

京津冀城镇用地空间结构的多分维谱分析

黄琳珊, 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:城市形态和城镇体系都具有分形性质,但简单分形模型不能有效揭示城市系统的复杂结构特征及其背后的问题。多分形模型及分析方法是研究城市空间复杂性和描述城市异质性的有效手段。利用城镇建设用地和总建设用地的多分维谱分析,可以发现京津冀城镇体系及主要城市的空间演化问题。主要结果如下:①京津冀总建设用地的全局谱线不正常,代表中心区的谱线收敛过快,而代表边缘区和乡村地区的谱线收敛位置严重越界;②局部谱线单峰左偏,左(趋向中心区)高密、右(趋向边缘区)低疏,且右边数值越界;③多分维增长曲线服从二次logistic函数,但不同区域和城市的生长曲线的拐点位置不同。深入分析谱线特征及其异常根源,得出如下结论:①京津冀主要城市的中心区填充过密,没有太多缓冲空间,而边缘区无序扩展,需要通过规划进行优化;②京津冀城市生长以外扩展模式为主,但河北省总建设用地有中心集聚迹象;③京津冀地区特别是主要城市用地接近饱和,土地扩展速度高峰已经过去,只有河北省部分区域例外。

关键词:城镇体系;多分形;多分维谱;自仿射;土地利用;京津冀地区

当前城市研究的趋势之一是科学化,数学建模和计算机模拟实验是科学研究的主要方法。科学研究过程可以分为两个环节:一是描述,二是理解(Gordon, 2005)。如果一个系统具有特征尺度,就可以利用常规测度和数学方法进行描述。但是,如果系统没有特征尺度,则常规测度和数学方法失效,需要借助标度分析(Takayasu, 1990)。城市和城镇体系在很多方面没有特征尺度,无法采用传统数学工具建模(陈彦光, 2015)。分形几何学作为标度分析的有效工具之一,早已用于城市的无尺度分析(Batty et al, 1994; Frankhauser, 1998)。对于单一的标度现象,简单分形建模即可。但现实的城市和城镇体系都具有多重标度性质,需要利用多分形理论描述其结构和演化过程。多分形的特点是不同的局部有不同的空间特征,从而不同的局部有不同的分维(汪富泉等, 1996)。借助多分维谱可以将城市形态或者城镇体系的不同局部投影到多分维谱线

上,然后利用多分维谱开展结构分析(Chen, 2014)。多分维谱就像是望远镜和显微镜,可以将城市形态的局部放大、城市的不同部分展开,以便进行细节分析和对比分析(Chen et al, 2013)。

多分形理论应用于城市研究已20多年,最近几年成果开始增多(Haag, 1994; 陈涛, 1995; 刘继生等, 2003; Ariza-Villaverde et al, 2013; Murcio et al, 2015; Salat et al, 2018)。Ariza-Villaverde等(2013)使用沙盒法多重分形方法(sandbox multifractal method)分析了西班牙城市Cordoba的两个不同邻域,发现当描述城市形态时,Rényi多重分形谱线比一个简单的分形维数效果更好,因为多重分形可以展示出在不同的规划和社会经济制度下建立的规则与不规则街道的布局。文章不仅证明了城市形态的多重分形特征,也证明了多重分形分析比简单分形维数分析能够提供更多的信息。早期人们将多分形作为观测数据的整理工具,如今已经发展到

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:黄琳珊(1989—),女,河南濮阳人,博士研究生,主要从事空间计算和地理信息分析。E-mail: linshanhuang@pku.edu.cn

*通信作者简介:陈彦光(1965—),男,河南罗山人,教授,主要从事地理分形与空间复杂性研究工作。E-mail: chenyg@pku.edu.cn

引用格式:黄琳珊, 陈彦光, 李双成. 2019. 京津冀城镇用地空间结构的多分维谱分析[J]. 地理科学进展, 38(1): 50-64. [Huang L S, Chen Y G, Li S C. 2019. Multifractal spectral analysis of land use structure of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system. Progress in Geography, 38(1): 50-64.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.005

构建假设、推导模型、发展理论的阶段(Chen et al, 2004; Chen, 2014; Chen, 2016)。Murico等(2015)通过对1786—2010年的伦敦街道做多重分形分析,有以下发现。第一,单一的分形维数用来描述城市形态,并不能够充分捕捉城市的动态变化,因此,对于像城市这样的动态演化系统,需要多重分形谱线来给出恰当的描述。第二,伦敦城市从非均质的分形结构逐渐向均质的分形结构演化。他们猜测这一趋势与伦敦外围的绿带有关。第三,通过加入空间限制条件,在受限扩散凝聚(Diffusion-limited Aggregation, DLA)模型基础上,借助计算机模拟,可以验证上一猜测。Salat等(2018)借助1912年和2012年京都的土地价格数据,推导出了城市模型,证明了多重分形分析非常适合用于衡量土地价格的空间异质性。他们还发现过去的京都和现在的京都之间,存在多重分形性的强烈下降以及均质化特征;而在现今的京都和现今的伦敦之间,以及过去的京都和100年前的曼哈顿之间,也有很多相似性。研究指出多重分形谱线描述分布异质性与其它工具相比存在巨大的优势,因此多重分形参数可以改进经典的衡量隔离程度和不平等水平的指标。

此次研究将京津冀作为研究区域,是因为对于城市和城镇体系形态而言,无论分析单个城市形态,还是探索城镇体系的空间结构,京津冀地区都是良好的实证研究区。城市是人口的城市,人口是城市第一动力学(Arbesman, 2012)。获得人口空间分布数据比较困难。人口活动的投影是城市用地(Rozenfeld et al, 2008)。借助遥感图像,可以提取城市用地数据,研究京津冀城市的现实特征和发展趋势。城市形态和城镇体系都与城市化有关(Knox et al, 2009)。在快速城市化阶段,城市问题会反映在单个城市的用地形态方面,也会反映在城镇体系的整体用地格局方面。本文将运用多分形建模分析,基于1995、2000、2005、2010和2013年5个年份19 a跨度的数据研究京津冀土地利用的空间结构及动态演化。借助多分维谱,揭示京津冀的城乡用地分异特征、中心-边缘结构特征和城市生长特征,指出隐含在城市和城镇体系发展过程背后的问题,为今后京津冀城市管理和规划提供一些具有启发意义的研究发现和结论。

1 多分形模型

1.1 多分形测度

对于简单的分形体,由于要素在分形体内分布

均匀,密度单一,可用一个维数描述。但是对于城市一类复杂的系统,由于不均匀分布,单个维数无法准确刻画其总体的特征,需要引入多分形的分析方法(Stanley et al, 1988; Encarnação et al, 2012)。多分形的分析方法由一系列的多分维测度组成(Kravchenko et al, 1999),可将研究对象内部的结构差异显著地表现出来(Folorunso et al, 1994)。通过改变参数 q ,具有某一空间特征的子集部分被放大或缩小(Chen et al, 2013),因此可以提供比简单的空间分维数更丰富的空间信息。多分形测度包含两套参数:全局参数和局部参数。全局参数包含广义关联维(D_q)和质量指数($\tau(q)$),局部参数包含奇异性指数($\alpha(q)$)和其对应的局部分维数($f(\alpha(q))$)(Feder, 1988; Chen, 2014)。简单分形中的一些常用维数,如容量维数($q=0$)、信息维数($q=1$)和关联维数($q=2$)都属于广义关联维集合(D_q)中的基本参数。

