

# 基于空间分形特征的城市群实体空间识别方法

刘 飞,郑新奇\*,黄 晴

(中国地质大学(北京)信息工程学院,北京 100083)

**摘 要:**城市群是城市地理学的重要研究领域,对城市群的实体空间进行界定识别是研究城市群的前提和基础。城市群作为众多城镇的集群,前人对城市群的空间识别主要是以城市为单元进行的,缺少对识别单元空间形态的考虑。城市群实体空间的形态具有自相似性,空间分形特征可作为自相似性的表征工具,通过对空间分形特征的分析、识别及提取,可以实现对空间对象基于形态的客观测度。本文借鉴单个城市其边界的相关识别方法,从不同尺度的空间最小可识别单元出发,测度城市群城镇空间形态的分形特征,并据此提出了城市群城镇的客观识别方法。该方法利用城镇的空间分形特征识别归属于城市群的城镇,通过空间最小可识别单元的变化得到不同的城镇规模并获取城市群城镇的空间分形特征,再以此为基础对空间分形特征的存在范围进行识别,将其映射于空间最终实现对城市群城镇的识别,进而得到城市群在空间上的分布状况。本文将该方法应用于京津冀城市群,基于2016年Landsat卫星遥感影像,实现了对京津冀城市群构成城镇的识别,为界定城市群的实体空间提供了一次有益尝试。

**关键词:**城市群;实体空间;空间识别;空间形态;分形特征

## 1 引言

城市群是城镇间的空间联系发展到一定阶段而形成的城镇体系,其实体空间可以看作是由城镇构成的集群,是城市群的客观存在,只有有效地界定城市群的实体空间并获取其空间分布状况,才能对城市群开展有效的统计并进行研究,因此明确城市群的实体空间是开展城市群研究的前提和基础。然而,城市群的复杂性和开放性,使得其实体空间具有模糊性界定困难(姚士谋等, 2006),如何实现城市群的空间识别是目前城市地理学中面临的问题之一。

在城市地理学领域,有关实体空间识别的研究已有众多成果,但大多是针对单个城市的边界识别,对于城市群实体空间的识别并不太多。已有研究对城市群实体空间的识别大体可分为三类:一是直接以行政区域作为城市群的空间,因而划定的城

市群空间与城市群的实际存在范围并不相符(陈群元等, 2010),且忽视了邻接城镇作为城市群组成部分的可能(潘竟虎等, 2014; 王成龙等, 2016);二是设定判别指标及判别标准,分别计算并判断各城市的对应指标是否符合城市群成员的标准(方创琳, 2009; 黄金川等, 2014)。虽然这一方法较为成熟,但却忽视了城市部分空间构成城市群的可能,且指标的选择及标准的设定带有主观色彩;三是先遴选城市群中心城市,再采用模型计算周围城市与中心城市的联系强弱,以此判断周边城市是否构成城市群,主要代表模型有引力模型、断裂点模型、场强模型、Voronoi图模型等(Martin, 1998; Mu et al, 2006; 李震等, 2006; Fragkias et al, 2009; 陈群元等, 2010),虽然考虑了城市的空间分布及城市间的相互作用,结果较贴近实际,但应用于模型计算的指标及判定依据的选择同样无法避免主观因素的干扰,同时模型的理论依托、测度方法缺乏科学依据,难以得到

收稿日期:2016-12;修订日期:2017-06。

基金项目:国家国际科技合作与交流专项(S2015ZR1018) [Foundation: National Major Programs of International Cooperation and Exchanges of China, No.S2015ZR1018]。

作者简介:刘飞(1989-),男,博士生,主要研究方向为地理分形与自组织, E-mail: liufei@escience.cn。

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

引用格式:刘飞,郑新奇,黄晴. 2017. 基于空间分形特征的城市群实体空间识别方法[J]. 地理科学进展, 36(6): 677-684. [Liu F, Zheng X Q, Huang Q. 2017. Identification of the physical space of urban systems based on fractal analysis[J]. Progress in Geography, 36(6): 677-684.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.06.003

普遍认可。由此不难看出,已有的城市群空间识别研究均以城市为研究单元,将城市群的空间识别等同于对城市是否归属城市群的判别,界线过于生硬,忽视了研究单元部分空间归属城市群的可能;同时,识别方法大都属于基于各项统计指标计算后的判别,统计指标的选择、判别标准的制定都具有较强的主观片面性和随意性,更无法真实地获得在空间上连续的指标,不能客观地刻画城市群实体空间。

