

人口条件约束下的城市元胞自动机模型研究

张 岩 陈云浩 李 京

(北京师范大学资源学院, 资源技术与工程研究所, 北京 100875)

摘 要 城市化过程中人口的流动和转移, 改变了不同地域上的人口分布, 同时对原有用地需求和用地格局产生影响, 使得土地利用方式发生相应的变化, 因此探讨人口变动是研究非城市用地向城市用地变迁的一个重要方面。近几十年来, 人们尝试利用元胞自动机模型来模拟, 预测城市用地的扩张, 但是标准的元胞自动机仅通过初始状态和既定不变的演化规则很难模拟出日渐复杂的城市系统, 本文尝试将人口分布和就业结构的变化作为一种限制因素来控制元胞自动机的演化, 并以北京市城市建成区的扩展为例, 通过为不同的区域赋予不同的限制值从而更加准确地模拟城市化过程中城市用地的扩张。

关键词 城市化 人口密度 就业结构 元胞自动机模型

中图法分类号: P237.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)08-1483-06

Study on the Dynamic City Model Based on Cellular Automata and Population Condition

ZHANG Yan, CHEN Yun-hao, LI Jing

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract The flow and shift of the population in the processes of urbanization have changed its distribution and also affected the demand and patterns of the land resource. Hence it is very important for us to pay more attention to the population distribution when we study the change of land use from non-urbanized to urbanized. In recent years, people attempt to simulate and predict all of these changes by cellular automata(CA). But the cities are very complex systems, and there are many factors influence its development, especially human behaviors, so only use the cellular automaton with its non-change evolvement regulations to model all of these is not enough. Here we make the population distribution and employments structure as a restriction of CA, and simulate the expansion of Beijing. We gave different districts different indices, and then they can expand in different rates. The simulation results match the actual situation very well indicates that the model is appropriate.

Keywords urbanization, population density, employment structures, cellular automata model

1 引 言

城市化既是人口聚集的过程, 又是地域功能改变的过程, 它在时间和空间上的发展变化是人口变动直接或间接作用的结果^[1-3]。人口的流动和转移会对原有用地需求和用地格局产生影响, 使得土地利用方式发生相应的变化, 非城市用地

不断地转变为城市用地。20世纪六、七十年代以来, 人们尝试利用元胞自动机模型(cellular automata, CA)来模拟、预测城市用地的扩张^[4-7], 元胞自动机是一种基于微观个体行为的离散动力学模型, 在地理学研究中, 尤其是在进行城市增长和土地利用演化模拟方面具有天然的优势。但是, 随着城市化进程的日益推进, 越来越多的因素影响着城市的发展, 尤其是人类活动对城市景观

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20030027014);三维信息获取与应用教育部重点实验室基金项目;测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目(WKL(03)0102)

收稿日期:2007-03-28; **改回日期:**2007-05-09

第一作者简介:张岩(1982~), 女。北京师范大学资源学院在读硕士研究生。主要研究城市化、城市扩张及动态模拟。E-mail: tiffany@ires.cn

产生了决定性的作用,其复杂性和多变性也使得标准的元胞自动机在模拟城市扩展时遇到了前所未有的困难^[8],这种仅由初始状态和演化规则决定的模拟结果无疑会与真实情况产生较大的偏差,因此人们开始尝试将 CA 模型与其他城市发展的决定性因素相结合来进行城市扩展的模拟,黎等人^[9]在元胞自动机中加入了一些约束性条件来控制模拟过程,进行城市规划,并且提出使用主成分分析法^[7]消除模拟过程中各种空间变量的相关性,使模拟结果更合理;何等人^[7]利用面向地理实体的思想对标准的元胞自动机进行扩展;何等人^[6]将 Tietenberg 资源分配模型与 CA 结合使用,先进行城市用地数量上的最优分配,再利用 CA 模型完成位置上的最佳分配。

考虑到在城市发展过程中人口的变化是一个对土地利用方式产生复合影响的过程,探讨人口变动是研究非城市用地向城市用地变迁的一个重要方面^[10-13],因此,本文在利用元胞自动机的概念进行

