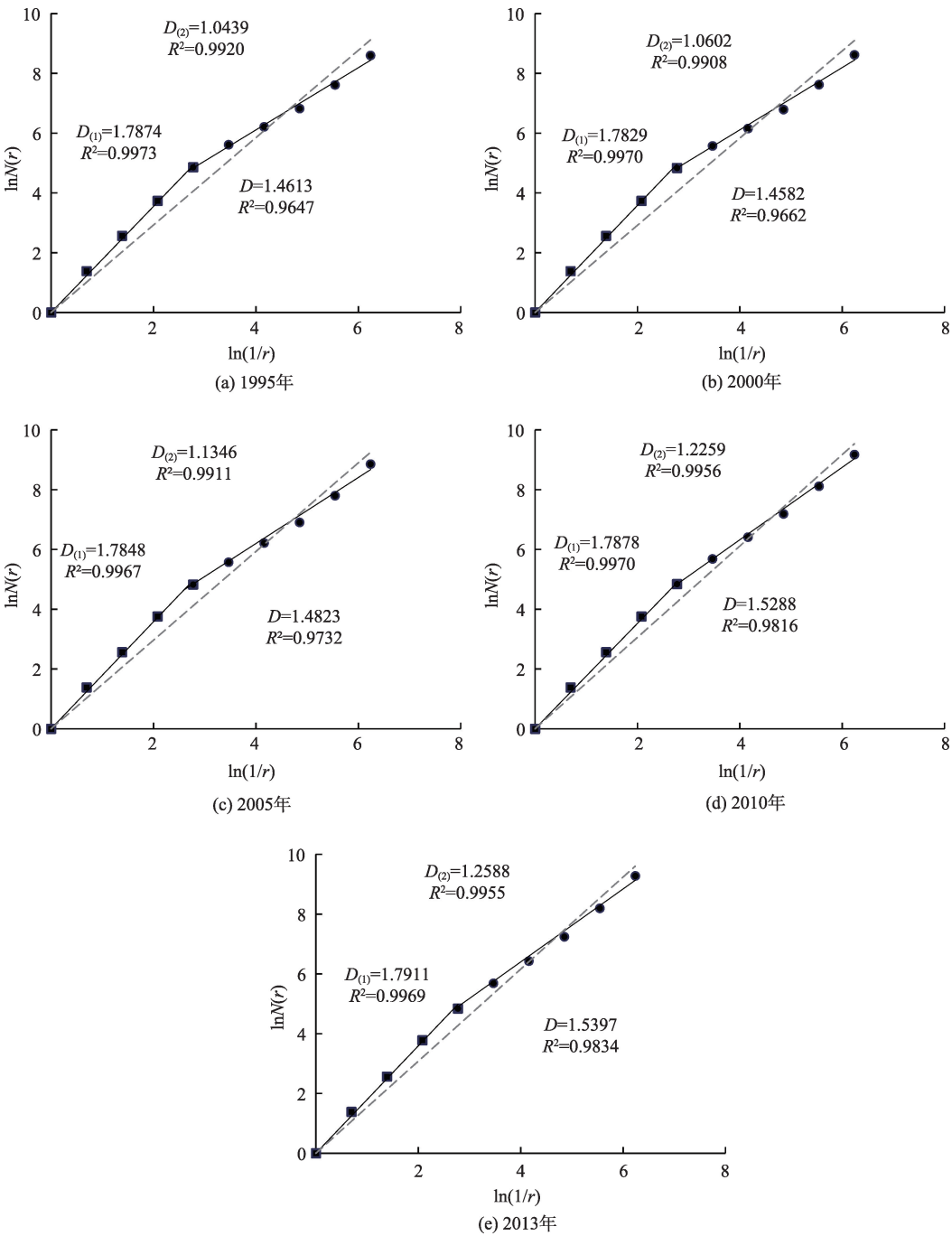


图2 1995、2000、2005、2010、2013年京津冀区域双分形关系图示
Fig.2 Bi-fractal patterns of urban land use in the Beijing-Tianjin-Hebei urban system

