

海岸带土地利用模拟结果对元胞邻域的响应研究

冯永玖, 韩 震

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘 要:通过元胞自动机(Cellular Automata, CA)动态模拟能够重建和预测复杂系统的全局结构及其演变。海岸带土地利用变化模拟是 CA 应用研究的重要领域之一。元胞邻域及其组合作为 CA 的必要组成部分,对海岸带模拟结果有显著影响。以半径为 1、2 和 3 的 Moore 邻域为例,测试并分析了模拟结果对元胞邻域的响应。研究表明:这种影响表现在 3 个方面:分别是元胞数量、空间形态和不确定性。小范围邻域组合模拟结果形态真实、不确定性较低,但是模拟变化容易过早终止;大范围邻域组合模拟结果形态真实性较差、不确定性较高,但是模拟结果能够保持延续。针对具体的模拟案例,元胞邻域的选择需要结合影响系统演变的全局因素而确定。模拟结果的响应特征不仅适合海岸带土地利用模拟,也适合其他类型的空间系统演变模拟。

关键词:土地利用情景;海岸带;元胞自动机;邻域响应;模拟结果

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)04-0078-04

Response to Neighbor Configurations on Coastal Land Use Simulation Results

FENG Yong-jiu, HAN Zhen

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: By dynamic simulation of cellular automata (CA) models, global structures and their evolution of complex systems could be automatically reconstructed and projected. A neighbor configuration off cells is an essential part of a CA model which remarkably affects simulated results. Based on Moore neighbors with radius 1, 2 and 3 respectively, the responses of simulations are detected and analyzed. This research demonstrates that the impact of cell neighbors includes three aspects: quantity of cells, spatial morphology and uncertainty. Small range of neighbors performs well in spatial morphology and uncertainty, but could prematurely terminate the simulating process; while larger range of neighbors performs poor in spatial morphology and uncertainty, but could continue the process over time. For an actual case study area, the selection of neighbor configurations needs global factors impacting system evolution fully considered. Moreover, the response characteristics on simulation of coastal land use changes presented in this research are also suitable for modelling the evolution of other spatial systems.

Key words: land use scenario; coastal area; cellular automata; response to neighborhood; simulation result

近年来,随着人们对复杂系统动态演变过程的关注,元胞自动机模拟及其作用越来越受到重视。元胞自动机(Cellular Automata, CA)最早由美国数学家 Ulam 在 19 世纪 40 年代提出,是一种在时间和均离散的系统。元胞自动机具有“自下而上”的结构,通过简单的底层交互行为,能够反映全局系统的复杂行为及其变化。1984 年英国数学家 Wolfram 在 Nature 发表文章认为,CA 可以用于复杂系统的模拟,并给

出了元胞自动机的定义、构成元素以及转换规则等^[1]。此后,CA 应用研究领域剧增,在计算机、生态、交通、地理等领域得到了较为广泛的应用。尤其在城市扩展演变与复杂土地利用变化方面,利用元胞自动机模拟方法不仅能够重建历史动态变化过程^[2-3],而且能够根据不同的条件预测未来发展的可能情景^[4-5]。作为复杂地理空间实体,城市与土地从上一时刻向下一时刻的转变依据的是元胞的转换规则(Transition Rules),这种规则是建立元胞自动机

收稿日期:2010-01-25

资助项目:上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(SSC09018);教育部科学技术研究重点项目(209047);上海市教育委员会科研创新项目(11YZ154);上海海洋大学博士启动基金项目

作者简介:冯永玖(1981—),男,讲师,博士,主要研究方向为遥感与 GIS、地学信息模型。E-mail: yjfeng@shou.edu.cn

模型的核心^[6]。一般地,转换规则由元胞邻域、区域影响变量、限制因素和随机变量等组成。大部分研究均把重点放在区域变量如何影响地理实体的演变,从而得到合理的元胞转换规则作为研究的重点^[2-5]。但是,随着规划和决策对模拟精度的要求越来越高,模拟结果的精度和不确定性开始受到重视^[7-9]。

