

引文格式:徐秋蓉,郑新奇.一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J].测绘学报,2015,44(S0):96-101. DOI:10.11947/j. AGCS.2015.F064.  
XU Qiurong, ZHENG Xinqi. Analysis of Influencing Mechanism of Urban Growth Using Geographical Detector[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(S0):96-101. DOI:10.11947/j. AGCS.2015.F064.

## 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法

徐秋蓉, 郑新奇

中国地质大学(北京)信息工程学院, 北京 100083

### Analysis of Influencing Mechanism of Urban Growth Using Geographical Detector

XU Qiurong, ZHENG Xinqi

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

**Abstract:** Urbanization is a widespread worldwide phenomenon, especially developing countries and regions are experiencing rapid urbanization process. And the phenomenon has led to a massive expansion of urban areas so as to increase the pressure of land resources, and bring a series of environmental and social problems. Quantitative analysis of the drive of urban expansion can make a better urban planning and management. The paper presents a quantitative urban expansion index-urban growth density. The spatial and temporal characteristics and the formation mechanism of urbanization in Beijing between 2000 and 2010 were analyzed systematically, using the methods geography detectors. Results show that Beijing urban extension along the highway linear, and it influences by social economy and geography. The most influential is urban fixed asset investment, and the secondary is regional conditions. These findings can provide for urban expansion simulation and prediction with better improvement.

**Key words:** urban growth; geo-detector; moving-window; effect mechanism

**Foundation support:** International S&T Cooperation Program of China(No. 2015DFA01370)

**摘 要:**城市化是全球范围内普遍存在的重要现象,尤其发展中国家和地区正经历着快速城市化的过程。快速城市化导致了城市地区的大规模扩张,从而加重了土地资源的压力,带来了一系列的环境和社会问题。定量分析城镇扩展的空间驱动力能更好地辅助城市规划与管理。本文提出了一种量化城镇扩展的指数——城镇扩展密度,并通过地理探测器方法分析了 1990—2000 年北京市城镇扩展的时空特征及形成机理。研究表明:北京市城镇扩展沿交通干线呈线性扩张,其城镇扩展受到社会经济和地理的共同影响和制约作用,城镇固定资产投资对城镇扩展影响力最大,区域条件次之。这些发现可以为城镇扩展模拟和预测提供更好的改进空间。

**关键词:**城镇扩展;地理探测器;移动窗口;影响机理

中图分类号:P208

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2015)S0-0096-06

基金项目:国家国际科技合作专项(2015DFA01370)

### 1 引 言

据世界城市化前景报告显示全球 70 亿人口中有一半目前生活在城市,到 2045 年城市人口将超过 60 亿。城市化与总体人口增长将在未来 30 年里使城市人口增加 25 亿,大多数的人口增长将会发生在发展中国家。2014 年 3 月,国家推

出《国家新型城镇化规划(2014—2020)》,规划将“人地和谐”定为目标。而规划提出的划定城市开发边界是我国新型城镇化道路的重要内涵,也是缓解当前各种“城市病”多发的重要途径。

随着城市规模的扩大,城市人口的不断增加,城市空间在原有基础上向四周扩散是城市发展过程中一种必然现象<sup>[1]</sup>。城市扩张的发生不仅体现

在城市人口的不断增长,另一方面体现在城市大量占用农业用地向原有建成区外部飞速扩张<sup>[2]</sup>。

国内外对于城市扩张的研究主要分为4个方面:城市土地利用/土地覆盖变化及其驱动力的影响<sup>[3-6]</sup>;城市扩张形态及增长模式研究<sup>[7-9]</sup>;城市扩张对城市自然资源、社会环境和全球气候变化的影响研究<sup>[10-12]</sup>;城市模型对城市发展的模拟研究<sup>[13-14]</sup>。其中理清土地利用变化与其驱动力之间的关系,是土地利用变化研究的核心,也是建立变化模型和定量预测的基础。已有研究虽对城镇扩展影响机理进行了广泛阐述,但主要围绕单个或少数几个影响因素探讨,尚缺乏综合全面的分析,同时也没有阐明各影响因素的相对重要程度和交互作用特征,因此对城镇扩展影响机理研究仍有待完善。本文提出一种新的城镇扩展的定量表达,通过对前人研究的影响因素进行总结,挑选出可以解释城镇扩展的影响因子并量化,运用地理探测器方法对北京城镇扩展影响机理进行实证分析,旨在回答以下科学问题:①北京市城镇扩展主要受哪些驱动力影响;②不同的影响因素的城镇扩展特征如何,及其对城镇扩展的影响效应大小;③城镇扩展的这些因素对城镇扩展的影响是其独立作用还是交互作用。