升。理论上,城市自组织优化过程,体现在分形特征上为双尺度自仿射分形逐步向单尺度自相似分形演化,就结构-功能关系而言,自相似是理想状态下城镇体系的优化结构(陈彦光, 2008; Chen et al, 2009)。

2.2 城市规模分布的双分形特征分析

城镇体系的空间结构与等级体系具有内在关系,从而分维分析相辅相成。理论上可以证明,城

镇空间网络结构与等级结构是一个问题的2个方面(Batty et al, 1994)。城市规模分布是反映等级体系的常规视角。城市规模有人口规模及用地规模2种基本测度,本文研究对象为城镇用地,因此采用1995、2000、2005、2010、2013年5个时间点的城镇用地面积数据进行用地规模研究。京津冀1995—2013年的行政区划基本无变化,数据口径前后具有一致性。统一将区县并入地级市,县级市单独作为

一个城市。剔除解译误差稍大的安国市和黄骅市,全区域城市单元共计33个。将城市按照用地规模降序排列,根据Zipf维数 q 来研究京津冀城镇体系的等级结构是否合理。采用双对数线性方法拟合用地位序-规模关系,得到5个年份的拟合曲线及Zipf维数值(图3)。双对数散点图的标度区可明显分为斜率不同的2段,第1点至第13点为第一段,后面20个点为第二段,分段的拟合优度显著地大于整体的拟合优度。由此可见,京津冀的城市位序规模分布也具有显性的双标度特征。城市规模的双分形结构不仅仅表现在用地方面,人口规模分布也会出现这种自仿射特征(刘继生等,1999)。

京津冀区域的城市位序-规模分布呈现双分形结构,表明京津冀城镇体系等级结构二元化。5个年份的第一段标度区的Zipf维数 q 在1上下浮动,地级市(前13位城市)城市规模分布状态良好,接近于标准位序-规模分布;5个年份第二段标度区的Zipf维数 q 始终大于1.5,县级市的用地规模和地级市差异很大。1995—2013年,京津冀城镇体系等级结构在逐步从二元化向一元化发展。随着演化,第二段的 q 值呈明显下降趋势,2个标度区的Zipf维数 q 值呈逐渐接近的趋势——二者的差值绝对值波动降低,双分形结构向单分形结构演化。如前所述,双分形代表自仿射特征,单分形代表自相似特征。京津冀城市等级体系的分形特征逐渐由自仿射特征向自相似特征演化,表明大小城市之间的发展差距逐渐在缩小,即京津冀城镇体系等级结构在逐步从二元化向一元化演化。这个趋势与前述空间结构的演变趋势一致,分别从不同的角度反映了京津冀城镇体系的结构变化特征和方向。

2.3 城镇体系的异速标度特征分析

由于缺乏连续的时间序列,无法进行纵向异速研究,本文采用截面数据开展横向异速标度分析。根据2.2节的城市样本提取标准和方法,研究区共计包括城市33个。2000和2010年的城市人口分别来源于第五次和第六次人口普查。城市人口数据有年末总人口和非农业人口。中国地理学实证经验表明,较之于年末总人口,非农业人口能够更好地反映城市地理规律。城区面积可以是城市建设用地面积或建成区面积,地理意义上非农人口对应的城区面积特指建成区面积,来源于2个年份的遥感影像提取的城镇用地(地类代码51)。分别以非农业人口和建成区面积为自变量和因变量,对2个年

份的城市样本数据分别进行拟合,建立非农业人口-建成区面积模型。理论上,异速标度关系是一种幂指数关系(Lee, 1989; 陈彦光, 2008)。但是,京津冀异速关系却不够进化。非农业人口和建成区面积的线性拟合效果优于幂指数拟合。在非农业人口-建成区面积的双对数坐标图上,呈现出线性分布趋势,表明非农人口和建成区面积有幂指数关系。然而,2个年份线性拟合的 R^2 分别高于0.96和0.97,显著高于对应年份的幂指数拟合效果(图4)。

