

北京城市发展模型：城市空间形态模拟的平台

龙瀛 沈振江 杜立群 毛其智 高占平⁴

摘要：在后奥运分析、城市总体规划实施评价和建国 100 周年远景预测等一系列背景和需求下，开发了基于元胞自动机（CA）和多个体系统（MAS）的北京城市发展模型（Beijing Urban Developing Model, BUDEM），现阶段完成了 BUDEM 第一阶段的工作，即基于 CA 进行北京城市空间形态的模拟。文中对基于 CA 的城市空间增长模拟的国际国内相关研究进展进行概述，在城市空间增长理论的支持下，提出了城市空间形态模拟 CA 的概念模型，并给出基于 Logistic 回归和 MonoLoop 方法获取 MCE 形式的状态转换规则权重系数的突破，以及对通过多种方法获得的模型所需数据进行介绍。将模型应用于规划实践，（1）利用 BUDEM 模型对北京历史不同阶段的城市空间增长的驱动力进行识别，对各个阶段的发展模式进行了对比分析；（2）给出了实现制定的空间形态，即 2020 年北京规划空间布局方案，所需要的空间保障政策；（3）作为城市空间政策模拟的平台，对 2049 年北京的城市空间形态进行了模拟。

关键词：元胞自动机 政策模拟 城市空间增长模拟 Logistic 回归 北京市域 BUDEM

1 引言

受整体的宏观经济以及奥运经济的影响，北京近年来的城镇空间扩展速度较快，为了对后奥运（2009 年）、总体规划期末（2020 年）和建国 100 周年（2049 年）等未来不同阶段的城市空间布局进行判断和预警，进而为下一阶段开展新一轮的城市总体规划提供支持，同时考虑到目前国际上主要的大城市都已经有了自身的城市模拟模型，而北京在这一领域仍为空白，因此开发了北京城市发展模型（Beijing Urban Developing Model, BUDEM），该模型是基于元胞自动机（Cellular automata, CA）和多主体系统（Multi-agent system, MAS）的时空动态的综合城市模型，直接面向北京市的城市规划编制和管理部门使用，其模拟的空间范围为北京市域 16410km²，模型精度为 500m。现阶段完成了 BUDEM 第一阶段即城市扩展模型 CA 部分的工作，实现了模拟北京城市空间增长（空间形态）的功能。

关于城市模型，其研究始于 20 世纪初期，主要经历了形态结构模型、静态模型、动态模型三个发展阶段。传统的基于微分方程的动态或准动态动力学城市模型，往往仅从宏观的空间尺度出发，研究对象也往往是对城市居住区、商业区等的机械划分及其相互作用，或区位选择，无法反映造成城市动态性、自组织性和突变性等城市微观结构和理性人个体行为。随着以 GIS 为代表的信息技术和复杂性科学的发展，基于人工生命，离散动力学的城市模型是目前的研究重点，近年来基于 CA 进行了诸多城市空间增长方面的模拟研究。

国际上基于 CA 开展城市空间增长方面的研究起步比较早，这一方面的应用也是 CA 当前应用和研究的重点之一。White 和 Engelen(1993)对将 CA 应用于城市规划领域进行了尝试，White 和 Engelen (1997)利用 CA 模拟了美国辛辛那提的土地利用模式；Clark 和 Gaydos(1998)利用所建立 SLEUTH 模型，对美国旧金山湾和华盛顿-巴尔的摩地区进行城市增长的远景模拟，是对真实城市进行模拟的早期实践；Batty 等(1991, 1994, 1996, 1997, 1998, 1999)基于分形理论和 CA 对城市的形成和扩展进行了系列研究，取得了较大的进展；Xie(1994)对美国 Buffalo 城市土地利用变化进行有效模拟；Wu(1998a, 1998b, 2002)实现 CA 与 MCE 的有机集成，分别采用 AHP 和 Logistic 等方法获得状态转换规则，对中国广州的城市扩张进行模拟。