北京城市演化模拟时,将人口的变动以及就业结构的变化作为一种限制因素来控制城市用地的扩张,以求更加有效地进行模拟。

2 研究方法

2.1 研究区和数据

北京的地域结构习惯上把东城、西城、崇文和宣武 4 个区作为城市中心区,把海淀、朝阳、石景山和丰台作为近郊区,市域其余的 10 个区县作为远郊区。本文的研究区主要包括北京的市区,近郊以及远郊的部分区县,如图 1 所示,具体范围为 $116^{\circ}4'16.28''E \sim 116^{\circ}41'38.39''E$, $39^{\circ}41'55.13''N \sim 40^{\circ}10'39.9''N$,总面积 $2\,838.758\text{km}^2$,研究区内基本包括了北京的城市核心区、城乡过渡区,以及远郊区县,地形上由西北到东南呈现出丘陵—山前洪积扇—平原区的有序排列,人口分布从内向外具有明显的梯度变化,体现了人类活动由强到弱的渐变。

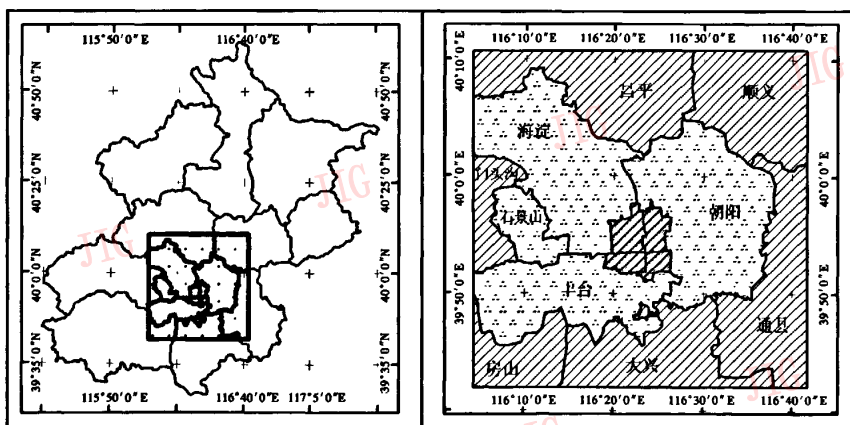


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

采用的遥感数据主要包括北京的 DEM 数据(空间分辨率为 30m),以及季相一致,质量较好的北京 Landsat TM 影像,它们分别是 1991 年、1997 年、2001 年和 2004 年 5 月份的影像,这个时期地物光谱信息差别比较大,有利于进行目视解译和分类预处理,根据模型输入数据的要求,将影像按照 Anderson I 分类体系^[14]进行了较高精度的分类,主要分为城市用地、农田、森林、水体、裸地和山脉 6 大类。另外,研究中所用到的人口统计数据主要来源于北京市 1996 年到 2002 年的统计年鉴。

2.2 人口分析

20 世纪 90 年代以来,北京城市发生了巨大的变化,发展的动力日趋多元化,空间结构日益复杂,突出表现在城市建成区面积不断扩大的同时,包括人口在内的各类要素也在不断地进行着内部的重组和分配。1996 年到 2002 年间,北京市各圈层,各区县人口都发生了较大的变动,总体上以市区人口减少,近郊区人口大幅度增加为主,详细数据如表 1 所示。

北京市各圈层从内而外人口密度呈现出比较明显的梯度变化,市中心 4 个区最大,向外依次递减,

表 1 北京市各区县 1996~2002 年人口密度
Tab.1 The population density of Beijing between 1996 to 2002

单位:人/km²

	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	年均增加量
东城	25 964	25 940	26 000	25 609	25 452	25 328	25 492	-52.40
西城	26 481	26 586	26 803	26 387	26 242	26 048	26 215	-44.30
崇文	27 169	27 090	27 071	26 449	26 242	25 969	25 948	-203.50
宣武	33 128	34 441	32 994	32 620	33 949	33 980	32 683	-74.20
朝阳	2 939	2 984	3 032	3 110	3 160	3 232	3 297	59.70
丰台	2 485	2 519	2 556	2 612	2 661	2 704	2 748	43.80
石景山	3 692	3 732	3 770	3 842	3 867	3 919	3 963	45.20
海淀	3 355	3 434	3 505	3 582	3 686	3 795	3 917	93.70
门头沟	182	181	179	176	177	176	176	-1.00
房山	400	400	399	399	399	398	400	0.00
通县	687	687	686	685	686	687	693	1.00
顺义	546	546	547	548	548	548	551	0.80
昌平	292	292	294	293	297	299	305	2.20
大兴	505	506	508	515	518	521	528	4.30