与传统的离散型统计指标不同,分形作为贴近自然的描述语言逐渐为越来越多的人所关注,空间分形特征是连续型地理空间对象自相似形态的有效表征,通过对空间分形特征的分析、识别及提取,可实现对空间对象基于形态的客观测度。就单一城市的空间识别而言,近年来有学者进行了一些从城市形态学的角度出发,利用城市形态的空间分形特征划定城市空间边界的尝试。Rozenfeld等(2008, 2011)提出了城市群算法;Tannier等(2011)提出了基于城市分形特征,利用多项式拟合,寻找最大偏离点的城市边界识别方法;Tannier等(2013)基于城市内部集群(组成城市的集群而非城市组成的集群)的识别方法,同时选取不同分形和非分形指征,分别对城市的不同理论形态和实际形态进行分析;谭兴业等(2015)在Tannier的基础上融入了邻域扩展的思想,基于栅格数据,利用多期曲线对比确定城市的边界;Chen(2016)则利用多重分形奇异谱曲线对城市和乡村区域特征进行了定量测定;更早期,Openshaw等(1987, 1988)开发了地理分析机,基于点的空间分布利用变化的搜索圆对其聚集区进行研究。这些尝试虽未以城市群的实体空间为识别目标,但为利用空间形态对实体空间进行识别提供了很好的借鉴。同时,城市群是因城镇间发生空间联系而形成的城镇体系,其实体空间可看作由城镇聚集而成,因而实现对构成城市群空间的城镇的识别,是在空间上识别城市群实体的有效途径。

针对上述研究中城市群实体空间识别方法的局限性,本文将利用空间分形特征表征空间自相似形态的思想引入城市群空间识别研究,不再以逐个城市作为城市群的识别单元,打破城市硬边界的束缚,将城镇群体作为城市群实体空间的识别对象,基于序列变化的空间可识别单元测度城市群城镇的自相似形态及其分形特征,并进行分析、识别及提取,由此建立对城镇的客观识别方法,以确定城市群实体空间的分布。该方法采用自上而下的识

别视角,打破了以城市为研究单元的地域限定;运用分形语言客观描述城市群城镇的空间形态,无需选取统计指标对各城市进行判别,更加贴近实际,且避免了指标选择的片面性和随意性,使得对空间的识别更具客观性。最后,以京津冀城市群为例,实现了对构成城镇的识别,进而得到城市群在空间上的分布状况,并对此法进行了验证。

## 2 研究方法

### 2.1 基于空间最小可识别单元的城市群城镇空间分形特征测度方法

若某一空间现象规模随尺度以某种规则的方式变化,并可在这一规则对应的维度上测度这一现象,则这一规则的方式即为该现象表现出的分形特征,而寻找这样的规则即为分形特征的测度,此规则对应的维度即分形维数。对于空间分形特征的测度,已有很多研究,最常用的分形特征的测度方法当属改变尺度的方法,即用不同刻度的尺子去测量同一空间形态会测得不同的量,把尺子的度记作 $r$ ,把相应于尺子测得的量记作 $N(r)$ ,随着尺子的度不断变化,会得到一组相应的量,如果这组量与这组量满足如下关系便可认为该空间形态存在分形特征。

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

式中的 $D$ 即为分形维数。

城市群是由城镇组成的集群,在空间分布上呈离散状态,既可视作成规模的整体,又可看作彼此独立的个体。本文基于可识别单元构成城市群城镇集合的思想,通过改变最小可识别单元测度城镇规模及城市群的空间形态,实现城市群城镇空间形态分形特征的测度。基于空间最小可识别单元空间形态测度城市群城镇的空间分形特征,就是将最小可识别单元当作不同尺子的度,当最小可识别单元发生变化时,可识别单元的数量、面积及空间分布等都会发生变化,因而通过最小可识别单元的变化可得出不同的可识别单元集合,即构成城市群城镇的不同规模,通过不同的城镇规模即可形成不同的空间分布形态,如图1所示。而得到的不同城镇规模,也即用不同尺子测度空间分形特征所得到的不同量。

因此,本文进行空间分形特征测度的主要思路如下:以研究区城镇建成区矢量图斑为基础,设定序列变化的最小可识别单元 $r$ ,分别对空间大于不

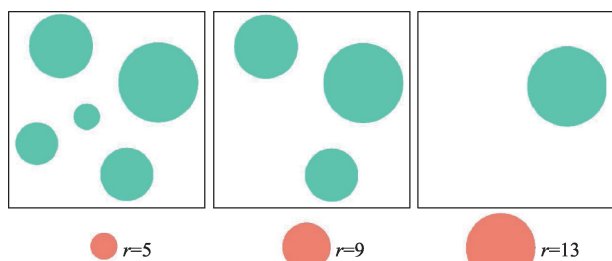


图1 最小可识别单元与空间形态关系示意图

Fig.1 Schematic diagram for the relationship between identifiable minimum unit and spatial morphology