简单分形结构和多分形结构都存在标度不变性,借助多分形谱线可以进行区分。一是观察 $D_0 > D_1 > D_2$ 的关系是否成立;二是广义关联维(D_q)谱线是否是一条曲线而非近似水平直线;三是奇异性指数($\alpha(q)$)和对应的局部分维数($f(\alpha(q))$)谱线是否是一条平滑弯曲的单峰曲线,而非一个点或者范围非常窄的点集合。在全局参数中,基于Rényi信息熵的广义关联维数为(Feder, 1988):

$$D_q = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{I_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} = \begin{cases} \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i(\varepsilon)^q}{\ln \varepsilon}, & (q \neq 1) \\ \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} P_i(\varepsilon) \ln P_i(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}, & (q = 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中的参数解释如下:如果使用盒子法测量分维数,每次使用不同的尺度为 ε 的盒子覆盖测量体,则式(1)里的 P_i 是指被测量体被每个尺度为 ε 的盒子覆盖部分的测度 M_i 与测量体的总测度 M 的比值,即 $P_i = M_i/M$ 。如果同次覆盖的盒子尺度相同,则 P_i 可以看成是分布概率,即 P_i 越大,表示该区域密度越高、被覆盖的几率越大。通过改变 q 值,不同 P_i 的区域会得到不同程度的放大和缩小。当 $q \rightarrow +\infty$ 时,高密度区域的信息占绝对优势; $q \rightarrow -\infty$ 时,反映的是低密度区的信息。另一个全局参数是质量指数 $\tau(q)$,它与广义关联维数有以下对应关系:

$$\tau(q) = (q-1)D_q \quad (2)$$

式(2)表明广义关联维数 D_q 和质量指数 $\tau(q)$ 二者具有一定的等价性,故对于全局参数的分析主要借助于广义关联维数谱 $q-D_q$ 谱分析。

对于局部参数,奇异性指数的定义也是基于概率测度。一个多分形体可以看作是拥有不同奇异性指数的子集的集合。奇异性指数不同的值对应着被测量体不同的区域。对于同一个分形体, $\alpha(q)$ 越大,其所对应的集合的密度越低,反之则高。奇异性指数对应的区域的维数为局部分维数 ($f(\alpha(q))$)。局部分维数越大,表明奇异性指数所对应集合的生长概率越低,反之则高。理论上,奇异性指数可以取无穷多个值,每个多分形体的子集数目也是无穷多个(Murcio et al, 2015)。如果将奇异性指数 $\alpha(q)$ 与其对应的局部分维数 ($f(\alpha(q))$) 绘制于同一个图上,则构成了局部指数分维谱,即 $\alpha-f(\alpha)$ 谱,这是一种复合谱。理论上, $\alpha-f(\alpha)$ 谱线出现的范围是:左右范围在 D_∞ 与 $D_{-\infty}$ 之间,上下范围在 0 到 D_0 之间(Chen et al, 2013; Chen, 2014)。可见,不论上下左右,合理的范围是 0 到 2 之间。

对于 $\alpha-f(\alpha)$ 谱的解读,本文主要集中于以下三个测度。第一个是 $\alpha-f(\alpha)$ 曲线的峰值。多分形的 $\alpha-f(\alpha)$ 谱为一条具有单驼峰的弧线,其峰值为 ($\alpha(0), f(\alpha(0))$), 其中 $\alpha(0)=D_0-dDq/dq$, $f(\alpha(0))=D_0$, 从而 $\alpha(0)\approx f(\alpha(0))$ 。一般说来, $\alpha(0)$ 值越大,空间填充程度越高; $f(\alpha(0))$ 值越大,空间结构越复杂。第二个是奇异性指数 $\alpha(q)$ 的宽度 $\Delta\alpha$ 。 $\Delta\alpha$ 为奇异性指数的极差,即 $\alpha_{-\infty}$ 与 $\alpha_{+\infty}$ 的差值(Sun, Chen, Wu et al, 2001; Sun, Chen, Yuan et al, 2001; He et al, 2017)。基于 $\Delta\alpha$ 与嵌入空间维数 d 的比值,可以定义一个空间填充指数(Chen, 2016)。 $\Delta\alpha$ 越大,表明 $\alpha-f(\alpha)$ 谱线越宽,测量体的最高和最低密度差异越大,空间填充程度越高或者填充能力越强,从而空间异质性可能越强。第三个是局部分维数收敛时的高度差 Δf , 即 $\Delta f = f(\alpha_{+\infty}) - f(\alpha_{-\infty})$ (Sun, Chen, Wu et al, 2001; Sun, Chen, Yuan et al, 2001)。当 $\Delta f > 0$ 时,表现在 $\alpha-f(\alpha)$ 谱上是一个左勾状,分形生长以对外扩展为主;当 $\Delta f < 0$ 时,表现在 $\alpha-f(\alpha)$ 谱上是一个右勾状,分形生长以中心集聚为主要动力(Chen, 2014);当 Δf 约为零时,表现在 $\alpha-f(\alpha)$ 谱上是一个左右对称的弧线,即最高密度区域与最低密

度区域的生长速度接近(Chen et al, 2004)。借助于 $\alpha-f(\alpha)$ 谱以上 3 个指标,可以揭示测量体更为细致的局部密度的空间结构特征。

1.2 多分形测度的估算方法

多分形测度的估算有多种途径:可以从全局到局部,也可以从局部到全局。传统的方法是首先根据式(1),采用最小二乘法估算广义关联维数 D_q 。借助式(2),估算质量指数 $\tau(q)$ 。局部参数奇异性指数 $\alpha(q)$ 和局部维数 $f(\alpha(q))$ 则可以根据 Legendre 变换计算出来:

$$\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} = D_q + (q-1)\frac{dD_q}{dq} \quad (3)$$

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - \tau(q) = q\alpha(q) - (q-1)D_q \quad (4)$$

上述过程是从全局到局部。Legendre 变换方法的好处是回归分析过程稳定。这个过程需要将微分替换为差分,即将式(3)离散化为

$$\alpha(q) = \frac{\Delta\tau(q)}{\Delta q} = D_q + (q-1)\frac{\Delta D_q}{\Delta q} \quad (5)$$

由于上式容易引起误差,因此在实际的测量中,通常采用“ μ 权重法”(Chhabra et al, 1989),从局部到全局估算多分维谱。“ μ 权重法”的好处在于跳过微分方程即式(3)的离散化过程,计算快速方便,容易控制误差。通过观测数据的回归分析计算局部参数,然后借助 Legendre 变换或式(1)获得全局参数。这个方法的缺点在于,当 q 的绝对值变大时,计算过程容易发散。

综合考虑两条技术路线的优缺点,本文采取从局部到全局的计算过程。“ μ 权重法”的具体步骤如下。首先定义

$$\mu_i(\varepsilon) = \frac{P_i(\varepsilon)^q}{\sum_i P_i(\varepsilon)^q} \quad (6)$$

式中 P_i 与式(1)中 P_i 的意义相同。在计算出 P_i 的前提下,根据式(5),对于不同的 q 值,计算出 P_i 对应的 μ_i 。奇异性指数和相应的维数分别为

$$\alpha(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\ln \varepsilon} \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \ln P_i(\varepsilon) \quad (7)$$

$$f(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\ln \varepsilon} \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \mu_i(\varepsilon) \ln \mu_i(\varepsilon) \quad (8)$$

利用式(7)和式(8),借助最小二乘法容易估算参数 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha(q))$ (Chen et al, 2013)。利用式(1)和式(2),借助最小二乘法容易估算参数 D_q 和 $\tau(q)$ 。

2 方法和结果

2.1 数据处理方法

下面以城镇建设用地和总建设用地为依据,研究京津冀城镇体系和主要城市的空间结构及变化。原始数据为基于TM影像生成的1995、2000、2005、2010和2013年北京市、天津市和河北省的建设用地矢量图。根据其土地利用类型,分别提取城镇建设用地、农村居民点和工矿交通建设用地三类。其中,城镇用地直接作为城镇体系用地的研究对象(图1a),城镇建设用地、农村居民点和工矿、交通建设用地三类的总和为总建设用地,作为城乡体系用地的研究对象(图1b)。由于与农村居民点用地相比,工矿、交通建设用地的比例不大(表1),可以认

为总建设用地比城镇用地多出来的部分大体上为农村居民点用地。因此,二者的对比,既可以反映城镇用地的结构及演化特征,也可以反映农村居民点用地的结构及演化特征。除了对京津冀整体分析之外,还对北京市、天津市和河北省分别进行了多分形谱的估算,揭示京津冀整体和局部用地结构及演化特征的相似性和差异性。

多分形参数可以采用盒子法测量、最小二乘法计算。第一步,确定盒子法的最外框。这里选择各个省级行政区划边界的最小外接矩形为最大外框。图1中,黑色涂色部分为城镇建设用地(图1a)和总建设用地(图1b),方框为相应的最大外框。盒子法测量对象为最大外框内且位于该行政区划范围内的用地(不包含位于最大外框内但不属于该行