## 2 探测方法和数据来源

### 2.1 数据来源与处理

本研究所使用的主要数据有北京2000、2010年两期LandSat TM影像数据,《中国城市统计年鉴》和《北京统计年鉴》的社会经济统计数据,以及北京市各区行政边界、道路交通线矢量图等空间数据。

利用遥感影像数据采用最大似然法进行监督分类,并参考地形图进行空间配准、镶嵌,运用ENVI进行影像解译得到2000和2010年的北京城镇用地分类图。结合北京市年度变更调查数据及第二次土地调查数据进行校正,计算误差矩阵和Kappa系数,2个年份影像解译精度分别为90.51%和88.30%,达到了模拟的精度要求。本文通过GIS的空间分析中的最小欧氏距离(minimum Euclidean distance)算法,生成研究区域中各点到道路、城市中心的“距离渐变图”,地面沉降因子的处理则根据地面沉降等值线生成地面沉降的数字高程模型,人口、GDP等社会经济数据则采用面域加权(weighted area)和kriging表面插值等方法进行空间化。

## 2.2 城镇扩展分析方法

### 2.2.1 移动窗口法

通常城镇扩展的分析基于城镇扩展的速度和强度或者用景观指数进行分析,然后这些指数仅用数值来描述城镇扩展,无法直接利用这些指数刻画城镇扩展空间形态。为在空间上更加直观地描述城市扩展的形态,本文提出一种新的用于分析城市扩展形态的指数——城镇扩展密度,城市扩展密度采用移动窗口法计算获得。

移动窗口法最早用于分析植被分布的规律<sup>[16]</sup>,近年来被用于城市景观格局的研究<sup>[17-18]</sup>。移动窗口法是用一定大小的窗口在研究区域中分析,输出可在GIS环境下运行的栅格图。

### 2.2.2 地理探测器

地理探测器是由中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰空间分析小组开发的分析地理空间影响因素对人类健康影响机理的一种方法<sup>[19]</sup>,近年来,逐渐被运用到景观、社会、土地等方面<sup>[20-21]</sup>。地理探测器包括4部分:风险探测器、因子探测器、生态探测器、交互探测器。其模型为

$$PD = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (1)$$

式中, $N$ 和 $\sigma^2$ 分别表示研究区域内城镇扩展的扩展指数和方差。把研究区的影响因素分为 $L$ 层,用 $i=1,2,\dots,L$ 来表示,则 $N_i$ 和 $\sigma_i^2$ 则表示 $i$ 层的扩展指数和方差。 $PD \in [0,1]$ ,如因素的影响,0则代表两者完全无关。因此, $PD$ 值反映了影响因素解释城镇扩展的程度大小。

(1) 风险探测器用于探索对每一影响因素对城镇扩展的影响大小,通过 $t$ 值检验来比较影响的程度, $t$ 值越大代表该影响因素对城镇扩展的影响力越大。

(2) 因子探测器主要定量探测不同因素对城镇扩展的解释程度,用 $PD$ (power of determinant)来表示, $PD$ 值越大代表影响因素对城镇扩展的解释力越强。