总体上,采用CA模型模拟城市的空间增长,在国际上有过较多探讨,已经相对比较成熟;国内的部分学者做了一定的文献综述、理论分析、框架层次的工作,并有在珠江三角洲、海口、武汉、福州、北京(部分区域,非市域范围)等真实城市模拟的应用案例,以北京市域为研究区域的相关研究并没有文献报道,同时已有的文献并没有报道将城市规划作为CA的空间变量。作为城市空间形态模拟的平台,BUDEM直接面向北京城市规划的实践工作,是对CA在超大城市城市规划部门应用的可能性和实际效果的有力尝试。在建模方法上,BUDEM采用Logistic回归和MonoLoop集成的方法获取CA的状态转换规则,并以此作为实现指定空间形态的核心方法;在考虑的城市发展因素方面,引入了复杂环境约束、城市规划等其他CA城市增长模型少有考虑并体现中国城市发展特色的研究视角;在模型应用方面,采用Logistic回归方法获取北京多年来不同历史阶段的发展模式,基于此给出北京2020年规划方案的实现策略,并结合中国国情,提出在2020年规划方案基础上不同发展政策作用下城市远景空间增长(2049年)的模拟模式。

2 建模方法

2.1 城市空间增长理论

经典的城市土地利用模型显示,土地开发受区位和地理条件影响,Alonso(1964)在其单中心城市区位理论中指出,距离城市中心的距离是影响城市土地利用的主要因素,随着距离的增大,可达性和交通成本升高,最优的用地类型也随之改变;Doxiadis 创建的人类聚居学指出,人类聚居的区位主要受到三种力的吸引:现有城市中心、交通干道、自然景观(吴良镛,2001)。这两个文献都对城市空间增长的驱动因素进行了阐述,而 Hedonic 模型(Hedonic Price Model,享乐价格模型/方法)则对其给出了更为清晰的框架。Hedonic 模型认为商品由很多不同的属性构成,其价格由所有属性带来的效用决定,由于各个属性的数量和组合方式的不同,商品价格产生差异(Lancaster,1966),例如Butler(1982)认为影响住宅价格的因素有三类,区位 Location、建筑结构 Structure 和邻里环境 Neighborhood。住宅价格反映的是消费者对住宅属性的偏好之和,而城市的开发同样如此,也是开发商对地块的相关属性的偏好之和,因此参考 Hedonic 模型的理论框架,同时考虑数据的可获得性,选择下列影响城市增长的要素作为 CA 模型的空间变量:

(1) 区位变量:与各级城镇中心的最短距离(天安门 d_{tam} 、重点新城 d_{vcity} 、新城 d_{city} 、重点镇 d_{vtown} 、一般镇 d_{town})、与河流的最短距离 d_{river} 、与道路的最短距离 d_{road} 、与镇行政边界的最短距离 d_{bdtown} ;

(2) 邻里变量:邻域内的开发强度 $neighbor$ (即邻域内不包括自身的城市建设元胞数目与邻域内邻近元胞的数目 8 的商);

(3) 政府变量:城市规划 $planning$ 、土地等级 $landresource$ 、禁止建设区 con_f 。

2.2 CA 概念模型

基于 CA 建立 BUDEM 模型,其基本要素如下:

- (1) 元胞空间 (Lattices): 北京市域, 16410km² (可根据需要调整模拟范围);
- (2) 元胞 (Cells): 500m*500m, 65628 个;
- (3) 状态变量 (Cell States): V=1 (城市建设用地), V=0 (非城市建设用地);
- (4) 转换规则 (Transition Rules): 多属性分析 (Multi-criteria Evaluation, MCE) 方法;
- (5) 邻域 (Neighborhoods): 摩尔邻域 (Moore 邻域, 3*3 矩形、8 个邻近元胞);
- (6) 离散时间 (Discrete Time): 通过城市建设用地总量建立离散时间与实际时间 (单位: 年) 的对应关系。