元胞自动机模拟结果是产生一系列模拟和预测情景,这些结果是基准图件相似的数据和图件,CA 模型有明显的空间尺度依赖性,不可避免地存在误差和不确定性^[10]。叶嘉安等从数据源、数据转换、CA 模型系统(包括转换规则、邻域结构、模拟时间和随机变量)等方面探讨了 CA 模拟的误差传递与不确定性问题^[11];Liu 研究了元胞尺度大小对城市土地利用模拟结果的精度影响^[12];Moreno 等从 CA 模型的空间尺度依赖性出发,提出了通过不规则元胞组合的改进方法^[10]。

大量研究证实,元胞的空间尺度及组合不仅影响土地利用变化的模拟结果,甚至影响规则的挖掘与获取,及不同邻域组合下,得到的 CA 转换规则、设置的转变阈值及模拟结果(包括数量、空间位置及形态)均有较大差异。可见,元胞邻域的大小及其组合是 CA 土地利用模拟不可忽视的一环。本文重点讨论探讨元胞邻域的大小及组合对模拟过程和结果的影响,并通过海岸带土地利用变化模拟的案例进行实证研究。

1 地理元胞自动机

1.1 基本原理

在 CA 模型中,散布在规则格网(Lattice)中的每一

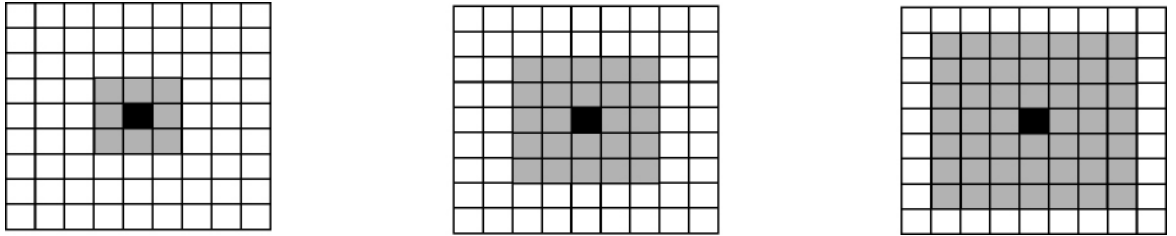


图 1 常见的几种 Moore 元胞邻域定义

1.3 CA 转换规则

一般地,利用 CA 对海岸带土地利用进行模拟,其核心是转换规则的确定。而本研究不考虑转换规则的影响,重点分析元胞邻域数量对于模拟结果的影响,以分析使用哪一种元胞类型较为适合。在此条件下,每个元胞在下一时刻能够发生状态转变的概率可以用式(4)表达。

$$P_g^t = P_s \cdot \text{con}(\text{cell}_{ij}^t = \text{suitable}) P(\Omega_{ij}^t) \quad (4)$$

式中: P_g^t ——全局概率; P_s ——区域空间变量(Spatial variables)作用下的发展概率; $\text{con}(\text{cell}_{ij}^t = \text{suit-}$

able)——限制条件,在本研究中为水域,取值 0 表示限制发展,1 表示可发展; $P(\Omega_{ij}^t)$ ——元胞的 Moore 邻域,可表达为 $P(\Omega_{ij}^t) = \frac{\sum (S_{ij} = \text{urban})}{n \times n - 1}$; n ——参与计算的元胞数量, $n = 3, 5, 7$ 分别表示 Moore 3×3 、Moore 5×5 、Moore 7×7 邻域,这 3 种元胞邻域分别包含 8、24 和 48 个邻域元胞。为了模拟结果对元胞邻域的响应,本文假定区域变量作用下的元胞转换概率 $P_s = 1$,即不考虑区域变量对转换规则的影响,但保留限制条件 $\text{con}(\text{cell}_{ij}^t = \text{suitable})$,一般地水域和高

1.2 元胞邻域

(1) Moore 3×3 邻域(普通 Moore 邻域)。一个元胞的上下、左右、左上、右上、左下及右下的 8 个元胞为其邻域,其数学定义如式(1)^[13]。

$$N = \{v_i = (v_i^x, v_i^y) \mid |v_i^x - v_0^x| \leq 1, |v_i^y - v_0^y| \leq 1, (v_i^x, v_i^y) \in z^2\} \quad (1)$$