(3) 生态探测器通过比较 $PD$ 值的大小来探索一个影响因素对城镇扩展的控制作用是否比另一个影响因素大。

(4) 交互探测器用于探测影响因素间是独立作用还是交互作用,判断公式为

加强: $PD(C \cap D) > PD(C)$ 或 $PD(D)$

加强,双线性: $PD(C \cap D) > PD(C)$ 和 $PD(D)$

加强,非线性: $PD(C \cap D) > PD(C) + PD(D)$

减弱:  $PD(C \cap D) < PD(C) + PD(D)$

减弱, 单线性:  $PD(C \cap D) < PD(C)$  或  $PD(D)$

减弱, 非线性:  $PD(C \cap D) < PD(C)$  和  $PD(D)$

独立:  $PD(C \cap D) = PD(C) + PD(D)$

式中,  $\cap$  是在 ArcGIS 中通过对 C 和 D 两个影响因素的图层进行叠加实现。

### 3 城镇扩展空间分异成因分析

#### 3.1 研究区概况

北京位于  $115.7^{\circ}\text{E}$ — $117.4^{\circ}\text{E}$ ,  $39.4^{\circ}\text{N}$ — $41.6^{\circ}\text{N}$ , 中心位于  $116^{\circ}25'29''\text{E}$ ,  $39^{\circ}54'20''\text{N}$ , 市域总面积为  $16\,410.54\text{ km}^2$ 。北京地区地貌复杂, 山地、丘陵、平原、台地皆有, 气候、土壤、水文也各有差别。北京市近年来人口、经济高速增长, 其城镇扩展在人口经济迅猛发展的态势下不断增长, 在中国城市中具有典型性, 有重要的研究价值。

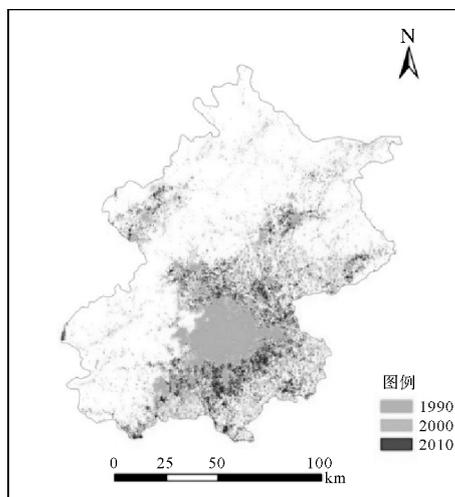


图 1 1990—2010 年北京历史城镇扩张

Fig. 1 1990—2010 Beijing urban growth

#### 3.2 北京市城镇扩展演变特征

由于已有的城市景观格局指数无法描述空间形态, 为了在空间上更加直观地描述城市扩展分布格局, 本文提出城市扩展密度指数用于分析城市扩展的空间分异。城镇扩展密度指数采用移动窗口法计算获得, 其值等于移动窗口中该时期内城镇建设用地扩展量与窗口内全部像元数之比。本文在 Fragstats 软件支持下, 选用  $5000\text{ m}$  大小的移动窗口在整个研究区内从左上角开始移动, 计算窗口内每一个城镇建设用地扩展值, 并将该值赋给该窗口中心栅格, 最后形成景观指标栅格图。

(1) 从 2010 年北京市城镇空间分布格局来看, 低城镇化率的区域集中分布在北京市生态涵养发展区, 大部分区域城镇化率在  $10\%$  左右。北京市城六区城镇化率较高, 其中功能核心区东城区和西城区最高为  $100\%$ 。其他地区范围也有所扩大, 大部分地区的城镇化率为  $20\%$ — $30\%$ 。可以看出北京市城镇化的中心性明显, 而郊县存在发展动力不足, 城镇化率明显偏低的问题。

(2) 从 2000—2010 年动态变化视角来看, 北京地区的城镇用地持续不断地增加, 导致建设用地供需矛盾日益尖锐, 耕地保护和生态建设的压力逐年加大。北京市东城区、西城区已经达到饱和状态, 无法再进行扩展; 朝阳区、丰台区、石景山区、海淀区表现出快速城镇用地扩张的状态; 通州区和大兴区城镇用地较 2000 年有较大提高, 这是由于 2000 年后根据《北京市总体规划 (2004—2020 年)》, 北京按照“两轴—两带—多中心”的城市空间结构布局方式来发展周边卫星城镇。主要可以概括为以中心大区和外围次级中心之间沿线状交通干线的放射性城市化过程。

