

文章编号:1000-582X(2013)04-118-07

# SLEUTH 模型支持下的重庆市主城区城市扩展模拟

黄 鸿,秦高峰,冯海亮

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**选取城市化速度较快和生态环境压力突出的重庆市主城区为研究对象,对该区域城区扩展进行模拟与预测。以研究区 1988 年、1993 年、2000 年、2007 年 4 期遥感影像及城市规划图等为数据源,结合 RS 和 GIS 技术对数据进行处理作为模型输入数据,对 SLEUTH 模型进行校正获取适合研究区的最佳参数组合,进而对研究区 1988~2007 年间的城区扩展进行历史重构,并对该区域未来 10 年城区扩展情况进行预测。研究表明:首次将该模型应用到重庆地区,模型对研究区域的城区扩展模拟精度较高,未来 10 年该区域城市化速度有逐渐加快趋势,这与目前的土地规划决策、道路建设、经济结构及政策等因素密不可分。

**关键词:**城市扩展;SLEUTH 模型;模拟预测;RS 和 GIS

**中图分类号:**TP751

**文献标志码:**A

## Applying SLEUTH model for simulating urban growth scenario of Chongqing districts

HUANG Hong, QIN Gaofeng, FENG Hailiang

(Key Lab of Optoelectronic Technique & Systems,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Districts of Chongqing is selected as the study area, which has a rapid rate of urbanization and eco-environmental pressure. The fundamental data of this study is the remote images and urban planning images of Chongqing city in 1988, 1993, 2000 and 2007. After data processing by RS and GIS, model calibration is applied to obtain the best parameters for the SLEUTH model. Then, the SLEUTH model is used for the simulation of the urban growth over the past 20 years. On the basis, the SLEUTH model is applied to predict the situation of urban expansion of the region in the next 10 years. The simulation results show that the calibrated model has a higher simulated precision for the urban expansion of study area, and the pace of urbanization has become relatively rapid in the study area, which may be closely related to the current land planning, road construction, industrial structure and economic policy.

**Key words:** urban expansion; SLEUTH model; simulation and prediction; RS and GIS

**收稿日期:**2012-12-07

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61101168);中国博士后科学基金资助项目(2012M511906);重庆博士后科研基金特别资助项目(XM2012001)

**作者简介:**黄鸿(1980-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事流形学习、模式识别、遥感影像智能处理等方面的研究,  
(E-mail)hhuang.cqu@gmail.com。

城市化水平标志着人类文明程度,目前发展中国家正在加快城市化建设进程,与此同时对城区扩展时空特征、驱动因素及城区扩展模拟预测等方面的研究已经成为城市规划、城市生态等领域的热点问题<sup>[1-2]</sup>。因此,如何用数学模型来描述和模拟城市发展的动态变化,并深入分析城市发展过程中内在的驱动因素,从而避免城市发展过程中所带来的矛盾,已经成为当今城市研究的最基本问题。

近年来,一种应用自适应元胞自动机模拟城市增长模型(Slop, landuse, exclusion, urban extent, transportation, hillshade, SLEUTH)引入到城市拓展模拟和预测中。Clarke等<sup>[3-4]</sup>运用该模型对旧金山和华盛顿都市区进行了成功模拟和长期预测,并推广到欧洲、澳洲,亚洲等。Silva等<sup>[5]</sup>用该模型对地理环境完全不同的2个欧洲城市—浇—葡萄牙的里斯本和波尔图进行研究,表明SLEUTH模型可以通过利用历史数据进行反复校正,得到理想的参数组合,并对城市扩展和土地利用演化做出较好的预测。

近些年中国已进入快速城市化建设阶段,黎夏、周成虎等<sup>[6-8]</sup>已在我国一些城市开展了基于元胞自动机的城市拓展模拟研究。但是,目前基于SLEUTH模型的应用主要集中在北京、上海、广州等较大的沿海城市,对内陆大中城市的应用分析较为少见。我国内陆许多城市正处在城市化的关键时期,快速城市化背景下,科学地探测城市扩展时空演变过程,动态揭示城市扩展趋势,对制定合理的土地利用优化决策,引导区域人地关系以及人类与环境之间的和谐发展具有较重要意义。

