

# 京津冀城市生长和形态的径向维数分析

张 凤<sup>1</sup>, 陈彦光<sup>1\*</sup>, 李晓松<sup>2</sup>

(1. 北京大学城市与环境学院城市与经济地理系, 北京 100871;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

**摘 要:**城市生长与形态是地理学规模与形状研究的重要内容,分维则是刻画城市形态、反映城市生长的标度指数。论文以城市建设用地为研究对象,采用2000、2005、2010年3个年份的遥感数据,利用分形理论的径向维数和相应的标度区概念分析京津冀城市和城镇体系的空间格局及其演变特征。结果表明:其一,北京市第一标度区的范围最大,10 a间增长幅度也最大,对周边城市产生阴影效应;其二,以北京为中心,距离越远,第一标度区范围有越小的趋势;其三,几乎所有研究区内城市的第一标度区空间都被建设用地过度填充,外围则各有特色;其四,经济水平对京津冀整体城市建设用地扩张的影响最大,但北京的城市建设用地扩张已经由经济因素主导转变为人人口因素主导;其五,随时间推移,第一标度区拟合径向维数效果提高,第二标度区拟合效果降低。由此得出结论:①北京在京津冀体现了城市首位效应和阴影效应的双重效应。一方面,京津冀地区城镇化区域体现出了以北京为核心的中央集聚特征,另一方面,北京市的巨大吸引力抑制了毗邻城市的生长。②城市中心和外围都出现二元化格局。地区内各个城市的中心部分过于紧凑,而外围则相对凌乱,中心-边缘缺乏一体化过程。③人口可能成为未来京津冀城市发展的第一动力。人口集聚的规模效应未来可能替代经济报酬递增效应。这些结果和结论有助于学术界和管理部门从新的角度认识京津冀城市化现状和未来的发展趋势,以便制定更为合理的城市发展政策和方针。

**关 键 词:**京津冀;城镇体系;城市土地利用;分形;径向维数;标度区

城市生长和形态是城市地理学研究的重要课题之一。要想分析城市生长动力学,首先要有效描述城市形态。为了刻画城市形态,地理学家曾经定义了一系列的测度,试图从形状的角度描述城市形态(Haggett et al, 1977; 林炳耀, 1998; 王新生等, 2005)。生长与形态问题研究理论上归属于规模与形状等更为一般的地理学问题(Longley et al, 1991; Batty, 2008)。然而,形状指数都是基于特征尺度概念定义的,而城市作为复杂系统,其形态没有特征尺度(Chen, 2011a)。分形是研究无尺度现象的有效工具之一(Batty et al, 1994; Frankhauser, 2000)。分形几何学产生不久,就被科学家逐步引入城市生长和形态研究(Stanley et al, 1986; Batty et al, 1989; Fotheringham et al, 1989; Batty, 1991a; 陈勇等,

1994; Makse et al, 1995; Makse et al, 1998; Longley et al, 2000)。常规的测度如长度、面积、体积在分形描述中失效,反映分形特征的主要参数是分维。分维定义和测量方法有多种,不同的分维有不同的应用领域和方向(Chen et al, 2017)。其中最简便的城市形态分维测量方法是面积-半径标度法(White et al, 1993; White et al, 1994),这种方法又叫集群生长标度法(cluster growing scaling),采用这种方法得到的分维被地理学家称为径向维数(radial dimension)(Frankhauser et al, 1991)。这种维数是通过城市中心-边缘关系定义的,因而能够更好地反映城市生长。著名英国城市地理学家Batty及其合作者早年的城市生长研究大多采用这种维数(Batty et al, 1994)。

收稿日期:2018-03-07;修订日期:2018-07-20。

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:张凤(1993—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事城市地理研究。E-mail: pintang6322@163.com

\*通信作者简介:陈彦光(1965—),男,河南罗山人,教授,博士,从事城市和理论地理学研究。E-mail: chenyg@pku.edu.cn

引用格式:张凤, 陈彦光, 李晓松. 2019. 京津冀城市生长和形态的径向维数分析[J]. 地理科学进展, 38(1): 65-76. [Zhang F, Chen Y G, Li X S. 2019. Radial dimension analysis of growth and form of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Progress in Geography, 38(1): 65-76.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.006

京津冀地区城镇已经发育为中国的特大城市群之一。近年来,随着城镇化的快速推进,城市环境问题也愈演愈烈,人地关系矛盾突出。这些矛盾在城市形态方面有一定的反映。形态是力的图式(Thompson, 1917),城市形态分析有助于解释地理空间结构和演化机制(Batty et al, 1994)。通过研究城市的建设用地形态,我们可以了解这个城市的扩张速度和扩张方式,在一定程度上对这个城市是否健康发展做出评价。分形几何学为城市形态的有效描述提供了有力的工具(Frankhauser, 1998)。国内外都有大量利用分形研究城市形态的报道(Batty et al, 1989; Batty, 1991b; White et al, 1994; 陈勇等, 1994; Benguigui et al, 2000; Longley et al, 2000; De Keersmaecker et al, 2003; 冯健, 2003; 姜世国等, 2006; Thomas et al, 2008; Sun et al, 2014; 刘勇洪等, 2015)。但是这些研究都是针对单个的城市,利用分形分析比较一个城市群中所有城市的形态的研究,还鲜见报道。本文利用标度区范围和径向维数,首先在全局层面分析京津冀地区城镇化区域的空间分布特征和时空演化规律,然后在局部层次探讨了各个城市建设用地的扩张情况,最后揭示了京津冀城镇体系的一些问题,并提出了相应的政策建议。

## 1 模型和方法

### 1.1 基于面积-半径标度关系的分形模型

利用分形描述城市形态,需要计算相应的分形维数。通常有三种常用的维数来描述城市形态:边界维数、径向维数和网格维数——网格维数是盒子维数的一种(陈彦光等, 2007)。就地理几何意义而言,径向维数表征城市中心-边缘距离衰减关系,网格维数表征的是研究区域内某一类用地的填充程度。前者是基于距离衰减律定义的一种分维,而距离衰减律是地理学的基本规律之一。为了反映城市生长特征,本文采用径向维数。假定以城市中心为圆心做同心圆,计算半径为 $r$ 的圆内的城市用地面积 $N(r)$ ,则对于分形生长,存在如下面积-半径标度关系:

$$N(r) = N_0 r^D \quad (1)$$

式中: $N_0$ 表示常数; $D$ 为径向维数。 $N(r)$ 可以借助像素数目度量。

可将累积标度关系化为密度标度关系。对式

(1)求导数得到

$$\frac{dN(r)}{dr} = DN_0 r^{D-1} \quad (2)$$

式(2)定义了城市生长的标度行为曲线(Frankhauser, 1998)。该曲线可作为标度区识别的判据之一。相应于式(1),同心圆的面积可以表示为 $A(r) = \pi r^2$ ,求导可得

$$\frac{dA(r)}{dr} = 2\pi r \quad (3)$$

用式(2)两边除以式(3)两边得到密度分布函数(Batty et al, 1994; 陈勇等, 1994):

$$\rho(r) = \frac{dN(r)}{dA(r)} = \frac{DN_0}{2\pi} r^{D-2} = \rho_1 r^{D-2} \quad (4)$$