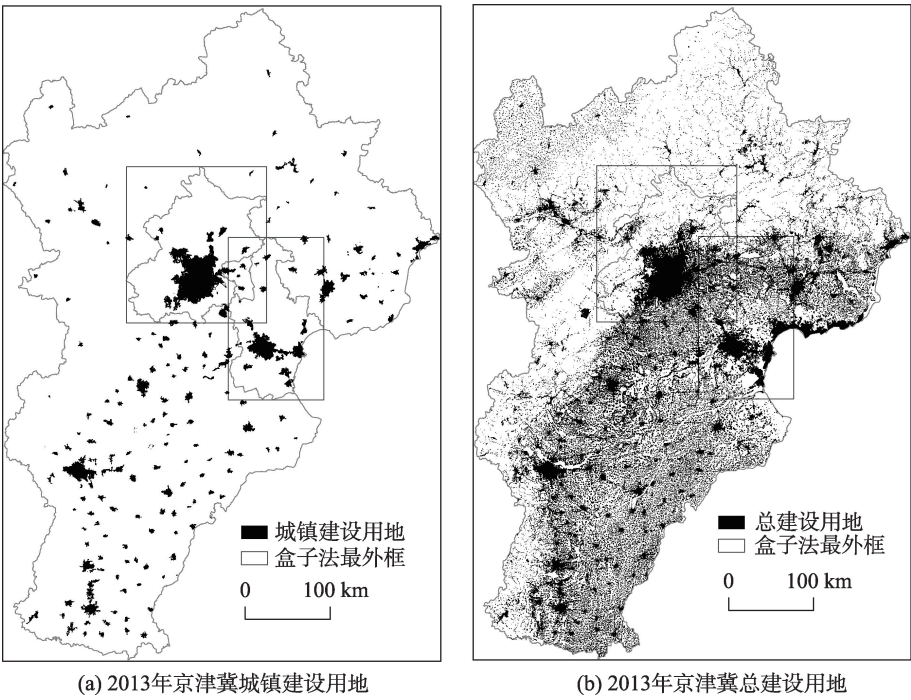


图1 京津冀城镇建设用地和总建设用地及最大外框示意图(以2013年为例)

Fig.1 Largest boxes for fractal dimension estimation of urban and total construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 2013

表1 城镇建设用地、农村居民点用地、工矿和交通建设用地的面积及占总建设用地的比例

Tab.1 Area and proportion of land use for urban, rural residential and industrial-transportation construction

年份	城镇建设用地		农村居民点用地		工矿和交通建设用地		总建设用地面积/m ²
	面积/m ²	比例	面积/m ²	比例	面积/m ²	比例	
1995	3430909489	0.2020	11154546324	0.6569	2395113056	0.1411	16980568869
2000	3541167552	0.2043	11451994392	0.6606	2343239014	0.1352	17336400957
2005	4775537679	0.2404	11709702253	0.5894	3381724968	0.1702	19866964900
2010	6517866881	0.2589	14435903946	0.5734	4222176983	0.1677	25175947809
2013	8079748079	0.3250	13273658619	0.5340	3505285674	0.1410	24858692372

政区划的用地)。采用盒子法划分的单元网格分别为 1×1 、 2×2 …… 512×512 。第二步,将用地面转换成用地点。将多边形转化成点集,分辨率为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,即将每 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 格子的面转换成其质点,这样可以更有效地反映分形特征。对于同一个测量对象,使用点计算的多分维谱在低密度测量区($q < 0$)的异常更少,因此使用点测量可以尽可能规避由于算法带来的估算误差。第三步,多分形参数估计。利用式(1)、式(2)、式(7)和式(8),借助最小二乘法,并采用固定截距,拟合估算广义关联维 D_q 、质量指数 $\tau(q)$ 、奇异性指数 $\alpha(q)$ 和局部分维数 $f(\alpha(q))$ 。对于每一个研究对象,固定截距与固定的最大外框相匹配,因此测量结果具有可比较性,可以做时间轴上的纵向对比分析(Huang et al, 2018)。参数 q 的矩次范围取 $-20 \sim +20$ 。这个范围的确定基于以下两个原因:第一,如果参数矩 q 的绝对值过大,则估算结果的可靠性会大大降低(Kantelhardt et al, 2001; Kantelhardt et al, 2002; Ihlen, 2012);第二,从测量结果上看,当 $q = -20$ 和 $q = +20$ 时,一般都已非常接近相应参数的极限值了。

2.2 整体计算结果

通过估算多分形全局参数和局部参数,可以分析京津冀城市和城镇体系的空间特征和演化趋势。多分形分析涉及4条谱线,分别是 D_q 、 $\tau(q)$ 、 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha)$ 相对于矩次参数 q 的展开结果(Chen, 2014, 2016)。但为了节省篇幅,人们常将两套局部参数谱合二为一,得到 $\alpha - f(\alpha)$ 复合谱,又叫 $f(\alpha)$ 曲线(Feder, 1988)。首先比较京津冀整体多分形谱中全局参数的特征,即广义关联维数谱 $q - D_q$ 谱线。在广义关联维 D_q 的计算中,利用式(1),可以借助最小二乘法估计直线的斜率确定维数。当散点在双对数坐标图上呈显著直线分布时,说明在全域尺度上遵循同一个标度率。在分别对京津冀整体的城镇建设用地区和总建设用地计算容量维的过程中,发现它们具有不同的标度现象。在城镇建设用地的计算中出现了显性双标度现象,即散点并不在同一条直线上排列,而是中间有个折断(图2a)。这意味着京津冀城镇用地的空间覆盖数目,在全域尺度上并非遵循同一个标度率,而是有所谓的双分形(bi-fractals)结构(White et al, 1993)。显性双标度暗示一种自仿射过程:不同方向、不同尺度或者不同区

域的分形发育不同步(Chen et al, 2009)。随着时间推移(1995—2013年),双标度的现象有减弱趋势。对于总建设用地(图2b),计算容量维时的散点都呈直线排列,说明加入了农村居民点用地的总建设用地的空间覆盖在全域尺度上遵循同一个标度率,形成自相似的空间格局。这意味着,标度间断根源之一是城镇用地在不同层面存在结构差异。

容量维是全局多分维谱中的特殊参数,也是最有代表性的参数。分维是空间填充程度的测度,分维越高表明城市土地利用的程度越高。广义关联维谱 $q - D_q$ 谱线展示出如下特征。第一,城乡用地变化的差异性。1995—2013年,京津冀城镇用地结构变化明显,而总建设用地的变异不太显著(图2c和图2d)。可以看出,19 a间,城镇建设用地的谱线有明显的向上推移,而总建设用地的变化不大。也就是说,区域城乡用地结构相对稳定,城镇填充和扩展显著。第二,城市用地的中心与边缘同步变化。在矩次 $q=1$ 附近,分维逐步增长,但变化不太突出,容量维、信息维和关联维都呈现缓慢上升趋势(表2)。但是,当 $q>5$ 或者 $q<-5$ 时,曲线的分异就明显了(图2c)。矩次小于0,其空间信息反映城市边缘、郊区到农村地区的变化特征;矩次大于1,反映主城区至中心区的变化特征。当 $q<-10$ 时,5个年份的曲线非常明显地分开,2000—2005年及2010—2013年间曲线变化很大。这意味着,京津冀乡村地区在这两个时段的用地扩展迅速。当 $q>5$ 时,2005—2010年的曲线抬升显著,这表明,在这五六年间,城市中心区和主要卫星城的主体部分,空间填充程度很高。第三,城市边缘区和乡村地区的扩展出现无序变化特征。当分形城市定义在二维电子地图中时,其嵌入空间维数 $d=2$ (Batty et al, 1994)。这是全局维数的极限,当然局部维数更低于这个上限($D_0 < D_\infty < d=2$)。当 $q<-2$ 时, D_q 值突破嵌入空间维数的限制,这不是正常的结果。小有突破可能是算法导致的偏差所致,但分维值达到2.5乃至2.8以上,反映空间结构的异常^①。较之于城镇用地的分维谱,总体建设用地的分维谱突破局限更为强烈,可见乡村建设问题比城郊建设问题更为无序(图2c和图2d)。第四,城市用地扩展速度的高峰已经过去。京津冀城镇建设用地区和总体建设用地的分维及其相关标度指数增长服从二次logistic增长轨迹。通过二次logistic建模分析发现,城镇用地和

