

MonoLoop: CA 城市模型状态转换规则 获取的一种方法

刘翠玲¹, 龙 瀛², 王艳慧¹

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045)

摘要:状态转换规则是元胞自动机(Cellular Automata, CA)的核心, 如何获取并建立 CA 的状态转换规则是构建 CA 模型的关键。邻域作用是 CA 能够模拟复杂物理现象的核心驱动力, 而在已有的用于城市增长模拟的 CA 城市模型中, 因为邻域作用在模拟的过程中为时间动态的变量, 其系数很难通过常用的 Logistic 回归方法识别, 致使已有的 CA 城市模型的状态转换规则中, 往往仅通过 Logistic 回归获取邻域作用之外的空间变量的模型参数, 而邻域作用的参数通常采用主观赋值的方法。本文提出了 CA 城市模型的多指标评价(Multi-Criteria Evaluation, MCE)形式状态转换规则获取的一种新方法 MonoLoop, 并针对北京市域 1976~2006 年的城市增长开展了该方法的实验。基于这种方法, 一方面利用历史数据可以建立更为客观的状态转换规则; 另一方面也可以大大降低模型参数识别的时间。

关键词:Logistic 回归; 多指标评价; 元胞自动机; 城市增长

中图分类号:P208

文献标识码:B

文章编号:1672-5867(2013)04-0122-04

MonoLoop: A New Approach to Retrieves Status Transition Rule of CA Urban Model

LIU Cui-ling¹, LONG Ying², WANG Yan-hui¹

(1. College of Resource Environment And Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045, China)

Abstract: Status transition rule is the core component of cellular automata, and retrieving status transition rule for CA is the key issue to develop a CA based model. Neighbor influence is the basic driving force for simulating complex physical phenomenon. However, the coefficient of neighbor cannot be identified via traditional logistic regression for its temporal dynamic character. In current CA urban models, coefficient of neighbor is usually set in subjective way. We bring forward an approach named "MonoLoop" to retrieve MCE based status transition rule of CA urban model, and conduct an experiment, using historical urban growth dataset of Beijing metropolitan area in 1976-2006, to test MonoLoop method. It has proved that MonoLoop is capable to identify more objective and accurate status transition rule with less time consuming.

Key words: logistic regression; multi-criteria evaluation; cellular automata; urban growth

0 引 言

近年来开展了诸多基于元胞自动机(Cellular Automata, CA)的城市模型方面的研究, 主要侧重于城市的空间增长的模拟^[1-8]。状态转换规则(Status transition rule)是 CA 城市模型研究的热点和核心之一, 其获取方法有多种, 其中多指标评价(Multi-Criteria Evaluation, MCE)是 CA 城市模型状态转换规则的一种常见形式。Wu^[9]提出

了 $P'_c = P_g \times \text{con}(S'_g = \text{suitable}) \times \Omega'_{i,j}$ 形式的状态转换规则, 其中, P_g 为基于 MCE 方法的城市增长适宜性(或全局概率, Global Probability), 乘以局部的邻域作用 Ω 、环境约束 con 后得到最终的耦合概率(Joint Probability)。Wu^[10]、Wu 和 Webster^[11] 基于 MCE 方法, 采用 AHP 方法对各空间变量进行专家打分, 进而获得状态转换规则, Wu^[9] 基于 Logistic 回归通过对历史数据进行分析获得 MCE 中的空间变量的权重系数。Wu 方法的有待改进之处在于, 基于

收稿日期: 2012-08-03

作者简介: 刘翠玲(1986-), 女, 河北邯郸人, 地图学与地理信息系统专业硕士研究生, 主要研究方向为城镇扩张模拟。

AHP 方法获取的权重系数,具有不可重复性,同时很难通过这一方法反应历史的发展趋势;而在其 Logistic 回归的过程中,因为邻域作用(Neighbor)在不同的循环中处于不断变化之中,很难在回归中考虑,同时回归中没有考虑环境约束,只是在回归之后将通过回归获得的概率乘以这两项作用。环境约束和邻域在其状态转移规则中的参数设定会失之于主观,不能完全反映某一历史阶段的城市空间增长的真实机制。