同最小可识别单元的图斑进行提取,得到空间可识别单元即城镇集合,对数量及面积进行测算,最终得到不同测度 $r$ 下的两组不同量 $N_{\text{num}}(r)$ 、 $N_{\text{area}}(r)$ ,如果二者满足:

$$N_{\text{num}}(r) \propto r^{-D_{\text{num}}} \quad (2)$$

$$N_{\text{area}}(r) \propto r^{-D_{\text{area}}} \quad (3)$$

则可认为该城市群空间可识别单元即城镇的空间形态存在分形特征,其中的 $D_{\text{num}}$ 、 $D_{\text{area}}$ 为分形维数,本文将 $N_{\text{num}}(r)$ 、 $N_{\text{area}}(r)$ 统称为城镇规模。

## 2.2 基于空间分形特征的城市群城镇识别方法

本文所述的城市群城镇是指由空间可识别单元构成的城镇集合。若改变最小的空间可识别单元,城市群中可识别的空间单元就会发生变化,构成的城镇集合也就发生了变化,城镇的数量及面积也会随之相应改变。如果城市群城镇的空间形态具有分形特征,则空间最小可识别单元 $r$ 与城市群城镇规模 $N(r)$ 会具有良好的幂函数关系,而幂函数关系可等价于双对数线性关系,即:

$$\ln N(r) = -D \times \ln r + c \quad (4)$$

式中: $D$ 为分形维数, $c$ 为常数。

因此,基于上述方法所得数据可绘制出空间最小可识别单元 $r$ 与城市群城镇规模 $N(r)$ 的双对数曲线,而实际曲线往往仅在有限范围可表现出分形特征,这一有限范围即无标度区,因而可通过无标度区的识别来确定空间分形特征的存在范围。若城市群中空间可识别单元的空间形态具有分形特征,则通过空间分形特征存在范围即可确定城市群中可识别的空间单元,进而得到城市群城镇的集合。

本文对于无标度区的识别主要是获取上述双对数曲线的线性区域。所谓线性区域,就是曲线在某一区域呈现出直线或是近似直线的形态。根据曲线斜率(即曲线拟合函数的一阶导数)的数学意义可知,曲线各点的斜率即曲线的变化趋势,因此该

区域内曲线各点的斜率应显示出相同的特征,故理论上通过曲线的斜率变化可准确地确定曲线的线性区域。但在实际中,曲线是根据对数样本点绘制而得,空间数据往往存在误差,样本点可能并非位于真实曲线之上,曲线无法呈绝对直线形态。因此,线性区域的斜率将围绕某一数值波动,单纯通过曲线斜率无法清晰地识别线性区域的边界。而线性拟合则可获得两组变量间的线性变化直线,故可借助同一样本的线性拟合比照出变化曲线的线性区域。本文将依据对双对数的线性拟合来识别曲线的线性区域,进而确定分形特征的存在范围。

最后,通过将空间分形特征的存在范围映射于空间最小可识别单元及城镇的规模,即可确定城市群中可识别的空间单元,由其斑块构成的城镇集合即本文所识别的城市群城镇,进而得到城市群的实体空间。

## 3 实验与结果

### 3.1 数据来源

本文以2016年北京、天津、河北的行政管辖区域为研究区,以美国Landsat系列陆地资源卫星的遥感影像为基础数据,利用监督分类,从多景遥感影像上共选取7153个训练样本,分景将用地类型分为建设用地、农用地、山地、水体四类。从各景影像上分别提取研究区的现状建设用地矢量图斑并完成拼接,最后得到研究区当期的建设用地矢量数据。通过分类结果与遥感影像的目视对比,可判定分类精度较高,基本可满足研究区空间分形特征识别的需求。

### 3.2 实验过程

基于可识别单元构成城市群城镇集合的思想,本实验将研究区内建设地图斑视为城镇的建成区,每一图斑即为一个待识别单元,以等间隔的空间最小可识别单元序列作为尺子,通过不同的尺子对待识别单元一一测度,得到可识别的单元即城镇集合并对城镇规模(数量及面积)进行测算。基于上述方法共得到727896组2016年京津冀城市群空间最小可识别单元与城市群城镇规模数据,见表1(因数据量过大此处仅列出序列中首尾各5条数据)。

从测算数据中可以看出,随着最小可识别单元的不断扩大,城镇规模呈递减趋势,即城市群城镇的数量及面积均不断减少。

将空间最小可识别单元与城镇规模作为坐标



对标绘在坐标图中。由于数十万条数据量过于庞大,坐标值相对于坐标轴的长度过小,使得数据点过于贴近坐标轴,为提高图表的可读性,本文仅对原始数据的前 5000 对进行展示,所得散点图见图 2-3,二者均呈幂律变化关系,研究区内构成城镇集合的空间可识别单元表现出典型的分形特征,满足式(2)-(3),因此,可认为城市群城镇的空间形态存在分形特征。