远郊区最小,相差都在一个数量级左右。市区中宣武区人口密度最大,其他 3 个区县分布比较平均;近郊区西北部的石景山和海淀区比东南部的朝阳和丰台人口密度大,这里是北京的城乡结合部,各区县发展条件有所不同,发展不太均等;而远郊区的人口密度则是东南部高过西北部,北京西北部大都是山区,受地形的影响人口密度较小。就人口密度的变化而言,1996 年到 2002 年间,位于市中心的 4 个区人口密度均有大幅度的减少,其中以崇文区减少的最多(年均 204 人/km²);而近郊区的 4 个区县则有相当幅度的上升,以海淀区增加的最多(年均 94 人/km²);研究区内远郊区的 6 个区县中大兴和昌平人口密度增加的最多,门头沟略有减少,其他区县变化不大。

城市化过程并不仅仅是人口增加,人口密度增大的过程,同时也伴随着产业、就业结构的变化,这主要体现在非农业人口的变化上,由于市中心 4 个区在研究中被认为是完全城市化,所以只考虑近郊区及远郊区的情况,表 2 给出了近郊及远郊 10 个区县第二、三产业从业人数的变化。

1996 年到 2001 年间,北京的近郊区及远郊区第二、三产业从业人数不断增加,非农产业发展很快,经济活动的主题呈多元化倾向,社会经济活动的分工日益复杂,从表 2 中可以看出,近郊区的增长远远大于远郊区,其中又以朝阳区最为明显,6 年中其第二产业从业人数增长了 1.5 倍,第三产业从业人数几乎增加了 1 倍,而远郊区发展比较缓慢,并且存

表 2 1996~2001 年各区县第二、三产业从业人数变化情况
Tab.2 Change of the population of the secondary industry and the tertiary industry between 1996 and 2001

单位:人

地区	第二产业从业人数		第三产业从业人数	
	1996~2001 年 增长人数	增长比例 (%)	1996~2001 年 增长人数	增长比例 (%)
朝阳	52 620	156.23	86 983	95.18
丰台	15 092	70.18	32 390	62.56
石景山	4 069	46.65	13 699	50.54
海淀	54 982	99.38	87 354	44.04
门头沟	-6 962	-24.95	5 010	9.96
房山	30 006	30.10	20 737	18.93
通州	59	0.08	-6 994	-7.92
顺义	13 718	14.53	7 051	6.88
昌平	347	0.57	13 583	18.73
大兴	42 669	87.09	41 214	72.61

在着区域不平衡问题,南部的房山,大兴发展很快,北部的昌平和顺义次之,而门头沟和通县发展比较缓慢,第二、三产业从业人数增长比例较小,甚至还出现了负增长。

2.3 方法原理

这里用到的元胞自动机模型是 SLEUTH3.0Beta^[15],它包含了 6 个输入数据层(土地利用图层、现有城市化图层、交通层、限制因素层、

坡度层以及山体阴影图层)。模型中考虑到了地形和交通线路对城市建成区扩展的影响,其中坡度会限制城市用地的扩张而交通线路则会对城市的发展起到引导和推动作用。其中,输入数据中的限制因素层可以设置模拟过程中任意一点被城市化的难易程度,较大的数值对应着较大的城市化难度,同时,该数据层也给模型的扩展留下了很好的接口。本文正是利用这个限制因素层将人口的分布与变化作为一种对城市扩展起约束作用的输入数据来限制城市的发展,这在一定程度上克服了元胞自动机模型在各个方向上都均等演化发展的不足。具体的模型扩展如图 2 所示。

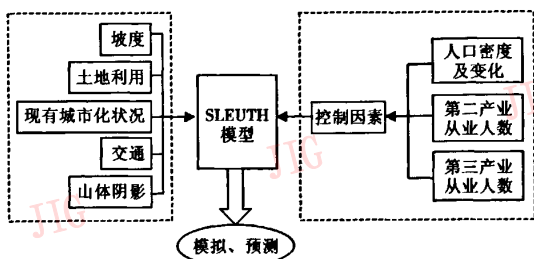


图 2 模型处理流程

Fig. 2 Chart of the model

通过分析北京近 6 年来各个区县的人口分布、变迁以及第二、三产业从业人数的变化,可以得出人口城市化水平及相应的城市化发展速度。这样就可以在限制因素层中为每个区县设置一个限制值,发展较快的区县对应着较小的限制值,相反地,发展较慢的区县对应着较大的限制值,从而实现了人口分析结果与 SLEUTH 模型的松散耦合,控制了模拟过程中各区县城市用地的扩张。