而 Clark 和 Gaydos^[2]提出了通过利用计算机自动计算不同参数组合(Nested Loops)产生的模拟结果,将其与观察值进行对比,计算其匹配度(the r-squared fit between the actual and predicted number of Urban pixels, Edges in the images, Separate clusters and A modified Lee-Sallee shape index),选择产生最优匹配度的参数集作为模型的参数进行模拟。Clark 和 Gaydos^[2]在其模型中考虑了 5 个参数(每个参数分别有 6, 6, 6, 5, 7 个取值),进而生成共 7560 个参数组,共运算 252 个小时识别最优参数组, Xie, Batty 和 Zhao^[12]也采用类似的方法用于模拟苏州的城市增长。采用这种方法,如果参数增加,则运算时间将大幅增长。对于大多数 CA 城市模型,尤其是用于指导城市规划实践的而不是虚拟城市的模型,其空间变量的数目往往超过 5 个,同时每个参数的供选择值也远超过 6 个,每次循环假设保持同样的计算时间,则总运行时间甚至可达数年,因此,即便运用目前最为先进的工作站,如此高强度的计算仍不可以接受。

本研究对 Wu^[9]、Clark 和 Gaydos^[2]二者的方法进行综合并作一定改进,结合二者的优点,将除邻域作用 neighbor 变量外的空间变量的权重系数通过 Logistic 回归方法利用历史数据获取,而 neighbor 的权重系数则采用笔者提出的单一参数循环方法(MonoLoop),根据最佳匹配度的原则获取^[13,14]。采用 MonoLoop 方法一方面利用历史数据可以获得更为真实全面的城市增长规律(邻域作用、环境约束等),进而对比不同阶段所起到的作用,一方面相比 NestedLoops 方法,可以大幅降低模型参数识别时间。这种方法适用于解决模型的参数变量(如邻域作用、道路修建、自然保护范围变化)在时间上发生变化的情况。本文在第二部分对 MonoLoop 这种获取 CA 城市模型状态转换规则的方法进行具体介绍,第三部分给出该方法的实验应用,最后在第四部分对这种方法进行讨论。

1 方法

CA 城市模型的概念模型如公式 1 所示,总体上元胞在下一次循环中的状态受自身状态、区位变量、政府变量和邻域变量影响,并以 MCE 作为状态转换规则的具体形式。其中,元胞在下一个时刻的状态可以根据该元胞的开发适宜性(Suitability)决定,将开发适宜性可以转变为元胞状态转换的概率(Probability),将其与城市开发阈值(Threshold)对比,如果大于阈值,则认为发生非城市建设用地向城市建设用地的转变,即为 1,反之不发生转变,即为 0。

$$V_{ij}^{t+1} = f\{Suitability_{ij}^t\}$$

$$= f\{V_{ij}^t, LOCATION_{ij}, GOVERNMENT_{ij}, NEIGHBOR_{ij}^t\}$$

$$= f\left\{\begin{aligned} &w_0 + \\ &w_1 \cdot loc_1_{ij} + w_2 \cdot loc_2_{ij} + \cdots + w_k \cdot loc_k_{ij} + \\ &w_{k+1} \cdot gov_1_{ij} + w_{k+2} \cdot gov_2_{ij} + \cdots + w_{k+m} \cdot gov_m_{ij} + \\ &w_{k+m+1} \cdot nei_{ij}^t \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

V_{ij}^t 为 t 时刻的 ij 位置的元胞状态, V_{ij}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻的 ij 位置的元胞状态 f 为状态转换规则, loc_k 为区位变量, gov_m 为政府变量, nei 为邻域变量。

在 MCE 形式的状态转换规则中, 区位类(LOCATION)空间变量($loc_1, loc_2, \cdots, loc_k$)和政府类(GOV-ERNMENT)空间变量($gov_1, gov_2, \cdots, gov_m$)已知,并假设这二类变量在整个模拟过程(模拟起点时刻 $t \sim$ 模拟结束时刻 T)中始终保持不变,而 nei 空间变量取决于 $t-T$ 阶段的模拟结果,其大小一直处于变化状态。时刻 t 和时刻 T 的城市空间形态(即城镇建设用地的空间分布)可以通过遥感影像或历史地形图获得。因此,要实现 $t-T$ 这一阶段的模拟,获取状态转换规则这个问题就转化为识别空间变量的权重系数($w_0 \sim w_{k+m+1}$)这一问题,一般的方法是采用 Logistic 回归来识别权重系数,但鉴于 nei 变量的动态性,其权重系数 w_{k+m+1} 并不能通过 Logistic 回归的方法识别。

