

基于灯光数据的京津冀城市多标度异速分析

龙玉清, 陈彦光*

(北京大学城市与环境学院城市与经济地理系, 北京 100871)

摘要:城镇体系的时空演化是一个复杂的动力学过程,具有无尺度性,其特征可以采用异速标度指数定量描述。论文以京津冀为例,基于1992—2013年夜间灯光数据的校正结果,提取城镇夜间灯光信息,采用多标度异速分析方法,分析京津冀城镇体系的相对发展特征及其空间分异格局。研究发现:①京津冀大城市的增长空间局限日益显著。虽然大城市如京津唐的绝对发展水平高,但接近环境承载量的极限,22 a间增长快速的是大城市交接地带的小城市(如三河、迁安、廊坊等)。②相对增长速度快的城市从东北到西南呈现带状分布——政府选择发展的“雄安新区”就在这个轴带上。由此可以得出两个结论:其一,京津冀城市演化的趋势相对均衡化,空间结构异质性逐步减弱,整个城镇体系的发展趋于相对平衡状态;其二,大、小城市“两极”贯通或许是增强城镇体系功能的有效途径。京津冀的空间格局优化不能仅仅考虑主要的、规模大的中心城市,而应该基于等级结构协调整个城镇网络体系。

关键词:城镇体系;夜间灯光数据;异速标度;分形;分维;京津冀

城镇体系是复杂地域系统,也是城市化研究的基本内容之一。如何有效地定量描述城镇体系的空间分布、等级结构和动态演化,一直是城市地理学工作者关注的难题。困难的原因在于,传统的数学建模和定量分析方法主要是基于特征尺度,而城市系统的很多方面属于标度现象(陈彦光, 2015)。今天看来,城市地理学中有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; 陈彦光, 2008)。距离衰减律对应着空间分布,位序-规模律对应着等级结构,而异速生长律则可以将空间分布、等级结构和动态演化联系起来。异速生长与分形几何学殊途同归,发展成为异速标度理论。该理论为无特征尺度的城市研究提供了新的思想和方法。英国城市科学家 Batty(2008)指出,分形、异速和网络理论正在形成城市演化分析新的集成理论。近年来,关注异速生长及其标度分析的中国学

者日益增多(梁进社等, 2002; 常静等, 2004; 李郇等, 2009; 古杰等, 2010; 陈彦光等, 2014; 曹迎春等, 2015; Li et al, 2017)。在理论和方法层面,异速生长定律的一个发展是多标度异速模型,该模型可以用于城镇体系的时空演化分析。

京津冀是城镇体系的代表性研究区,其城市发展问题和人地关系问题备受国内外学者关注。借助多标度异速分析,可以从一个新的角度揭示京津冀城镇化过程的特征及其导致的空间格局。以往城市异速标度的相关研究多采用人口统计数据或城市用地的遥感影像解译数据,但前者易受行政区划变动与统计口径不一致等因素影响(董磊等, 2017),难以获取真正意义上“城市”(urbanized area)^①范围内口径统一的长时间序列数据,后者连续性较弱,这些问题一定程度上限制了城镇体系时空演化分析。随着遥感和GIS技术的发展进步,夜间灯光数据被

收稿日期:2018-03-21;修订日期:2018-08-12。

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

第一作者简介:龙玉清(1995—),女,湖南长沙人,博士研究生,主要从事城市结构与动力学研究。E-mail: longyq@pku.edu.cn

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

① 根据周一星(1995)的观点,城市建成区或城镇化地区反映城市作为人口以及各种非农业活动高度密集的地域而区别于乡村,它不是行政意义上的城市,而是实际景观上的城市。

引用格式:龙玉清, 陈彦光. 2019. 基于灯光数据的京津冀城市多标度异速分析 [J]. 地理科学进展, 38(1): 88-100. [Long Y Q, Chen Y G. 2019. Multi-scaling allometric analysis of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system based on nighttime light data. Progress in Geography, 38(1): 88-100.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.01.008

越来越多的学者应用到城市发展研究中。这类数据具有客观性、长时段和连续性,是表征区域社会经济发展的良好测度。已有研究发现,夜间灯光数据能够较好地反映人类活动,与城市建成区面积、人口密度、GDP等传统城市规模测度存在显著相关关系(Lu et al, 2008; Zeng et al, 2011; Zhao et al, 2011; 杨眉等, 2011)。本文采用1992—2013年间22 a的夜间灯光数据对京津冀地区35个主要城市进行多标度异速分析,目的在于揭示该地区城镇化过程导致的空间格局特征。研究结果对京津冀城镇体系时空问题诊断具有启发意义,也为今后探索该地区城镇发展与环境之间的关系奠定基础。

1 理论模型

1.1 异速标度关系

异速标度概念是在标度分析和异速生长定律基础发展而来。异速生长定律最早源于生物学(引自Lee, 1989),后由Naroll等(1956)将异速生长定律引入城市地理学研究中。该定律不仅可以描述城镇体系内任一城市与整体的相对增长关系,还常用于分析城市内部不同要素之间的相对增长比率(陈彦光, 2013)。Beckmann(1958)发现,中心城市与城镇体系之间满足异速生长关系。这个异速关系可以推广到一般,描述个体与整体的关系。假设一个城镇体系中有 n 个城市,则各城市和城市系统整体之间的异速标度关系可表示为:

$$Q_i = a_i S^{b_i} = a_i \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right)^{b_i} \quad (1)$$

式中: Q_i 为系统内第 i 个城市在一定测度下的规模; a_i 为比例系数; b_i 为异速标度指数; S 为系统内 n 个城市规模总和。

异速标度指数涉及时间、空间和等级3个方面的含义。在时间意义上,异速标度指数 b 表示2个不同要素之间(如城市与城市之间)、或者单个要素相对于整体(如单个城市相对于整个城镇体系)的相对增长率。就要素与整体关系而言,单个城市相对于城镇体系整体的相对增长率如下:

$$b_i = \left(\frac{dQ_i}{Q_i dt} \right) / \left(\frac{dS}{S dt} \right) = \frac{dQ_i/Q_i}{dS/S} \quad (2)$$

当 $b_i > 1$ 时,说明第 i 个城市的相对增长率大于系统整体,为正异速生长; $b_i < 1$ 时,说明第 i 个城市的相对增长率小于系统整体,为负异速生长; $b_i = 1$ 时,

说明该城市与城市系统整体同步增长,为同速增长。再次明确,这里所谓的增长速度都是指相对速度。

在空间意义上,异速标度指数 b_i 与分维相关。此时异速标度关系实际上是一种几何测度关系:

$$Q_i^{1/D_{(i)}} \propto S^{1/D_s} \quad (3)$$

从而有

$$b_i = \frac{dQ_i/Q_i}{dS/S} = \frac{D_{(i)}}{D_s} \quad (4)$$

式中: $D_{(i)}$ 即为第 i 个城市测度 Q_i 下的分形维数; D_s 即为城市系统测度 S 下的分形维数。此时异速标度指数 b_i 为分形维数之比,表示城市空间填充度的相对大小;由于 D_s 反映了 n 个城市分形维数的整体效应,异速标度指数 b_i 反映空间意义上的单个城市与系统整体的相对增长水平。