在此基础上,为了识别城市群城镇需要进一步确定分形特征的存在范围,以确定其对应的最小可识别单元。空间最小可识别单元与城镇规模表现出典型的分形特征,二者的对数应呈良好的线性关系,故二者双对数曲线的线性无标度区即为分形特征的存在范围。为此,首先应获取空间最小可识别单元与城镇规模的双对数曲线,本文所测得的每一对空间最小可识别单元与城镇规模的对数均可视为一个样本点,因此可通过对这些样本点插值的方式获取二者的变化曲线,故采用对二者分别取对数后作曲线插值的方法获取双对数曲线。常用的插值方法主要有拉格朗日插值、分段插值、样条插值等,其中拉格朗日插值在曲线两端常常会出现异常波动;分段插值虽在曲线两端不会出现波动,但其折线相交处棱角分明;样条插值则是在此基础上利用其导数值使得折线相交处更加平滑,故样条插值是曲线插值方法中最为普遍的插值方法,在曲线形态上更贴近本文样本点所在的双对数曲线。由插值效果可得,曲线平滑且可靠性和复杂性相对适中,插值曲线见图 4-5。

从图 4-5 中可以看出,城市群空间最小可识别单元与城镇规模的双对数曲线在有限区间内呈现

出近似线性关系。基于无标度区的识别方法,在此基础上对双对数曲线样本点再次作线性拟合,见图 6-7。

### 3.3 结果与分析

通过对线性拟合曲线与双对数曲线的比照分析可以得到,当空间最小可识别单元的对数值大于 10.58 时,双对数曲线虽未呈严格的线性变化,但近似与线性拟合曲线重合,其微幅波动在有限范围内且幅度极小,可以认为双对数曲线呈近似线性变化;而当小于该值时,双对数曲线偏离线性拟合曲

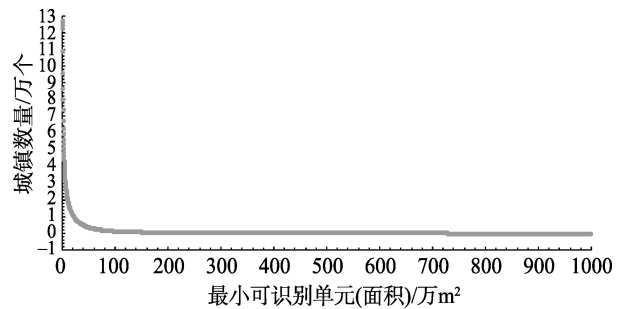


图2 空间最小可识别单元与城镇数量变化关系图

Fig.2 Relationship between identifiable minimum units and corresponding counts of towns

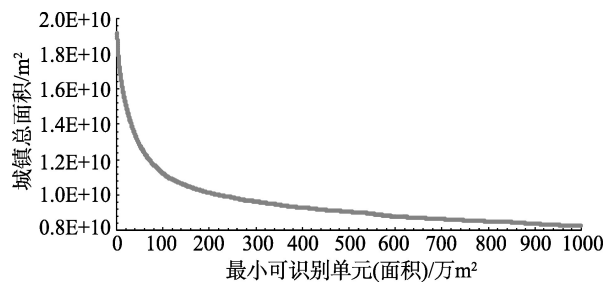


图3 空间最小可识别单元与城镇总面积变化关系图

Fig.3 Relationship between identifiable minimum units and corresponding areas of towns

表1 空间最小可识别单元与城镇规模统计表

Tab.1 Statistics of identifiable minimum units and corresponding counts and areas of towns

最小可识别单元(面积)/m <sup>2</sup>	城镇数量/个	城镇总面积/m <sup>2</sup>
2000	127448	19182219429
4000	126204	19178354882
6000	124706	19170842330
8000	122453	19155247742
10000	108958	19030279736
.....	.....	.....
1455784000	1	1455790901
1455786000	1	1455790901
1455788000	1	1455790901
1455790000	1	1455790901
1455792000	0	0

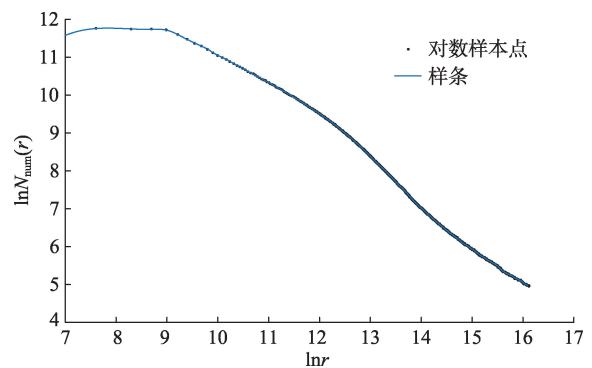


图4 空间最小可识别单元与城镇数量双对数样条插值曲线

Fig.4 Curve of spline function for the logarithm of identifiable minimum units and counts of towns