#### 3.3 北京市城镇扩展影响机理分析

北京市城镇扩展受到自然、经济、社会等多种因素的综合影响。本文通过梳理文献并结合北京城镇扩展的实际, 遴选出国民生产总值 (GDP)、城镇固定资产投资、第二产业产值、第三产业产值、非农人口密度、城镇化水平 (城镇用地占所有土地比例)、离主干道距离、到城市中心距离、海拔高度、坡向共 10 项指标 (图 2), 分别对城镇扩展形成机理进行探测研究。需要说明的是, 北京市东城区和西城区已经无法再向外扩展, 所以本文在进行分析时排除了东城区和西城区数据。本研究依据地理探测器方法, 利用式 (1) 计算出各影响因素对城镇扩展密度的影响力, 以期全面揭示北京市城镇扩展特征与影响机理。

依据模型运算结果可知:

(1) 通过风险探测识别不同影响因素的城镇扩展变化的差异性。结果显示, 本文遴选的影响因素与城镇扩展密度具有相对一致性, 并通过  $0.05$  水平显著性检验。

(2) 因子探测主要测度各影响因素对城镇扩展的影响力大小, 图 3 为各影响因素的影响力大小, 按对城镇扩展影响强弱排序依次为: 城镇固定资产投资 > 离城市中心距离 > 城镇化水平 > 非农人口密度 > 海拔高度 > 离主干道距离 > GDP =