1.2 多标度异速分析模型

多标度异速分析(MSA)是一种基于异速标度指数矩阵的特征向量和特征值开展相对发展水平综合分析的一种数学方法(陈彦光, 2008; Chen et al, 2009; Chen, 2017)。异速标度矩阵是一种倒数矩阵,其数学性质与层次分析法(AHP)的判断矩阵相同,故层次分析法的矩阵求解方法适用于异速标度分析。通过与层次分析法的数学过程类比,很容易理解MSA方法。对于城市研究而言,MSA是一种基于时间序列的纵向异速分析方法。有关时间序列需要满足两个前提条件:①城市系统内各城市之间在给定测度下均近似满足异速生长关系;②系统内各城市整体呈非负增长趋势。根据Bertalanffy(1968)一般系统论,异速生长是普遍存在的先验关系,故异速标度矩阵理论上广泛存在,从而上述条件容易满足。在此条件下,可以将城市与城市系统整体之间的异速标度关系拓展到各城市之间的异速标度关系:

$$Q_i = \beta_{ij} Q_j^{\alpha_{ij}} = \beta_{ij} Q_j^{D_{(i)}/D_{(j)}} \quad (5)$$

式中: Q_i 、 Q_j 分别表示第 i 、 j 个城市在同一测度下的规模; β_{ij} 为比例系数; α_{ij} 为2个城市之间异速关系的标度指数; $D_{(i)}$ 、 $D_{(j)}$ 分别为测度 Q_i 、 Q_j 的分形维数。理论上可以证明

$$\alpha_{ij} = \frac{D_{(i)}}{D_{(j)}} = \frac{dQ_i/Q_i}{dQ_j/Q_j} = \frac{r_i}{r_j} \quad (6)$$

式中: r_i 、 r_j 分别为测度 Q_i 、 Q_j 的相对增长率(RRG)。这个式子将空间意义的分维与时间方向上的增长

率联系起来了,从而为时空统一分析奠定了方法基础。

上述方程描述的城镇体系中两两城镇的关系,需要借助适当的方法开展集成分析。利用式(5),通过双对数曲线对系统内两两城市之间的异速生长关系进行分析,可得到一个反映各城市之间相对权重的标度指数正定倒数矩阵:

$$\mathbf{M}=[\alpha_{ij}]_{n \times n}=[D_{(i)}/D_{(j)}]_{n \times n} \quad (7)$$

式中: \mathbf{M} 为标度系数矩阵(SEM),反映两两城市之间对于某种测度的相对增长率。然后,构建一个分维矩阵方程(FDM):

$$\mathbf{M}\mathbf{D}=\mathbf{n}\mathbf{D} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{D}=[D_{(1)} D_{(2)} \cdots D_{(n)}]^T$; n 为矩阵 \mathbf{M} 的最大特征根 λ_{\max} 。 \mathbf{D} 为 \mathbf{M} 的特征向量,可以通过按行计算几何平均值进行近似求解,即有

$$D_{(i)}=\left(\prod_{j=1}^n \alpha_{ij}\right)^{1/n} \quad (9)$$

归一化可得

$$w_i=D_{(i)}\bigg/\sum_{i=1}^n D_{(i)} \quad (10)$$

式中: w_i 即为各城市的相对异速生长指数(ASI),反映一定时期内各城市发展的相对异速生长水平,揭示城镇体系内各要素之间的相对发展速度与增长潜力。

MSA分析是一种相对增长速度和潜力的分析,不能反映一个城市的绝对地位和水平。在城市研究中,通常需要将相对增长与绝对水平相互参照。城镇体系中各城市的绝对发展水平可以用特征规模(Q_c)进行表示。由于异速生长定律源于两个城市之间的指数增长过程,各城市的动态演化过程可以用指数增长模型表示为:

$$Q(t)=Q_0 \exp\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (11)$$

式中: t_0 指时间特征长度; Q_0 指测度 Q 对应的初始规模。当 $t=t_0$ 时,即可得特征规模 $Q_c=Q_0 e$,其中 $e \approx 2.7183$, Q_c 即为该城市的绝对发展指数,揭示该城市的绝对发展水平。

为了评判分析效果,需要对多标度异速分析模型参数估计结果进行检验。检验依据有二。一是SEM矩阵的最大特征根检验:为检验 λ_{\max} 与 n 的相似性,定义一个标度一致性指数(SCI):

$$SCI=\frac{|\lambda_{\max}-n|}{n-1} \quad (12)$$

若标度一致性比率 $SCR=SCI/RCI$ (随机试验所得的随机一致性指数) <0.1 ,说明 λ_{\max} 与 n 没有显著差异,检验通过。这一套方案直接可以通过AHP法类比而来。二是相关系数矩阵检验,定义一个平均相关系数:

$$R^*=\frac{1}{(n-1)n}\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij}-n\right) \quad (13)$$

式中: R^* 为平均相关系数; R_{ij} 为相关系数矩阵中 i 行 j 列元素。若 R^* 大于一定显著性水平下的临界值,说明系统内各城市之间基本满足异速标度关系,模型计算结果可靠。这一套方法可以间接利用回归分析的有关技术。

2 实证分析

2.1 数据资料与测度

京津冀地区是快速城镇化过程中城镇体系演化研究的典型实证区。该区域的城市群是中国核心经济区的重要组成部分(陆大道, 2015),改革开放以来区域经济飞速发展。2013年,京津冀主要城市包括北京、天津2个直辖市和河北省11个地级市及其下辖的22个县级市,各城市发展水平差异较大,区域内部的不平衡性与不协调性越来越受到关注(刘浩等, 2016)。2014年,京津冀协同发展被列为国家重大战略。可见,研究京津冀城镇体系近20多年来相对发展趋势并分析其空间异质性,对未来京津冀一体化发展具有重要的参考价值。

城市地域范围定义的不同会对城市相关统计分析的结论造成一定影响。长期以来,中国的城市多是基于行政意义上的市域,区域统计数据也是基于行政区划进行的,不是真正意义上的“城市”(urbanized area)。本文的研究对象是京津冀城镇体系,更多地聚焦于“城镇化地区”,而非包含大量非城镇化地区的市域。因此传统统计数据难以反映真实的城市边界范围及规模。现有较权威的人口普查数据虽然准确性高,但数据更新慢,难以适用于动态演化分析。夜间灯光数据反映地区夜间照明强度,从而间接监测人类经济社会活动的客观强度,可以作为区域的替代统计指标。目前应用较广的灯光数据主要有2类:①美国国防气象卫星搭载的可见光成像线性扫描业务系统(DMSP/OLS),空间分辨率为1 km,包含1992—2013年数据;②国家极轨卫星搭载的可见光近红外成像辐射仪(NPP/

VIIRS),分辨率为500 m,时序为2011年至今。考虑到研究的空间一致性以及数据序列的连续可靠性,本文选取1992—2013年DMSP/OLS灯光数据进行分析,以2013年行政区划为准,将京津冀地区35个主要城市作为研究对象,分别选取城镇夜间灯光面积及灯光指数(灯光亮度之和)作为测度,进行多尺度异速分析。