式中: N ——元胞数量; v_i^x, v_i^y ——邻域元胞的行列坐标值; v_0^x, v_0^y ——中心元胞的行列坐标值, z^2 ——元胞空间。

(2) Moore 5×5 邻域。把 Moore 型的邻域半径扩展为 2,扩展后的邻域数为 24,其数学定义如式(2)^[13]。

$$N = \{v_i = (v_i^x, v_i^y) \mid |v_i^x - v_0^x| \leq 2, |v_i^y - v_0^y| \leq 2, (v_i^x, v_i^y) \in z^2\} \quad (2)$$

(3) Moore 7×7 邻域。把 Moore 型的邻域半径扩展为 3,邻域数为 48,其数学定义如式(3)^[13]。

$$N = \{v_i = (v_i^x, v_i^y) \mid |v_i^x - v_0^x| \leq 3, |v_i^y - v_0^y| \leq 3, (v_i^x, v_i^y) \in z^2\} \quad (3)$$

坡度区域均可作为限制条件,因此本研究中海岸带土地元胞的转换概率可用式(5)表示。

$$P_g^t = \text{con}(\text{cell}_{ij}^t \neq \text{water}) \times \frac{\sum (S_{ij} = \text{urban})}{n \times n - 1}$$

(5)

模拟之前,设置元胞是否可以发生转变的阈值 $P_{\text{threshold}}$,当 $P_g^t > P_{\text{threshold}}$ 则发生转变,否则元胞保持原状态不变。

2 模拟结果对元胞邻域的响应分析

2.1 研究区域及模拟结果

为测试不同元胞组合对模拟结果的影响,选择上海市浦东新区海岸带某区域作为研究对象。现浦东新区由原浦东和南汇于 2009 年合并而成。原南汇作为上海远郊区,其海岸带土地利用类型复杂多样,包括城市建设、工业开发、垃圾填埋场、城市绿化、大型主题公园、农业基地、滨海湿地等。本文研究区位于南汇沿海区域,面积为 90 km²

利用 GIS 组件 ArcGIS Engine 9.3 在 VS2005 环境下开发海岸带土地利用模拟模块,通过改变元胞邻域,产生一系列模拟结果(见图 2)。模拟中,将土地利用类型简化为 3 类:分别为已开发土地、未开发土地和水域;运行的阈值为 0.52,模拟运行次数为 60。

2.2 模拟结果分析

由于水域作为限制条件,因此模拟中其元胞状态保持不变,发生变化的元胞为已开发和未开发的元胞,结果是已开发的元胞数量不断增加、未开发的元胞数量不断减少,故而检测模拟结果对元胞邻域的响应只需要检测已开发或未开发的元胞数量即可。本研究把已开发的元胞作为研究的重点。对于图 2 的目视检测和直观认识可知,3 种元胞邻域产生的模拟结果在数量上和形态上均有较大差异。初始状态,已