京津冀的用地结构的演化受到无序因素的干扰,异速关系并不显著。京津冀全区域的城市人口和城区面积之间的关系更接近线性关系,这不符合异速生长的一般规律(Lee, 1989)。分形结构是最集约、最高效的城市空间结构,异速关系的退化意味着该区域的人-地关系分形结构不够进化。大量的研究表明,当一个区域的分形特征具有双标度的特征时,其异速标度关系往往呈线性关系,但这是一种假的线性关系(Chen et al, 2017)。为了深入研究,对两个年份的数据进行处理,仅仅基于地级市及其以上的城市数据建立异速标度模型,县和县级市均剔除。考虑北京市、天津市、石家庄市、唐山市、秦皇岛市、邯郸市、邢台市、保定市、张家口市、承德市、沧州市等,共计13个城市。结果表明,地级市及其以上的城市人口和城区面积间的异速关系仍不符合严格意义上的幂指数异速生长模型,地级市的城市人口和城区面积之间幂指数拟合效果 R^2 依然小于线性拟合效果 R^2 。究其原因,很可能在于房地产工程使得大城市失去了用地集约的优势。大城市寸土寸金,地产商及其他投资者都愿意集中资金于未来利润丰厚的大城市。这样,违反自然增长的客观规律,一窝蜂的投资大城市的房地产市场,不可避免地导致大城市用地的迅猛扩张。特别是城市边缘区,无序蔓延导致土地利用铺张浪费。

理论上,通常状态下,大城市的异速标度指数会小于中小城市。大城市用地有更集约的特点,单位土地的人口密度往往会更高,土地相对于人口的增长速度更小,表现在异速模型上即为大城市的标度指数小于小城市(刘继生等, 2005)。然而,京津冀区域的城市用地扩展却与城市异速生长的普遍法则相悖。2000—2010年间,随着城市演化,京津冀全区域和地级市的用地特征有分异,且发展方向不同:地级及其以上城市用地增长相对人口增长的速度显著大于全区域,且随着城市化进程,地级及