DMSP/OLS灯光数据集是在去除云、火光、极光等短暂光源影响的基础上,获取城镇、乡村等其他位置相对稳定的年平均灯光强度值,灰度值DN范围为0~63,来源于美国NOAA国家地球物理数据中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp.html>)。由于该数据集未进行辐射定标,容易造成多个传感器获取的不同年份数据存在年际差异,同时也存在明显的“饱和现象”,导致区域的灯光强度值低于其真实值(杨洋等,2016)。为此,首先基于F16的2006年辐射定标夜间灯光影像,根据不变目标区域法,采用幂指数方程对1992—2013年末辐射定标的夜间灯光数据集进行校正(曹子洋等,2015)。在此基础上,进一步提取各市城镇化地区范围。现有研究表明,在选取适当DN阈值的条件下,区域内高于DN门槛值的灯光面积或亮度总和,可以近似表征经济社会活动高度集中的城市范围及规模(Milesi et al, 2003; 王慧娟等, 2017)。为了加强DMSP数据集的纵向可比性,本文根据经验阈值法统一选取DN值大于50的区域,作为城市范围。并分别统计京津冀城镇化地区内的城镇灯光面积和灯光指数(其中安国市前3 a和新乐市第1年末统计到城镇夜间灯光,采用幂指数模型进行插值处理),用于表征城市规模。尽管不同时期不同地区的最佳阈值可能会有所区别(杨洋等, 2015),本文基于以下3个原因统一

采用50作为阈值:①根据Milesi等(2003)对美国阿拉巴马、密西西比、佛罗里达和佐治亚等地区的城市区域研究,以及舒松等(2011)对上海不同年份边界提取,发现采用50作为分割阈值具有更高的精度;②就京津冀地区而言,分年份、分城市分别提取各自最佳阈值工作量大、可实现性低,本文的研究目的不在于精确提取城市边界范围,城市本身并不存在一个清晰的边界,而是在统一可比的尺度下研究不同城市的相对发展情况;③将人口普查数据得到的各市城镇人口与提取的相应年份城镇夜间灯光指数进行回归分析,可以发现,无论是2000年还是2010年,回归拟合系数达0.97以上(图1),说明两者高度线性相关,城镇夜间灯光提取结果可以近似表征各城市发展规模。最后,经过对夜间灯光数据的处理,提取到1992—2013年间京津冀地区各主要城市22 a的城镇夜间灯光信息(表1)。部分结果图示出来,可以据此看出京津冀城镇体系空间格局及其演变(图2)。

1992—2013年,京津冀各市的城镇夜间灯光都经历了大幅增长,大城市扩张明显,小城市增长迅速。1992年,城镇夜间灯光多在大城市的中心城区显著集聚,北京、天津、石家庄、邯郸等城市的夜间灯光面积和灯光指数居于前列。到2005年,各大城市的中心城区夜间灯光斑块向外大幅扩张,且多沿交通干线发展。北京和天津的灯光面积和灯光指数明显增强,增加了1倍以上;地级市中廊坊扩张更为迅猛,灯光面积和指数分别扩张了4~5倍。至2013年,各大中心城市不断向外扩展的同时,各县级市的夜间灯光也有了明显的增强,如三河、迁安等市的夜间灯光面积和指数分别增加了5倍以上,说明近20多年来各县级市取得了飞速发展。而地

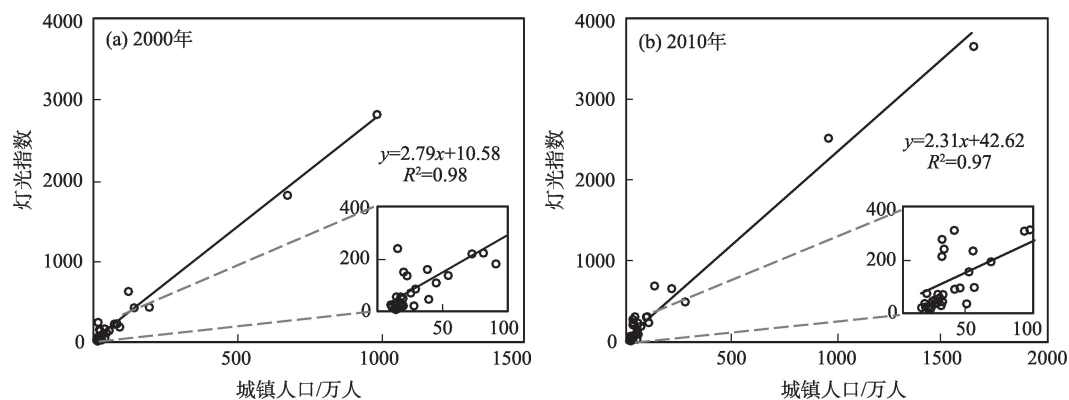


图1 提取的京津冀城镇体系灯光指数与人口普查数据相关性分析

Fig.1 Regression analysis of extracted nighttime light index and the census data of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system

表1 1992—2013年京津冀主要城市城镇夜间灯光信息提取结果

Tab.1 Extracted urban nighttime light results from DMSP/OSL in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1992-2013

城市	1992年		2000年		2005年		2013年	
	面积/km ²	指数/10 ³	面积/km ²	指数/10 ³	面积/km ²	指数/10 ³	面积/km ²	指数/10 ³
北京	1504	163	2818	322	3359	375	3853	416
天津	881	86	1818	194	2182	225	2795	276
石家庄	216	22	433	48	469	51	533	56
唐山	239	22	426	43	554	53	688	63
秦皇岛	120	12	225	23	266	26	341	32
邯郸	304	27	628	62	635	63	725	69
邢台	68	6	143	14	185	17	205	18
保定	92	10	187	21	225	24	246	26
张家口	117	11	228	23	234	23	332	29
承德	28	2	53	5	69	6	133	10
沧州	64	6	115	12	138	14	174	16
廊坊	37	4	166	16	206	20	261	24
衡水	32	3	77	8	87	8	100	9
三河	42	3	245	19	266	21	280	22
迁安	23	2	62	5	153	12	260	19

注:由于研究涉及22个年份35个主要城市的城镇夜间灯光数据,为简明起见,这里只选取了1992、2000、2005和2013年的全部地级及以上城市以及部分县级市放入表中。

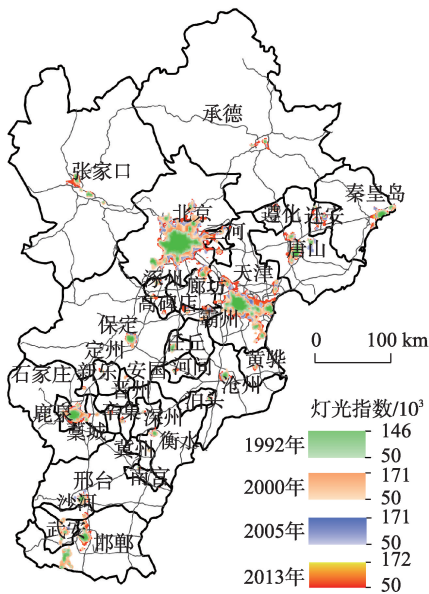


图2 1992—2013年京津冀主要城市城镇夜间灯光空间分布
Fig.2 Spatial distribution of urban nighttime light from DMSP/OSL in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1992-2013

级市中承德、衡水等夜间灯光则始终较弱,规模在地级市中始终处于较低位置。

2.2 计算结果与分析

通过提取的原始数据揭示的京津冀城镇演化信息比较有限,下面借助MSA方法开展相对深入

的时空演化分析。为便于对城市异速生长指数的理解,首先以北京、天津和石家庄为例,根据式(5)图解其异速生长关系(图3),得到的标度指数反映22 a来两两城市之间相对增长的快慢。初步试验效果较好,可以开展系统分析。根据多标度异速分析方法,首先分别基于城镇灯光面积和指数求得各城市的标度系数矩阵(SEM)(表2、表3),反映两两城市之间的相对增长率。进一步计算其相对异速生长指数(ASI)、相对增长率(RRG)和绝对发展指数(Q_c)及其指数模型的拟合系数(R^2),如表4所示。计算结果表明,京津冀地区主要城市之间基本服从异速生长关系。对于夜间灯光面积这一测度,模型最大特征根 $\lambda_{\max}=32.53$,标度一致性指数 $SCR=0.04<0.1$;各城市之间异速标度关系的相关系数最小值为0.61,最大值接近于1,平均相关系数 $R^*=0.93$,大于临界值0.54。对于夜间灯光指数, $\lambda_{\max}=32.98$, $SCR=0.03<0.1$;相关系数在0.62~1之间,平均相关系数 $R^*=0.94>0.54$ 。可见,无论是基于灯光面积还是灯光指数测度,在0.01的显著性水平下检验均通过,模型具有较高的置信度。