式中:比例系数 $\rho_1 = DN_0/(2\pi)$ 。理论上,式(4)与式(1)等价,但经验上存在差别:式(1)可以从整体上反映城市生长的分形特征,但通常忽略了细节方面的信息;式(4)常常不能很好地拟合城市分形结构,但却可以反映城市形态变化的局部异常特征。

径向维数表征城市建设用地密度从中心到四周衰减的相对速率。当 $D > 2$ 时,城市建设用地密度从中心向外围递增;当 $D = 2$ 时,城市建设用地密度从中心到外围没有变化;当 $D < 2$ 时,城市建设用地密度从中心向外围递减(刘继生, 陈彦光, 2004)。理论上的分形是无穷层次、标度区范围无限的。由于现实世界没有真正的分形,径向维数只在一定标度区范围内有效(陈彦光等, 2007; 陈彦光, 2017)。Frankhauser等(1991)在对世界各国城市进行一系列测量时,发现城市具有双分形的特点,即城市的面积-半径关系有两个标度区。靠近圆心的称第一标度区,外围的称为第二标度区。第一标度区是已经城镇化区域,城市空间填充度高,土地利用相对充分;第二标度区代表城乡过渡地带,空间利用尚有余地,是未来城市生长的主要区域。

### 1.2 数据处理方法

遥感影像数据是城市形态演化分形分析的重要凭据。下面借助北京、天津、河北3个省市建设用地的栅格影像开展空间分析。数据来源为30 m空间分辨率卫星遥感图像,包括美国陆地资源卫星TM数据和国产环境卫星CCD数据。解译方法为监督分类,并采用高分辨率遥感数据和野外调研数据进行修正,分类精度达86%以上(由第三作者提供)。本文为系列论文之一,为了与相关文章的人口普查数据分析对应,采用了2000年(五普)、2005年、2010年(六普)3个年份的遥感数据。课题组处

理了2015年的京津冀的图像资料,但数据来源和精度不一致,故本文未予采用。在计算标度区和径向维数的过程中,另外使用了2004年京津冀范围内省、地级市、县级市的行政区划矢量文件做辅助。计算径向维数的模型是式(1)及其对数线性形式。具体步骤如下:①确定城市中心;②以城市中心为圆心向外画同心圆;③统计各同心圆内的建设用地面积;④绘制建设用地面积-半径的双对数图;⑤模型与数据拟合,判断标度区范围,计算标度区范围内的径向维数。确定城市中心之后,利用 ArcGIS 和 Excel 容易实现步骤②~④,最后需要根据统一的标准,断定标度区范围,再计算出径向维数。其中,关于城市中心的选择和标度区范围的界定下文另有说明。

径向维数的计算结果非常依赖于圆心位置的选择。因此,西方学者将其视为局部分形参数(Frankhauser, 1998)。一般来说,圆心的选取有多种办法:城市图像的重心、生长中心、政治中心、某一城市职能用地的重心、商业中心等(姜世国等, 2006)。因为本文要描述城市全部建设用地的形态,所以选择城市图像的重心作为城市中心。在西方,城市图像的重心一般是商业中心(CBD)(Batty et al, 1994),但是在中国,城市重心与商业中心并不总是吻合,所以需要借助 GIS 技术确定。首先,将遥感数据转换为矢量数据,选取城市中心的连片建成区,生成一个单独的多边形文件,用 ArcGIS 的 Feature To Point 功能找到主城区的重心。以廊坊为

例,见图 1a。其中,秦皇岛和承德有所例外,选取其商业中心为圆心,分别见图 1b、图 1c。秦皇岛为门户区位,主城区靠近海边,主城区的几何中心并非其扩张中心,所以以其商业中心-河北大道为圆心。承德主城区纵向发展,主城区的几何中心同样并非其扩张中心,以其商业中心-南营子大街为圆心。

接下来需要分别界定第一标度区和第二标度区的范围。首先,我们界定第一标度区的范围。White 等(1993)和 Frankhauser 等(1991)最早发现了城市的双分形特点,根据面积-半径双对数散点图的转折点,可以将散点分为内外两部分,靠近圆心的部分就是第一标度区。图 2 是北京市的累计建设用地面积-半径双对数散点图,可以看到数据点在环带编号为 20~40 之间的地方有转折。在实证分析中,标度区范围通常是一个模糊的概念,难以准确界定。特别是,基于所示的累计分布形式,无法看出空间结构变化的局部特征。比较而言,利用式(2)的离散形式绘制标度行为曲线和基于式(4)绘制的用地密度衰减曲线,可以确定转折点的大体位置,由此估计标度区的界线。北京市的结果在图 2 中用黑色竖线表示,2000、2005、2010 年的第一标度区范围分别是 13、16、19 km。关于第二标度区的界定,文献中论之甚少。本文参考第一标度区的界定方法,来确定第二标度区范围。但是使用的不是基于式(1)的面积-半径的双对数散点图,而是基于式(4)的密度-半径的双对数散点图。因为在图 2 中,越往右散点越密集,很难分辨转折点。所以采用密度-

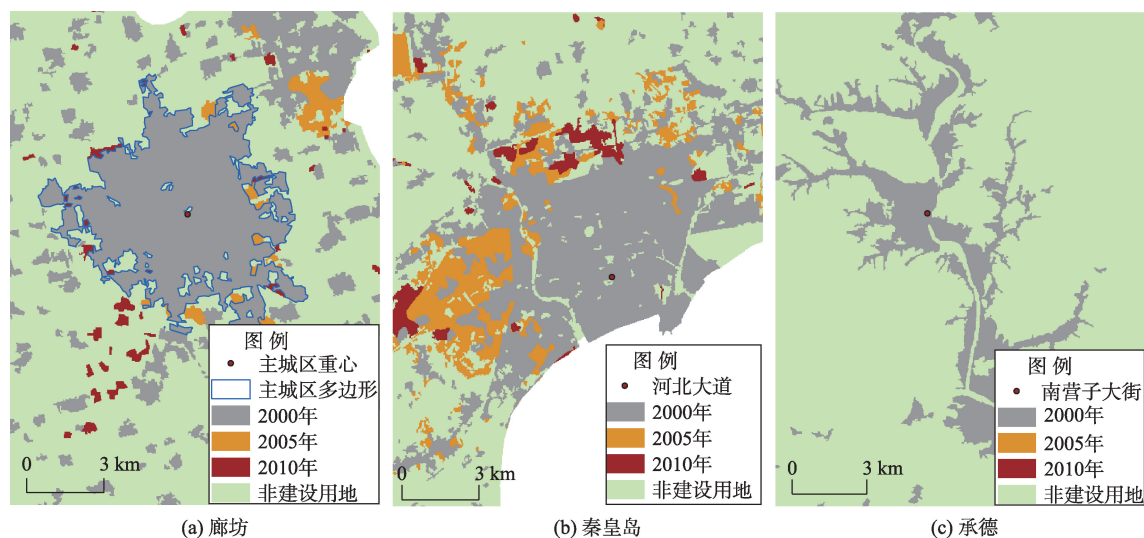


图1 圆心位置的确定

Fig.1 Sketch maps for defining the centers of concentric circles of spatial measurement