第二产业产值>第三产业产值>坡向。

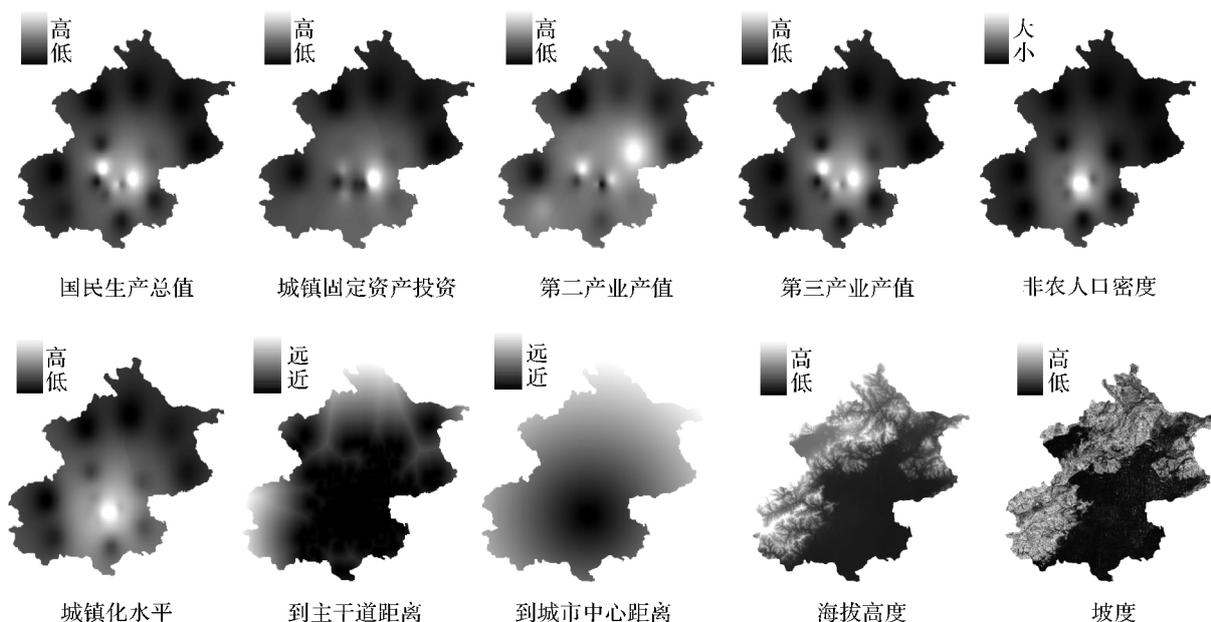


图 2 北京市城市扩展影响因素空间分析图

Fig. 2 Spatial analysis of urban growth factors in Beijing

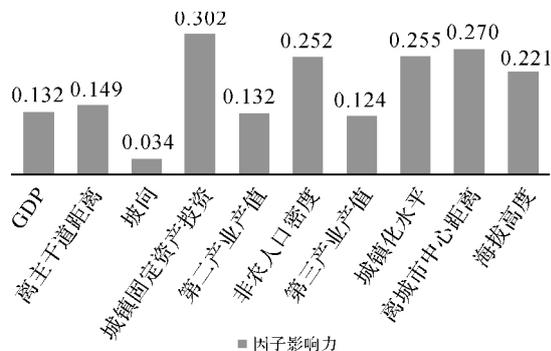


图 3 城镇扩展影响因素的因子影响力

Fig. 3 Power of determinant of urban growth factors

其中,城镇固定资产投资的因子影响最大(0.302),城镇固定资产投资反映了城市经济发展能力,说明区域的经济对城镇扩展的控制作用最为强烈。这是因为城镇固定资产投资意味着一个地区厂房、设备等生产要素的增加和交通、通信、房地产等基础设施的发展和改善,表现在空间上便是城镇地区的不断向外扩展。区位条件对城镇用地扩张有较大的影响,随着城市物质空间扩张,城边村变为城中村或者拆迁征地可能加强,致使在离中心城区距离较近、交通条件较好的主干道路旁建成区激增,离城市中心距离的地

理探测影响力为 0.270,同时城镇地区空间分布表现出一定交通指向性,离主干交通线距离的地理探测影响力为 0.149。除城镇固定外其他经济因素对城镇用地变化的影响作用不显著,均在 0.124~0.132 之间;坡向对北京城镇扩展的影响力明显偏弱,不足 0.01。

(3) 生态探测着重比较不同影响因素的影响力大小相对重要性是否具有显著差异。结果显示,城镇固定资产投资、离城市中心距离和离主干道距离对城镇扩展的影响力要显著强于其他影响因素,而其他因素之间的因子解释力差异在统计上并不显著。再次表明,城镇的发展能力和区位条件对城镇扩展变化有明显的控制作用。

(4) 交互探测主要分析影响因素对城镇扩展是否存在交互作用。结果发现,社会和地理影响因子对城镇扩展的影响均存在交互作用,任意两个影响因素交互后因子影响力均表现为双线性加强或非线性加强。其中,城镇固定资产投资和第二产业产值交互后因子影响力最强,达到 0.596。这说明,在任意两个因素的控制作用下,城镇扩展变化的内部差异会减小,交互后因子影响力均明显增强,同时也说明城镇扩展是社会、经济、地理共同作用的结果。

## 4 结 论

城镇扩展的驱动力研究是城镇扩展研究的重要内容之一,探究城镇扩展形成机理有助于增加对城市扩展模拟的精度,一般研究无法从空间尺度上分析自然条件和社会经济因素的城镇扩展的影响。本文通过移动窗口法量化城镇扩展,借助地理探测器方法较好地解释了城镇扩展的影响机理,为开展城镇扩张相关研究提供了新的视角和方法,也为规划者提供了有效的支撑建议。本文得出以下结论:

(1) 北京城市空间拓展在各个方位处于不均衡状态,主要表现在西北方位城市发展的不可持续性,未来需要严格控制建设用地,优化建设用地布局;其他 3 个方位总体呈现建设用地密度从中心向外递减趋势,反映出还有较为宽裕的拓展空间,但仍需注意保证城市空间发展的可持续性。

(2) 在时间序列上,北京市城镇空间呈持续扩张的状态,中心地区和外围中心之间沿交通干线呈线性扩张,但郊区范围的城镇扩展不太显著。城市“摊大饼”扩张模式导致了过于松散的城市结构,造成空间效率的降低,影响了城市健康发展。