京津冀城镇的绝对增长水平比较明确,不言可知。现在需要揭示的是相对发展速度,并与绝对发展水平进行比较。根据ASI指数和 Q_c 指数的大小,

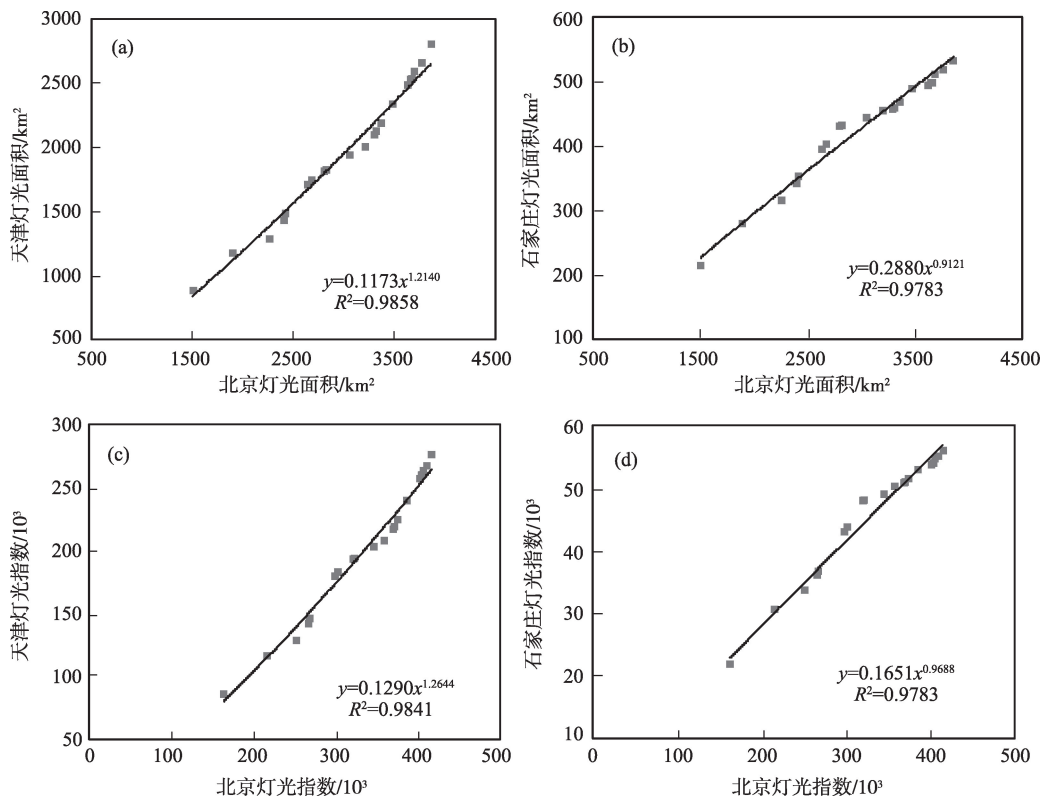


图3 1992—2013年基于灯光面积和灯光指数的京津冀城市之间的异速标度关系(举例)

Fig.3 Allometric relationship between three main cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1992–2013 (examples)

表2 京津冀主要城市夜间灯光面积异速生长的标度系数矩阵(1992—2013年)

Tab.2 Scaling exponent matrix of urban nighttime light area in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1992–2013

城市	北京	天津	石家庄	唐山	秦皇岛	邯郸	邢台	保定	张家口	承德	沧州	廊坊	衡水
北京	1	0.81	1.07	0.80	0.81	1.21	0.79	0.92	0.95	0.53	0.99	0.49	0.79
天津	1.21	1	1.30	1.00	1.00	1.45	0.97	1.12	1.18	0.67	1.21	0.59	0.95
石家庄	0.91	0.74	1	0.72	0.74	1.15	0.72	0.85	0.87	0.47	0.89	0.46	0.73
唐山	1.17	0.97	1.23	1	0.98	1.36	0.94	1.06	1.15	0.68	1.18	0.56	0.89
秦皇岛	1.19	0.98	1.27	0.99	1	1.39	0.95	1.09	1.15	0.67	1.18	0.58	0.94
邯郸	0.69	0.55	0.77	0.53	0.54	1	0.53	0.64	0.69	0.34	0.69	0.36	0.55
邢台	1.24	1.02	1.34	1.02	1.03	1.47	1	1.15	1.19	0.68	1.23	0.61	0.98
保定	1.08	0.87	1.16	0.85	0.87	1.31	0.84	1	1.01	0.56	1.06	0.53	0.86
张家口	0.94	0.78	1.02	0.79	0.78	1.20	0.74	0.86	1	0.55	0.96	0.46	0.73
承德	1.57	1.33	1.64	1.39	1.36	1.79	1.27	1.41	1.64	1	1.62	0.74	1.19
沧州	0.99	0.81	1.05	0.81	0.81	1.21	0.78	0.91	0.97	0.55	1	0.48	0.77
廊坊	1.99	1.60	2.17	1.56	1.60	2.52	1.55	1.85	1.89	1.02	1.94	1	1.60
衡水	1.23	0.99	1.34	0.96	0.99	1.51	0.96	1.14	1.14	0.62	1.19	0.62	1

注：为简明起见，表中只给出基于夜间灯光面积的京津冀地区地级及以上城市之间的异速标度系数，反映不同城市两两之间的相对增长率。表3同。

对京津冀地区35个主要城市的发展状况进行排序(图4)。直观上看,首尾两端的城市ASI指数与 Q_c 指数之间呈现出较为明显的相互错位态势:首段ASI指数高的城市 Q_c 指数低,而 Q_c 指数高的波峰处则出

现在ASI指数排序结果的后段。从夜间灯光面积来看,相对异速生长指数高的城市多以县级市为主,但从特征规模上看,其绝对发展水平仍较低(图4a)。相反,一些特征规模较大的大城市则表现出较

表3 京津冀主要城市夜间灯光指数异速生长的标度系数矩阵(1992—2013年)

Tab.3 Scaling exponent matrix of urban nighttime light index in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1992-2013