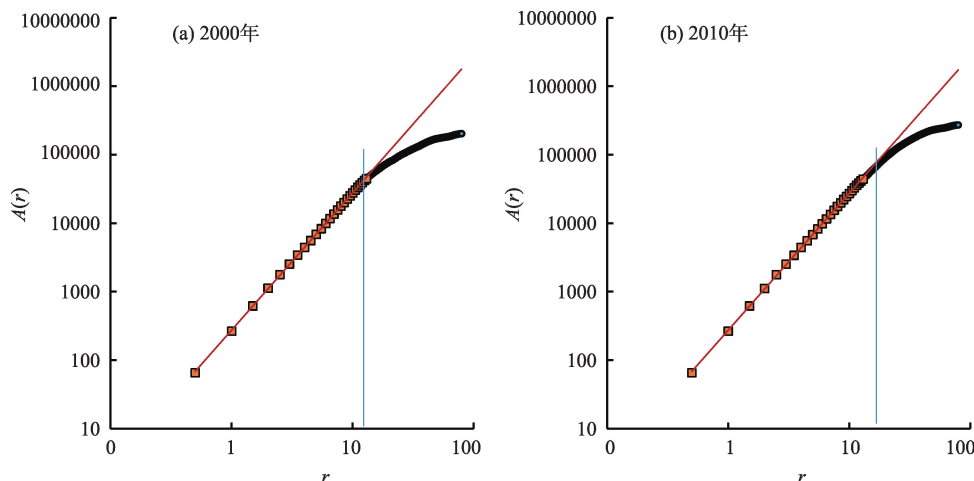


图2 北京市半径和累计建设用地面积双对数图

Fig.2 Log-log plots of zone number and cumulative construction land area of Beijing

半径的双对数散点图进行判断,这里的密度指的是每个环带的建设用地面积除以环带总面积。图3是北京市环带编号和环带建设用地密度双对数图,可以看到在半径为60 km处,有明显转折,而且3个年份结果均是如此,故60 km为第二标度区外围。

## 2 结果和分析

### 2.1 径向维数计算结果

根据上述数据处理方法,可以得到京津冀地区3个年份全部城市的标度区范围和径向维数。其中,径向维数是利用固定标度区计算得到的。因为只有根据相同的尺度范围计算分维,纵向才可比。所以,我们采用各个城市2000年的标度区范围,计算不同年份的径向维数(表1,表2)。表1中,第一标度区反映的是已经城镇化区域,第二标度区反映的是未来有可能成为城市的一部分地区。表2中,径向维数反映的是2个标度区范围内的城市建设用地密度从内部到外围的分布情况。径向维数小于2时,值越小,说明从中心向外围递减的速率越快。标准差可以反映参数估计的变异程度。首先初步分析一下表2中标准差的变化。2000、2005、2010年第一标度区的标准差平均值分别为0.013、0.012、0.010,逐渐减小,变异性越来越小;第二标度区的标准差平均值分别为0.017、0.019、0.020,逐渐增大,变异性越来越大。虽然就统计学意义而言,上述变化不够显著,但大体反映一种趋势:已经城市化区域内的建设用地形态越来越有规律,外围的建设用

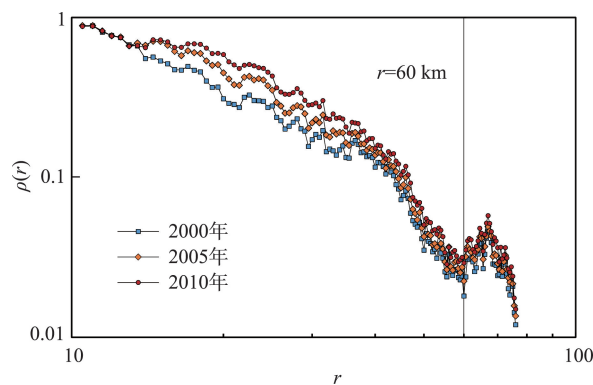


图3 北京市半径和建设用地密度双对数图

Fig.3 Log-log plot of zone number and zonal construction land density of Beijing

地越来越杂乱无章。下面根据表1和表2的计算结果分析其空间分布特征和时空演化规律。

### 2.2 时空演化特征分析

从整个城镇体系看来,京津冀各城市标度区的范围与到北京的距离有关。第一标度区的空间分布特征是:以北京为中心,距离越远第一标度区范围有越小的趋势。但是2000—2010年北京毗邻城市建设用地扩张缓慢。为方便解读空间分布特征,将3个年份的第一标度区范围绘制在地图中(图4)。从图4中可以看出,以京津唐为界限,2000年京津冀地区各城市的第一标度区范围东南高,西北低。此外,从集聚的角度来看,以北京为中心,离北京越远的城市第一标度区范围越小。其中,石家庄和邯郸为例外。邯郸距离北京太远,而石家庄为河北省会。就河北的地级市而言,以石家庄为中心,

表1 2000、2005、2010年京津冀各城市的标度区范围

Tab.1 Scaling range of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2000, 2005 and 2010 (km)

城市	2000年标度区		2005年标度区		2010年标度区	
	第一标度区	第二标度区	第一标度区	第二标度区	第一标度区	第二标度区
北京	13	60	16	60	19	60
天津	8	19	9	19	10.5	19
保定	4	9	4	9	4	9
沧州	3.5	14	3.5	14	3.5	14
承德	1.5	14	1.5	14	1.5	14
邯郸	4	12.5	4	12.5	5	12.5
衡水	2.5	9	3	10	3.5	12.5
廊坊	3.5	13	3.5	13	3.5	13
秦皇岛	3	10	3	12	3	10
石家庄	5	24.5	5.5	24.5	6	24.5
唐山	4	11.5	4	11.5	5	11.5
邢台	3	15	3	15	3.5	15
张家口	2	12	2	12	2	12