在限制因素层的设置中,首先将研究区内不能城市化的点(如公园,水库等)设置为最大值 100;其次,根据遥感影像的分类结果,市中心 4 个区被认为完全城市化,在模型中将其设置为 0;在近郊区的分析中,人口密度以及第二、三产业从业人数的增长比例都远远大于远郊区,这里是北京的城乡过渡区,在北京的城市化进程进入到郊区化阶段时,这里就成为了北京城市建成区扩展的最主要地区,因此,尽管这 4 个区县在人口密度及就业结构的变化上存在着一些差别,但其发展速度都远远高于远郊区,模拟过程中将这 4 个区县取同样的限制值 10;最后,根据人口分析结果,远郊区 6 个区县的发展存在着较大的差别,房山、大兴、顺义、昌平 4 个区县的发展速度

相当,通县次之,门头沟最慢,因此限制因素层按照这 3 个层次依次将它们的限制值设为 15,20,25。

3 结果分析

设置了限制因素层并且利用输入影像对模型进行校正之后,以 1991 年的数据作为模拟的初始点,1997 年,2001 年和 2004 年的数据作为参考点对北京市近十几年来发展进行了模拟,恢复重建了城市发展的全过程,这有助于我们了解城市发展的自组织特性,从而更加深入地研究城市化的机制和成因。SLEUTH 模型采用一种改进的 Lee-Sallee 指数来评价模拟结果与真实数据的空间匹配程度, Lee-Sallee 的值由下式确定:

$$S = (A \cap B) / (A \cup B) \quad (1)$$

其中, A 为模拟结果, B 为真实数据,这样得到的最优空间匹配度是 1.0。由于统计结果中模拟的城市点总个数与真实数据的最小平方回归都达到了 0.99 以上,所以可以认为两者基本相等,那么根据 Lee-Sallee 值就可以得出模拟结果的精度:

$$F = 2S / (1 + S) \quad (2)$$

这里的 F 既要求数量上的匹配又包括空间位置的符合。模拟过程中随着时间跨度的加大,模拟精度也会略有降低,1997 年,2001 年以及 2004 年的 Lee-Sallee 值分别为 0.63, 0.62, 0.61, 那么根据式(2)可知这 3 个年份的模拟精度分别为 77.3%, 76.5% 和 75.8%, 可见,最低精度仍然可达 75% 以上。

结果中 1991 年到 1997 年间年平均城市增长率为 0.75%, 1997 年到 2001 年为 1%, 而 2001 年到 2004 年增加到 1.2%, 具有逐年增长的势头,这几年来中北京城市扩展日渐加快,建成区面积不断增大。

城市化单元不断增加,市区面积不断增大,城市扩展的中心点位置也随之发生着变化,根据图 3 可知,1997 年到 2004 年间研究区内城市中心点的位置有向西南方向偏移的趋势(图中坐标为像元值)。另外,就城市扩展方式而言,模拟过程中边缘增长方式占据着绝对优势,对比 3 个参考年份,自发增长和生成新扩展中心的生长模式产生的像元个数很少,几乎可以忽略不计,而道路影响的增长稍多于前两种,但是相对于边缘增长方式则也显得微乎其微。由此可见,北京城市增长方式比较单一,以边缘增长为主,不断地从现有的城市区向外扩张。详细的模拟结果如图 4 所示。