城市	北京	天津	石家庄	唐山	秦皇岛	邯郸	邢台	保定	张家口	承德	沧州	廊坊	衡水
北京	1	0.78	1.01	0.84	0.84	1.05	0.79	0.91	1.02	0.58	1.02	0.47	0.75
天津	1.26	1	1.28	1.09	1.09	1.31	1.01	1.15	1.30	0.75	1.29	0.60	0.94
石家庄	0.97	0.75	1	0.81	0.81	1.05	0.77	0.89	0.99	0.55	0.99	0.46	0.74
唐山	1.14	0.91	1.14	1	0.99	1.16	0.91	1.03	1.18	0.70	1.17	0.54	0.84
秦皇岛	1.14	0.91	1.15	0.99	1	1.16	0.91	1.03	1.17	0.69	1.16	0.54	0.85
邯郸	0.81	0.62	0.85	0.66	0.66	1	0.64	0.74	0.87	0.43	0.85	0.39	0.62
邢台	1.25	0.98	1.27	1.06	1.06	1.31	1	1.14	1.27	0.72	1.27	0.59	0.94
保定	1.10	0.85	1.12	0.92	0.92	1.16	0.87	1	1.11	0.62	1.11	0.52	0.83
张家口	0.92	0.72	0.93	0.78	0.77	1.01	0.72	0.82	1	0.55	0.95	0.43	0.68
承德	1.53	1.23	1.51	1.36	1.36	1.49	1.21	1.36	1.62	1	1.57	0.71	1.11
沧州	0.97	0.76	0.98	0.82	0.81	1.04	0.77	0.88	1.01	0.57	1	0.46	0.72
廊坊	2.08	1.62	2.12	1.74	1.76	2.24	1.65	1.90	2.11	1.18	2.11	1	1.58
衡水	1.31	1.02	1.34	1.09	1.10	1.41	1.04	1.19	1.32	0.73	1.32	0.63	1

低的异速生长水平,如北京、石家庄和邯郸等。夜间灯光指数这一测度的结果与灯光面积一定程度上表现一致(图4b)。

2.3 时空演变特征分析

结合城镇夜间灯光图、MSA 计算结果,可以揭示 22 a 来京津冀城镇体系的时空演变特征。其一,空间扩展有蔓延之势。1992—2013 年间,各大城市的中心城区不断向外扩展,区域中心城市周边各县级市的夜间灯光也明显增强,说明京津冀地区的城市发展以各个点状城镇为中心向外扩展,同时也由中心城市向周边小城镇逐渐扩展。另外,22 a 来,京津两地之间的夜间灯光显著增强,联系越发紧密,说明京津走廊地区未来有进一步集聚的趋势。其二,小城市相对增长快速。通过对 ASI 指数的分析可得,相对异速生长水平较高的城市以县级市为主,还包括地级市中规模较小的廊坊,说明自改革开放以及 1992 年市场经济体制确立以来,在政治经济政策的影响下,京津冀地区内的一些中小城市依托大城市取得相对较快的增长。其三,大城市增长空间有限。绝对发展水平高的大城市异速生长指数则居下中地位,以邯郸、石家庄和北京最低,说明持续的高速生长难以为继。在城市增长早期,北京借助良好的经济基础和政策资源等率先发展,经济社会发展水平远高于城市群内其他城市,已接近城市化发展成熟期;邯郸、石家庄等城市一方面由于本身城镇用地规模已接近饱和,并且由于主要依靠采矿、钢铁或能源等传统重工业,其进一步发展受到制约。天津、唐山、秦皇岛、保定等城市自改革开

放以来,借助独特的滨海优势、政策支持或北京辐射作用等取得了一定的规模扩张,但也不可避免地将面临环境容量限制等问题,近年来发展速度逐渐放缓。

保定在京津冀城镇体系中独具特色。一方面,在 1992—2013 年这 22 a 之间,保定虽然相对增速较慢,异速标度指数不高,但其周围被相对增速更慢的张家口、北京、沧州、石家庄等环绕,在区位上具有相对发展优势。另一方面,保定的绝对优势位居中流。这或许可以在一定程度解释,为什么政府选择、学者支持在保定发展一个雄安新区。就相对发展潜势而言,霸州是建设新区的区位,但如果综合地质条件、环境容量等诸多方面的因素,霸州可能不如现在的雄安新区了。

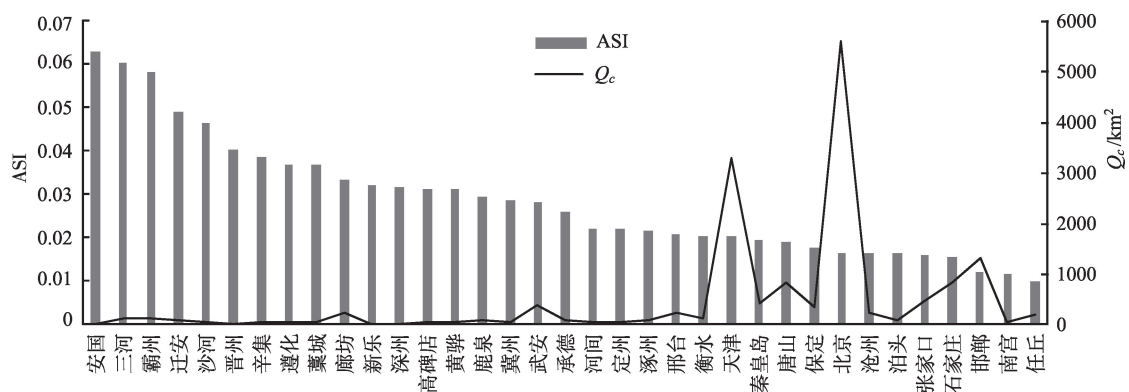
京津冀内部各城市发展水平的空间异质性特征明显。将各城市的 Q_i 指数和 ASI 指数绘图表示,可以得到京津冀地区发展水平的空间分异格局(图 5)。从 Q_i 指数上看,绝对发展水平高的城市主要分布在京津唐一带以及冀南地区,如邯郸、石家庄等,而县级市的绝对发展指数普遍偏低,且多集中在冀中南交接地带。至于 ASI 指数,分别从空间分布和地理方位 2 个视角来分析。①从空间分布上看,大型城市边缘地带的城市相对发展速度较高,特别是京津唐周边的三河、迁安、霸州和廊坊等市。京津唐是京津冀绝对发展水平最高、交通最为便利的地区,各城市之间联系紧密;近 22 a 来,位于这些大型城市边缘地带的中小城市迅速发展,它们自身资源条件丰富,区位条件优越,便于承接中心城市的产

表4 1992—2013年京津冀主要城市夜间灯光面积和灯光指数的多标度异速分析结果
Tab.4 Multi-scaling allometric (MSA) analysis results of urban nighttime light area and index
in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 1992-2013