文中对基于元胞自动机的城市增长模型——SLEUTH的原理及其应用做了详细阐述和讨论,并对模型参数进行优化,基于GIS方法和遥感数据源,在此基础上,利用SLEUTH模型对重庆市几个主城区近20年以及未来的城市扩展过程进行模拟,通过对重庆市主城区的重建和预测,找出城市扩展趋势并分析总结其成因及影响,进而为政府决策、城市土地利用和规划、城市可持续发展建设提供科学参考依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

文中的研究区域包括重庆市主要的6个城区,即渝中区\江北区\九龙坡,南岸区\沙坪坝区\渝北区等部分地区,研究的区域总面积为1 664.02 km<sup>2</sup>,具体如图1所示。

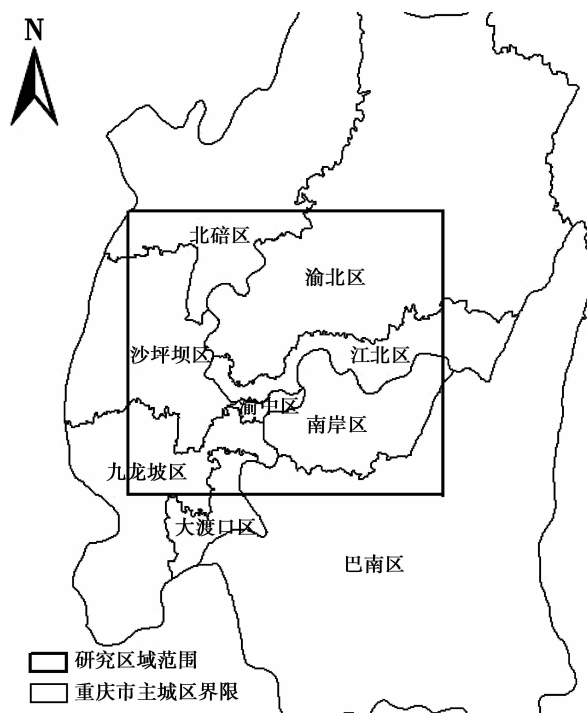


图1 研究区域范围

### 1.2 数据源及数据预处理

文中使用的原始数据源主要有:1)重庆主城区的1988年、1993年、2007年3期Landsat TM遥感影像数据,以及2000年的ETM+影像数据;2)1988年、1993年、2000年、2007年研究区的交通矢量图;中国省界县界行政区划图;3)文中采用的DEM数据是美国航天飞机雷达地形测图(SRTM)数据;4)城市规划图及社会经济统计数据。根据研究需要以及数据属性把数据分为土地利用图层、现有城市化图层、交通矢量层、城市用地限制图层、地形坡度层、山体阴影层,具体的数据处理流程和技术路线如图2所示。

首先在ENVI 4.7中对4期影像数据进行辐射校正、几何校正、图像增强等预处理,然后经人工目视解译选取训练样本数据,并进行有监督分类、精度检验,生成土地利用图层。在ArcGis 9.3中根据DEM数据提取出坡度和山体阴影图层。城市用地限制图层即城市用地中不可建设用地,如水域、自然保护区等,根据重庆市控制性城市规划纲要结合土地利用图层,提取出城市用地限制图层。同时,对道路图、规划图、DEM数据等进行数据格式、坐标系统转换等操作,文中所用图像均为WGS-84坐标系下UTM北48带投影的数据。