开发的元胞数量为 14 753;而 3 种不同邻域下模拟运行 1~60 次产生的元胞数量如表 1 所示。

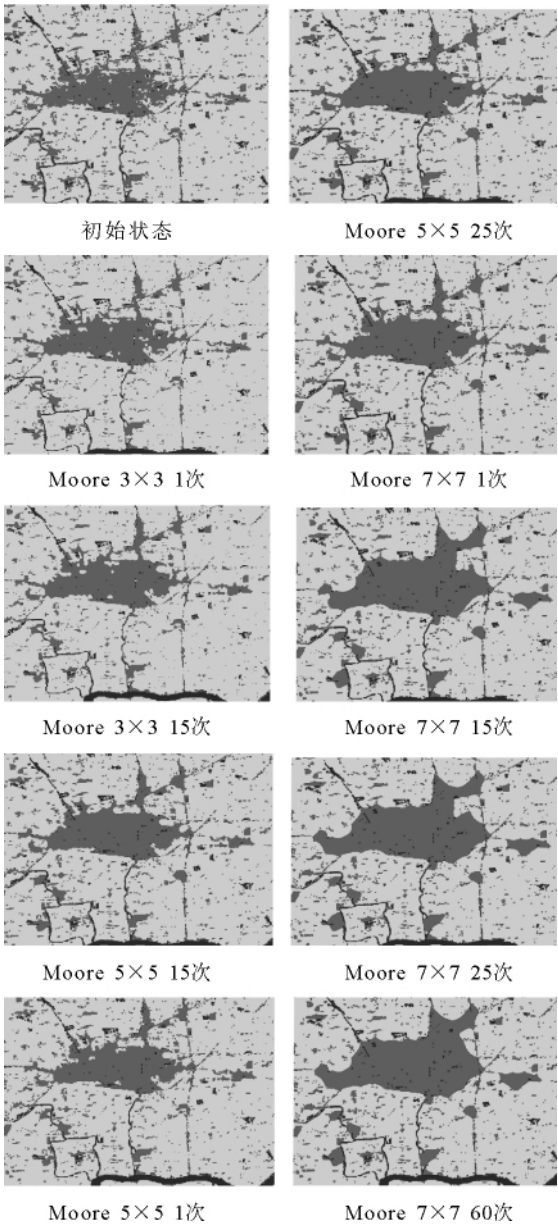


图 2 基于 3 种不同的 Moore 邻域的模拟结果

表 1 三种不同元胞邻域模拟结果趋势分析

模拟次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Moore3×3	37691	38166	38461	38627	38735	38803	38870	38902	38902	38915
Moore5×5	46338	47212	47820	48195	48447	48624	48775	48888	48943	48971
Moore7×7	43440	45217	46590	47686	48725	49536	50294	51032	51471	51863
模拟次数	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Moore3×3	38922	38924	38927	38930	38937	38937	38937	38937	38937	38937
Moore5×5	48981	48987	48994	49006	49020	49030	49046	49053	49063	49083
Moore7×7	52206	52626	53119	53119	53393	53744	53996	54189	54328	54447
模拟次数	21	22	23	24	25	26	27	28	...	60
Moore3×3	38937	38937	38937	38937	38937	38937	38937	38937	...	38937
Moore5×5	49083	49096	49099	49110	49114	49114	49114	49114	...	49114
Moore7×7	54533	54609	54685	54746	54795	54865	54908	54965	...	56048