BUDEM 的概念模型如公式 1 所示。

$$\begin{aligned}
 \text{公式 1} \quad V_{i,j}^{t+1} &= f\{V_{i,j}^t, Global, Local\} \\
 &= \{V_{i,j}^t, LOCATION, GOVERNMENT, NEIGHBOR\} \\
 &= f\left\{ \begin{array}{l} V_{i,j}^t, isrural_{i,j}, isagri_{i,j} \\ d_tam_{i,j}, d_vcity_{i,j}, d_city_{i,j}, d_vtown_{i,j}, d_town_{i,j}, \\ d_river_{i,j}, r_road_{i,j}, d_bdtown_{i,j}, \\ planning_{i,j}, con_f_{i,j}, landresource_{i,j}, \\ neighbor_{i,j}^t \end{array} \right\} \\
 &V_{i,j}^t \text{ 为 } t \text{ 时刻的 } ij \text{ 位置的元胞状态} \\
 &V_{i,j}^{t+1} \text{ 为 } t+1 \text{ 时刻的 } ij \text{ 位置的元胞状态} \\
 &f \text{ 为元胞的状态转换函数 (转换规则)}
 \end{aligned}$$

本研究只模拟非城市建设用地向城市建设用地的转变, 逆向过程不模拟, 也不考虑城市的再开发 (Redevelopment) 过程。

2.3 状态转换规则

状态转换规则是 CA 研究的热点和核心之一, 本研究采用 MCE 方法建立元胞状态转移规则。Landis(1994, 1995, 1998a, 1999b) 所开发用于模拟城市发展形态的 CUF 和 CUF-2 (California Urban Future Model), 是多属性分析方法在城市增长方面的典型应用, 但其基本研究单元为 DLU (开发土地单元), 并没有基于 CA 的方法。基于 CA 模拟城市增长方面, Wu(2002) 和黎夏(2007) 提出了如公式 2 所示的状态转换规则:

$$P_c^t = P_g * con(s_{ij}^t = suitable) * \Omega_{i,j}^t \quad \text{公式 2}$$

Wu(1998a, 1998b) 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(2002) 基于 Logistic 回归 (简称 LR) 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 的方法的不足之处在于, 基于 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过于主观,不能完全反映某一历史阶段的城市空间增长的机制。

而 Clark 和 Gaydos(1998)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,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 考虑了五个参数,进而生成共 7560 个参数组,共运算 252 个小时识别最优参数组。如果参数增加,则运算时间将大幅增长,BUDEM 共 14 个参数,如果每个参数有 6 个选择,则总运行时间可达 298189 年,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(2002)、Clark 和 Gaydos(1998)二者的方法综合并作一定改进,结合二者的优点,将除邻域作用 *neighbor* 变量外的其余 13 个空间变量代入 Logistic 回归方程中,利用历史数据获取因变量,回归得到回归系数即权重系数 w^{*23} ,在此基础上利用单一参数循环方式(MonoLoop),根据最佳匹配度的原则识别 *neighbor* 的权重系数 w^* ,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,一方面大大降低了模型运算的时间。最终确定的状态转换规则如公式 3 所示,首先利用历史数据获取不同阶段的 Logistic 回归的系数 β ,之后计算城市增长的适宜性 s_{ij}^t 并计算初始概率 p_g^t ;假定不同阶段城市开发的相对门槛相同,引入随机因素 RI ,将初始概率变换为最终概率,即 p_{ij}^t ;将最终概率与阈值对比,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。

公式 3

$$\begin{aligned}
 s_{ij}^t &= \beta_0 + \beta_1 * isrural_{ij} + \beta_2 * isagri_{ij} \\
 &+ \beta_3 * d_tam_{ij} + \beta_4 * d_vcity_{ij} + \beta_5 * d_city_{ij} + \beta_6 * d_vtown_{ij} + \beta_7 * d_town_{ij} \\
 &+ \beta_8 * d_river_{ij} + \beta_9 * r_road_{ij} + \beta_{10} * d_bdtown_{ij} \\
 &+ \beta_{11} * planning_{ij} + \beta_{12} * con_f_{ij} + \beta_{13} * landresource_{ij} \\
 &+ \beta_{14} * neighbor_{ij}^t \\
 p_g^t &= \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \\
 p_{ij}^t &= \exp \left[\alpha \left(\frac{p_g^t}{p_{g\max}^t} - 1 \right) * RI_{ij}^t \right] \\
 RI_{ij}^t &= 1 + (\gamma_{ij}^t - 0.5) / k \\
 \text{if } p_{ij}^t &> p_{threshold} \text{ then } V_{ij}^{t+1} = 1
 \end{aligned}$$