① 关于多分维谱线的正常状态(理想状态)与不正常状态(非理想状态)的理论基础和实际表现请参见Huang et al, 2018。

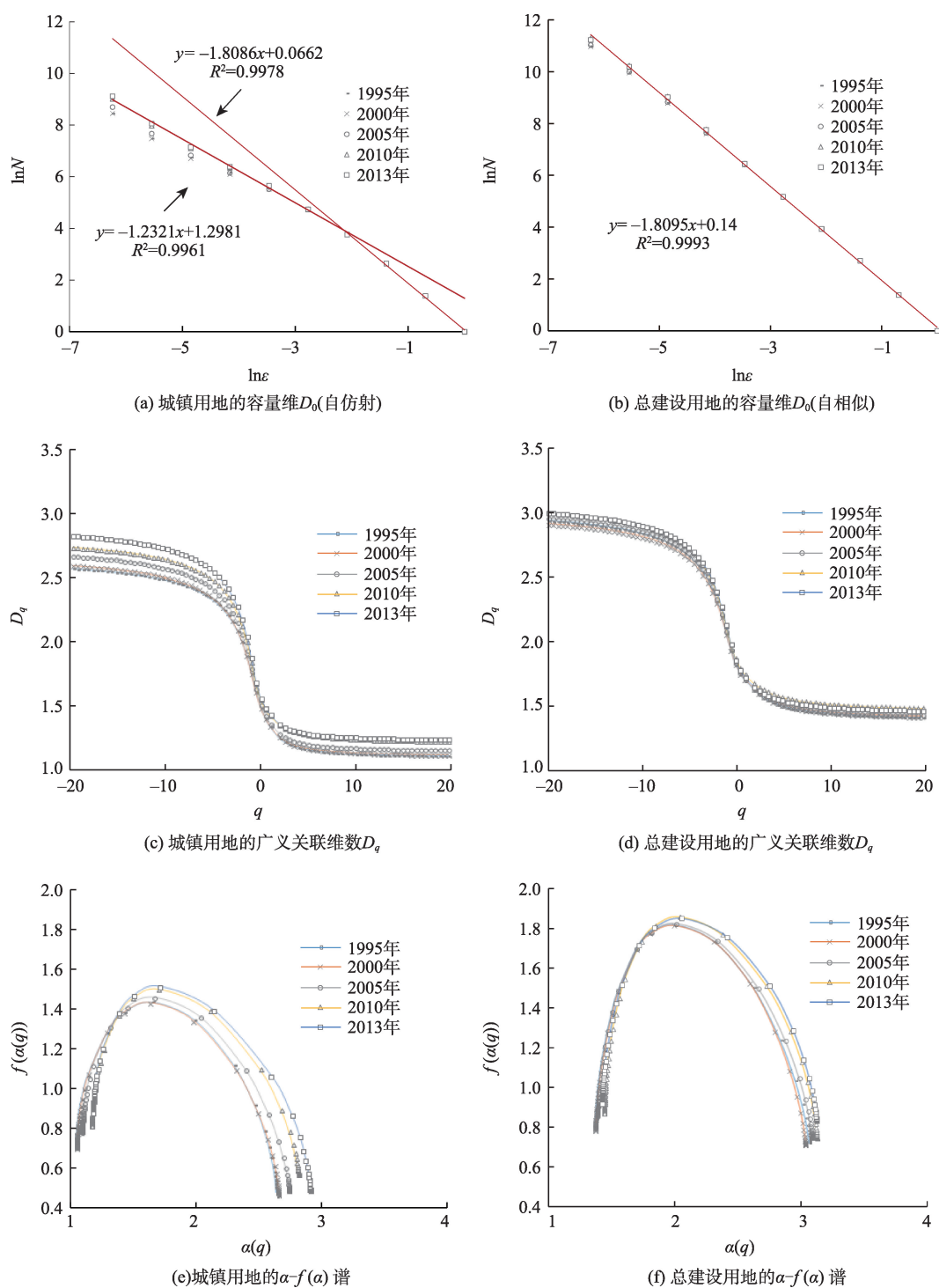


图2 1995—2013年京津冀的城镇用地(左列)和总建设用地(右列)的容量维 D_0 估计双对数图、广义关联维 $q-D_q$ 谱和局部分维 $\alpha-f(\alpha)$ 谱

Fig.2 Log-log plots for capacity dimension estimation and multifractal dimension spectrums of urban and total construction land in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1995–2013

总建设用地都已经接近极限,可供进一步开发的土地资源不多,并且用地扩展速度的高峰出现在2003—2005年间。第五,京津冀城镇用地空间异质性逐步降低,但总建设用地的变化趋势比较复杂。

分维是基于熵定义的,熵值随着城镇用地的扩展会逐渐升高,相应地,分维也必然呈现上升趋势。京津冀城镇用地的信息维与容量维的比值 D_1/D_0 表现出持续上升趋势,暗示城市土地利用形态的差异在

表2 京津冀城镇建设用地的容量维、信息维和关联维数

Tab.2 Capacity, information and correlation dimensions of the Beijing-Tianjin-Hebei region urban and total construction land

年份	城镇建设用地				总建设用地			
	D_0	D_1	D_2	D_1/D_0	D_0	D_1	D_2	D_1/D_0
1995	1.4411	1.2858	1.1949	0.8922	1.8071	1.6847	1.6062	0.9323
2000	1.4374	1.2899	1.2017	0.8974	1.8062	1.6868	1.6124	0.9339
2005	1.4623	1.3157	1.2331	0.8998	1.8135	1.6882	1.6108	0.9309
2010	1.5075	1.3781	1.3074	0.9141	1.8479	1.7248	1.6534	0.9334
2013	1.5187	1.3860	1.3122	0.9126	1.8414	1.7064	1.6316	0.9267
平均	1.4734	1.3311	1.1949	0.9032	1.8232	1.6982	1.6062	0.9314

减少,但是,总建设用地的 D_1/D_0 值围绕0.93随机波动,没有显著的增减。

局部参数反映城市或者区域结构的单元格局及其关联过程。不妨考察局部分维谱即 $f(\alpha)$ 曲线(图2e和图2f)。局部参数分析揭示的京津冀城市用地特征如下。第一,城市边缘区和乡村地区用地呈现病态扩展。无论是京津冀城镇用地还是总建设用地的 $f(\alpha)$ 曲线都突破了2的限制,数值达到3乃至更高。分维是空间填充度,总体建设用地的容量维高于城镇建设用地的容量维,这是正常的,但奇异性指数超过嵌入空间维数就不正常了。这种特征与 D_q 谱反映出的嵌入空间维数被突破的问题一致。第二,总体建设用地的空间填充度高于城镇建设用地的填充度,但城镇用地填充速度更快。奇异性指数 $\alpha(q)$ 的宽度 $\Delta\alpha$ 与嵌入空间维数 d 的比值反映空间填充程度的大小(Chen, 2016)。1995—2010年城镇建设用地的奇异性指数 $\alpha(q)$ 宽度 $\Delta\alpha$ 小于总建设用地的 $\Delta\alpha$ 值,但2013年情况逆转(表3)。这表明,城镇用地的范围虽小,但空间填充速度却很快,表现出指数上升趋势,但总量用地的 $\Delta\alpha$ 曲线却起伏不定。第三,城镇用地和总建设用地都属于扩展式

蔓延,具有“摊大饼”的特征。城市和区域发展在分形生长方面表现为两种基本模式:一是中心集聚式——单峰右倾,代表边缘区的曲线右端谱密度高;二是外围扩展式——单峰左倾,代表中心区的曲线左端谱密度高(Chen, 2014)。模式的特征可以借助局部分维数 $f(\alpha(q))$ 收敛时的高度差 Δf 来识别。总体看来, $\Delta f > 0$ 。城镇用地的 Δf 值以上升为主,而总体建设用地的 Δf 值则有上升转为下降的趋势。这意味着,京津冀城镇用地和总建设用地都是外延扩展型的。内涵集聚发展的动力不足:要么城镇用地空间不多,要么地方管理措施有不当之处。

2.3 分区计算结果

京津冀是一个城市和区域的混合体,有必要分区考察,即分别对京津冀的3个部分——北京市、天津市和河北省——估算多分维谱。作为应用研究,研究区的范围以行政区划为依据。分区的作用,一是观察单个组成单元用地的空间结构及演化特征,二是比较整体和部分的相似性和差异性,寻找整体分形结构中某些特征的根源。在广义关联维数 D_q 谱线的估算过程中,三个区域在全域尺度上的标度不变性不一致(图3)。在容量维的拟合计算过程中,

表3 京津冀城镇建设用地的奇异性指数和局部分维数的容量值

Tab.3 Singularity exponent and capacity of local dimensions of the Beijing-Tianjin-Hebei region urban land use and total construction land use