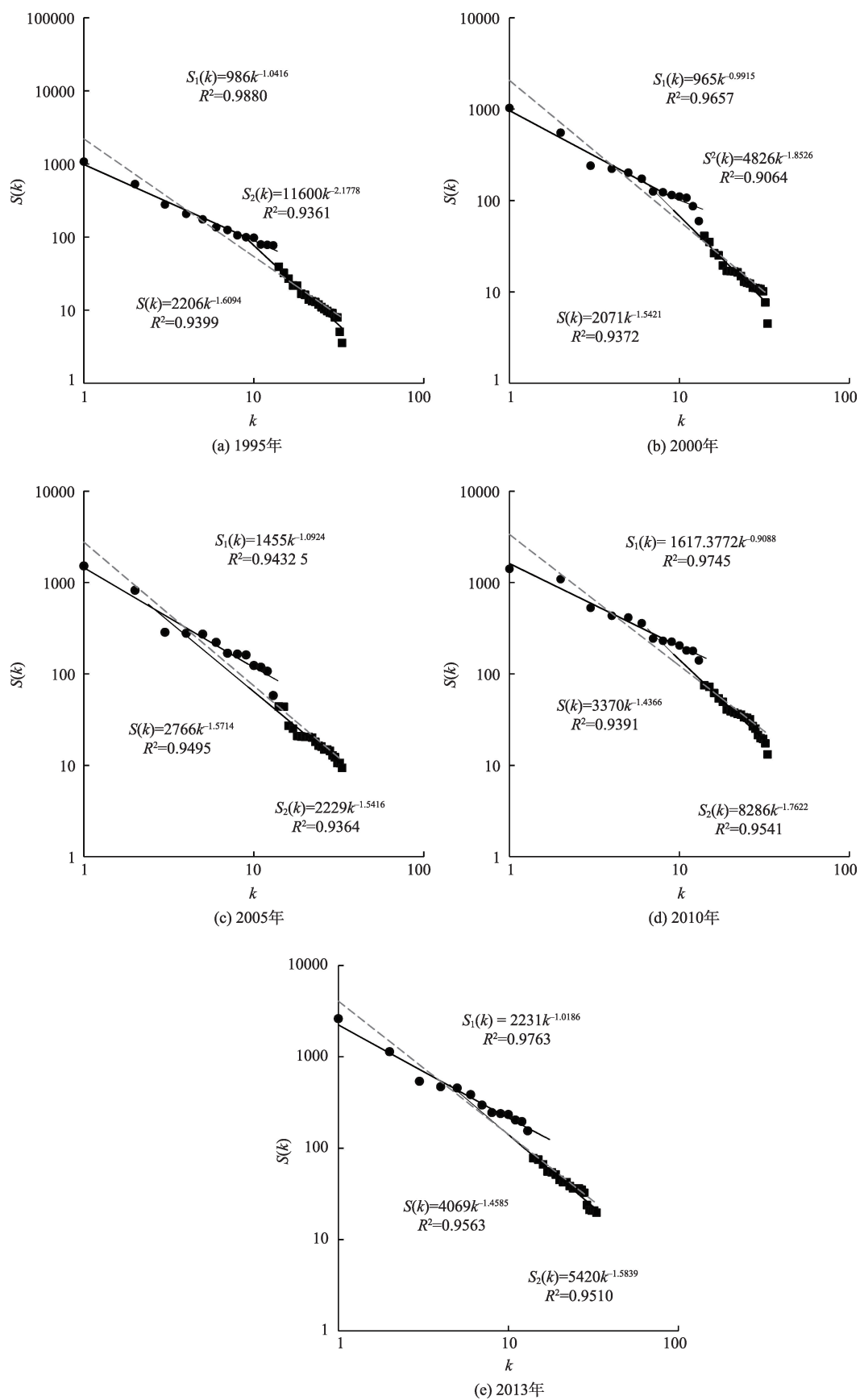


图3 5个年份城镇用地序-规模分布双标度对数坐标图示

Fig.3 Rank-size patterns indicating bi-fractal structure of the Beijing-Tianjin-Hebei hierarchical system of cities (logarithmic coordinate)