注：①河北各城市按名称首字母排序，下同；②表格中的数字分别指的是第一和第二标度区外边界到圆心的距离。以2000年北京市结果为例，第一标度区范围为0~13 km，共13 km；第二标度区范围为13~60 km，共47 km。

离石家庄越远，第一标度区范围越小。在与北京毗邻的5个城市中，除了天津以外，张家口、承德、保定、廊坊的第一标度区范围10 a之间都没有显著变化。与北京非毗邻的7个城市中，除了沧州以外，秦皇岛、唐山、石家庄、衡水、邢台、邯郸的第一标度区范围都有所增长。因此，尽管整个京津冀地区的建设用地城镇化体现了以北京为中心的集聚特征，但是2000—2010年，北京在一定程度上抑制了毗邻城市的建设用地扩张。大城市对中小城市的生长抑制如图乔木的阴影剥夺灌木和草丛的阳光(Evans, 1985)，这种现象可以视为城市地理系统的“阴影效应”(Chen, 2011b, 2014)。这也在地区层面印证了城市首位律的作用(Jefferson, 1939)。北京市的首位效应在中国城市经济发展过程中依然十分强大。

在局部层面，京津冀地区城市生长的分形特征如下。其一，北京市第一标度区的范围最大，10 a间增长幅度也是最大的，共往外扩张了6 km，平均每年0.6 km。第二标度区内，径向维数快速增加(增加量0.374)。在京津冀区域中，北京的城市建设用地扩张程度和速度都遥遥领先。其二，天津市第一标度区范围排名第2，10 a内共向外扩张了2.5 km。第二标度区内的径向维数大幅增加(增加量0.44)，是所有城市中分维增长最快的，这意味着天津市城郊地带用地快速开发。不过，天津市第二标

度区范围较小，甚至小于石家庄，这表明天津市的发展空间受限，未来的拓展空间不足。其三，石家庄是河北地级市中第一标度区范围最大的，其第一标度区范围5 a往外扩张0.5 km。第二标度区内，径向维数小幅增加(0.07)。在河北地级市中，该增加幅度也不算大。与天津的问题相反，石家庄的问题是第二标度区范围太大，这反映城郊用地缺乏有效的规划和管理。其四，唐山、邯郸、保定3个城市2000年的第一标度区范围都是4 km，后来唐山和邯郸10 a间扩张了1 km，保定不变。第二标度区内，唐山和保定的径向维数类似，邯郸的径向维数要低一些，10 a间3个城市的增加幅度差不多，都是0.1左右。虽然这3个城市第一标度区范围相同，但是邯郸第二标度区径向维数小，也就是说外围建设用地密度快速下降，保定城市范围扩张缓慢，10 a之间第一标度区范围没有扩张。其五，沧州、廊坊在2000年的第一标度区范围都是3.5 km，10 a间均没有增长。它们的第一标度区径向维数和第二标度区径向维数都有小幅度增加。这2个城市的建设用地增长十分类似，无论是扩张程度还是扩张速度都是属于中间型的。其六，邢台、秦皇岛在2000年的标度区范围都是3 km，10 a之后，邢台的标度区范围增加了0.5 km，秦皇岛不变。然而，秦皇岛第二标度区径向维数大幅增加，仅次于天津，远高于邢台。通过遥感影像可见，主要原因是秦皇岛2000—

表2 2000、2005、2010年京津冀各城市的径向维数  
Tab.2 Radial dimension of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2000, 2005 and 2010

城市	2000年径向维数		2005年径向维数		2010年径向维数	
	第一标度区	第二标度区	第一标度区	第二标度区	第一标度区	第二标度区
北京	2.0057	1.0999	2.0058	1.2977	1.9998	1.4741
	(0.008)	(0.024)	(0.008)	(0.034)	(0.009)	(0.041)
天津	1.9832	0.9560	1.9941	1.2459	1.9944	1.3933
	(0.012)	(0.039)	(0.015)	(0.026)	(0.014)	(0.026)
保定	2.0177	1.0949	2.0147	1.1572	2.0148	1.2112
	(0.016)	(0.007)	(0.014)	(0.013)	(0.014)	(0.013)
沧州	1.9967	0.9124	2.0035	0.9233	2.0053	0.9477
	(0.011)	(0.006)	(0.009)	(0.007)	(0.009)	(0.006)
承德	1.8556	1.0329	1.8556	1.0329	1.8556	1.0372
	(0)	(0.022)	(0)	(0.022)	(0)	(0.021)
邯郸	1.9534	0.9101	1.9550	0.9484	1.9652	1.0143
	(0.01)	(0.012)	(0.009)	(0.015)	(0.006)	(0.021)
衡水	1.9680	0.9198	1.9591	0.9084	1.9865	1.0112
	(0.016)	(0.022)	(0.011)	(0.025)	(0.005)	(0.022)
廊坊	1.9821	0.9145	1.9897	0.9357	1.9908	0.9671
	(0.017)	(0.01)	(0.015)	(0.011)	(0.015)	(0.011)
秦皇岛	1.9513	0.8649	1.9424	1.1303	1.9492	1.1935
	(0.023)	(0.021)	(0.024)	(0.026)	(0.023)	(0.026)
石家庄	1.9983	1.0626	2.0004	1.098	2.0043	1.1348
	(0.007)	(0.014)	(0.005)	(0.017)	(0.004)	(0.024)
唐山	2.0098	1.1018	2.0137	1.1237	2.0279	1.1976
	(0.023)	(0.021)	(0.023)	(0.023)	(0.023)	(0.026)
邢台	1.9727	0.9414	1.9729	0.9539	1.9729	0.9830
	(0.008)	(0.014)	(0.008)	(0.015)	(0.008)	(0.011)
张家口	2.0709	0.7917	2.0709	0.7966	2.0825	0.8887
	(0.0123)	(0.008)	(0.012)	(0.008)	(0.008)	(0.011)