(3) 北京城镇扩展主要由 6 个影响因素构成,按因子影响力强弱排序依次为城镇固定资产投资>离城市中心距离>城镇化水平>非农人口密度>海拔高度>离主干道距离。城镇固定资产投资对城镇扩展变化影响力最大,区域交通基础设施将在很大程度上拉动建设用地定向增长。

(4) 城镇扩展与其影响因素具有相对一致性,且各个因素交互后因子影响力会明显加强。表明城镇扩展的影响因素之间存在典型的“木桶效应”现象<sup>[22]</sup>,即任意因素的改变,均可能影响城镇扩展的变化。因此城镇扩展受到社会经济和地理的共同影响和制约作用。

本文利用地理探测器方法对城镇扩展的空间特征与影响机理进行了解释,但是本研究难以把所有要素考虑详尽,只选取了当前研究比较关注的 10 个影响因素。后期研究还可以从以下方面进行深化:后期可从不同类别的影响因素进行出发进一步探讨城镇扩展的影响机理;影响机理的探测是为了更好地模拟和分析城镇扩展,可以从本文所得出的影响力较大的因素出发对城市扩展进行模拟和预测。

## 参考文献:

- [1] 姜文亮. 基于 GIS 和空间 Logistic 模型的城市扩展预测——以深圳市龙岗区为例[J]. 经济地理, 2007, 27(5): 800-804. JIANG Wenliang. Urban Spatial Forecast Based on GIS and Spatial Logistic Model-A Case Study for Longgang, Shenzhen [J]. Economic Geography, 2007, 27(5): 800-804.
- [2] LIU Xiaoping, MA Lei, LI Xia, et al. Simulating Urban Growth by Integrating Landscape Expansion Index (LEI) and Cellular Automata[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013, 28(1): 148-163.
- [3] 张勃,毛彦成,柳景峰. 黑河中游土地利用/覆盖变化驱动力的定量分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 726-730. ZHANG Bo, MAO Yancheng, LIU Jingfeng. Analysis Driving Forces of LUCC in Heihe Middle Reaches[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(5): 726-730.
- [4] 王丹桂,胡克,马鹏飞,等. 双台河口自然保护区 30 年间土地利用/覆被变化及其驱动力分析[J]. 海洋学研究, 2015, 33(1): 51-61. WANG Dangui, HU Ke, MA Pengfei, et al. Land Use and Land Cover Change and Their Driving Forces in The Nature Reserve of Shuangtai River Estuary in The Past 30 Years[J]. Journal of Marine Sciences, 2015, 33(1): 51-61.
- [5] CAMPBELL D J, LUSCH D P, SMUCKER T A, et al. Multiple Methods in the Study of Driving Forces of Land Use and Land Cover Change: A Case Study of SE Kajiado District, Kenya[J]. Human Ecology, 2005, 33(6): 763-794.
- [6] 黄照强,冯学智. 基于 PETRI 网的土地变更时空过程建模[J]. 测绘学报, 2005, 34(3): 239-245. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2005.03.010. HUANG Zhaoqiang, FENG Xuezhi. A Study of Spatio-temporal Process Modeling Based on Petri Net for Land Alteration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(3): 239-245. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2005.03.010.
- [7] RIMAL B. Urban Growth and Land Use/Land Cover Change of Pokhara Sub-metropolitan City, Nepal [J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2011, 26(2): 118-129.
- [8] 曾永年,张瓊瓊,张鸿辉,等. 城市扩展强度及其地表热特性遥感定量分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 65-70, 94. ZENG Yongnian, ZHANG Yingying, ZHANG Honghui, et al. A Quantitative Analysis of Urban Growth and Associated Thermal Characteristics Using Remote Sensing Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 65-70, 94.
- [9] KESGIN B, ERDOGAN N, ERSOY E, et al. Analysing the Spatial Urban Growth Pattern by Using Logistic Regression in Didim District[J]. Journal of Environmental Protection & Ecology, 2014, 15(4): 1866-1876.
- [10] BART I L. Urban Sprawl and Climate Change: A Statistical