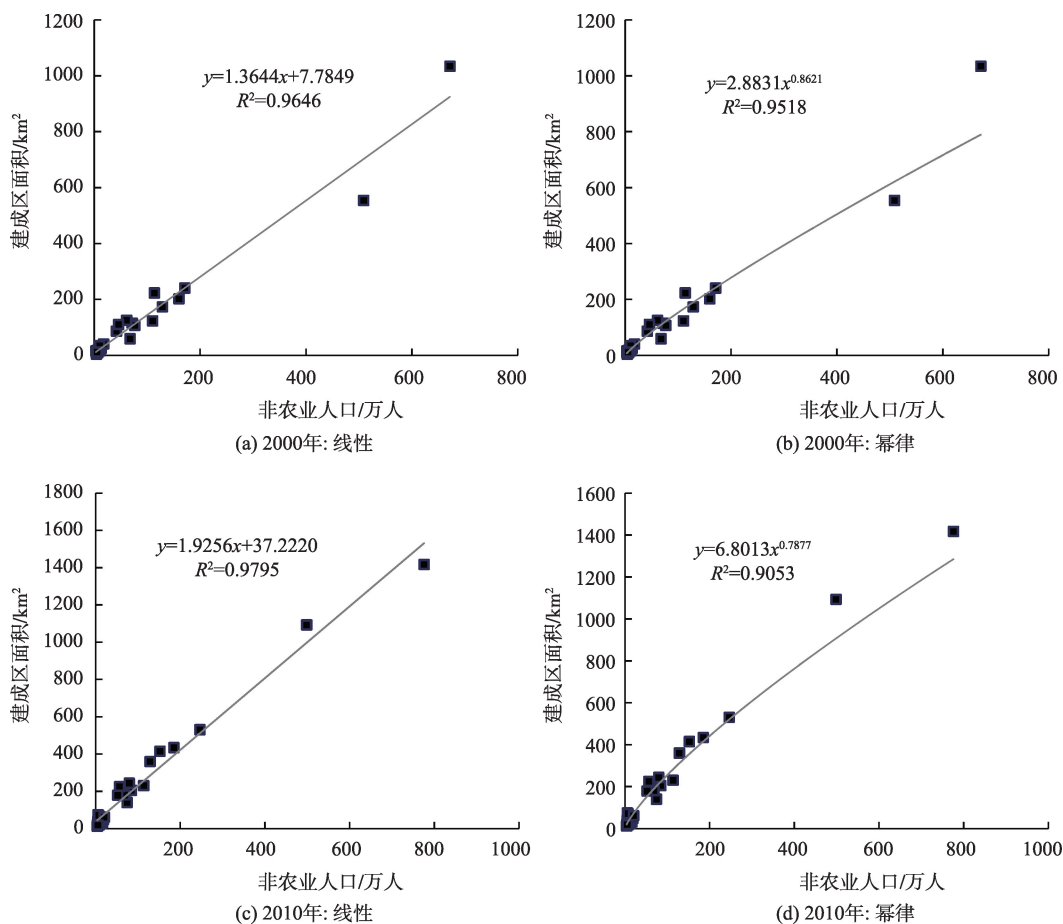


图4 2000—2010年全区域非农人口-建成区面积模型(左:线性,右:幂律)

Fig.4 A comparison of linear relations and power-law relations between urban population and urban area of the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2000-2010

其以上城市的用地集约性下降,而全区域的用地集约性增强。京津冀城市人口-城区面积的异速生长建模结果表明,京津冀全区域2000年的异速标度指数 b 为0.86,属于负异速增长,暗示城镇用地扩张的速度相对于城市人口增加的速度要更慢。2010年的异速标度指数 b 降低到0.79,降低较多,偏离了0.85的理论上的平均水平。这表明城市人口的增长比城镇用地的扩张更快,人均用地面积减少,用地向集约演化。对比全区域和地级市的异速标度指数,发现地级市的异速标度指数分别超过了0.95和0.96,显著大于全区域的异速标度指数。虽仍为负的异速关系,但均已经显著超过理论平均值0.85,且呈增大趋势。这表明地级及其以上城市中城镇用地相对于城市人口的增长要比整个区域水平扩张更快,人均用地呈增长趋势,用地集约性下降。异速模型拟合不理想,且异速关系不佳。除了前述原因之外,还有一个可能的原因是数据口径问

题。人口数据与建成区面积数据不尽对应。人口数据应为建成区内的人口(包含外来流动人口),而这样的数据不可获取,故无法得到准确的关系。大城市的人口流动性更高,很多生活在大城市的人的户籍并不在大城市,故大城市的异速生长模型中人口数据偏小更严重,如果包含了这部分人口,可能会得到不一样的结果——这个问题有待未来继续探索。

3 讨论与结论

城市和城镇体系的空间结构、等级结构以及异速生长可以形成一个完整的逻辑框架。利用这个框架,可以揭示城市演化的很多问题。对于京津冀城镇体系而言,可以清楚地判断如下问题:

第一,静态地看,区域内部的一体化程度不够高。基于城市用地格局的空间结构分析、基于位

序-规模分布的等级结构分析以及基于城市人口-城区面积的异速标度分析,结果都指向同一个问题,那就是京津冀城镇体系的空间结构存在不协调的发展因素。其一,空间结构具有双分形特征。空间上的双分形意味着各向异性生长,即不同方向具有不同的生长概率和速度,从而具有不同的分维;空间双分形也可能意味着空间格局中存在2种不同的分形结构,不同的区域具有不同的分维(陈彦光, 2008)。其二,等级结构具有双分形特征。等级上的双分形意味着不同层次的城市规模分布特征不一样,从而具有不同的标度指数。对于京津冀而言,地级市与县级市存在二元等级结构。在合理的情况下,城市无论大小,在规模分布方面应该具有相同的标度指数。其三,异速标度不够进化,或者退化为线性关系。在理论上,如果2个要素的相对增长率为常数,则表现为幂律关系;如果2个要素的绝对增长率为常数,则表现为线性关系(陈涛, 1995)。对于京津冀而言,异速标度不显著可能是多种因素导致:一是标度间断所致,位序-规模分布的双标度关系通常导致异速标度关系向线性关系退化;二是城市不正常生长,房地产泡沫导致城市用地不够集约;三是数据质量问题,城市人口与用地的口径不尽一致。对于京津冀而言,地级市的异速标度指数显著大于整体的异速标度指数,这意味着城市的发展存在明确的二元结构。