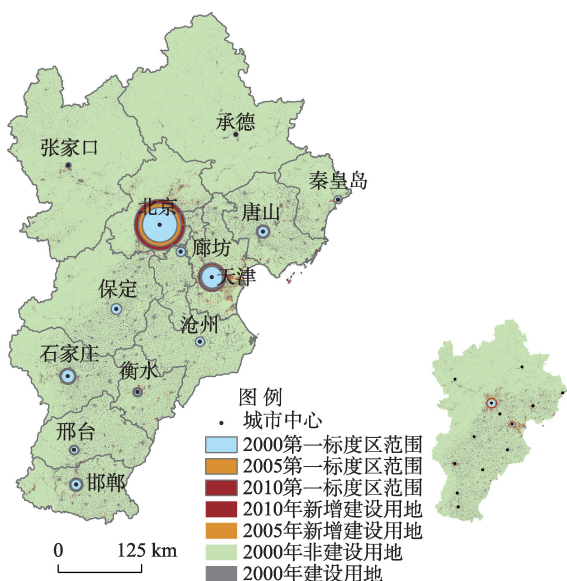
注:括号内为标准误差。

2005年有大规模的建设(图1b),范围4~8 km。其七,衡水、张家口和承德。衡水在2000年第一标度区范围是2.5 km,往后每5 a增加0.5 km,在河北城市中属于城镇化区域增加较快的。其第二标度区径向维数有小幅增加,高于邢台。张家口在2000年第一标度区范围是2 km,它的标度区范围没有扩大。张家口的第一标度区径向维数最大,而第二标度区径向维数最小。这表明,张家口的建设用地集中在城市中心,外围的建设用地十分稀少。标度区范围最小的是承德,只有1.5 km,这可能和承德纵向型发展的城市形态有关(图1c)。承德在10 a间,无论是城镇化区域,还是径向维数,都几乎没有变化,可以看出建设用地扩张十分缓慢。

理论上来说,径向维数增大有2种情况:一种是区域外围的建设用地填充,另一种是内部的建设用

地退化,总之需要外围的填充速度高于内部。径向维数减小的情况反之。为直观起见,将表1、表2的内容绘制成图(图5)。综合看来,第一标度区范围随着时间的推移会扩大,标度区范围扩大表示城镇化区域往外发展;第二标度区范围和径向维数随着时间的推移,升降不定。各城市径向维数和标度区范围之间的差距反映了3个年份相应数值的变化特征。从图5a中可以看出,京津冀地区城镇化区域差距拉大。最高的是北京13 km,然后是天津8 km。河北11个城市中石家庄最高为5 km,承德最低为1.5 km,平均值为3.3 km。北京市的第一标度区范围是河北平均值的4倍,是天津的1.6倍。由此可见,北京市的城镇化区域在京津冀地区一家独大。另外,随着时间的推移,这种差距继续拉大。到2010年,北京的第一标度区范围是河北平均值的





注:左图为示意图,图中的标度区范围是实际范围的2倍,右下角的小图为实际图

图4 京津冀各城市第一标度区范围图示

Fig.4 First scaling range of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei region

5.2倍,是天津的1.8倍。上文提到,第一标度区是已经城镇化区域,人口和用地的城镇化过程接近尾声。这就意味着,在京津冀的城镇体系中,城镇化区域差距拉大。根据图5b,在第一标度区范围内,各城市之间径向维数差异较小。3个年份里,13个城市的径向维数都在1.85~2.10之间,绝大部分在1.95~2.05之间。最高的是张家口,在2010年达到2.08(高于2,属于不正常的数值),最低的是承德,3个年份都是1.86。随着时间的推移,各城市径向维数变化幅度也非常小。2000—2005年,第一标度区径向维数平均增加了0.001;2005—2010年,平均增加0.005。从图5c可以看出,第二标度区范围有越往右值越小的趋势,这表明第一标度区范围大的城市,第二标度区范围也相对大。不同于第一标度区,第二标度区外围在10 a之间几乎没有变化。因此,第二标度区范围的变化主要是取决于第一标度区范围的变化。根据图5d,在第二标度区,各城市之间径向维数差异较大。并有越往右值越小的趋势,说明第一标度区范围和第二标度区径向维数具有一定的正相关性。随着时间的推移,径向维数变化幅度也较大。2000—2010年,第二标度区径向维数平均增加了0.07。这是因为第二标度区是未来有可能成为城市的一部分地区,城镇化过程仍然十分活跃。

### 2.3 社会经济因素的影响分析

为了深入了解京津冀城市生长和形态,考察标度区、径向维数与社会经济数据之间的关系,本文选取了常住人口、地区生产总值(GDP)、城镇化水平、人均GDP四个要素。首先计算标度区面积,然后将标度区面积、径向维数和社会经济数据进行相关分析,最后以社会经济要素为自变量做逐步回归。为简明起见,仅以2010年的结果为例列表展示(表3)。结果表明:其一,整体上,经济水平对京津冀城市建设用地扩张的影响最大。在逐步回归结果中,以2010年第一标度区面积为自变量的回归分析引入了常住人口、GDP、人均GDP三个自变量,其中GDP的标准化回归系数绝对值最大;以第二标度区面积为因变量引入了GDP和人均GDP两个自变量,同样是GDP的标准化回归系数绝对值更大;以第一标度区径向维数为因变量所有社会经济因素都被剔除;以第二标度区径向维数为因变量只引入了GDP一个自变量。说明地区生产总值无论是对城镇化区域范围,还是对外围的建设用地扩张的影响都是最显著的。其二,北京的城市建设用地扩张已经由经济因素主导转变为人口因素主导。从时间上来看,京津冀城市第一标度区面积与地区生产总值的相关系数减小,与常住人口的相关系数增加。但这是由于北京和天津的特殊性造成的。假如仅用河北的数据,结果正相反。如果绘制出第一标度区面积-地区生产总值散点图(图略),就可以清晰地看到,北京的第一标度区面积增长太快,远超过了地区生产总值的增长速度。根据第一标度区面积-常住人口散点图,又可以看到京、津的第一标度区面积和常住人口都快速增加,导致数据点离河北城市的趋势线越来越远。天津不如北京那么显著。这暗示,北京的第一标度区面积快速增长是人口集中所致。

针对上述两方面的分析,提出相应的政策建议:①河北各城市要发展城镇化,首先要找准其战略定位,然后通过与北京、天津的紧密合作提高经济实力。河北可以抓住京津冀一体化的机遇,加强与京津以及河北其他城市的协作(孙久文等, 2012; 李建民, 2014)。具体来说,与京津距离较近的河北城市,例如张家口、承德、保定、廊坊,应该充分发挥经济腹地的作用,利用比较优势,与京津形成良好的产业互补关系,避免同质化竞争。与京津距离较远的城市以及港口城市,可以发挥好门户城市的作