线相对于整体较多,斜率变化剧烈,空间最小可识别单元与城镇规模(数量及面积)的双对数均呈现出非线性关系的趋势,而非空间分形特征应显示出的线性关系。通过数量及面积两种不同测度的双对数样条插值曲线及其线性拟合曲线的对比可以看

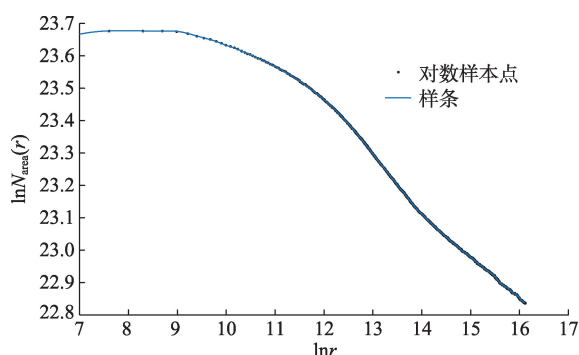


图5 空间最小可识别单元与城镇总面积双对数样条插值曲线

Fig.5 Curve of spline function for the logarithm of identifiable minimum units and areas of towns

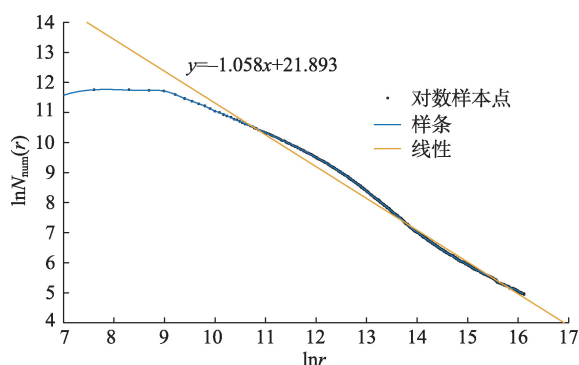


图6 空间最小可识别单元与城镇数量双对数线性拟合曲线

Fig.6 Curves of the linear fitting function for the logarithm of identifiable minimum units and counts of towns

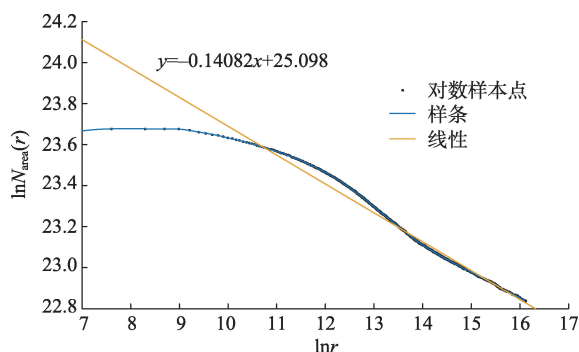


图7 空间最小可识别单元与城镇总面积双对数线性拟合曲线

Fig.7 Curves of the linear fitting function for the logarithm of identifiable minimum units and areas of towns

出,虽然二者存在不一致区域,但其线性区域基本重合,可作为线性区域基本可靠的印证。因此本文认为,该点为研究区空间可识别单元分形特征存在的范围界限。故可借助曲线的直线拟合比照出双对数曲线变化的线性区域,本文将依据对曲线的直线拟合来识别双对数曲线的线性区域,进而确定分形特征的存在范围。

最后,通过该界限反推空间最小可识别单元,并得出  $39340.11 \text{ m}^2$  为所识别的该城市群的空间最小可识别单元。在此基础上,再次以研究区建设用地矢量图斑为基础,识别大于所得的最小可识别单元的图斑,得到空间可识别单元集合并进行融合,最终形成京津冀城市群城镇集合,即城市群的实体空间,见图8。

从所识别的构成京津冀城市群实体空间的城镇集合可以看出,城市群实体空间打破了城市行政区域的束缚,既包括现有的城市主城区,更包括了城市间的次一级中心,这种空间形态可运用中心地理论(Christaller, 1933)进行解释,亦符合现有对京津冀城市群城镇实际空间分布的普遍认知;同时,识别结果并未覆盖全部建成区,剔除了不属于城市群实体空间的零散居民点图斑,与以行政区域作为城市群空间的组份相比,提高了对实体空间认知的科学性,使识别结果更加贴近客观实际;识别的实体空间多集中于东部和南部地区,西部和北部分布