第二,动态地看,区域内部的一体化正在逐步加强。1995—2013年,无论空间结构,还是等级结构,自仿射分形正在向自相似分形演化。一方面,2个标度区的分维或者标度指数之差越来越小;另一方面,全局的双对数线性关系拟合效果越来越好。

通过同类研究的对比,可以看出本文的创新点所在。同类研究在国内早已开始。20多年前,陈涛(1995)从空间结构、等级结构和异速生长的角度,从理论和实证2个方面系统研究了豫北地区城镇体系的分形结构特征,发现异速标度退化的三种模式。王洁晶(2011)借助分形思想,采用1985、1996、2005年3个年份遥感影像解译数据,系统研究了长三角城镇体系的时空演化特征,发现大区域城市演化具有自仿射特征。在国外,Sun等(2013)从人地关系的角度研究了亚马孙地区城镇体系的分形结构特征。对于京津冀内部城市,姜世国(2004)系统研究了北京地区城乡空间结构的分形特征,发现乡村地区的分形结构出现标度间断现象,但当时尚未意识到该现象与自仿射发育的关系。Chen等(2013)研

究了北京城市形态多分形,发现城市土地利用密度低的区域与密度高的区域不能形成统一的多分维谱,这可能是城市自仿射的原因之一。陈彦光(2008)从理论上证明,标度间断与自仿射分形有关,自仿射的空间效率低于自相似的空间效率,而城市和城市体系会通过自组织演化从自仿射向自相似结构演化。相对于有关学者的前期研究,本文的特色在于2个方面:其一,以自仿射特征为主要探索目标。本文从空间结构、等级结构和异速标度3个视角揭示京津冀地区的自仿射分形特征,而不仅仅是从某一个方面开展分析。其二,以时空的动态演化为考察方向。本文利用5a的数据清晰地揭示:京津冀城镇体系的分形结构从自仿射向自相似结构演进,从而实现城镇体系的空间利用效率最大化。本文的不足之处在于3个方面:其一,缺乏长时间序列数据,未能开展长期的动态分析;其二,缺乏环境数据,未能开展深入的人地关系分析;其三,没有与三维空间维数进行对比分析。基于三维空间的分维计算可以提供城市分维分析的高程信息(Qin et al, 2015; 秦静等, 2015)。限于篇幅,有关问题留待今后的研究逐步解决。

分形代表大自然的优化结构,分形体可以最优化的利用空间。从分形思想的角度,本文可以得出如下结论。第一,京津冀城镇体系空间结构和等级结构存在不协调的方面,但正在逐步走向一体化。从空间结构、等级结构上看,京津冀城镇体系具有双分形标度,暗示自仿射特征,表明城镇体系在不同的方向、不同的区域以及不同的层面,存在二元化现象,时空利用效率未能达到优化状态。但是,1995—2013年,自仿射的双分形结构正在向自相似的单分形结构逐步演进,城镇体系的空间结构正在逐步优化。第二,京津冀区域大城市的用地集约性小于小城市。京津冀区域的城市人口-城区面积的异速生长模型的拟合效果总体上不理想,表明京津冀的城镇化过程中存在一些问题。正常情况下,城市人口-城区面积异速关系为幂律关系。但是,京津冀的城镇异速标度却退化为假线性关系,且异速模型里大城市的异速标度指数大于小城市。对于地方政府而言,应该考虑限制大城市的城镇用地不合理的扩张,促进城镇用地的集约化和高效化,调控容易与城市演化的自组织机制相互冲突。只有政府调控与城市自组织演化之间形成合理的关系,城市和城镇化管理才能上升到新的水平。

参考文献(References)