年份	城镇建设用地				总建设用地			
	$\alpha(0)$	$f(\alpha(0))$	$\Delta\alpha$	Δf	$\alpha(0)$	$f(\alpha(0))$	$\Delta\alpha$	Δf
1995	1.6481	1.4411	1.6058	0.2237	1.9823	1.8071	1.6746	0.0732
2000	1.6358	1.4374	1.6226	0.2356	1.9824	1.8062	1.6444	0.0698
2005	1.6650	1.4623	1.6595	0.2946	1.9953	1.8135	1.6789	0.1076
2010	1.6995	1.5075	1.6570	0.2467	2.0248	1.8479	1.6651	0.1239
2013	1.7123	1.5187	1.7415	0.3932	2.0414	1.8414	1.6786	0.0861
平均	1.6721	1.4734	1.6573	0.2788	2.0052	1.8232	1.6683	0.0921

注:表中 $\Delta\alpha$ 表示奇异性指数的极差, Δf 表示局部分维的末端高度差。表5同。

三个分区的总建设用地的散点大致都处于同一条直线上(图3b、图3d和图3f), 差异主要体现在城镇建设用地上(图3a、图3c和图3e)。1995年至2013年北京市和天津市的城镇建设用地的容量维双对数坐标图散点大致沿直线排列, 但是河北省的城镇

建设用地却出现了直线的折断。这暗示京津冀用地结构的自仿射主要源于河北省, 而河北省的分异在于城乡用地。添加工矿用地和乡村建设用地之后, 不同层次的标度因子趋于一致。可见, 河北省的城镇用地结构存在尺度分异特征。

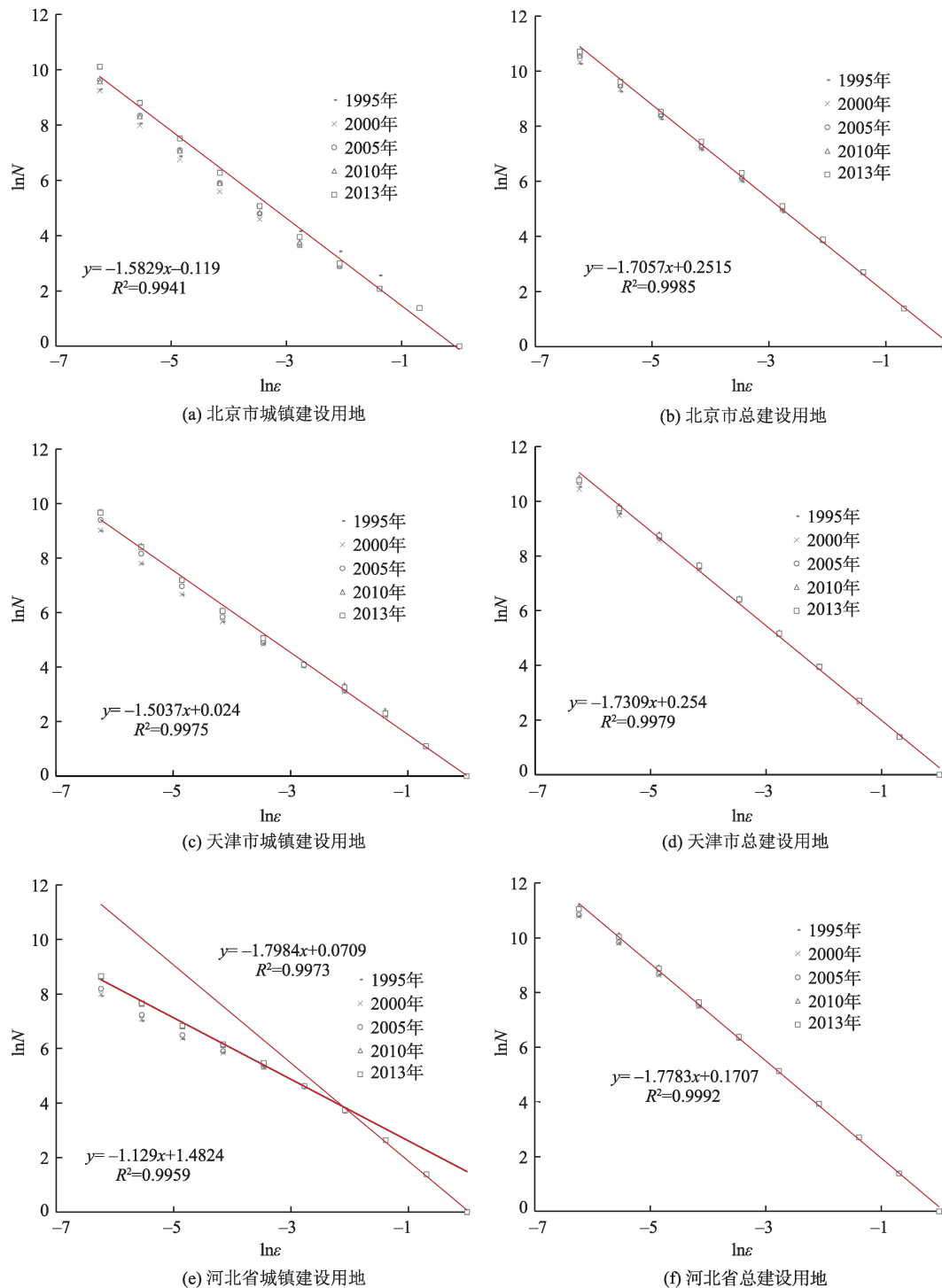


图3 1995—2013年北京市、天津市和河北省的城镇用地(左列)和总建设用地(右列)的容量维估计的双对数坐标图

Fig. 3 Log-log plots for capacity dimensions of urban and total construction land in Beijing Municipality, Tianjin Municipality and Hebei Province, 1995–2013

首先对分区进行全局多分维谱分析。从3个分区的广义关联维数 D_q 谱线的估算结果上看,京津冀城镇用地具有如下特征(图4a、图4c和图4e)。其一,京津城市核心区的用地已经达到极限,河北省

的城镇用地尚有弹性。如前所述,矩次 $q>1$,分维谱逐次从城市边缘过渡到主城区。随着 q 值的增大,北京、天津很快收敛至接近水平线,最后几无变化,这表明城市中心区土地利用程度因为“见缝插针”