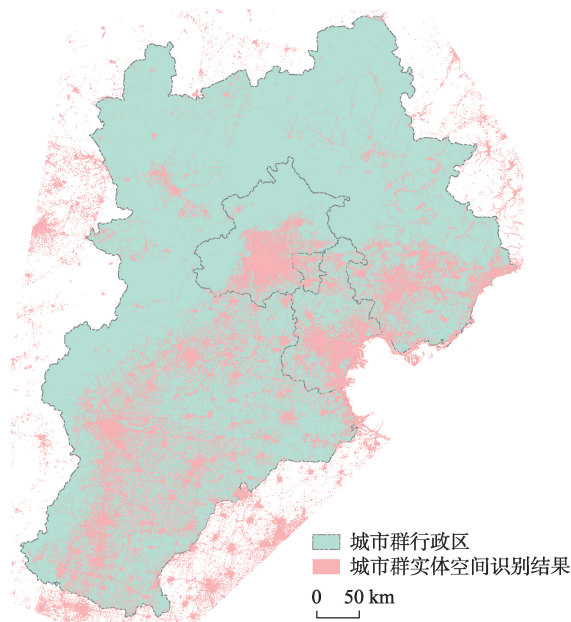


图8 城市群实体空间识别结果

Fig.8 Identification of the physical space of the Beijing-Tianjin-Hebei urban systems

较少,呈现出空间分异规律,同时也与京津冀地区西、北部多山地致使城市的发展存在自然阻碍相一致,验证了结果的科学性和可靠性;而分布于聚集中心周围呈放射状的触角形态在表征城市辐射及其扩张范围的同时,通道状分布亦是城镇间的相互作用及要素流的集中体现,符合地理学第一定律。总体上看,识别结果贴近实际,效果较好。因此,实验的结果有效验证了基于空间分形特征的城市群城镇识别方法的可行性和有效性。

## 4 讨论与总结

### 4.1 讨论

本文基于空间可识别单元测度城市群城镇的形态及其分形特征,实现了城市群实体空间的客观识别。与传统的城市群空间范围相比,本文识别的城市群实体空间是一体化的城市群作为单一的行为主体有能力触及的空间,而非城市群内城市行政边界的简单集合,体现了城市群相异于城市集合的整体性;城市群实体空间中的城镇是城市群生存空间的客观存在,亦符合城市群城镇间相互联系的特征;而城市群实体空间城镇构成的不规则形态体现了对上述相互作用的合理限制,故城市群实体空间是对地域不被城市割裂的城市群空间范围的合理识别。同时,城市群实体空间中的城镇呈等级规模结构,符合中心地理论等经典城市地理学的相关理论。

与传统的城市群识别方法相比(表2),本文所采用的识别方法具有如下特点:

首先,本文对城市群实体空间的识别是从宏观角度出发,将所有城镇单元作为整体的判别,研究单元不再受城市的制约,打破了以城市为研究单元的束缚,满足了研究区部分城镇归属城市群的可能,实现了对城市群空间范围的客观测度,避免了识别过程中由于对空间的一刀切而对识别结果的影响。

其次,本文采用的识别方法是基于城市群实体空间自相似形态的,在无需单独考虑城市群内部的复杂相互作用及要素流的同时,亦符合 Tobler 提出的地理学第二定律(引自 Goodchild, 2004)即区域外部性,在城市群实体空间的识别过程中无需捕捉影响空间的因素即可得到识别结果,避免了影响因素捕捉的不完整性对识别结果的影响。

第三,本文所使用的方法规避了对城市中心性的测定,从而避免了指标的选取;测度分形特征的

表2 新旧城市群识别方法对比

Tab.2 Comparison of the identification methods for the space of urban systems

对比内容	传统据指标判别方法	基于空间分形特征的识别方法
识别角度	自下而上	自上而下
识别目标	城市	实体空间
行政边界	需要	不需要
行政单元分拆性	不可分	可分
贴近客观存在	否	是
空间形态	未充分考虑	已考虑
捕捉影响因素	需要	不需要
空间相互作用及要素流	需要但未考虑	无需单独考虑
评价指标体系	需要	不需要
判别标准	需要	不需要
城市双分形特征	未考虑	已体现

方法为客观的统计学方法;对分形存在范围的识别则是采用非指标方法计算其分段点;无标度区在空间上的映射则是以客观手段设定的界定标准。识别过程未掺杂主观因素,是一种客观的城市群识别方法。

第四,城市形态存在双分形特征已为目前的部分研究所证实(White et al, 1993, 1994; Haag, 1994; Frankhauser, 1998; 刘继生等, 2003; Chen et al, 2004; Ariza-Villaverde et al, 2013; Chen et al, 2013),这种特征正是城市与非城市区域的体现。而本文的识别方法并不违背对这一双分形特征的已有认知,可从规模层面直接将非城市群区域从整个区域剔除,避免了在非城市区域中对城市群的识别,是在城市群层面对双分形特征的利用尝试。