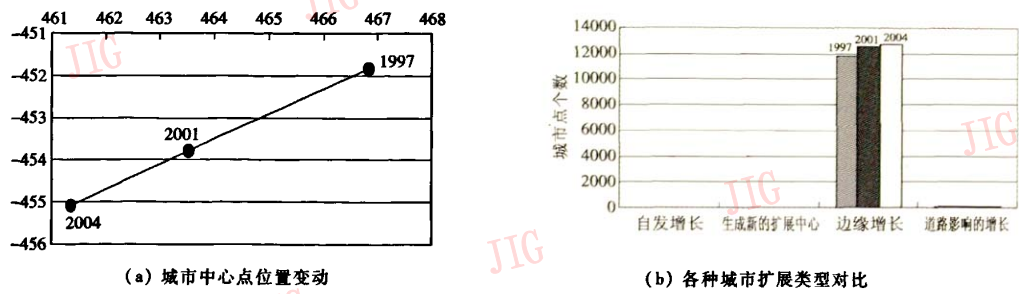


图 3 统计结果
Fig. 3 Statistical results

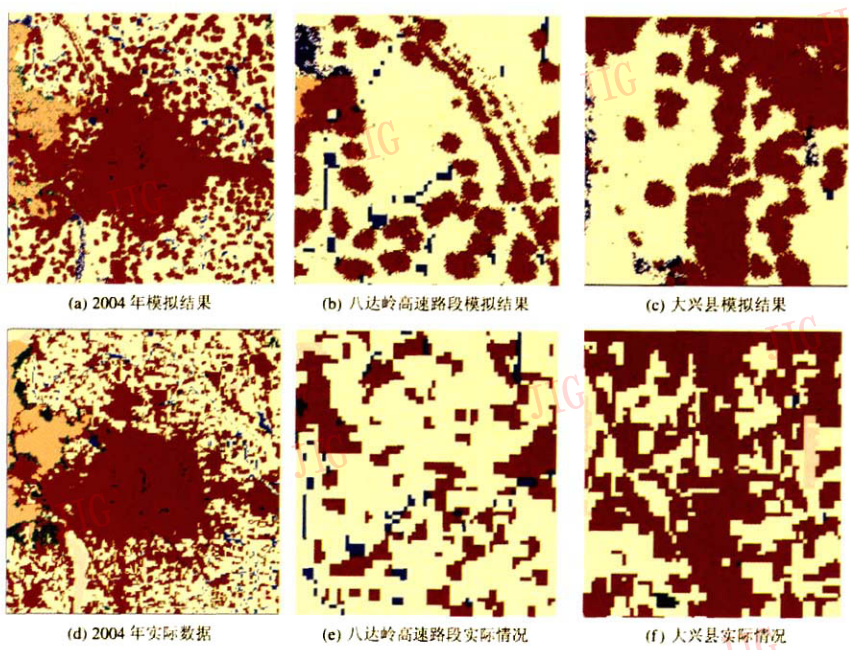


图 4 模拟结果与实际数据的对比
Fig. 4 Comparison between simulation results and the actual situation

以 2004 年为例图中给出了模拟结果与真实数据的对比,总体上模拟精度能够达到 75% 以上,2004 年的模拟结果与实际数据基本符合,但同时也有着一些不足,首先,在八达岭高速路段模拟结果中城市沿道路扩张过多,与实际情况相比出现了较大的偏差,这与模型中道路系数的设置有关,因为每个系数都是面向整个研究区的而并非适合于任一个小的区域,所以会出现局部地方模拟结果偏差较大的情况。另外,图中大兴县模拟不足,模拟结果中城市的发展要慢于实际情况,这一方面是由于城市扩展的系数过小导致了模拟不充分,另一方面则是因

为这一区域的限制因素值过大制约了城市的扩张。最后,实际数据中的城市板块比模拟结果中细碎,模拟过程中边缘增长的比重很大,使得城市发展更侧重于从已有的城市点向外扩张,而同时自发增长和生成新传播中心的生长却模拟不足。

4 结 论

将人口分析结果作为控制指标与元胞自动机进行松散的耦合,对北京城市的扩展进行了模拟。精度达到 75% 以上,使得在数据不足的情况下仍然能

够重建北京城市的发展过程,有助于更好地研究北京城市化进程、城市发展的自组织特性及其驱动力。但同时模型也存在着一些不足之处,首先,利用统计分析数据所确定的各个区县的限制值具有很大的主观性,限制值的设置是通过多次实验取最优值得到的。另外,研究区并没有完全包含海淀区以及 6 个远郊区县,而本文在分析统计数据时考虑的是整个区县的情况,这样就有可能使得分析的结果不能很好地体现研究区内城市的发展状况,导致模拟结果产生偏差。最后,随着我国城市化的进一步推进,城市的发展越来越多地受到经济、文化、政策等多方面的影响,具有很大的突变性,这也给模拟工作带来了一定的困难。