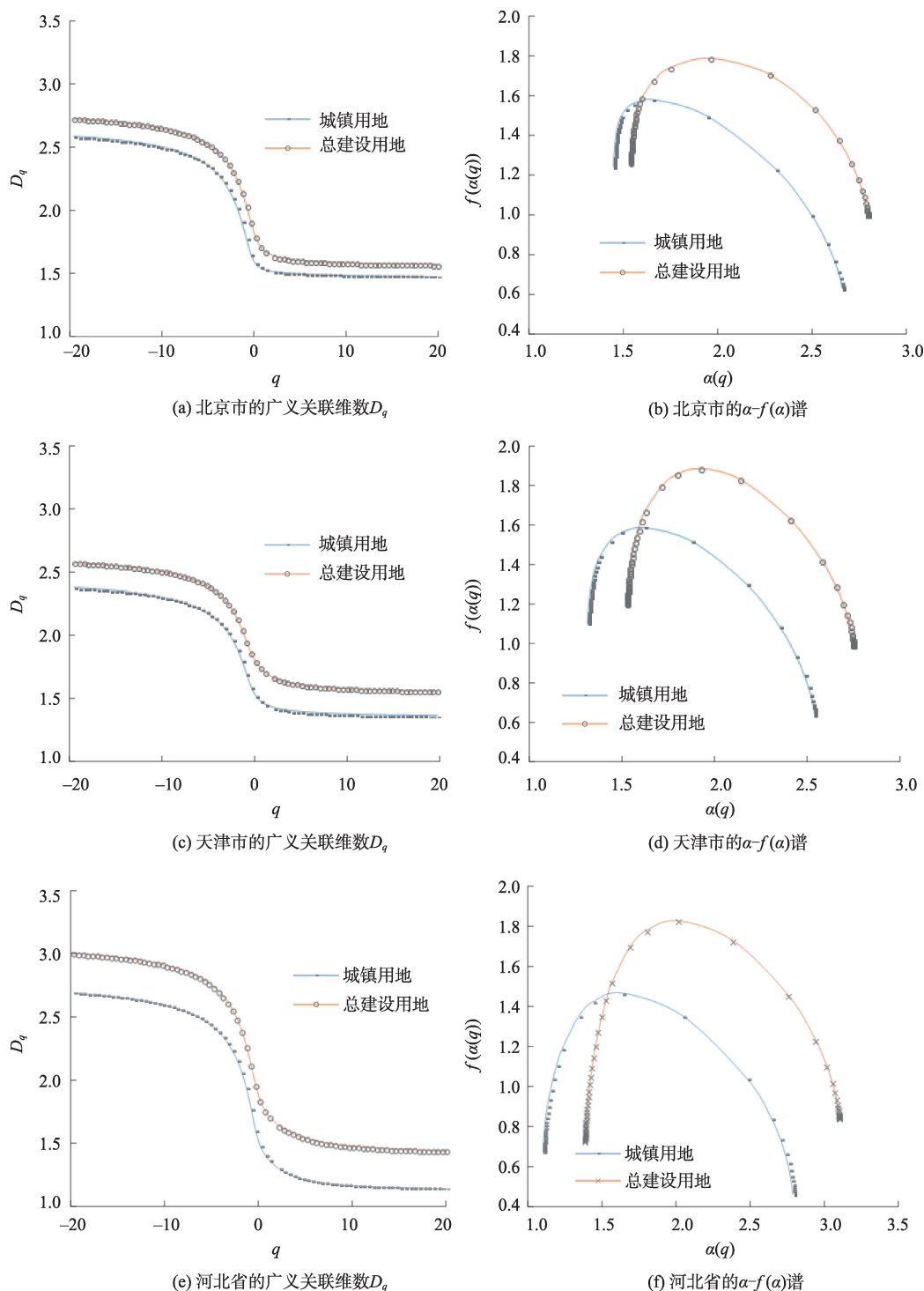


图4 北京市、天津市和河北省城镇用地和总建设用地计算的广义关联维数 $q-D_q$ 谱和 $\alpha-f(\alpha)$ 谱(以2013年为例)

Fig. 4 Multifractal dimension spectrums of urban and total construction land in Beijing Municipality, Tianjin Municipality and Hebei Province, 2013

式填充达到极限;河北省的曲线收敛速度缓慢很多,说明河北省的建设用地尚有余地,这一点容易理解。其二,城市边缘区和乡村地区的用地结构普遍凌乱,以河北部分为甚。矩次 $q<0$,分维谱逐次从城市边缘过渡到乡村区域。不论何地,不论何种分维,不应该超过嵌入空间的欧氏维数2。但是,北京、天津和河北的城镇用地都出现极端分维显著超过2.5的情形。扣除算法和数据质量的原因,城乡结合部的结构不合理、城乡关系没有理清,应该是很重要的原因,也可能是世界性的管理难题之一。其三,从动态演化上看,北京、天津和河北的城镇用地扩展不同步。总体上分维值呈现上升趋势,表明区域内土地填充程度越来越高。根据表4的数据,京、津、冀的城镇用地分维增长都服从二次logistic曲线。利用二次logistic模型可知,北京市的城镇用地扩展速度高峰在2012年前后,天津城镇用地的扩展速度高峰在2016年前后,此前加速,此后减速。而且,天津的分维上限 D_{\max} 将会高于北京。然而,河北的城镇用地分维没有明确的上限,扩展速度高峰将在2028年前后。分维增长曲线的变化特征印证了谱线变化特征:城镇用地填充程度过高。对于京

津冀的规划者和管理者而言,如何遏制城镇土地的滥用,可能是一个课题。至于城乡总建设用地的结构及其变化,分形特征和演化趋势与城镇用地类似,大体同步。这意味着,城市建设与工矿建设以及乡村发展互为联系。其四,京、津、冀三地区的城镇用地空间异质性有降低趋势。与京津冀总体情况一样,北京、天津和河北城镇用地与总用地形态的信息维与容量维的比值以及关联维与信息维的比值都呈现持续上升趋势,表明土地分形结构局部之间的差异在逐步减少。

借助局部分维谱可以看到北京、天津和河北城镇用地以及总体建设用地时空特征的另一方面。其中一些特征与京津冀系统整体反映的特征类似,如:①城郊地带和乡村地区用地的扩展存在结构性问题(谱线超过2);②总体建设用地的空间填充度大于城镇建设用地的空间填充度(根据 $\Delta\alpha$ 值的大小判断)。下面重点说明城镇用地和总建设用地的扩展模式。大城市的城镇用地模式通常由向内集聚型发展为向外扩展型。对于北京天津这样的城市,这是正常情况(Chen et al, 2013)。但是,对于河北省这样的包括大量农村的区域,情况便不正常。河南省

表4 1995—2013年北京市、天津市和河北省的城镇建设用地和总建设用地的容量维、信息维和关联维

Tab.4 Capacity, information, and correlation dimensions of urban and total construction land in Beijing Municipality, Tianjin Municipality and Hebei Province, 1995–2013

地区	年份	城镇建设用地					总建设用地				
		D_0	D_1	D_2	D_1/D_0	D_2/D_1	D_0	D_1	D_2	D_1/D_0	D_2/D_1
北京市	1995	1.4662	1.3575	1.3246	0.9259	0.9758	1.6934	1.5817	1.5292	0.9340	0.9668
	2000	1.4154	1.3408	1.3126	0.9473	0.9790	1.7100	1.5983	1.5436	0.9347	0.9658
	2005	1.4745	1.4137	1.3903	0.9587	0.9835	1.7331	1.6264	1.5826	0.9384	0.9731
	2010	1.4740	1.4054	1.3802	0.9535	0.9820	1.7390	1.6256	1.5789	0.9348	0.9712
	2013	1.5558	1.5079	1.4917	0.9692	0.9893	1.7630	1.6497	1.6122	0.9357	0.9773
	平均	1.4772	1.4051	1.3799	0.9509	0.9819	1.7277	1.6163	1.5693	0.9355	0.9708
天津市	1995	1.4168	1.3258	1.2835	0.9357	0.9681	1.7598	1.6730	1.6163	0.9507	0.9661
	2000	1.4153	1.3306	1.2915	0.9402	0.9706	1.7500	1.6676	1.6113	0.9529	0.9663
	2005	1.4658	1.3912	1.3587	0.9491	0.9767	1.7759	1.6927	1.6436	0.9531	0.9710
	2010	1.5183	1.4488	1.4205	0.9542	0.9805	1.8017	1.7185	1.6714	0.9538	0.9726
	2013	1.5091	1.4430	1.4141	0.9562	0.9800	1.7887	1.7035	1.6566	0.9524	0.9725
	平均	1.4651	1.3879	1.3537	0.9471	0.9752	1.7752	1.6911	1.6399	0.9526	0.9697
河北省	1995	1.3666	1.2432	1.1689	0.9097	0.9402	1.7815	1.6649	1.5917	0.9345	0.9561
	2000	1.3730	1.2515	1.1787	0.9115	0.9419	1.7799	1.6634	1.5928	0.9346	0.9575
	2005	1.3943	1.2745	1.2051	0.9140	0.9456	1.7871	1.6699	1.5988	0.9344	0.9575
	2010	1.4522	1.3338	1.2668	0.9185	0.9498	1.8257	1.7050	1.6357	0.9339	0.9594
	2013	1.4567	1.3425	1.2796	0.9216	0.9531	1.8172	1.6890	1.6217	0.9295	0.9602
	平均	1.4086	1.2891	1.2198	0.9151	0.9461	1.7983	1.6784	1.6082	0.9334	0.9581

城镇体系的空间发育就是空间集聚型的(Chen, 2014)。京津冀的城镇用地的 $f(\alpha)$ 曲线都是单峰左偏,并且曲线左端底限高于右端底限(图2b,图2d和图2f)。相应地,大部分 $\Delta f > 0$ 。但是,河北省的总建设用地的 Δf 值大多小于0(表5),但曲线单峰左偏(图2f)。这暗示,河北总体建设用地有空间集聚的趋势,似乎纠结于集聚与扩展两个矛盾的增长方向。

3 讨论

可以看到,采用多分维谱描述京津冀城市用地形态和城镇体系空间结构,具有独具特色的效果。其一,揭示了中心-边缘关系,区分了城乡结构的差异。当矩次 $q < 0$ 时,多分维谱反映城市边缘到乡村地区的空间特征;当矩次 $q > 1$ 时,多分维谱反映城市化地区到主城区再到中心区的空间特征。京津冀的主要城市因为见缝插针式的建设而导致主城区过度填充。其二,区分了集聚与扩散特征。中心集聚生长型的多分形,局部分维谱即 $f(\alpha)$ 曲线单峰右倾、右端位高点密,因为代表中心的方向(左)生长快速;外围扩散型生长的多分形,局部分维谱即 $f(\alpha)$