### 4.2 总结

城市群是由城镇组成的集群,与传统的城市群空间识别模型相比,本文将提取空间分形特征进行挖掘的思想引入城市群空间范围识别的研究,从城市群自相似性的角度出发,从组成城市的最小可识别单元入手,通过对空间可识别单元空间分形特征突变的识别,从全部空间可识别单元排除非城市群的单元,其实质是对空间分形特征存在范围的测度,从而实现对城市群城镇的识别,避免了城市对城市群空间的割裂,规避了指标的选取,因而不需对相互作用规律进行深究。并以京津冀城市群为例,进行了实体空间的识别,为城市群的空间识别研究提供了一次有益的尝试。

目前,学界对于城市群的定义仍有许多争议(周一星等, 1995; Scott, 2001; 张京祥等, 2001; Ferreira et al, 2010; 方创琳, 2011; 江曼琦, 2013),本文



虽实现了对城市群的识别,但并不是一种普适的识别方法,遵循不同的理论依据会得到不同的尺度序列及识别结果。因此,相应于不同的城市群概念该方法的可行性仍有待考究。同时,样条插值并不能等同于真实曲线,曲线两端的数据断崖使得两端曲线非线性程度较高,影响对无标度区的直观识别,亦会造成误判,且本文采用的曲线插值及拟合方法亦不能完全体现样本点的真实状态,如何更趋近地获取真实曲线仍有待探索。

此外,本文虽实现了对城市群实体空间的识别,但由于缺少时空数据,未能实现识别结果时空分异特征的对比,有待在后续研究中进一步完善。

### 参考文献(references)

- 陈群元, 宋玉祥. 2010. 城市群空间范围的综合界定方法研究: 以长株潭城市群为例[J]. 地理科学, 30(5): 660-666. [Chen Q Y, Song Y X. 2010. Methods of dividing the boundary of urban agglomerations: Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration as a case[J]. Scientia Geographica Sinica, 30(5): 660-666.]
- 方创琳. 2009. 城市群空间范围识别标准的研究进展与基本判断[J]. 城市规划学刊, (4): 1-6. [Fang C L. 2009. Research progress and general definition about identification standards of urban agglomeration space[J]. Urban Planning Forum, (4): 1-6.]
- 方创琳. 2011. 中国城市群形成发育的新格局及新趋向[J]. 地理科学, 31(9): 1025-1034. [Fang C L. 2011. New structure and new trend of formation and development of urban agglomerations in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(9): 1025-1034.]
- 黄金川, 刘倩倩, 陈明. 2014. 基于 GIS 的中国城市群发育格局识别研究[J]. 城市规划学刊, (3): 37-44. [Huang J C, Liu Q Q, Chen M. 2014. The identification of urban agglomeration distribution in China based on GIS analysis[J]. Urban Planning Forum, (3): 37-44.]
- 江曼琦. 2013. 对城市群及其相关概念的重新认识[J]. 城市发展研究, 20(5): 30-35. [Jiang M Q. 2013. Reinterpret urban agglomeration and related concepts[J]. Urban Development Studies, 20(5): 30-35.]
- 李震, 顾朝林, 姚士谋. 2006. 当代中国城镇体系地域空间结构类型定量研究[J]. 地理科学, 26(5): 544-550. [Li Z, Gu C L, Yao S M. 2006. A quantitative study on regional spatial structure of urban system in contemporary China[J]. Scientia Geographica Sinica, 26(5): 544-550.]
- 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[J]. Scientia Geographica Sinica, 23(6): 713-720.]
- 潘竞虎, 刘伟圣. 2014. 基于腹地划分的中国城市群空间影响范围识别[J]. 地球科学进展, 29(3): 352-360. [Pan J H, Liu W S. 2014. Identification of spatial influence sphere of urban agglomerations in China based on urban hinterland delimitation[J]. Advances in Earth Science, 29(3): 352-360.]
- 谭兴业, 陈彦光. 2015. 基于邻域扩展量化法的城市边界识别[J]. 地理科学进展, 34(10): 1259-1265. [Tan X Y, Chen Y G. 2015. Urban boundary identification based on neighborhood dilation[J]. Progress in Geography, 34(10): 1259-1265.]
- 王成龙, 刘慧, 张梦天. 2016. 行政边界对城市群城市用地空间扩张的影响: 基于京津冀城市群的实证研究[J]. 地理研究, 35(1): 173-183. [Wang C L, Liu H, Zhang M T. 2016. The influence of administrative boundary on the spatial expansion of urban land: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Geographical Research, 35(1): 173-183.]
- 姚士谋, 陈振光, 朱英明, 等. 2006. 中国城市群[M]. 第3版. 合肥: 中国科学技术大学出版社. [Yao S M, Chen Z G, Zhu Y M, et al. 2006. The urban agglomerations of China [M]. 3rd ed. Hefei, China: Press of University of Science and Technology of China.]
- 张京祥, 邹军, 吴启焰, 等. 2001. 论都市圈地域空间的组织[J]. 城市规划, 25(5): 19-23. [Zhang J X, Zou J, Wu Q Y, et al. 2001. On the spatial organization of the metropolitan area[J]. City Planning Review, 25(5): 19-23.]
- 周一星, 史育龙. 1995. 建立中国城市的实体地域概念[J]. 地理学报, 50(4): 289-301. [Zhou Y X, Shi Y L. 1995. Toward establishing the concept of physical urban area in China[J]. Acta Geographica Sinica, 50(4): 289-301.]
- Ariza-Villaverde A B, Jiménez-Hornero F J, De Ravé E G. 2013. Multifractal analysis of axial maps applied to the study of urban morphology[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 38: 1-10.
- Chen Y G. 2016. Defining urban and rural regions by multifractal spectrums of urbanization[J]. Fractals-Complex Geometry, Patterns, and Scaling in Nature and Society, 24(1): 1650004.
- 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.
- Christaller W. 1933. Die zentralen orte in suddeutschland[M]. Jena, Germany: Fischer.
- Ferreira J A, Condessa B, Castro e Almeida J, et al. 2010. Urban settlements delimitation in low-density areas-An application to the municipality of Tomar (Portugal) [J]. Landscape and Urban Planning, 97(3): 156-167.
- Fragkias M, Seto K C. 2009. Evolving rank-size distributions of intra-metropolitan urban clusters in South China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 33(3): 189-