- 陈涛. 1995. 豫北地区城镇体系的分形研究 [D]. 长春: 东北师范大学城市与环境学院. [Chen T. 1995. Studies on fractal systems of towns in the central plains. Changchun, China: College of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University.]
- 陈彦光. 2008. 分形城市系统: 标度、对称和空间复杂性 [M]. 北京: 科学出版社. [Chen Y G. 2008. Fractal urban systems: scaling, symmetry, and spatial complexity. Beijing, China: Science Press.]
- 陈彦光. 2015. 简单、复杂与地理分布模型的选择 [J]. 地理科学进展, 34(3): 321-329. [Chen Y G. 2015. Simplicity, complexity, and mathematical modeling of geographical distributions. Progress in Geography, 34(3): 321-329.]
- 陈彦光. 2017. 城市形态的分维估算与分形判定 [J]. 地理科学进展, 36(5): 529-539. [Chen Y G. 2017. Approaches to estimating fractal dimension and identifying fractals of urban form. Progress in Geography, 36(5): 529-539.]
- 陈彦光, 刘继生. 1998. 城镇体系等级结构的分形维数及其测算方法 [J]. 地理研究, 17(1): 82-89. [Chen Y G, Liu J S. 1998. Fractal dimensions of hierarchical structure of urban systems and the methods of their determination. Geographical Research, 17(1): 82-89.]
- 陈勇, 陈嵘, 艾南山, 等. 1993. 城市规模分布的分形研究 [J]. 经济地理, 13(3): 48-53. [Chen Y, Chen R, Ai N S, et al. 1993. On the fractal property of city-size distributions. Economical Geography, 13(3): 48-53.]
- 姜世国. 2004. 基于北京遥感图像和GIS的分形城市形态研究: 理论、方法与实践 [D]. 北京: 北京大学环境学院. [Jiang S G. 2004. Studies on fractal urban form using GIS and remote sensing images of Beijing: Theory, method and practice. Beijing, China: College of Environmental Sciences, Peking University.]
- 刘继生, 陈彦光. 1999. 东北地区城市规模分布的分形特征 [J]. 人文地理, 14(3): 1-6. [Liu J S, Chen Y G. 1999. A preliminary study of fractal features of size distribution of cities in Northeast China. Human Geography, 14(3): 1-6.]
- 刘继生, 陈彦光. 2005. 山东省城市人口-城区面积的异速生长特征讨论 [J]. 地理科学, 25(2): 135-141. [Liu J S, Chen Y G. 2005. An allometric analysis of the Shandong urban system using ideas from fractals. Scientia Geographica Sinica, 25(2): 135-141.]
- 刘式达, 刘式适. 1993. 分形与分维引论 [M]. 北京: 气象出版社. [Liu S D, Liu S S. 1993. An introduction to fractals and fractal dimension. Beijing, China: Meteorological Press.]
- 秦静, 方创琳, 王洋, 等. 2015. 基于三维计盒法的城市空间形态分维计算和分析 [J]. 地理研究, 34(1): 85-96. [Qin J, Fang C L, Wang Y, et al. 2015. A three dimensional box-counting method for estimating fractal dimension of urban form. Geographical Research, 34(1): 85-96.]
- 王洁晶. 2011. 长三角城市用地时空演化特征的分维与异速标度分析 [D]. 北京: 北京大学城市与环境学院. [Wang J J. 2008. Fractal dimension and allometric analysis on spatio-temporal evolution of urban land-use in the Yangtze River Delta. Beijing, China: College of Urban and Environmental Sciences, Peking University.]
- 周一星. 1995. 城市地理学 [M]. 北京: 商务印书馆. [Zhou Y X. 1995. Urban geography. Beijing, China: The Commercial Press.]
- Allen P M. 1997. Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity [M]. London & New York: Routledge.
- Batty M. 2008. The size, scale, and shape of cities [J]. Science, 319: 769-771.
- Batty M, Longley P A. 1994. Fractal cities: A geometry of form and function [M]. London, UK: Academic Press.
- Benguigui L, Czamanski D, Marinov M, et al. 2000. When and where is a city fractal? [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 27(4): 507-519.
- Benguigui L, Daoud M. 1991. Is the suburban railway system a fractal? [J]. Geographical Analysis, 23(4): 362-368.
- Chen Y, Lin J. 2009. Modeling the self-affine structure and optimization conditions of city systems using the idea from fractals [J]. Chaos, Soliton & Fractals, 41(2): 615-629.
- Chen Y G. 2014. The spatial meaning of Pareto's scaling exponent of city-size distributions [J]. Fractals, 22(1-2): 1450001. doi: 10.1142/S0218348X14500017.
- Chen Y G, Feng J. 2012. Fractal-based exponential distribution of urban density and self-affine fractal forms of cities [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 45(11): 1404-1416.
- Chen Y G, Feng J. 2017. A hierarchical allometric scaling analysis of Chinese cities: 1991-2014 [J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, doi: 10.1155/2017/5243287.
- Chen Y G, Wang J J. 2013. Multifractal characterization of urban form and growth: The case of Beijing [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 40(5): 884-904.
- Chen Y G, Zhou Y X. 2006. Reinterpreting central place networks using ideas from fractals and self-organized criticality [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 33(3): 345-364.
- Clark C. 1951. Urban population densities [J]. Journal of Royal Statistical Society, 114(4): 490-496.
- Feng J, Chen Y G. 2010. Spatiotemporal evolution of urban form and land use structure in Hangzhou, China: Evidence from fractals [J]. Environment and Planning B: Planning