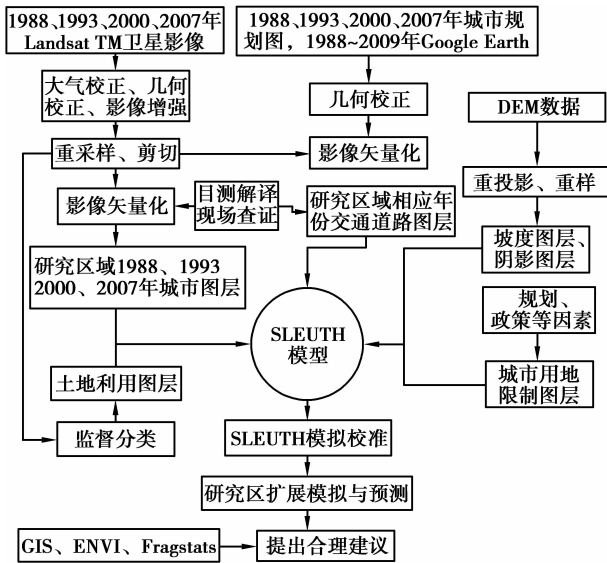


图 2 技术路线图

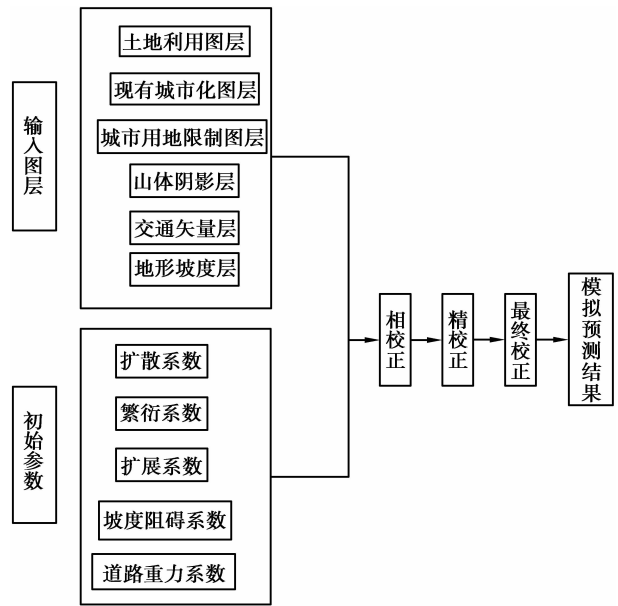


图 4 SLEUTH 模型处理流程图

### 1.3 SLEUTH 模型

#### 1.3.1 基本原理

SLEUTH 模型以网格空间为工作基础,相邻有 4 个单元格,每个单元格被赋予 2 种属性(城市/非城市),通过定义 5 个转换规则应用于时间序列数据的动态研究。该模型重要特点是通过自我修改规则来获取研究区的历史状态从而进行相应的模拟<sup>[9]</sup>。

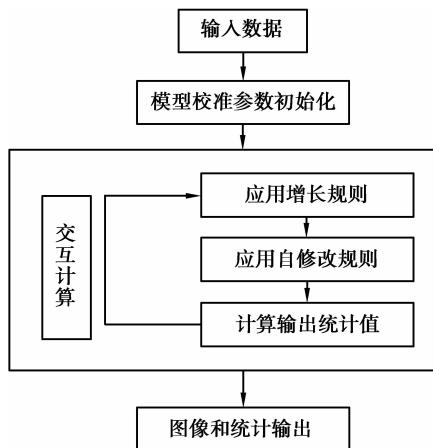


图 3 SLEUTH 模型原理图

在 SLEUTH 模型中,有 5 个控制图层来调控每个元胞随时间推移变化,在元胞自动机框架里,每个元胞的状态都与其相邻的元胞状态有关。该模型的增长规则由 5 个增长控制参数(系数)来决定,分别是:扩散(散布)系数(Diffusion, Diff)、繁衍系数(Breed, Brd)、扩展系数(Spread, Sprd)、坡度阻碍系数(Slope, Slp)、道路重力系数(Road-gravity, Rg)。这 5 个增长系数值是通过模拟结果与历史

年份数据的比较进行校准获得的,模型的整个处理流程如图 4 所示。

模型中的这 5 个系数因子能够产生 4 种增长方式:1)自发式邻近增长,即模型在模拟区域增长时,在扩展系数的控制下城区向适宜的坡度地区增长;2)扩散增长和创造新的增长中心;3)自组织增长,在城市的周围和空隙复制城市的增长规律;4)道路影响型增长,道路重力系数吸引新的居民点沿着道路分布,控制着道路影响的增长。