本文提出的 MonoLoop 方法是建立在 Logistic 回归基础上的,首先利用 Logistic 回归的方法识别除 nei 变量的其他空间变量的权重系数,其中因变量为是否发生由非城市建设用地向城市建设用地的转变(发生转变为 1, 否则为 0),自变量为 nei 之外的空间变量。利用 ESRI ArcGIS9.0 的 Sample 工具,对自变量对应的栅格形式的空间数据进行采样以获得自变量数据,对时刻 t 和 T 的城市空间形态数据作栅格代数减法运算获得因变量数据^[15]。将自变量和因变量在 SPSS 环境中进行分析,可以获得权重系数 w_{0-k+m} ,它的大小反映了开发概率受空间变量影响的基本规律。

通过 Logistic 回归方法确定除 nei 变量之外的空间变量的权重参数之后,保持这些参数不变,在 CA 城市模型中增加一个循环过程,不断调整 nei 的权重系数 w_{k+m+1} (以下简称为 wN),对比不同 wN 的模拟值(Simulation)与观察值(Observation),将具有最佳匹配度的 wN^* 与 Logistic 回归获得的 w_{0-k+m} 一同代入 MCE 形式的状态转换规则,即可实现城市空间形态模拟的功能。模拟值与观察值的匹配度的表征指标较多,本文选择 Goodness-of-fit(下文简称“GOF”),即点对点匹配度来评价模拟值与观察值的匹配度,其理论上的最大值为 1。对于 wN 数值范围的选择,为了降低 MonoLoop 过程的模型运行时间,先在较大的范围内不断尝试各个数值进行计算,之后根据其计算结果不断细化数值选择的范围。不同的 wN 值的模拟过程中,其余参数保持不变,包括目标建设用地总规模。

下面以识别北京市域 1976~2006 年的 CA 城市模型的状态转换规则为例,介绍 MonoLoop 方法的实验应用。

2 实 验

2.1 数 据

为了验证 MonoLoop 方法的实用性,本文基于此方法建立了北京市域的城市空间增长模型 BJ-CA,用于识别 1976~2006 年转换规则的过程中。该模型模拟的空间范

围为北京市域(16 410 km²),元胞大小为 500 m×500 m 的矩形,邻域为 Moore(3×3 矩形、8 个邻近元胞),开发平台为 VBA 和 ESRI Arcobjects9.0。BJ-CA 模型的变量见表 1,包括 6 个区位变量、3 个政府变量,来自于所掌握的矢量数据,并利用 ArcGIS 进行处理,达到模型应用的目的(其中区位变量以吸引力来表征)。

表 1 BJ-CA 模型变量一览表
Tab.1 Variables in BJ-CA

类型	名称	数值范围	空间分布	解释
LOCATION	l_tam	0~1		天安门的吸引力
	l_vcity	0~1		重点新城的吸引力
	l_city	0~1		新城的吸引力
	l_vtown	0~1		重点镇的吸引力
	l_town	0~1		一般镇的吸引力
	l_road	0~1		道路的吸引力
GOVERNMENT	g_plan	0,1		是否为规划城市建设用地
	g_ldrss	0~1 共 8 级		农业用地适宜性
	g_conf	0~1 共 5 级		是否为禁止建设区
NEIGHBOR	nei	0~1		邻域内的城市建设元胞比例

注:变量空间分布图中,白色对应 1,黑色对应 0,灰度表示 0~1 之间的数值。

1976 和 2006 的土地利用数据来自于遥感影像解译,其空间分布如图 1 所示。

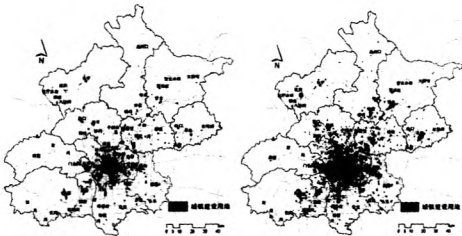


图 1 1976 年(左)及 2006 年(右)城镇建设用地分布图
Fig.1 Urban built-up map of 1976 (Left) and 2006 (Right)

2.2 转换规则获取

将 1976 年至 2006 年的新增城市建设用地作为 Logistic 回归的因变量,将表 1 中的前 9 个变量作为自变量,回归结果见表 1,回归的准确度可以达到 92.8%,所有变量的显著水平均为 0.001,回归结果可以接受。