- and Design, 37(5): 838-856.
- Frankhauser P. 1998. The fractal approach: A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations [J]. Population: An English Selection, 10(1): 205-240.
- Knox P L, Marston S A. 2009. Places and regions in global context: human geography [M]. The 5th Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Lee Y. 1989. An allometric analysis of the US urban system: 1960-80 [J]. Environment and Planning A, 21(4): 463-476.
- Portugali J. 2000. Self-organization and the city [M]. Berlin, Germany: Springer.
- Pumain D. 2006. Hierarchy in natural and social sciences [M]. Dordrecht, the Netherlands: Springer.
- Qin J, Fang C L, Wang Y, et al. 2015. Evaluation of three-dimensional urban expansion: A case study of Yangzhou City, Jiangsu Province, China [J]. Chinese Geographical Science, 25(2): 224-236.
- Shen G. 2002. Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas [J]. International Journal of Geographical Information Science, 16(5): 419-437.
- Sun J, Southworth J. 2013. Remote sensing-based fractal analysis and scale dependence associated with forest fragmentation in an Amazon tri-national frontier [J]. Remote Sensing, 5(2): 454-472.
- White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns [J]. Environment and Planning A, 25(8): 1175-1199.
- Zipf G K. 1949. Human behavior and the principle of least effort [M]. Cambridge, MA: Addison-Wesley.

Bi-fractal structure and evolution of the Beijing-Tianjin-Hebei region urban land-use patterns

ZHAO Jingtian, CHEN Yanguang*, LI Shuangcheng

(Department of Urban and Economic Geography, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: One of the indicators of regional integration of urban and rural areas is the integration of the structure of systems of cities and towns. This process can be described and evaluated using the concept of scaling. Fractal geometry is one of the powerful tools for scaling analysis. An important parameter of geographic spatial distribution characteristics is fractal dimension. Based on data derived from remote sensing images and census data, this study carried out fractal analysis, rank-size distribution analysis, and allometric scaling analysis of cities and urban system in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The aim was to explain the process of urban growth in the region from 1995 to 2013. The results show three characteristics of urban form and growth: 1) Both the spatial structure and the rank-size distribution of the cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region are of self-affine pattern, indicating bi-fractal property. 2) The relationship between urban population and urban area of the Beijing-Tianjin-Hebei region indicates a false linear correlation. 3) With the change of the urban system, the self-affine bi-fractal structure evolved gradually into a self-similar fractal structure. The main conclusions are as follows: 1) There is a structural incongruity in the system of cities and towns in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The urban hierarchy takes on a dual structure, but the direction of urban change shows a significant trend of internal structure integration. 2) Land use in large cities is not intensive enough. The unordered expansion of urban fringe led to the waste of land resources. Planners and local governments should make use of the characteristics and trends of change of the urban system to formulate planning schemes and management measures.

Keywords: urban land use; fractals; self-affinity; rank-size distribution; allometric scaling law; urban system of the Beijing-Tianjin-Hebei region