曲线单峰左倾、左端位高点密,因为代表乡村的方向(右)生长迅速(Chen, 2014)。京津冀城市和城镇体系用地因为“摊大饼”式的扩张而表现出外围扩展式的生长,但河北省总建设用地有集聚的倾向。其三,揭示了城市和城市体系生长的空间动力学特征。由于挤压效应,城市形态的多分维参数表现为“S”形生长曲线,中国城市形态分维参数的变化可以拟合二次logistic曲线(Chen, 2016)。通过二次logistic曲线建模,可以揭示京津冀城市用地分维的上限以及城市用地速度的高峰。

城市和城镇体系的多分形研究,在国内早有报道,但本文有所创新。20多年前,陈涛(1995)研究了河南省北部城镇体系的多分形结构,发现区域城镇聚落的多标度特征以及标度间断导致谱线紊乱等问题。后来陈彦光等(2001)进一步深入探讨了河南省北部城镇体系的多分维谱特征。刘继生等(2003)则借助多分维谱,从人地关系的角度研究了整个河南省的城镇体系空间结构。随着遥感数据的普及,中国城市多分形研究逐步从城镇体系分析发展到城市内部结构分析,如Chen等(2013)借助遥感解译数据研究了北京城市形态的分维刻画和相关算法

表5 1995—2013年北京市、天津市和河北省的城镇建设用地和总建设用地的奇异性指数和局部分维
Tab.5 Singularity exponent and capacity of local fractal dimensions of urban and total construction land in Beijing Municipality, Tianjin Municipality and Hebei Province, 1995–2013

地区	年份	城镇用地				总建设用地			
		$\alpha(q)$	$f(\alpha(q))$	$\Delta\alpha$	Δf	$\alpha(q)$	$f(\alpha(q))$	$\Delta\alpha$	Δf
北京市	1995	1.6558	1.4662	1.3039	0.3908	1.8587	1.6934	1.2182	0.1128
	2000	1.5371	1.4154	1.1037	0.4278	1.8750	1.7100	1.2329	0.1191
	2005	1.5763	1.4745	1.1152	0.4844	1.9037	1.7331	1.2554	0.2103
	2010	1.5909	1.4740	1.1052	0.4435	1.9182	1.7390	1.2742	0.1650
	2013	1.6479	1.5558	1.2286	0.6240	1.9568	1.7630	1.2733	0.2655
	平均	1.6016	1.4772	1.1713	0.4741	1.9025	1.7277	1.2508	0.1745
天津市	1995	1.5496	1.4168	1.1546	0.2314	1.8673	1.7598	1.1171	0.1183
	2000	1.5393	1.4153	1.0927	0.2522	1.8515	1.7500	1.1170	0.0538
	2005	1.5847	1.4658	1.1214	0.3926	1.8858	1.7759	1.1379	0.1557
	2010	1.6404	1.5183	1.2077	0.3709	1.9124	1.8017	1.1446	0.2058
	2013	1.6174	1.5091	1.1413	0.4349	1.9042	1.7887	1.1383	0.1910
	平均	1.5863	1.4651	1.1435	0.3364	1.8842	1.7752	1.1310	0.1449
河北省	1995	1.5442	1.3666	1.5365	0.0878	1.9515	1.7815	1.6511	-0.0181
	2000	1.5477	1.3730	1.5502	0.1061	1.9538	1.7799	1.6227	-0.0182
	2005	1.5699	1.3943	1.5452	0.1246	1.9614	1.7871	1.7057	-0.0172
	2010	1.6330	1.4522	1.6453	0.1116	2.0006	1.8257	1.7070	0.0492
	2013	1.6335	1.4567	1.6931	0.2151	2.0119	1.8172	1.7163	-0.1211
	平均	1.5857	1.4086	1.5941	0.1290	1.9759	1.7983	1.6806	-0.0251

问题。在国外,城市形态的多分维谱分析逐步兴起(Ariza-Villaverde et al, 2013; Murcio et al, 2015)。相对于城市形态,城镇体系的空间结构要稳定得多,故西方学者有“快城市、慢区域”之说(Portugali, 2000)。城市和城镇体系都是自组织系统(Allen, 1997; Haken et al, 1995)。所谓“快城市、慢区域”就是说,单个城市是自组织系统的快变量,而区域城镇体系则是慢变量。城镇体系的多分维谱线要比城镇结构的多分维谱合理得多(Chen, 2014)。相对于先前的各种研究,本文具有如下新意:其一,基于遥感数据,将城市和城镇体系的多分形研究结合起来,从整体和分区两个层面探讨;其二,从城市用地和总建设用地的角度,系统地诊断了京津冀城市形态和城镇体系空间结构存在的问题,为大城市群的空间异质性刻画和病理诊断提供了新的思路和范例。

研究过程中也存在一些问题,主要不足之处和改进意见如下。其一,数据质量问题。由于用地类型是根据TM影像分类提取的,其空间分布与实际的用地分布之间确实存在误差。严格地讲,分维以S形曲线上升,但京津冀1995年的部分分维却高于2000年的分维,特别是北京市,1995年的分维显著高于2000年的分维,这是不正常的,除非城镇用地被废弃,否则不应该出现分维显著降低的情况。下一步希望可以借助于更精确的数据(比如城市建筑投影矢量数据)进行分析。其二,算法的有效性和异常值问题。任何数学模型的参数估计结果都依赖于算法,即便同一种算法,也有不同的处理方式。例如采用最小二乘法估计多分维谱就有固定截距与不固定截距两种处理方式(Huang et al, 2018)。一种观点是,有些多分维测量方法(比如MDFA)不适用于数值较低甚至接近零的数据,因为低概率区域的采样点非常少,当 q 为负值时,计算误差会剧烈增加(Kantelhardt et al, 2002)。但这种说法是值得商榷的,因为 q 取负值采样点并无显著减少,根源在于少量高密度区域被缩小,而大量低密度点却被放大。相反,随着 q 正值的逐步增大,有效样本点才会不断减少。实际上, q 值对基于Rényi熵的全局维数估计影响不大,但对基于 μ -权重的局部参数估计影响显著,当 q 值大于0时,低密度点被逐步消去,有限空间样本点越来越少,计算过程迅速抖动以至发散(Chen, 2014)。针对 μ -权重法的局部参数估计误差,接下来的研究需要比较直接使用

Legendre变换方法(式(3)和式(4))与使用 μ -权重法估算的局部参数结果,找到更为准确的测量方法。其三,研究区问题。多分体的一个特征是,不同的局部有不同的维数,因而研究区范围对分维计算结果影响很大。本文是从行政区的角度研究北京、天津城市用地和河北省城镇体系用地结构。计算结果反映行政地域的空间结构,不是纯粹的景观意义的城市结构。如果需要从景观的角度研究城市结构,则需要下一步摆脱行政地域单元,选择客观的、基于距离和景观的城区范围作为研究区。

4 结论

虽然存在方法和数据方面的不足之处,但整体分析效果令人满意。通过多分维谱分析,的确可以发现一些借助其他方法无法揭示的问题、特征和规律。综上所述,本文可得主要结论如下:

第一,京津冀城镇用地存在层次和区域的分异,但总建设用地格局的空间分异不显著。城镇用地层面出现显性双标度的双分形结构,而双分形暗示自仿射结构。自仿射分形有三种原因:各向异性生长、各层异性发育和各区异性分布。京津冀的双分形源于两个方面:一方面,城镇用地出现层次差异,中小城市的发育与大城市不同步;另一方面,自仿射主要表现在河北省境内,这意味着北京、天津与河北不同步。自仿射表明京津冀城镇体系尚未形成一体化空间格局。如果将城镇用地与工矿用地和乡村建设用地叠加起来,双标度特征不再明显,这意味着随着乡镇的发育,京津冀的空间结构能通过一体化得到优化。