#### 1.3.2 SLEUTH 模型的校准

校准是 SLEUTH 模型运行的关键,在整个校准过程中,模型借助 Brute-force 蒙特卡洛迭代方法和历史数据<sup>[10-11]</sup>,以确定各个参数的最佳取值范围。该校正方法是 SLEUTH 模型应用研究中采用最普遍也最成熟的方法,分 4 步校正:初级校正(Coarse calibration)、中级校正(Fine calibration)、终校正(Final calibration)和预测参数获取(Deriving forecasting coefficients)4 个步骤。

此外,模型还有 3 个精度验证参数因子:Compare 反映城市用地面积的预测值和实际值的相关性的,设置好该参数可以得到高精度的面积预测结果;Edges  $R^2$  表示城市用地像元与非城市用地像元的边界数目模拟值与真实值的相关系数;Lee-sallee 参数是 1 个形状指数,反应了模型模拟结果与已知年份城市范围间的空间匹配程度,它对模型预测结果空间位置的精确和数量的精确有综合的反映。除 Lee-sallee 参数外,其他都和土地利用面积

有直接的相关性,所以文中在模型运行时屏蔽部分参数只运行了3个验证参数,以提高模型运行速度

和效率。模型3个校正环节的参数设置和参数最佳值组合如表1所示。

表1 SLEUTH模型3个校正阶段参数设置

模型增长系数	初级校正		中级校正		终校正		最佳系数值组合
	范围	步长	范围	步长	范围	步长	
扩散(散布)系数(Diff)	25~100	15	25~70	9	25~40	3	28
繁衍系数(Brd)	0~100	25	25~75	10	45~70	5	63
扩展系数(Sprd)	0~100	25	35~80	9	45~52	2	47
坡度阻碍系数(Slp)	0~100	25	25~75	10	45~70	5	57
道路重力系数(Rg)	0~100	25	25~75	10	50~70	4	67
蒙特卡洛迭代次数	5		7		9		
循环迭代次数	3 568		7 462		4 125		
Compare	0.926		0.952		0.934		
Edges R <sup>2</sup>	0.954		0.962		0.947		
Lee-Sallee 指数	0.585		0.603		0.581		

注:Edges R<sup>2</sup>表示城市用地像元与非城市用地像元的边界数目模拟值与真实值的相关系数;Lee-Sallee表示边界的空间匹配度;Compare表示城市用地像元数目模拟值与实际值的相关系数。

由表1中的模型增长最佳系数值,可得知:扩散系数值相对较小,表明在低密度城区自发形成城市点的现象不很明显;除扩散系数值比较小外,其余系数值都在45以上,特别是道路重力系数为67,这表明在研究区城区扩展受到道路分布、地势高低以及周围区域城市化水平等因素影响比较大,并且城区扩展速度较快。

上述研究结果与实际情况基本吻合:重庆以山城而著称,平均地势较高,城市发展受地形影响较大;同时大中城市的发展也遵循“点-轴”理论,重庆市主城区交通道路设施的建设对于城市扩展起着重要的作用;自重庆直辖以来,在国家政策及市政府的政策等因素的影响下,城市经济发展有了很大的发展,城市化速度也在加快,大量土地转为城市用地,尤其是渝北区、江北区、沙坪坝区等,在政策的引导下乡镇经济发展迅速,城市化水平有较大提高,沿江扩展的城市化格局逐步得到改善。

由表1可看出,该模型3个阶段的Lee-Sallee

指数都在0.58以上,有研究表明<sup>[12]</sup>该参数较少超过0.6,Edges R<sup>2</sup>也在0.95以上,说明模型校正结果较为理想。因此,文中使用校正得到的最佳系数组合,以1988年为起始年份,对1988年到2007年间重庆市主城区城市空间扩展过程进行模拟。

## 2 研究结果

### 2.1 城区扩展模拟

SLEUTH模型通过上述校正后,利用表1得到的各参数因子最佳系数组合,对研究区1988年~2007年间的城市发展进行模拟。选取1988年、2000年、2004年和2007年4年的模拟城区与真实遥感影像矢量化得到的城区进行比较,根据点对点规则进行精度验证(见表2),通过表2可以看出模拟的城区精度较高,说明模拟效果较好,在进入21世纪后重庆城市化<sup>[13]</sup>建设加快,模拟精度比1988年和2000年有所下降,但在可接受范围之内。同时,给出1988年、2000年及2004年的实际图和城区模拟图,如图5所示。