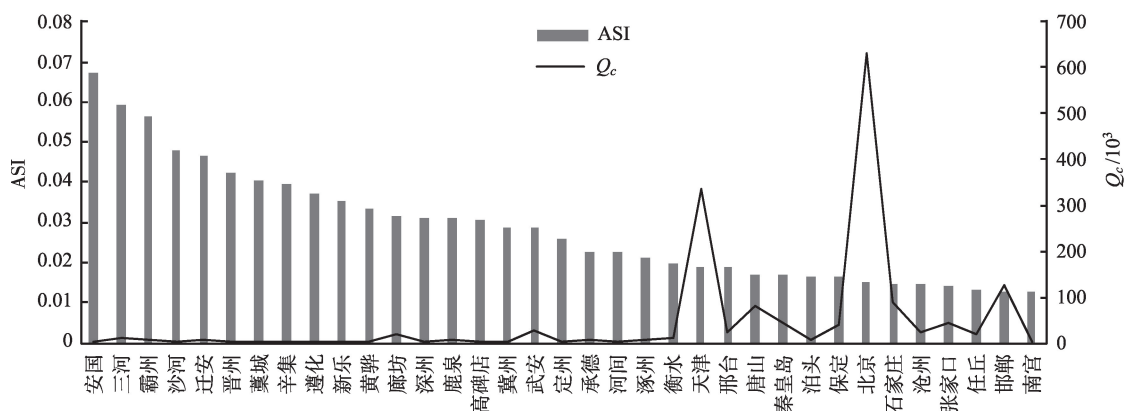
城市	基于灯光面积				基于灯光指数			
	ASI	RRG	Q_c/km^2	R^2	ASI	RRG	$Q_c/10^3$	R^2
北京	0.0166	0.0476	5584.3345	0.8516	0.0150	0.0481	629.5157	0.8130
天津	0.0202	0.0587	3299.6355	0.8990	0.0190	0.0599	336.9200	0.8615
石家庄	0.0154	0.0459	831.4278	0.7816	0.0147	0.0489	88.9824	0.7287
辛集	0.0387	0.1895	41.4513	0.6432	0.0394	0.2174	3.0537	0.6061
藁城	0.0369	0.2878	33.9766	0.3728	0.0402	0.3461	2.2959	0.3952
晋州	0.0405	0.1718	25.7266	0.7397	0.0421	0.1964	1.5818	0.7313
新乐	0.0319	0.0938	23.0870	0.8165	0.0353	0.1166	1.4206	0.7622
鹿泉	0.0295	0.1160	88.6341	0.7006	0.0309	0.1277	5.8084	0.6926
唐山	0.0192	0.0540	829.8382	0.9298	0.0171	0.0546	81.8007	0.8869
遵化	0.0369	0.1188	43.4224	0.9021	0.0373	0.1376	3.0685	0.8905
迁安	0.0491	0.1320	73.9027	0.9555	0.0467	0.1400	4.9919	0.9564
秦皇岛	0.0196	0.0530	407.9582	0.9154	0.0171	0.0507	41.4006	0.8859
邯郸	0.0121	0.0472	1330.7037	0.5569	0.0128	0.0516	125.1351	0.5113
武安	0.0283	0.1224	367.8588	0.4652	0.0285	0.1280	26.7679	0.4807
邢台	0.0206	0.0567	252.1434	0.8866	0.0188	0.0597	24.1521	0.8073
南宫	0.0117	0.0552	38.9206	0.3771	0.0125	0.0642	2.6878	0.3725
沙河	0.0466	0.2699	34.0733	0.5405	0.0478	0.3192	2.3890	0.4936
保定	0.0179	0.0503	359.9242	0.8046	0.0165	0.0520	38.6227	0.7722
涿州	0.0216	0.0761	99.2396	0.7002	0.0214	0.0812	8.4591	0.6758
定州	0.0221	0.0739	46.4907	0.7862	0.0257	0.0909	3.1522	0.7313
安国	0.0631	0.2981	7.9561	0.6382	0.0671	0.4004	0.4567	0.6235
高碑店	0.0312	0.1184	54.6144	0.8716	0.0307	0.1289	4.3387	0.8104
张家口	0.0160	0.0548	439.9350	0.8609	0.0140	0.0552	43.4514	0.7852
承德	0.0258	0.0829	89.3341	0.9621	0.0226	0.0798	7.9165	0.9543
沧州	0.0164	0.0510	235.3047	0.8839	0.0146	0.0519	23.8490	0.8106
泊头	0.0164	0.0556	67.1015	0.6630	0.0167	0.0650	5.4462	0.6144
任丘	0.0099	0.0315	198.0287	0.5734	0.0132	0.0468	18.7365	0.5328
黄骅	0.0311	0.1297	44.7231	0.7627	0.0332	0.1683	3.6201	0.6676
河间	0.0222	0.0739	49.9423	0.8193	0.0226	0.0851	4.1394	0.7132
廊坊	0.0335	0.1099	222.6302	0.7558	0.0315	0.1070	20.5950	0.7549
霸州	0.0580	0.2312	104.7807	0.6843	0.0564	0.2400	7.6541	0.6788
三河	0.0605	0.2311	116.1876	0.8032	0.0592	0.2531	8.4994	0.7650
衡水	0.0205	0.0592	129.4754	0.7677	0.0198	0.0622	12.1906	0.7364
冀州	0.0286	0.1161	33.3075	0.4145	0.0289	0.1264	2.2059	0.4301
深州	0.0317	0.1082	17.2473	0.7486	0.0311	0.1111	0.9733	0.7654

业转移,增长潜力巨大。②从地理方位上看,东部沿海地区的相对发展速度普遍高于内陆地区。例如秦皇岛、黄骅等市的ASI指数显著高于张家口、石家庄、邯郸等,这些城市能够利用独特的滨海优势加快经济发展,是内陆地区对外开放的前沿。另

外,安国市灯光指数的ASI指数远超于其他城市,除了其本身借助独特的医药文化资源增长快速之外,也可能与该市的初始年份灯光是通过插值得到有关。最后,任丘、南宫和泊头等小城市的绝对发展水平和异速生长速度始终处于落后状态。



(a) 基于夜间灯光面积的发展指数排序



(b) 基于夜间灯光指数的发展指数排序

图4 京津冀城市群各城市发展水平

Fig.4 Development level of cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region

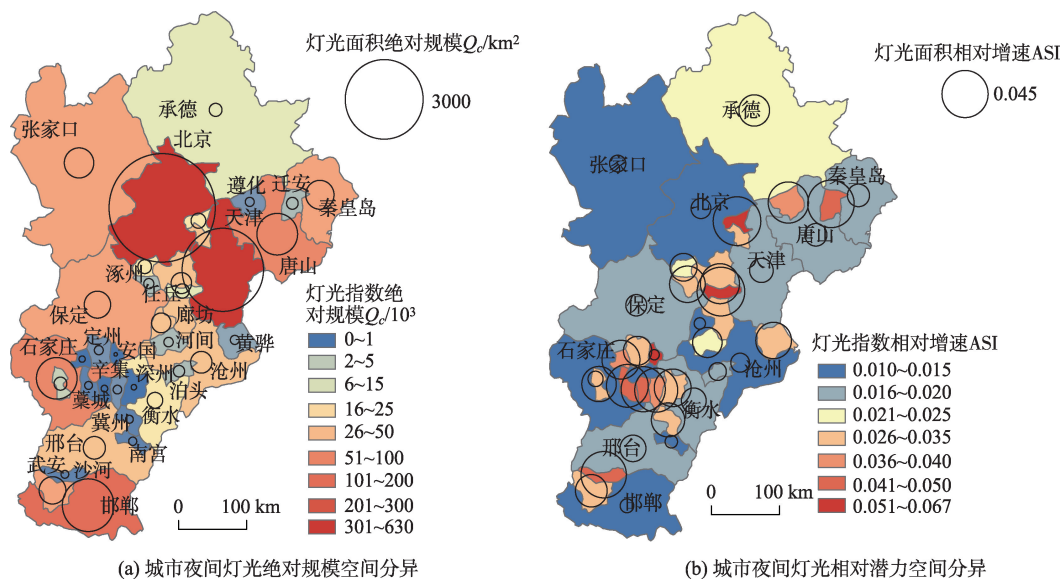


图5 1992—2013年间京津冀主要城市绝对发展水平及相对发展水平空间分异

Fig.5 Spatial heterogeneity of absolute and relative levels of urban development in the Beijing-Tianjin-Hebei region