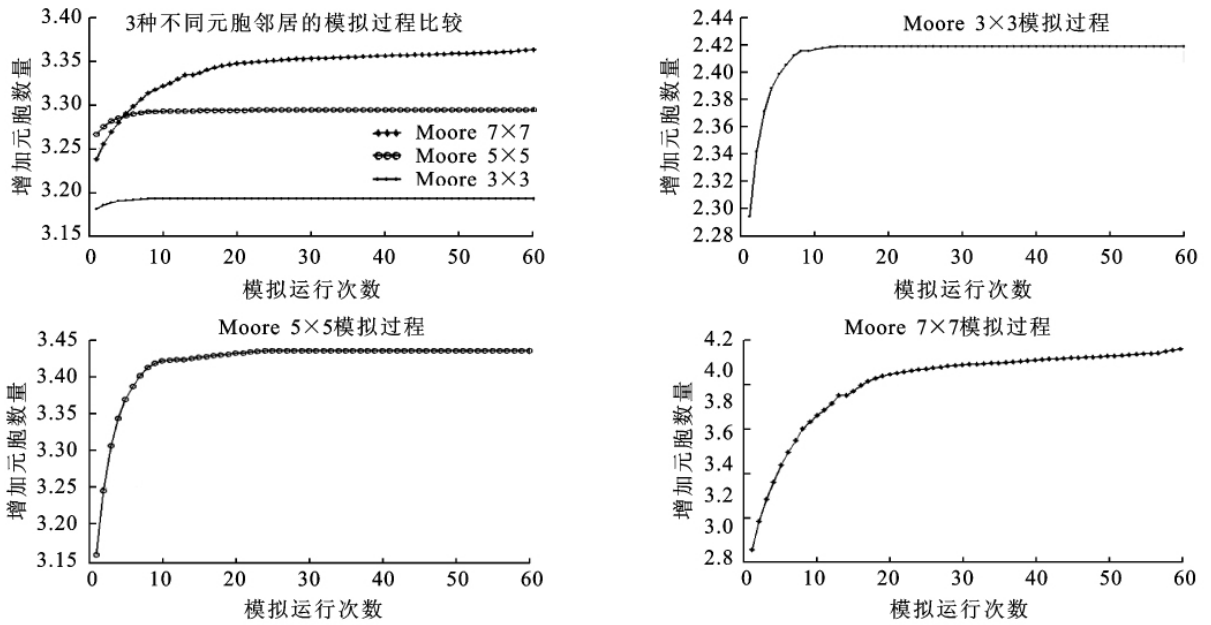


图 3 三种不同元胞邻域模拟结果趋势分析

从表 2 可知, Moore 3×3 和 Moore 5×5 邻域分别模拟运行到 15 和 25 次时不再发生变化, 而 Moore 7×7 邻域在 60 次运行以内均发生变化。图 3 显示了模拟次数与模拟最终状态已开发的元胞数量之间的关系, 从模拟过程变化曲线可知, Moore 3×3 与 Moore 5×5 相似, 而与 Moore 7×7 的差异较大, 其中 Moore 3×3 模拟变化甚微, Moore 5×5 变化次之, 而 Moore 7×7 模拟结果变化显著。Moore 3×3 和 Moore 5×5 在 1~10 次模拟运行元胞增加数量显著, 分别增加元胞数量为 1 224 和 2 633 个, 10 次之后趋于缓慢, 分别增加元胞数量 22 和 143 个; Moore 7×7 在 1~20 次模拟运行增加元胞数量 8 423 个, 20 次之后趋于缓慢, 增加元胞数量 4 185 个。

综上所述, 可归纳不同元胞邻域下海岸带土地利用模拟结果的特点: ①从数量上看, 模拟初期已开发元胞增加显著, 随着模拟次数增加已开发元胞数量增加趋缓, 邻域范围越小导致模拟结果越早停止变化, 这是因为大邻域范围综合了区域发展的更多因素, 而小邻域范围只考虑了中心元胞周围的局部因素。②从形态上看, 元胞邻域范围越大模拟结果真实性越低, 凡是包含在邻域范围内的元胞, 随着模拟次数增加, 其状态均有可能改变, 而当邻域范围越大, 可以改变状态的元胞则越多, 因此一些包围在已开发的元胞区域中的未开发元胞, 虽然实际中并未得到开发, 但是其状态却发生了改变, 从图 2 看这种情况在 Moore 7×7 邻域中比较明显。③从不确定性方面来看, 小邻域范围由局部元胞组成, 而大邻域范围由较大区域的元胞组成, 显然邻域范围越大、因素越多, 则模拟不确定性增加。可见, 小邻域范围模拟结果形态

真实、不确定性较低, 但会导致模拟运行变化过早终止; 而大邻域范围模拟运行变化延续性较强, 但是模拟结果形态欠缺真实、不确定性增加。

因此, 在海岸带土地利用模拟过程中必须依赖全局变量, 而不是邻域范围变量。由于各种尺度邻域范围具有自身的优缺点, 邻域范围大小及其组合的选择必须考虑研究区域的特点、全局变量的情况, 利用试错法进行模拟并评价精度, 最后确定模拟案例的特征尺度及较优的邻域大小及组合。

3 结论

元胞自动机是一种“自下而上”的离散系统, 能够模拟复杂现象和系统的演变过程并预测其未来情景。海岸带土地利用变化模拟是 CA 的重要应用领域。研究表明: 元胞邻域的大小及其组合对海岸带土地利用模拟结果有显著影响。通过测试分析 3 种不同的 Moore 邻域对模拟结果的影响, 初步研究了模拟结果对元胞邻域的响应特征。

研究证实: 元胞邻域对模拟结果在 3 个方面有重要影响, 分别是元胞数量、空间形态及不确定性。针对一般性模拟研究, 无法判断什么样的元胞尺度及组合对海岸带土地利用模拟时最优的, 必须结合实际模拟案例, 考虑组成元胞全局转换规则的因素, 在多次模拟比较之下, 才能够确定最佳元胞邻域尺度和组合。此外, 本研究的结论对不仅对海岸带土地利用变化模拟适用, 而且对其他类型的空间演变模拟及预测均有参考价值。