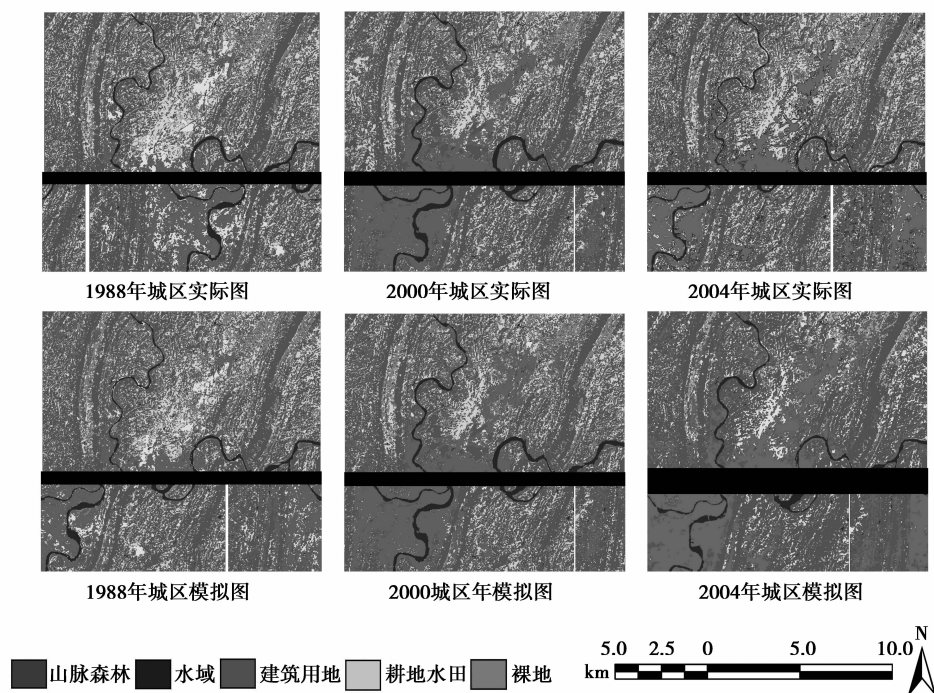


图 5 1988 年、2000 年和 2004 年重庆市城区模拟图与实际城区图结果对比

表 2 实际与模拟城区精度表 %

年份	1988 年	2000 年	2004 年	2007 年
城市区域精度	75.63	72.41	70.26	68.57

重庆市于 1991 年 3 月经国务院批准成立国家级高新技术产业开发区以来,高新区(九龙坡区的一部分和渝北区的一部分)城市扩展速度较快。从模拟结果来看:1988 年~2004 年符合实际城市扩展趋势,由于模型较大的扩展系数值,城区增长更侧重于从已有的城市边界向外扩张;同时,相对于其他增长方式(由道路影响的增长和自发增长)来说,边缘增长占主导地位,从边缘不断向外扩展,而新的城市中心的生长却模拟不足。在经济因素的驱动下城市还在不断增长,近年来重庆市主城区发展呈现逐步加快趋势。

## 2.2 城区扩展预测

在上述实验的基础上,根据模型的转换规则和校正的最佳参数组合<sup>[14-18]</sup>,对重庆市主城区城市扩展进行模拟预测,以 2007 年为起点,预测研究区 2012、2017 和 2022 年的城区扩展情况(如图 6)。

从研究区城区扩展情况来看:从 2007 年~2012 年间,在城区扩展中边缘增长继续起作用,但是道路

网影响的增长和自发增长也逐渐起到作用,由主要公路组成的现状交通系统对主城地区的城市化过程产生重要影响。同时,在 2012 年~2022 年这 10 年间,研究区城市沿道路扩展较为明显,出现了区域不大的城镇用地单元,说明主要受交通道路网和自发增长影响,城市远郊不少农用地被转化为城市用地。从实验结果来看,研究区的外围地区城市增长速度明显加快,城区“摊大饼”式的扩展得到一定的改善,这与重庆市未来 10 年间的城市规划及城区发展趋势大体一致。