3 讨论

可以看出,基于夜间灯光数据的京津冀城镇演化的多标度分析的确可以提供其他方法无法揭示的地理时空信息。灯光数据面积和指数从不同的角度反映城镇规模。统计分析表明,京津冀各个城镇2000年、2010年的城镇人口普查数据与灯光数据高度线性相关。城市人口与城区用地之间高度相关(Lo et al, 1977; Lee, 1989; Lo, 2002; 陈彦光, 2008)。这意味着,灯光数据的异速分析反映了京津冀城镇人口和用地扩张的时空关系。MSA方法提供了考察京津冀城镇体系时空特征的新方法。其一,绝对发展水平不同于相对增长潜力。在京津冀地区,京津唐之类的大城市由于环境容量的局限,增长空间已经不大。但是,在这些城市交接的间隙,出现了相对发展速度快的小城市。其二,异速生长的空间自相关为负。就灯光面积和灯光指数而言,空间自相关的Moran指数并不显著。但是,就ASI来说,空间自相关表现出显著的负相关性。也就是说,多标度异速指数之间存在负的空间自相关。这暗示相对发展速度快的城镇与慢的城镇高低错落,表现出空间异质性特征。其三,异速生长具有阶段性特征。京津冀的时空格局暗示,城镇生长的异速标度指数仅仅在一定时期内为常数,长期看来必然有跃变特征,否则不可能出现绝对水平与相对速度的显著差异。多标度异速分析有助于理解城镇体系的空间异质性(Chen, 2017)。如果所有的城镇同速增长,那就形成均质区域了。地理条件不同,资源禀赋不同,发展机遇不同,相对发展速度也不相同。这就导致空间差异,而空间差异正是地理学探讨的核心问题之一。

区域城镇体系的异速生长分析在国内开创较早,20 a前就有报道。陈涛(1995)从空间关联的角度,以非农业人口为测度,研究了豫北地区城镇体系的异速生长特征;陈彦光等(1997)以非农人口为测度研究了河南省城镇演化的异速生长问题;刘继生等(2000)以工业总产值为测度研究了东北长春地区的城镇体系异速生长关系,发现异速标度受到政治经济形势的显著影响。不过,那时主要从标度关系及其退化形式的角度解析时空特征,尚未形成系统的多标度异速分析模式。当层次分析法的思想和异速标度分析集成起来的时候,多标度异速分析开始形成,并且应用于杭州地区的城镇体系研究

(陈彦光, 2008; Chen et al, 2009)。然而,过去采用的数据都是统计数据,缺乏数值可靠的时间序列。京津冀城市群内部的发展关系一直是国内外学者关注的热点问题,但时间上连续、空间上完整、质量方面可靠数据的缺乏限制了有关研究的深入开展。本文借助夜间灯光数据和多标度异速分析,揭示了京津冀城镇化地区异速生长水平的时空特征,这对于适当了解和掌握区域内部各城市的发展阶段和增长潜力、调整和优化区域城镇体系格局有一定的参考价值。

本研究的不足之处在于2个方面。其一,灯光数据处理的精确性有待提高。城镇夜间灯光是通过幂指数方程校正后、根据经验阈值法提取的,具有便捷性和可实现性,但同时也存在一定的主观性,未来可以采用其他更有效的方法提高城市边界范围提取的精确性并开展分析。其二,缺乏最近几个年份的数据。研究时段限于1992—2013年,最近5个年份的灯光数据没有获得,不能反映现状的时空特征。以后可以结合VIIRS灯光数据对两者进行一致性校正,开展更长时间序列分析,并分阶段对京津冀城镇体系相对发展格局及其演化进行研究。

4 结论

综合上述动态演化和空间格局分析,本文可以得出如下主要结论:京津冀地区的空间格局优化不能仅仅考虑主要的中心城市,而应该从等级结构角度,激发增长快区域与增长慢区域的协同发展。具体要点如下:

第一,京津冀大城市包括京津唐的增长空间业已受限,相对发展速度较高的是大城市边缘的小城市。虽然北京、天津、唐山、石家庄、邯郸的绝对规模非常突出,但环境承载量临近极限,相对增长速度在整个城镇体系中已经没有优势。区域内一些绝对发展水平较低的县级市,如三河、霸州、遵化等,具有更高的相对发展速度。这些城市能够借助优越的区位条件和自身资源快速发展。随着边缘城市的迅速增长,区域空间异质性将会逐步降低。但是,就整个区域而言,可利用空间将会越来越少。

第二,京津冀城市发展格局的表现出地带性特征。相对发展速度较高的小城市在空间分布上有一定的规律性。这些相对优势的城市主要分布在大型城市的边缘地带和东部沿海地区,尤其是京津

唐周边的小城市,如三河、廊坊、迁安、黄骅等。概括起来,表现为2个方面的规律:一是大城市如京津唐的交接地带,二是大多分布在从东北到西南的轴带上。正是在这个轴带上,政府选择发展雄安新区。

第三,尽管区域范围内城市差异化发展难以避免,但京津冀整体相对演化趋势趋于均衡化发展。城市的异速生长具有阶段性特征,近22 a来,原来率先发展的大城市规模逐渐饱和,增速放缓,而较小城市获得更快发展机遇。这是一个有趣的现象:在生物界,一个物种不断挤压其他物种的生存空间,容易导致另一物种的濒危甚至灭绝(如生物入侵),这种异速竞争关系甚至比捕食关系显得更为残酷;但城市之间的异速生长并未出现这种绝对情况。未来可以通过管理和规划将绝对发展水平高的城市与相对增长速度快的城镇和区域有机组织起来,提高整个城镇系统的社会和经济效益。

参考文献(References)

- 曹迎春, 张玉坤. 2015. 河北省城镇体系规模结构及异速生长关系研究 [J]. 干旱区资源与环境, 29(1):13-18. [Cao Y C, Zhang Y K. 2015. The scale structure and allometric growth of the urban systems in Hebei Province. Journal of Arid Land Resources and Environment, 29(1): 13-18.]
- 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. 2015. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用 [J]. 地球信息科学学报, 17(9): 1092-1102. [Cao Z Y, Wu Z F, Kuang Y Q, et al. 2015. Correction of DMSP/OLS night-time light images and its application in China. Journal of Geo-information Science, 17(9): 1092-1102.]
- 常静, 李雪铭. 2004. 修正后的城市系统异速生长方程实证研究: 以大连市为例 [J]. 地理科学, 24(4): 406-412. [Chang J, Li X M. 2004. Modification of urban allometric growth and Cobb-Douglas function: A case of Dalian. Scientia Geographica Sinica, 24(4): 406-412.]
- 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. [Chen T. 1995. Studies on fractal systems of towns in the central plains. Changchun, China: 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. 2013. 城市异速标度研究的起源、困境和复兴 [J]. 地理研究, 32(6): 1033-1045. [Chen Y G. 2013. The rise, fall, and revival process of allometric scaling analysis in urban studies. Geographical Research, 32(6): 1033-1045.]
- 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, 王永洁. 1997. 城镇体系相关作用的分形研究 [J]. 科技通报, 13(4): 233-237. [Chen Y G, Wang Y J. 1997. A fractal study on interaction between towns in urban systems. Bulletin of Science and Technology, 13(4): 233-237.]
- 陈彦光, 张莉. 2014. 信阳城市人口-城区用地异速生长分析 [J]. 地理科学进展, 33(8): 1058-1067. [Chen Y G, Zhang L. 2014. An allometric analysis of the scaling relations between urban area and population of Xinyang. Progress in Geography, 33(8): 1058-1067.]
- 董磊, 王浩, 赵红蕊. 2017. 城市范围界定与标度律 [J]. 地理学报, 72(2): 213-223. [Dong L, Wang H, Zhao H R. 2017. The definition of city boundary and scaling law. Acta Geographica Sinica, 72(2): 213-223.]
- 古杰, 陈忠暖, 张少伟. 2010. 中国中部六省城乡人口异速生长过程分析 [J]. 云南地理环境研究, 22(4): 13-19. [Gu J, Chen Z N, Zhang S W. 2010. An allometric analysis of six provinces' urbanization in middle China. Yunnan Geographic Environment Research, 22(4): 13-19.]
- 李郁, 陈刚强, 许学强. 2009. 中国城市异速增长分析 [J]. 地理学报, 64(4): 399-407. [Li X, Chen G Q, Xu X Q. 2009. Urban allometric growth in China: Theory and facts. Acta Geographica Sinica, 64(4): 399-407.]
- 梁进社, 王旻. 2002. 城市用地与人口的异速增长和相关经验研究 [J]. 地理科学, 22(6): 649-654. [Liang J S, Wang M. 2002. The allometric growth of urban land use and population and its experiential research. Scientia Geographica Sinica, 22(6): 649-654.]
- 刘浩, 马琳, 李国平. 2016. 1990s以来京津冀地区经济发展失衡格局的时空演化 [J]. 地理研究, 35(3): 471-481. [Liu H, Ma L, Li G P. 2016. Spatial-temporal evolution pattern of unbalanced economic development in Beijing-Tianjin-Hebei region since the 1990s. Geographical Research, 35(3): 471-481.]
- 刘继生, 陈彦光. 2000. 长春地区城镇体系时空关联的异速生长分析: 1949-1988 [J]. 人文地理, 15(3): 6-12. [Liu J S, Chen Y G. 2000. An allometric analysis of the Changchun system of towns: 1949-1988. Human Geography, 2000, 15(3): 6-12.]
- 陆大道. 2015. 京津冀城市群功能定位及协同发展 [J]. 地理科学进展, 34(3): 265-270. [Lu D D. 2015. Function orientation and coordinating development of subregions within the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Progress in Geography, 34(3): 265-270.]