表 2 1976~2006 年 Logistic 回归系数表

Tab.2 Variables in the equation of logistic regression in 1976~2006

Variable	B	S. E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
l_tam	3.377 9	.202	280.788	1	.000	29.310
l_vcity	2.078 7	.114	335.053	1	.000	7.994
l_city	3.053 0	.096	1020.426	1	.000	21.178
L_vtown	-1.316 1	.126	108.793	1	.000	.268
l_town	-2.478 1	.125	394.613	1	.000	.084
L_road	5.050 4	.257	385.287	1	.000	156.081
g_plan	-1.232 6	.085	210.361	1	.000	.292
g_ldrss	-2.196 7	.127	300.483	1	.000	.111
g_conf	2.432 8	.108	503.234	1	.000	11.391
Constant	-7.684 8	.263	852.867	1	.000	.000

Logistic 回归之后,利用 MonoLoop 方法识别具有最佳 GOF 的 nei 的权重系数 wN,进而完善 CA 的转换规则。关于 wN 范围的选择,本研究先在较大的范围内选择其取值(0~100),根据分析结果类似二分法缩小取值范围,以降低 MonoLoop 过程的模型运算时间^[2]。

MonoLoop 过程共采集了取值范围位于 0~100 的 39

个 wN 的取值样本,用时 7 068.5 s (425 iterations, 16.6 s/iteration)。GOF 的响应曲线如图 2 所示,可以看出 wN 取值范围处于 9 ~ 20 之间时, GOF 相对较为稳定,保持在 94.5% 左右; $wN > 20$, GOF 不断下降; $wN = 100$ 时 GOF 达到最小值 92.37%。最后选取 $wN^* = 12.6$ 用于该历史阶段的模拟,其点对点准确度可以达到 95.00% 的水平。

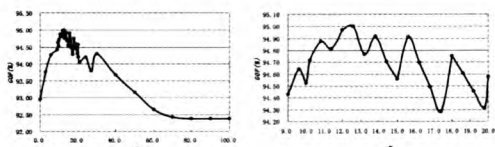


图2 MonoLoop 过程的 $dGOF/dwN$ 曲线
(左图为全局效果,右图为局部效果)

Fig.2 $d(GOF)/d(wN)$ of MonoLoop procedure

2.3 模拟结果

利用通过 Logistic 回归和 MonoLoop 所获取的所有空间变量的权重系数代入 CA 状态转换规则进行模拟。模拟结果如图 3 所示。

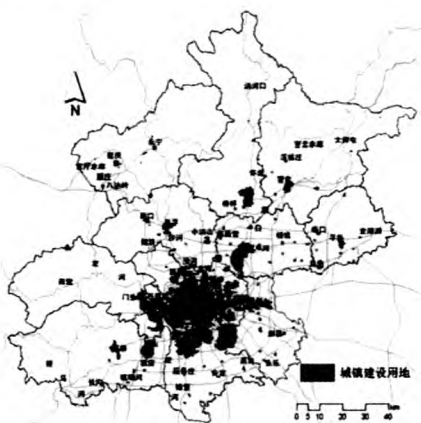


图3 模拟结果(2006年)

Fig.3 Simulated urban form of year 2006

3 结束语

经过证明, MonoLoop 方法适用于 MCE 形式的 CA 城市模型状态转换规则的提取。

1) wN 的取值对模拟结果比较敏感,如果采用传统的主观赋值方法,则会对模拟结果有较大的影响,这也进一步证明采用 MonoLoop 方法的必要性;

2) MonoLoop 的过程就是对 GOF 验证优化的过程,这种方法相比 NestedLoops 方法可以节约大量时间,仅用不到两个小时的计算就可以识别出相对准确的状态转换规则;

3) wN 的科学识别,使得能够将邻域作用与其他空间变量的权重系数进行对比,进而可以了解邻域作用在城市增长过程中所起到的作用。如果不同的历史阶段都采用 MonoLoop 方法,则可以使得邻域作用的动态对比成为可能,这是传统的主观赋值的方法所无法实现的;

4) MonoLoop 方法也可以用于识别邻域作用的空间分异效应,进而对比邻域作用在研究范围内不同区域所起到的不同作用。

参考文献:

- [1] White R W, Engelen G. Cellular Automaton as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modeling [J]. Environment and Planning B, 1997(24): 235 - 246.
- [2] Clark K C, Gaydos L J. Loose - Coupling a Cellular Automation Model and Gis: Long - Term Urban Growth Prediction For San Francisco and Washington/Baltimore [J]. Geographical Information Sciences, 1998, 12(7): 699 - 714.
- [3] Xie Y. Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban Dynamics. Unpublished Ph. D. dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N. Y, 1994.
- [4] Ward D P, Murray A T, and Phinn S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, 24(6): 539 - 558.
- [5] Yeh A G O, Li X. A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2001(28): 733 - 753.
- [6] Yeh A G O, Li X. A cellular automata model to simulate development density for urban planning [J]. Environment and Planning B, 2002(29): 431 - 450.
- [7] Yeh A G O, Li X. Errors and uncertainties in urban cellular automata [J]. Computers, Environment and Urban systems, 2006, 30(1): 10 - 28.
- [8] He C, Okada N, Zhang Q, Shi P, and Zhang J. Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata [J]. Landscape and Urban Planning, 2008(86): 79 - 91.
- [9] 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.
- [10] Wu F. Simland: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP - derived transition rules [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(1): 63 - 82.
- [11] Wu F, Webster C J. Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation [J]. Environment and Planning B, 1998(25): 103 - 126.
- [12] Xie Y, Batty M, and Zhao K. Simulating emergent urban form: Desakota in China. Center for Advanced Spatial Analysis (University College London), Working Paper 95, London, 2005.
- [13] 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 等. 基于约束性 CA 方法的北京城市形态情景分析[J]. 地理学报, 2010, 65(6): 643 - 655.
- [14] 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性 CA 制定城市增长边界[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 999 - 1 008.
- [15] 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.

[编辑:陈珏西]

作者：[刘翠玲](#)，[龙瀛](#)，[王艳慧](#)，[LIU Cui-ling](#)，[LONG Ying](#)，[WANG Yan-hui](#)
作者单位：[刘翠玲,王艳慧,LIU Cui-ling,WANG Yan-hui\(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京,100048\)](#)，[龙瀛](#)
[,LONG Ying\(北京市城市规划设计研究院,北京,100045\)](#)
刊名：[测绘与空间地理信息](#)
英文刊名：[Geomatics & Spatial Information Technology](#)
年，卷(期)：2013, 36(4)

参考文献(15条)

1.[White R W;Engelen G Cellular Automaton as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modeling](#) 1997(24)
2.[Clark K C;Gaydos L J Loose-Coupling a Cellular Automation Model and Gis:Long-Term Urban Growth Prediction For San Francisco and Washington/Baltimore](#) 1998(07)
3.[Xie Y Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban Dynamics](#) 1994
4.[Ward D P;Murray A T;Phinn S R A stochastically constrained cellular model of urban growth](#)[外文期刊] 2000(06)
5.[Yeh A G O;Li X A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS](#) 2001(28)
6.[Yeh A G O;Li X A cellular automata model to simulate development density for urban planning](#) 2002(29)
7.[Yeh A G O;Li X Errors and uncertainties in urban cellular automata](#)[外文期刊] 2006(01)
8.[He C;Okada N;Zhang Q;Shi P and Zhang J Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata](#)[外文期刊] 2008(86)
9.[Wu F Calibration of stochastic cellular automata:the application to rural-urban land conversions](#) 2002(08)
10.[Wu F Simland:a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules](#) 1998(01)
11.[Wu F;Webster C J Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation](#) 1998(25)
12.[Xie Y;Batty M;Zhao K Simulating emergent urban form:Desakota in China. \[Working Paper95\]](#) 2005
13.[龙瀛;沈振江;毛其智 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析](#)[期刊论文]-[地理学报](#) 2010(60)
14.[龙瀛;韩昊英;毛其智 利用约束性CA制定城市增长边界](#)[期刊论文]-[地理学报](#) 2009(08)
15.[黎夏;叶嘉安;刘小平 地理模拟系统:元胞自动机与多智能体](#) 2007

引用本文格式：[刘翠玲,龙瀛,王艳慧,LIU Cui-ling,LONG Ying,WANG Yan-hui MonoLoop:CA城市模型状态转换规则获取的一种方法](#)
[期刊论文]-[测绘与空间地理信息](#) 2013(4)