第二,京津冀城镇用地和总建设用地存在中心-边缘差异和城乡差异,在两个极端都有结构性问题:中心区见缝插针式填充,过于紧凑,而边缘区无序蔓延、用地浪费。多分形的特征是不同的部分有不同的生长概率、分布密度和空间结构,这些特征通过矩次参数映射到全局维数谱线上面,从左到右分别反映乡村地区、郊区、城区、主城区、中心区。代表北京、天津中心区的谱线没有变化,暗示京津主城区填充过度,以致没有多少缓冲空间;代表郊区和乡村地带的谱线异常,表明这些地方的空间结构存在缺陷。河北省的核心部分是一群中小城市的中心区,尚有扩展余地。这可以解释京津城市功能的对外疏散。

第三,京津冀整体、北京、天津城市发展表现为“摊大饼”式外延扩展,只有河北省出现一些内涵集聚生长的特征。城市和城镇体系的发育有两种模式:一是中心集聚式,二是外延扩展式。通过局部维数谱线的特征可以对其明确区分。对于一个城市而言,理论上,早期发育为中心集聚式,发展到一定规模则转向外延扩展式。但是,如果大大小小的城镇都表现为外延扩展式,对于人多地少的中国而言,不是一种集约用地的可取模式。

第四,京津冀城市用地速度不同步,京津冀整体用地高峰期已经过去,但河北省城镇建设用地的高峰尚未到来。多分维参数具有“S”形曲线特征。借助二次logistic函数拟合分维增长曲线,得出如下结论:整体而言,京津冀城镇用地和总建设用地都已经接近饱和,扩展速度在2003—2005年期间达到高峰,现已减速。分区而言,北京城镇用地局限较大,扩展速度在2012年前后已达到高峰;天津比北京的发展余地大些,扩展速度在2016年前后也达到高峰;而河北省的城镇用地缺乏有限的限制,扩展速度将在2028年前后达到高峰。整体看来,京津冀的用地扩展速度高峰与中国城镇化速度高峰大体一致。

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. 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, 周一星. 2001. 豫北地区城镇体系空间结构的多分形研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 810-818. [Chen Y G, Zhou Y X. 2001. A study of multifractals measures of the spatial structure of the urban system in central plains. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 37(6): 810-818.]

刘继生, 陈彦光. 2003. 河南省城镇体系空间结构的多分形特征及其与水系分布的关系探讨 [J]. 地理科学, 23(6): 713-720. [Liu J S, Chen Y G. 2003. Multifractal measures based on man-land relationships of the spatial structure of the urban system in Henan. Scientia Geographica Sinica,

23(6): 713-720.]

汪富泉, 李后强. 1996. 分形——大自然的艺术构造 [M]. 济南: 山东教育出版社. [Wang F Q, Li H Q. 1996. Fractals: The artistic structure of nature. Jinan, China: Shandong Education Press.]

Allen P M. 1997. Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity [M]. London & New York: Routledge.

Arbesman S. 2012. The half-life of facts: Why everything we know has an expiration date [M]. New York: Penguin Group.

Ariza- Villaverde A B, Jimenez- Hornero F J, De Rave E G. 2013. Multifractal analysis of axial maps applied to the study of urban morphology [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 38: 1-10.

Batty M, Longley P A. 1994. Fractal cities: A geometry of form and function [M]. London, UK: Academic Press.

Chen Y G. 2014. Multifractals of central place systems: Models, dimension spectrums, and empirical analysis [J]. Physica A, 402: 266-282.

Chen Y G. 2016. Defining urban and rural regions by multifractal spectrums of urbanization [J]. Fractals, 24(1): 1650004.

Chen Y G, Lin J Y. 2009. Modeling the self-affine structure and optimization conditions of city systems using the idea from fractals [J]. Chaos, Soliton & Fractals, 41: 615-629.

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. 2004. Multi-fractal measures of city-size distributions based on the three-parameter Zipf model [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 22(4): 793-805.

Chhabra A, Jensen R V. 1989. Direct determination of the $f(\alpha)$ singularity spectrum [J]. Physical Review Letters, 62(12): 1327-1330.

Encarnação S, Gaudiano M, Santos F C, et al. 2012. Fractal cartography of urban areas [J]. Scientific Reports, 2: 527.

Feder J. 1988. Fractals [M]. New York: Plenum Press.

Folorunso O A, Puente C E, Rolston D E, et al. 1994. Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength [J]. Soil Science Society of America Journal, 58(2): 284-294.

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.
- Gordon K. 2005. The mysteries of mass [J]. *Scientific American*, 293(1): 40-46, 48.
- Haag G. 1994. The rank-size distribution of settlements as a dynamic multifractal phenomenon [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 4(4): 519-534.
- Haken H, Portugali J. 1995. A synergetic approach to the self-organization of cities and settlements [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 22(1): 35-46.
- He S, Wang Y. 2017. Revisiting the multifractality in stock returns and its modeling implications [J]. *Physica A*, 467: 11-20.
- Huang L S, Chen Y G. 2018. A comparison between two OLS-based approaches to estimating urban multifractal parameters [J]. *Fractals*, 26(1): 1850019.
- Ihlen E A. 2012. Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in Matlab [J]. *Frontiers in Physiology*, 3: 141.
- Kantelhardt J W, Koscielny-Bunde E, Rego H H, et al. 2001. Detecting long-range correlations with detrended fluctuation analysis [J]. *Physica A*, 295(3): 441-454.
- Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, et al. 2002. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series [J]. *Physica A*, 316(1): 87-114.
- 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.
- Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. 1999. Multifractal analysis of soil spatial variability [J]. *Agronomy Journal*, 91(6): 1033-1041.
- Murcio R, Masucci A P, Arcaute E, et al. 2015. Multifractal to monofractal evolution of the London street network [J]. *Physical Review E*, 92, 062130.
- Portugali J. 2000. Self-organization and the city [M]. Berlin, Germany: Springer.
- Rozenfeld H D, Rybski D, Andrade Jr. D S, et al. 2008. Laws of population growth [J]. *PNAS*, 105(48): 18702-18707.
- Salat H, Murcio R, Yano K, et al. 2018. Uncovering inequality through multifractality of land prices: 1912 and contemporary Kyoto [J]. *PLoS One*, 13(4), e0196737.
- Stanley H E, Meakin P. 1988. Multifractal phenomena in physics and chemistry [J]. *Nature*, 335: 405-409.
- Sun X, Chen H P, Wu Z Q, et al. 2001. Multifractal analysis of Hang Seng index in Hong Kong stock market [J]. *Physica A*, 291: 553-562.
- Sun X, Chen H P, Yuan Y Z, et al. 2001. Predictability of multifractal analysis of Hang Seng stock index in Hong Kong [J]. *Physica A*, 301: 473-482.
- Takayasu H. 1990. Fractals in the physical sciences [M]. Manchester, UK: Manchester 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.

Multifractal spectral analysis of land use structure of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system

HUANG Linshan, CHEN Yanguang*, LI Shuangcheng

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

Abstract: Cities and urban systems both bear scale-free properties, from which no characteristic scales can be found for mathematical modeling and quantitative analysis. Therefore, fractal geometry is useful for making scaling analysis. Complex urban systems cannot be effectively described by simple fractal models, but can be characterized by multifractal theory. This paper is devoted to exploring the spatiotemporal features of urban change in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1995 to 2013. Using multifractal parameter spectrums, we can reveal the spatial dynamics of urbanization from the aspects of urban form and urban system. The main findings are as below: 1) The spectral curves of global fractal dimension are abnormal. If $q > 1$ and $q \rightarrow \infty$, the spectral lines quickly converge to horizontal lines; when $q < 0$ and $q \rightarrow -\infty$, the spectral lines quickly surpass the upper limit of fractal dimension, 2, which represents Euclidean dimension of embedding space. 2) The spectral curves of local fractal dimension are also not entirely normal. The peaks of the $f(\alpha)$ curves incline to the left, and the left ends of the curves are higher than the right ends. The problem lies in that the curves go beyond the maximum value of 2. 3) Fractal dimension growth curves can be described by the quadratic logistic function. Capacity parameters and inflection points of different fractal dimension growth curves are different. The main conclusions are as follows: 1) The urban fringes are disorderly developed, while the central areas of the main cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region is overfilled with construction land, leaving little buffer space. 2) The main mode of urban growth is to expand to the outside region, but there are signs of central agglomeration in the total construction land of Hebei Province. 3) Land use of the main cities is close to saturation, and the speed of land expansion has peaked for Beijing and Tianjin, but not in Hebei Province yet. In short, it is necessary to optimize the land use structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region by city planning.

Keywords: urban system; multifractals; multifractal dimension spectrum; self-affinity; land use; Beijing-Tianjin-Hebei region