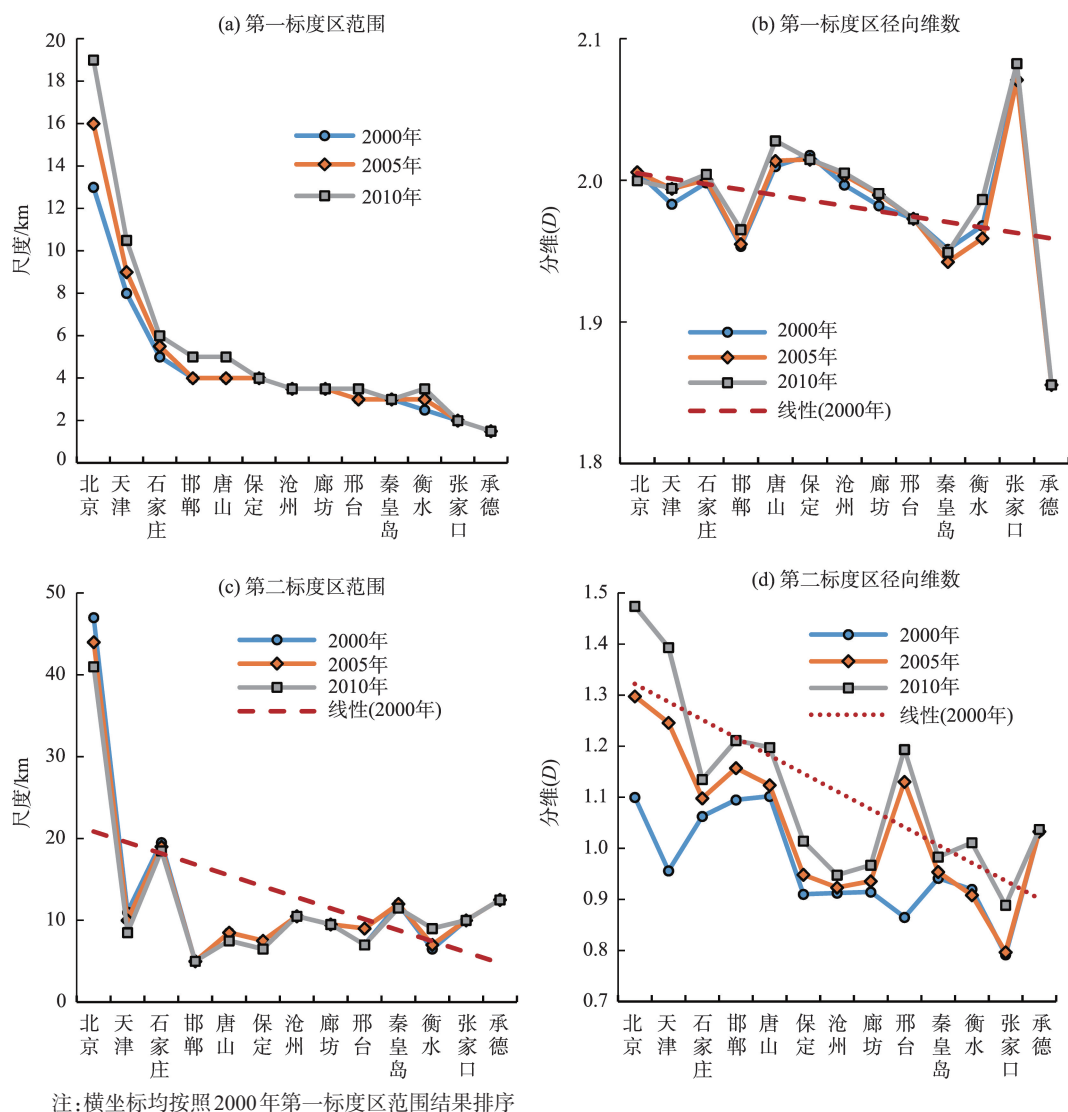


图5 京津冀各城市2000、2005、2010年的标度区范围和径向维数

Fig.5 Scaling range and radial dimension of each city in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2000, 2005 and 2010

用,帮助促进京津冀地区和全国以及全世界的交往,例如邯郸、唐山、秦皇岛。这样,京津冀各城市优势互补,可以提升京津冀的整体竞争力,实现共赢。②北京应该更加重视提升城镇化的质量。目前,人口的快速集中已经给北京带来了沉重的负担,导致了一些严峻的城市问题,例如交通拥挤、住房资源紧张、房价快速上涨、垃圾围城等。北京在城镇化过程中,应在保证经济中高速增长的基础上,以人为本,着力提高人民生活水平和质量,改善生态环境,发展为更宜居的北京。

### 3 讨论与结论

根据第一标度区径向维数,可以判断出,京津

冀地区城镇化区域内用地十分紧张。Batty 等(1994)在其专著中列举了29个城市空间形态分维(P242),最高的达1.93,包括北京和洛杉矶;最低的大约1.3,包括台北和东京(有些是地形导致);大多数城市分维在1.7左右。从城市的动态演化趋势看,形态维数逐渐接近并波动于1.7左右。分维越大,城市内部活动密度越大,当分维过大时,城市建设用地的内部填充过度密集,出现拥挤的弊症。因此,城市形态的分维不宜高出1.71过多,以便为防灾以及日后城市改建留有足够的余地(陈彦光,2005)。但是1.71的标准主要是针对网格维数而言。网格维数和径向维数在理论上是相等的(Batty et al, 1994),但是现实中并不相等(Frankhauser, 2007)。目前,在城市形态分维里面,网格维数的计



表3 2010年京津冀各城市标度区面积、径向维数与社会经济数据的相关系数及回归系数  
Tab.3 Correlation coefficients of scaling range, radial dimension, and socioeconomic data of cities  
in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2010

标度区	常住人口	GDP	城镇化水平	人均GDP
第一标度区面积	0.852** (-0.528)	0.939** (2.177)	0.866** (0)	0.731** (-0.856)
第二标度区面积	0.767** (0)	0.829** (1.517)	0.729** (0)	0.582* (-0.771)
第一标度区径向维数	0.206 (0)	0.120 (0)	0.131 (0)	0.100 (0)
第二标度区径向维数	0.744** (0)	0.768** (0.768)	0.682* (0)	0.606* (0)

注：①括号中的零值代表SPSS默认逐步回归中被剔除的变量，非零数字代表被引入变量的标准化回归系数；②\*、\*\*分别代表通过显著性水平为0.05、0.01的检验；③社会经济数据来自人口普查、中国城市统计年鉴、北京统计年鉴、天津统计年鉴、河北经济年鉴；④城镇化水平为以常住人口衡量的城镇化水平。

算结果比较清晰，径向维数因为标度区界限的问题往往似是而非，究其原因在于多分形和自仿射2个方面的影响(陈彦光, 2017)。本文借助面积-半径分布确定标度区，相对客观，也可以利用径向维数判断网格维数的大小。城镇化区域内，13个京津冀城市的径向维数都在1.85~2.10之间，绝大部分在1.95~2.05之间。除了承德为1.86，其他12个城市的径向维数都高于1.94，接近于2。径向维数等于2时，城市建设用地密度从中心到外围没有变化。根据遥感影像，第一标度区范围内的土地几乎被填满。因此，可以推断城镇化区域内的网格维数也接近于2。城市土地利用分维如此之高，难免出现诸多问题。在未来的建设中，应该要注意控制用地密度，避免将城市空间全部填满。