- 199.
- Frankhauser P. 1998. The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations[J]. *Population*, 10 (1): 205-240.
- Goodchild M F. 2004. The validity and usefulness of laws in geographic information science and geography[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 94(2): 300-303.
- Haag G. 1994. The rank-size distribution of settlements as a dynamic multifractal phenomenon[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 4(4): 519-534.
- Martin D. 1998. Automatic neighbourhood identification from population surfaces[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(2): 107-120.
- Mu L, Wang X. 2006. Population landscape: A geometric approach to studying spatial patterns of the US urban hierarchy[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(6): 649-667.
- Openshaw S, Charlton M, Craft A W, et al. 1988. Investigation of leukaemia clusters by use of a geographical analysis machine[J]. *The Lancet*, 331: 272-273.
- Openshaw S, Charlton M, Wymer C, et al. 1987. A mark 1 geographical analysis machine for the automated analysis of point data sets[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1(4): 335-358.
- Rozenfeld H D, Rybski D, Andrade Jr J S, et al. 2008. Laws of population growth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(48): 18702-18707.
- Rozenfeld H D, Rybski D, Gabaix X, et al. 2011. The area and population of cities: New insights from a different perspective on cities[J]. *American Economic Review*, 101(5): 2205-2225.
- Scott A J. 2001. *Global city-regions: Trends, theory, policy* [M]. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Tannier C, Thomas I. 2013. Defining and characterizing urban boundaries: A fractal analysis of theoretical cities and Belgian cities[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41: 234-248.
- Tannier C, Thomas I, Vuidel G, et al. 2011. A fractal approach to identifying urban boundaries[J]. *Geographical Analysis*, 43(2): 211-227.
- White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling 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.

## Identification of the physical space of urban systems based on fractal analysis

LIU Fei, ZHENG Xinqi\*, HUANG Qing

(School of Information Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Urban system study is an important field of urban geography. Identification of the physical space of urban systems is a precondition and basis for the research on urban systems. Existing research on urban system identification primarily took city as the minimum unit since urban systems are aggregations of towns and cities. They determine whether a city belong to an urban system through the comparison between values of selected indicators and the criteria set by subjective estimates, which unfortunately lacks consideration of spatial morphology. The morphology of the physical space of urban systems has self-similarity, which can be expressed by the feature of fractal. Through the analysis, identification, and extraction of fractals we can describe the spatial objects objectively based on morphology. In this study, by referencing the experience in identifying boundary of individual cities by fractal, we measured the spatial fractal feature of towns of urban systems from the perspective of spatially identifiable minimum unit at different scales, and proposed a method to identify the towns of urban systems. Through the change of identifiable minimum unit we obtained different scales of towns by which we derive their spatial fractal feature. Then, the range of spatial fractal features was identified, and the identification of urban systems that is the spatial distribution of urban systems was achieved by mapping the range to the space. Finally, this study applied the method to the Beijing- Tianjin- Hebei urban system and achieved the identification of the system based on Landsat images in 2016.

**Key words:** urban systems; physical space; space identification; spatial morphology; fractal