20 世纪 90 年代以来,北京的城市发展经历了翻天覆地的变化,出现了以城市化为主要特征的大规模土地利用/土地覆盖的变化,如何建立合适的城市模型来模拟,分析这些复杂的城市动态行为已经成为我们研究城市问题的首要任务,而元胞自动机模型在城市扩展模拟方面仍然具有明显的优势,它的这种离散化的“自下而上”的微观个体演化概念代表了当前城市动态模型的最新发展方向,因此建立基于 CA 的城市空间动态模型应该引起研究者的重视。

参考文献 (References)

- Huang Rong-qing. Population redistribution in the context of urbanization in Beijing since 1980s[J]. Population Research, 2005, 29(5): 19~26. [黄荣清. 1980 年代以来北京市城市化过程中人口分布的变化[J]. 人口研究, 2005, 29(5): 19~26.]
- Li Hui. Urbanization in China[J]. Population Journal, 2003, 6(142): 51~58. [李辉. 中国人口城市化综述[J]. 人口学刊, 2003, 6(142): 51~58.]
- Feng Jian, Zhou Yi-xing. The latest development in demographic spatial distribution in Beijing in the 1990s[J]. City Planning, 2003, 27(5): 55~63. [冯健, 周一星. 1990 年代北京市人口空间分布的最新变化[J]. 城市规划, 2003, 27(5): 55~63.]
- Wu Fu-long. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules[J]. Geographical Information Science, 1998, 12(1): 63~82.
- Zhang Xian-feng, Cui Wei-hong. Spatio-temporal analysis and modeling based on the integration of GIS and CA model[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(12): 1012~1018. [张显峰, 崔伟宏. 基于 GIS 和 CA 模型的时空建模方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(12): 1012~1018.]
- He Chun-yang, Chen Jin, Shi Pei-jun, et al. Study on the spatial dynamic city model based on CA (cellular automata) model[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2): 188~195. [何春阳, 陈晋, 史培军等. 基于 CA 的城市空间动态模型研究[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 188~195.]
- Li Xia, Ye Jia-an. Application of principal component analysis and cellular automata in spatial policy and urban simulation[J]. Science in China(Series D), 2001, 31(8): 683~690. [黎夏, 叶嘉安. 主成分分析与 Cellular Automata 在空间决策与城市模拟中的应用[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(8): 683~690.]
- He Su-fang, Luo Ping, Huang Yao-li, et al. The study of shortcoming and extension of standard cellular automata[J]. Journal of Foshan University(Natural Science Edition), 2002, 20(2): 52~56. [何素芳, 罗平, 黄耀丽等. 标准元胞自动机模型的缺陷及拓展研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2002, 20(2): 52~56.]
- Li Xia, Ye Jia-an. Constrained cellular automata for modeling sustainable urban forms[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(4): 289~298. [黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟[J]. 地理学报, 1999, 54(4): 289~298.]
- Yuan Chang-feng, Liu De-qin, Cui Xian-guo, et al. Spatial analysis of Beijing population density based on population GIS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(4): 40~42. [袁长丰, 刘德钦, 崔先国等. 基于人口 GIS 的北京市人口密度空间分布分析[J]. 测绘科学, 2004, 29(4): 40~42.]
- Li Xin-yun, Zhang Xiao-qing, Wu Yu-lin. The parameter estimation and application of urbanization population model[J]. Economic Geography, 1995, 15(2): 82~86. [李新运, 张晓青, 吴玉林. 城市化人口模型的参数估计及应用实例[J]. 经济地理, 1995, 15(2): 82~86.]
- Luo Ping, Du Qing-yun, He Su-fang. Spatio-temporal simulation of urbanization based on population density model and CA[J]. Science of Surveying and Mapping, 2003, 28(4): 18~21. [罗平, 杜清运, 何素芳. 人口密度模型与 CA 集成的城市化时空模拟试验[J]. 测绘科学, 2003, 28(4): 18~21.]
- Zhang Jun-yan, Wang Guo-xia, Li Juan, et al. Population changes in urbanization progress and the influence on land use in suizhou city[J]. Progress in Geography, 2004, 23(4): 87~96. [张军岩, 王国霞, 李娟等. 湖北省随州城市化进程中人口变动及其对土地利用的影响[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 87~96.]
- James R Anderson, Ernest E Hardy. A Land Use and Land Cover Classification System for Use With Remote Sensor Data[M]. Washington: United States Government Printing Office, 1976.
- Claire A Jantz, Scott J Goetz, Mary K Shelley. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2003, 30: 251~271.