利用面积-半径标度研究中国城市形态，文献中早见报道。其中与本文关系最大的是姜世国等(2006)的研究，他们利用1984和1999年的遥感数据，借助径向分维分析了北京城市生长的分形特征，发现城市生长具有各向异性的特点。但是，利用径向维数及其标度区长短、分段和变化系统研究一个城镇体系如京津冀城市群的报道尚未见到。从这个意义上讲，本文在方法和内容方法有自身的特色。此外，本课题其他成员利用网格法-盒子法的一种研究京津冀城市和城镇体系分析特征，也发现城市形态的自仿射现象，从不同的角度与本文的结果相互印证。不足之处在于，其一，同心圆的中心系根据对城市的经验认识确定，目前尚且没有理论根据和定量标准。因为圆心的位置对于径向维数和标度区的测定而言甚为重要。本文根据各个

城市的具体实际情况，确定了圆心位置。其二，缺乏时间序列的动态分析。作者当前的遥感数据只有3个年份，据此可以看出一些动态变化特征，但却不能建立长期发展的预测分析模型。如果具备10个年份以上的遥感数据，就可以构建分维和标度区变化的预测模型，进而开展动力学分析。

综上所述，京津冀地区的城镇化在整体层面(城镇体系)和局部层面(单个城市)都表现出显著的中心集聚效应，从中心到边缘的扩散效应在过去10多年不占主导力量。具体而言，主要结论如下：其一，北京在京津冀城镇体系的发展过程中发挥对立统一的作用：城市首位效应和阴影效应。一方面，京津冀地区城镇化区域体现出了以北京为核心的中央集聚特征；另一方面，北京抑制了毗邻城市的生长过程。北京和天津的第一标度区范围远大于其他城市。从空间方面看，在与北京毗邻的5个城市中，除了天津以外，张家口、承德、保定、廊坊的第一标度区都没有显著增长。与北京非毗邻的7个城市中，除了沧州以外，秦皇岛、唐山、石家庄、衡水、邢台、邯郸的第一标度区都有明显增长。从演化方面看，第一标度区的大小差距比较大，随着时间的发展，该差距进一步拉大。其二，在整个区域中，各个城市的中心和外围都出现二元化格局。城市中心部分过于紧凑，而外围则相对凌乱，中心-边缘缺乏一体化过程和分布格局。而且，随时间推移，城市中心用地愈加规则，外围愈加杂乱无章。从空间上看，第一标度区(中心城区)填充迅速，第二标度区(郊区、郊县)一般变化缓慢且缺乏共性。第一标度区范围内的土地几乎被填满。城市土地利用形态

的分维过高,表现出了见缝插针式的土地利用模式,该模式难免导致生态、抗灾和未来城市改造等诸多问题。从发展上看,京津冀各城市有不同的关于建设用地增长的问题,比较显著的有:天津未来可能成为城市的范围太小;沧州和廊坊的建设用地扩张缓慢;邯郸在城镇化区域外围的建设用地密度,从内部向外围下降比较快;保定城镇化区域没有增长;石家庄在城镇化外围的建设用地增长相对比较缓慢;张家口的建设用地过于集中在城市中心。其三,城市化的影响因素暗示了经济报酬递增和人口集聚的规模效应。一个迹象是,城市人口集聚的规模经济可能替代报酬递增效应,成为京津冀城市发展的第一动力。目前看来,在各主要经济指标中,经济水平对京津冀整体的城市建设用地扩张的影响最大。但是,北京的城市建设用地扩张已经由经济因素主导转变为人人口因素主导。结合建设用地扩张的空间分布规律,本文提出相应的政策建议:①北京应该更加重视提升城镇化的质量,在保证经济中高速增长的基础上,多考虑人的因素;采取措施,提高北京和天津的辐射能力,带动周边城市尤其是承德和石家庄的经济发展,改善京津冀城镇体系的空间结构。②河北各城市要找准其战略定位,通过与北京、天津的紧密合作提高经济实力。具体来说,与京津距离较近的城市,应充分发挥经济腹地的作用,利用比较优势,与京津形成良好的产业互补关系;与京津距离较远的城市以及港口城市,发挥好门户城市的作用,帮助促进京津冀地区 and 全国以及全世界的交往。③为了避免内部填充过度密集,为日后城市改建留有足够的活动余地,应该降低城市中心区域的用地密度,同时,重视城市化区域外围建设用地的规范问题,避免郊区的无序扩张。

## 参考文献(References)

- 陈彦光. 2005. 分形城市与城市规划 [J]. 城市规划, 29(2): 33-40, 51. [Chen Y G. 2005. Fractal cities and city planning. City Planning Review, 29(2): 33-40, 51. ]
- 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. 2007. 城市形态分维测算和分析的若干问题 [J]. 人文地理, 22(3): 98-103. [Chen Y G, Liu J S. 2007. On fractal dimension calculation and analysis of urban form. Human Geography, 22(3): 98-103. ]
- 陈勇, 艾南山. 1994. 城市结构的分形研究 [J]. 地理学与国土研究, 10(4): 35-41. [Chen Y, Ai N S. 1994. Studies on fractal structure of cities. Geography and Territorial Research, 10(4): 35-41. ]
- 冯健. 2003. 杭州城市形态和土地利用结构的时空演化 [J]. 地理学报, 58(3): 343-353. [Feng J. 2003. Spatial-temporal evolution of urban morphology and land use structure in Hangzhou. Acta Geographica Sinica, 58(3): 343-353. ]
- 姜世国, 周一星. 2006. 北京城市形态的分形集聚特征及其实践意义 [J]. 地理研究, 2006, 25(2): 204-212. [Jiang S G, Zhou Y X. 2006. The fractal urban form of Beijing and its practical significance. Geographical Research, 25(2): 204-212. ]
- 李建民. 2014. 京津冀城镇化及其与长三角和珠三角的比较 [J]. 人口与经济, 35(1): 3-7. [Li J M. 2014. The urbanization of Beijing, Tianjin, Hebei and the comparison with the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta. Population & Economics, 35(1): 3-7. ]
- 林炳耀. 1998. 城市空间形态的计量方法及其评价 [J]. 城市规划汇刊, 21(3): 42-45. [Lin B Y. 1998. The calculation method of urban spatial form and its evaluation. Urban Planning Forum, 21(3): 42-45. ]
- 刘继生, 陈彦光. 2004. 城市密度分布与异速生长定律的数理关系探讨 [J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 36(4): 139-148. [Liu J S, Chen Y G. 2004. The spatial complexity of the law of allometric growth and urban population density. Journal of Northeast Normal University (Natural Sciences Edition), 36(4): 139-148. ]
- 刘勇洪, 徐永明. 2015. 利用分形的北京城市空间拓展分析 [J]. 测绘科学, 40(10): 30-36. [Liu Y H, Xu Y M. 2015. Urban spatial expansion of Beijing based on city fractal. Science of Surveying and Mapping, 40(10): 30-36. ]
- 孙久文, 丁鸿君. 2012. 京津冀区域经济一体化进程研究 [J]. 经济与管理研究, 35(7): 52-58. [Sun J W, Ding H J. 2012. Research on the stage of Beijing-Tianjin-Hebei regional integration. Research on Economics and Management, 35(7): 52-58. ]
- 王新生, 刘纪远, 庄大方, 等. 2005. 中国特大城市空间形态变化的时空特征 [J]. 地理学报, 60(3): 392-400. [Wang X S, Liu J Y, Zhuang D F, et al. 2005. Spatial-temporal changes of urban spatial morphology in China. Acta Geographica Sinica, 60(3): 392-400. ]
- Batty M. 1991a. Cities as fractals: Simulating growth and form [M]// Crilly A J, Earnshaw R A, Jones H. Fractals