根据重庆市未来 10 年城市发展规划,明确提出加快城市化进程速度,目前重庆市交通道路网基本形成,确定以渝中区等已完成城市化的 290 多万  $\text{km}^2$  范围为一环区,向外围扩展形成二环区域,二环覆盖区域 1 000 多  $\text{km}^2$ ,形成 25 个大型聚居区,预计城市用地占 400 多  $\text{km}^2$ 。未来 10 年重庆市城市空间发展格局规划主要形成以两江新区为龙头,西永综合保税区、两路-寸滩保税港区、经开区、高新区为支撑的“1+2+2”国家级开发区格局,重庆市主城将实施大规模工业化、城市化开发建设。

根据模拟的结果图通过计算得出:2007 年~2012 年间城市扩展年平均增长率为 1.85%,2012 年~2017 年间城市扩展年平均增长率为 2.61%,2017 年~2022 年间城市扩展年平均增长率为

3.32%,可见未来10年主城区城市化速度会明显加快,不可避免的会占用部分耕地和林地等。重庆是我国典型的“山城”,城市土地资源十分紧缺,随着城

市经济在西部大开发中快速发展,满足城市发展的合理用地需求与控制城市用地超常规扩张形成了巨大矛盾。

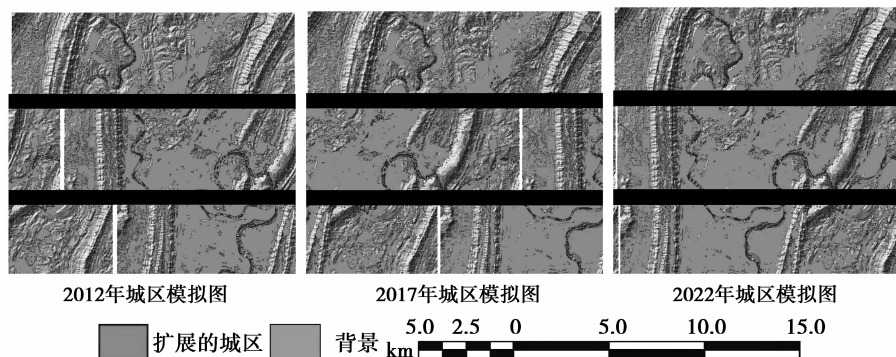


图6 未来10年重庆市主城区扩展情况

建议采取以下措施:1)鼓励新增城区立体式发展,提高城市的容积率,以尽量减少占用耕地;2)在有条件和优势的区域性中心和工业强区促进产业点状发展,引导新兴产业形成“多点”的空间扩展布局;3)加强区域线状交通体系建设,鼓励远郊区区域次级中心城市发展,推动城乡二元化发展,从而在一定程度上缓解城区人口与产业链过分集中,尽量避免城市“摊大饼”式外延扩展的局面;4)在加快城市化建设的同时迫切需要采取相关措施保护基本农田,避免城市化过程中占用大量良田,促进区域性可持续发展。

### 3 结 论

综合应用了RS、GIS、SLEUTH等方法,首次将SLEUTH模型应用到中国西南部山地城市——重庆,通过对近20年重庆市主城区扩展进行了模拟预测,研究重庆市主城区城市发展的趋势,比较与实际城区扩展趋势是否大体一致,分析总结其成因及影响,文中的研究为以后重庆市主城区土地利用、城市规划等提供一定的借鉴和参考作用。

实验结果表明,自1988年至今,重庆市主城区以较快扩展速度扩张,并且未来10年其增长速度有加快趋势,这种扩展格局及变化状况与研究区经济产业结构、土地规划决策、交通网建设等因素密不可分。重庆市主城区未来用地形势更加紧张,渝中区,江北区,南岸区等中心城区已无地可用,城区扩展开始由组成高密度城区逐步向交通条件较好的较远区县扩张,这与重庆市未来十年规划大体相符,但是随着城市的生长,农田、园地、林地不可避免地被占用,政府应采取相关措施,严格保护农业用地,同时要控