- Exploration of Cause and Effect, With Policy Options for the EU[J]. Land Use Policy, 2010, 27(2): 283-292.
- [11] 张兆明,何国金.北京市TM图像城市扩张与热环境演变分析[J].地球信息科学,2007,19(5):83-88.  
ZHANG Zhaoming, HE Guojin. A Study on the Urban Growth and Thermal Environmental Changes of Beijing City Based on TM Imagery Data [J]. Geo-information Science, 2007, 19(5): 83-88.
- [12] KAHN M E. Green Cities: Urban Growth And The Environment [M]. Washington DC: The Brookings Institute, 2006.
- [13] DAHAL K R, Chow T E. An Agent-integrated Irregular Automata Model of Urban Land-use Dynamics [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(11): 2281-2303.
- [14] TAYYEBI A, PERRY P C, TAYYEBI A H. Predicting the Expansion of an Urban Boundary Using Spatial Logistic Regression and Hybrid Raster-vector Routines with Remote Sensing and GIS[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(4): 639-659.
- [15] 徐颖,吕斌.基于GIS与ANN的土地转化模型在城市空间扩展研究中的应用——以北京市为例[J].北京大学学报:自然科学版,2008,44(2):262-270.  
XU Ying, LÜ Bin. Application of Land Transformation Model Based on GIS and ANN: A Case Study of Beijing, China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(2): 262-270.
- [16] WHITTAKER R H. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California[J]. Ecological Monographs, 1960, 30(3): 279-338.
- [17] MCDONNELL M J, PICKETT S T A. Ecosystem Structure and Function along Urban-rural Gradients: an Unexploited Opportunity for Ecology [J]. Ecology, 1990, 71(4): 1232-1237.
- [18] HUANG Wei, ZENG Yongnian, LI Songnian. An Analysis of Urban Expansion and its Associated Thermal Characteristics Using Landsat Imagery[J]. Geocarto International, 2015, 30(1): 93-103.
- [19] WANG Jinfeng, HU Yi. Environmental Health Risk Detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 33: 114-115.
- [20] LI Xuewen, XIE Yunfeng, WANG Jinfeng, et al. Influence of Planting Patterns on Fluoroquinolone Residues in the Soil of an Intensive Vegetable Cultivation Area in Northern China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 63-69.
- [21] REN Yin, DENG Luying, ZUO Shudi, et al. Geographical Modeling of Spatial Interaction between Human Activity and Forest Connectivity in an Urban Landscape of Southeast China[J]. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1741-1758.
- [22] 湛东升,张文忠,余建辉,等.基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J].地理科学进展,2015,34(8):966-975.  
ZHAN Dongsheng, ZHANG Wenzhong, YU Jianhui, et al. Analysis of Influencing Mechanism of Residents' Livability Satisfaction in Beijing Using Geographical Detector[J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 966-975.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期:2015-11-15

修回日期:2015-12-10

第一作者简介:徐秋蓉(1989—),女,博士,主要研究领域为GIS应用研究,城市模型。

First author: XU Qiurong (1989—), female, PhD, majors in GIS application, urban models.

E-mail: xuqiurong@cugb.edu.cn

通信作者:郑新奇

Corresponding author: ZHENG Xinqi

E-mail: zhengxq@cugb.edu.cn

(上接第95页)

- [23] 郭建明.分形理论在遥感影像空间尺度转换中的应用研究[D].西安:西北大学,2008.  
GUO Jianming. An analysis on Scale Transformation in Remote Sensing-Based on Fractal Theory[D]. Xi'an: Xibei University, 2008.
- [24] HAY G J. Multiscale Object-Specific Analysis: An Integrated Hierarchical Approach for Landscape Ecology [D]. Montréal: Université de Montréal, 2002.

(责任编辑:宋启凡)

修回日期:2015-12-10

第一作者简介:冯桂香(1990—),女,硕士生,主要从事遥感图像处理及GIS应用研究。

First author: FENG Guixiang (1990—), female, post-graduate, majors in remote sensing image processing and GIS applications.

E-mail: Fenggxgis@126.com

通信作者:明冬萍

Corresponding author: MING Dongping

E-mail: mingdp@cugb.edu.cn

收稿日期:2015-11-15