- 舒松, 余柏菡, 吴健平, 等. 2011. 基于夜间灯光数据的城市建成区提取方法评价与应用 [J]. 遥感技术与应用, 26(2): 169-176. [Su S, Yu B L, Wu J P, et al. 2011. Methods for deriving urban built-up area using night-light data: Assessment and application. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 169-176.]
- 王慧娟, 兰宗敏, 金浩, 等. 2017. 基于夜间灯光数据的长江中游城市群城镇体系空间演化研究 [J]. 经济问题探索, 38(3): 107-114. [Wang H J, Lan Z M, Jin H, et al. 2017. The spatial evolution of urban system in the middle reaches of Yangtze River using DMSP/OLS nighttime light data. *Inquiry into Economic Issues*, 38(3): 107-114.]
- 杨眉, 王世新, 周艺, 等. 2011. 基于DMSP/OLS影像的城市化水平遥感估算方法 [J]. 遥感信息, 26(4): 100-106. [Yang M, Wang S X, Zhou Y, et al. 2011. A method of urbanization level estimation using DMSP/OLS imagery. *Remote Sensing Information*, 26(4): 100-106.]
- 杨洋, 黄庆旭, 章立玲. 2015. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的土地城镇化水平时空测度研究: 以环渤海地区为例 [J]. 经济地理, 35(2): 141-148. [Yang Y, Huang Q X, Zhang L L. 2015. The spatial-temporal measurement on the land urbanization level using DMSP/OLS nighttime light data: A case study of Bohai Rim. *Economic Geography*, 35(2): 141-148.]
- 杨洋, 李雅静, 何春阳, 等. 2016. 环渤海地区三大城市群城市规模分布动态比较: 基于1992-2012年夜间灯光数据的分析和透视 [J]. 经济地理, 36(4): 59-69. [Yang Y, Li Y J, He C Y, et al. 2016. A comparative study on spatiotemporal dynamics of city size distribution among three urban agglomeration in Bohai Rim: Based on the analysis and perspective of nighttime light data from 1992 to 2012. *Economic Geography*, 36(4): 59-69.]
- 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.]
- Batty M. 2008. The size, scale, and shape of cities [J]. *Science*, 319: 769-771.
- Beckmann M J. 1958. City hierarchies and distribution of city sizes [J]. *Economic Development and Cultural Change*, 6(3): 243-248.
- Bertalanffy L. 1968. *General system theory: Foundations, development, and applications* [M]. New York: George Braziller.
- Chen Y G. 2017. Multi-scaling allometric analysis for urban and regional development [J]. *Physica A*, 465: 673-689.
- Chen Y G, Jiang S G. 2009. An analytical process of the spatio-temporal evolution of urban systems based on allometric and fractal ideas [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 39(1): 49-64.
- Lee Y. 1989. An allometric analysis of the US urban system: 1960-80 [J]. *Environment and Planning A*, 21(4): 463-476.
- Li R Q, Dong L, Zhang J, et al. 2017. Simple spatial scaling rules behind complex cities [J]. *Nature Communications*, 8(1): 1841.
- Lo C P. 2002. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSP-OLS nighttime images [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(2): 225-240.
- Lo CP, Welch R. 1977. Chinese urban population estimates [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 67(2): 246-253.
- Lu D S, Tian H Q, Zhou G M, et al. 2008. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely sensed data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 112(9): 3668-3679.
- Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, et al. 2003. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the Southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 401-410.
- Naroll RS, Bertalanffy L. 1956. The principle of allometry in biology and social sciences [J]. *General Systems Yearbook*, 1: 76-89.
- Zeng C Q, Zhou Y, Wang S X, et al. 2011. Population spatialization in China based on night-time imagery and land use data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24): 9599-9620.
- Zhao N Z, Currit N, Samson E. 2011. Net primary production and gross domestic product in China derived from satellite imagery [J]. *Ecological Economics*, 70(5): 921-928.

Multi-scaling allometric analysis of the Beijing-Tianjin-Hebei urban system based on nighttime light data

LONG Yuqing, CHEN Yanguang*

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

Abstract: The spatial-temporal evolution of urban systems is a complex scale-free dynamic process, which can be described quantitatively by allometric scaling index. In this study, the multi-scaling allometric analysis method was employed to analyze the relative development characteristics and the spatial heterogeneity pattern of the main cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on the calibration results of the nighttime light data from 1992 to 2013. The main findings are as follows: 1) The limitations on spatial development of big cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region were increasing. Although the absolute development levels of big cities such as Beijing, Tianjin, and Tangshan were higher than medium-sized and small cities, large cities were close to the limit of environmental carrying capacity; smaller cities such as Sanhe, Qian'an, and Langfang had grown rapidly in the 22 years. 2) Cities with relatively high growth advantage show a zonal distribution from northeast to southwest. These small cities are located in the space between the big cities. Two principal conclusions can be drawn as below: 1) The trend of urban change in Beijing, Tianjin, and Hebei is relatively balanced. Heterogeneity of the spatial structure has gradually weakened, and the development of the whole urban system tends to evolve into a relatively homogeneous state. 2) The key of spatial optimization in the Beijing-Tianjin-Hebei region is to unify the two extremes of cities. The large cities with absolute high development levels and the small cities with relatively high growth rates should be integrated into a self-organized framework. The nighttime light data can be used to characterize the allometric scaling relations between elements of urban systems and to explain the formation mechanism of spatial heterogeneity.

Keywords: urban system; nighttime light data; allometric scaling; fractal; fractal dimensions; Beijing-Tianjin-Hebei region