制城市的过快的的发展,以免引起区域性粮食安全问题,有可能给生态环境造成过度破坏,从而影响“森林重庆,宜居重庆”的实现,进而影响人们的生活环境。

文中研究在SLEUTH模型校准方法方面还有待进行更深入地拓展,如何将经济文化、人口、气候环境等方面的因素以排除层的方式,动态地嵌进该模型中,从而更好地模拟城市空间扩展,是下一步要解决的问题。

### 参考文献:

- [1] 许学强,周一星,宁越敏. 城市地理学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [2] 代娟. 基于SLEUTH模型的区域空间演变模拟[D]. 武汉:中国地质大学博士学位论文,2010.
- [3] Dietzel C, Clarke K C. The effect of disaggregating land use categories in cellular automata during model calibration and forecasting [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2006, 30(1): 78-101.
- [4] Silva E A, Ahern J, Wileden J. Strategies for landscape ecology: an application using cellular automata models [J]. Progress in Planning, 2008, 70(4):133-177.
- [5] Liu X P, Li X, Liu L, et al. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008,22(11/12):1247-1269.
- [6] 黎夏,叶嘉安,刘小平,等. 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [7] 周成虎,孙战利,谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北

- 京:科学出版社,2000.
- [8] 米丽娜. 基于 SLEUTH 模型的银川市空间扩展研究[D]. 兰州:兰州大学硕士学位论文,2008.
- [9] 刘勇,吴次芳,岳文泽,等. 基于 SLEUTH 模型的杭州市城市扩展研究[J]. 自然资源学报,2008,23(15):797-805.  
LIU Yong, WU Cifang, YUE Wenze, et al. Applying SLEUTH for simulating urban expansion of Hangzhou[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(15):797-805.
- [10] Wang Y, He B. Applying SLEUTH for simulating urban expansion of Beijing[C] // Proceedings of the 2009 International Forum on Information Technology and Applications, May 15-17, 2009, Chengdu, China. Piscataway: IEEE Press, 2009, 2:652-656.
- [11] 何丹,金凤君,蔡建明. 近 20 年京津廊坊地区城市增长模拟和预测研究[J]. 经济地理,2011,31(1):7-13.  
HE Dan, JIN Fengjun, CAI Jianming. Simulation and prediction of urban spatial growth in the past 20 years in Jing-Jin-Lang area[J]. Economic Geography, 2011, 31(1):7-13
- [12] 廖和平,彭征,洪惠坤,等. 重庆市直辖以来的城市空间扩展与机制[J]. 地理研究,2007,26(6):1137-1146.  
LIAO Heping, PENG Zheng, HONG Huikun, et al. Research on dynamic mechanism and model of urban spatial expansion since the establishment of Chongqing municipality [J]. Geographical Research, 2007, 26(6):1137-1146.
- [13] 李明杰,钱乐祥,吴志峰,等. 广州市海珠区高密度城区扩展 SLEUTH 模型模拟[J]. 地理学报,2010,65(10):1163-1172.  
LI Mingjie, QIAN Lexiang, WU Zhifeng, et al. The SLEUTH model simulation of high density urban sprawl in Haizhu district of Guangzhou City[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(10):1163-1172.
- [14] Ding Y C, Zhang Y K. The simulation of urban growth applying SLEUTH Ca model to the Yilan delta in Taiwan[J]. Jurnal Alam Bina, 2007, 9(1):95-107.
- [15] Xu C, Liu M S, Zhang C, et al. The spatiotemporal dynamics of rapid urban growth in the Nanjing metropolitan region of China[J]. Landscape Ecology, 2007, 22(6):925-937.
- [16] Jantz C A, Goetz S J, Donato D, et al. Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(1):1-16.
- [17] Wu X Q, Hu Y M, He H S, et al. Performance evaluation of the SLEUTH model in the Shenyang metropolitan area of Northeastern China [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2009, 14(2):221-230.

(编辑 陈移峰)