- and Chaos. New York: Springer: 43-69.
- Batty M. 1991b. Generating urban forms from diffusive growth [J]. *Environment and Planning A*, 23(4): 511-544.
- Batty M. 2008. The size, scale, and shape of cities [J]. *Science*, 319: 769-771.
- Batty M, Fotheringham A S, Longley P A. 1989. Urban growth and form: Scaling, fractal geometry and diffusion-limited aggregation [J]. *Environment and Planning A*, 21(11): 1447-1472.
- Batty M, Longley P. 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.
- Chen Y G. 2011a. Derivation of the functional relations between fractal dimension and shape indices of urban form [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(6): 442-451.
- Chen Y G. 2011b. Fractal systems of central places based on intermittency of space-filling [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 44(8): 619-632.
- Chen Y G. 2014. Multifractals of central place systems: Models, dimension spectrums, and empirical analysis [J]. *Physica A*, 402(10): 266-282.
- Chen Y G, Wang J J, Feng J. 2017. Understanding the fractal dimensions of urban forms through spatial entropy [J]. *Entropy*, 19(11): 600.
- De Keersmaecker M L, Frankhauser P, Thomas I. 2003. Using fractal dimensions for characterizing intra-urban diversity: The example of Brussels [J]. *Geographical Analysis*, 35(4): 310-328.
- Evans A W. 1985. *Urban economics: An introduction* [M]. New York: Basil Blackwell.
- Fotheringham S, Batty M, Longley P. 1989. Diffusion-limited aggregation and the fractal nature of urban growth [J]. *Papers of the Regional Science Association*, 67(1): 55-69.
- 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.
- Frankhauser P. 2000. GIS and the fractal formalisation of urban patterns: Towards a new paradigm for spatial analysis? [M]// Fotheringham AS, Wegener M. *Spatial models and GIS: New potential and new models*. London, UK: Taylor & Francis: 121-142.
- Frankhauser P. 2007. Fractal geometry of urban patterns and their morphogenesis [J]. *Discrete Dynamics in Nature & Society*, 2(2): 127-145.
- Frankhauser P, Sadler R. 1991. Fractal analysis of agglomerations [M]// Hilliges M. *Natural structures: Principles, strategies, and models in architecture and nature*. Stuttgart, Germany: University of Stuttgart: 57-65.
- Haggett P, Cliff A D, Frey A. 1977. *Locational analysis in human geography* [M]. The 2nd Edition. London, UK: Arnold.
- Jefferson M. 1939. The law of the primate city [J]. *Geographical Review*, 29(2): 226-232.
- Longley P A, Batty M, Shepherd J. 1991. The size, shape and dimension of urban settlements [J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 16(1): 75-94.
- Longley P A, Mesev V. 2000. On the measurement and generalization of urban form [J]. *Environment and Planning A*, 32: 473-488.
- Makse H, Havlin S, Stanley H E. 1995. Modelling urban growth patterns [J]. *Nature*, 377: 608-612.
- Makse H A, Andrade Jr J S, Batty M, et al. 1998. Modeling urban growth patterns with correlated percolation [J]. *Physical Review E*, 58(6): 7054-7062.
- Stanley H E, Ostrowsky N. 1986. *On growth and form: Fractal and non-fractal patterns in physics* [M]. Boston: Martinus-Nijhoff.
- Sun J, Huang Z J, Zhen Q, et al. 2014. Fractally deforested landscape: Pattern and process in a tri-national Amazon frontier [J]. *Applied Geography*, 52: 204-211.
- Thomas I, Frankhauser P, Biernacki C. 2008. The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium): A classification using fractal indices [J]. *Landscape and Urban Planning*, 84(2): 99-115.
- Thompson D W. 1917. *On growth and form* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 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.
- White R, Engelen G. 1994. Urban systems dynamics and cellular automata: Fractal structures between order and chaos [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 4(4): 563-583.



## Radial dimension analysis of growth and form of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region

ZHANG Feng<sup>1</sup>, CHEN Yanguang<sup>1\*</sup>, LI Xiaosong<sup>2</sup>

(1. Department of Urban and Economic Geography, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Urban growth and form are important contents of geographic research on sizes and shapes. Fractal dimension is an effective scaling parameter to describe urban form and reflect urban growth. Based on remote sensing data of construction land in 2000, 2005 and 2010, this study analyzed the spatial pattern and change of cities and towns in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Fractal measures, including radial dimension and the corresponding concept of scaling range, were applied. The main results are as follows: 1) The first scaling area and its growth rate of Beijing are the largest in the Beijing-Tianjin-Hebei urban system, producing a shadow effect on the surrounding cities. 2) On the whole, the farther from Beijing, the smaller the scope of the first scaling range of other cities. 3) For almost all the cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region, the first scaling areas are overfilled by construction land. 4) Economic development level has the greatest impact on the overall urban construction land expansion in the region, but the driver of urban construction land expansion in Beijing has changed from economic factors to population factors. Based on these findings, several conclusions can be drawn: 1) Beijing has dual effects in the process of urban development in the region, including the primary city effect, and the shadow effect. While Beijing drives the development of the Beijing-Tianjin-Hebei region, it also inhibits the growth of some other cities. 2) The central part of each city in the study region is too compact, but the development of the peripheries is relatively disorderly, and the main city areas and outskirts lack integration. 3) Population may become the key dynamics of the urban change in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The principal role of economic return growth may be replaced by the economies of scale based on urban population agglomeration in the future. These results and conclusions may help the research community and government authorities understand the status quo and future development trend of urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region from a new perspective.

**Keywords:** Beijing-Tianjin-Hebei region; urban system; urban land use; fractal; radial dimension; scaling range