但是,这样的土地利用格局无法保证当地的经济效益。在流域治理过程中,植物措施与工程措施有机的结合,即能有效保持水土,涵养水源,也能给当地带来经济效益。

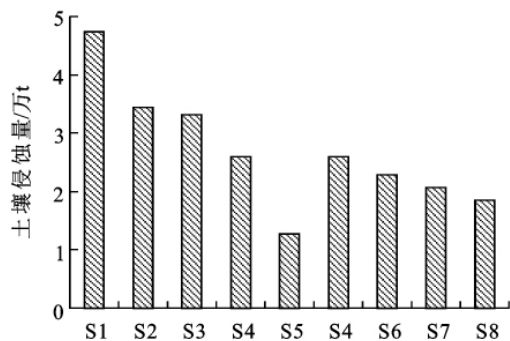


图 2 不同情景土壤侵蚀量分布

参考文献:

- [1] 摆万奇,柏书琴.土地利用和覆盖变化在全球变化研究中的地位与作用[J].地域研究与开发,1999,1(4):13-16.

- [2] 江忠善,王志强,刘志.黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,1(2):1-9.
- [3] 龚丹.农牧交错带典型区农牧业土地利用变化的多主体模拟分析[D].北京:北京大学,2006:4-8.
- [4] 余新晓,秦富仓.流域侵蚀动力学[M].北京:科学出版社,2007:54-57.
- [5] 蔡庆,唐克丽.植被对土壤侵蚀影响的动态分析[M].水土保持通报,1992,6(2):47-51.
- [6] 史志华.基于GIS和RS的小流域景观格局变化及其土壤侵蚀响应[D].武汉:华中农业大学,2003:53.
- [7] 张殿发,李凤全.我国北方农牧交错带脆弱生态地质环境形成机制探讨[J].农村生态环境,2000,16(4):58-60.
- [8] 赵亚敏.基于流域生态过程的洛阳市城市滨河绿地景观格局优化研究[D].郑州:河南农业大学,2006:35-39.
- [9] 秦富仓.黄土地区流域森林植被格局对侵蚀产沙过程的调控研究[D].北京:北京林业大学,2006:51-80.
- [10] Ascough J C, Baffaut C, Nearing M, et al. Watershed Model Channel Hydrology and Erosion Processes [J]. Ecological Applications, 1995,17(3)45-61.

(上接第 81 页)

参考文献:

- [1] Wolfram S. Cellular Automata as Models of Complexity [J]. Nature, 1984, 311 (10): 419-424.
- [2] Al-kheder S, Wang J, Shan J. Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multi-temporal satellite images [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22(11): 1271-1293.
- [3] Liu Xiaoping, Li Xia, Liu Lin, 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): 1247-1269.
- [4] 何春阳,史培军,陈晋,等.基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J].中国科学(D辑):地球科学,2005,35(5):464-473.
- [5] 黎夏,杨青生,刘小平.基于CA的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟[J].中国科学(D辑):地球科学,2007,37(9):1242-1251.
- [6] Wu F. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2002,

- 16(8): 795-818.
- [7] 张杰,周寅康,李仁强,等.土地利用/覆盖变化空间直观模拟精度检验与不确定性分析:以北京都市区为例[J].中国科学(D辑):地球科学,2009,39(11):1560-1569.
- [8] Robert Gilmore Pontius, Neeti Neeti. Uncertainty in the difference between maps of future land change scenarios [J]. Sustainable Science, 2010, 5: 39-50.
- [9] Lien Poelmans, Anton Van Rompaey. Complexity and performance of urban expansion models [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(1): 17-27.
- [10] Moreno Nian dry, Wang Fang, Danielle J. Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2009, 33: 44-54.
- [11] Yeh Anthony Gar-On, Li Xia. Errors and uncertainties in urban cellular automata [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2006, 30: 10-28.
- [12] Liu Yan. The impact of neighbourhood size on the accuracy of cellular automata-based urban modelling [J]. Applied GIS, 2007, 3(5): 1-14.
- [13] 徐昔保.基于GIS与元胞自动机的城市土地利用动态演化模拟与优化研究:以兰州市为例[D].兰州:兰州大学,2007.