式中:

- s_{ij}^t : 开发适宜性;
- β : Logistic 回归的系数;
- p_g^t : 初始转换概率;
- $p_{g\max}^t$: 某一循环过程中的最大初始转换概率;
- p_{ij}^t : 最终转换概率;
- $p_{threshold}$: 控制城市增长的阈值;
- RI : 随机项;
- γ : 0~1 范围内的随机变量;

- k : 随机系数, 用于调整 RI 的大小, k 值越大, RI 越小;
- α 为离散系数, 取值范围为 $1 \sim 10$, 表示区位选择的严格程度。

3 模型应用

3.1 历史分析

采用 Logistic 回归的方法提取不同历史阶段的规则, 进而对不同历史阶段的城市增长模式进行对比。各个历史阶段的回归系数如表 1 所示, 纵向分析各个历史阶段, 可以看出城市增长的驱动力差异较大, 市场和政府在其中所起到的作用也存在差异 (对改革开放的背景也是个印证): 2001~2006 年: 滨河发展显著, 中心城增长次之, 沿道路发展不显著; 1996~2001 年: 沿道路开发显著, 现在的一般新城的发展次之, 一般乡镇发展速度较慢; 1991~1996 年: 沿道路开发显著, 滨河发展次之; 1986~1991 年: 沿道路发展显著, 东部卫星城 (即现在的重点新城) 次之。

横向对比不同要素随时间的变化, 可以看出: $planning$: 保持正值, 1986~1991 年间所起到的作用最大, 而近年来基本持平, 也反映了社会主义市场经济初期城市规划对开发的引导作用更大, 近年来市场机制的引入, 城市开发正不断由市场选择来决定; con_f : 保持负值, 绝对值逐渐增加, 其所产生的作用正不断加强, 即开发对禁止建设区的保护的力度不断增大, 可持续性不断增强; $landresource$: 保持负值, 但绝对值逐渐降低, 产生的作用不断下降, 即开发对等级较高的适于农业生产的土地的占用正逐渐增大; d_bdtown : 1996 年之前为正值, 之后为负值, 即近年来在乡镇边界附近的开发正逐渐增多, 行政界限对开发的限制正逐渐淡化。

表 1 不同历史阶段的 Logistic 回归系数表

variable	$B(2001-2006)$	$B(1996-2001)$	$B(1991-1996)$	$B(1986-1991)$	$B(1986-2006)$
w_{d_tam}	-0.000042	-0.000049	-0.000054	-0.000012	-0.00003
w_{d_vcity}	-0.000018	-0.000032	0.000003	-0.000047	-0.00002
w_{d_city}	-0.000032	-0.000094	-0.000034	-0.000028	-0.00004
w_{d_vtown}	-0.000019	-0.000029	-0.000018	-0.000014	0.00009
w_{d_town}	-0.000036	0.000129	0.000023	-0.000021	0.00010
w_{d_river}	-0.000224	-0.000078	-0.000066	-0.000021	-0.00013
w_{d_road}	0.000061	-0.000734	-0.000365	-0.001232	-0.00039
w_{d_bdtown}	-0.000057	-0.000463	0.000001	0.000182	-0.00002
$w_{planning}$	0.312422	0.459742	0.416635	1.302933	0.45571
w_{con_f}	-1.076304	-0.613198	-0.449983	-1.274498	-1.47920
$w_{landresource}$	-0.023686	-0.140539	-0.131834	-0.350835	-0.04198
$w_{isrural}$	3.284309	-3.774535	-3.949259	-5.534083	0.63520
w_{isagri}	4.376267	3.279759	1.802018	-0.156322	2.90697

3.2 BEIJING2020

2004 年国务院批复了《北京城市总体规划 (2004~2020 年)》, 其空间布局图即为 PLANNING2004 数据, 如何实现该总体规划所确定的空间布局, 以及目前到 2020 年之间不同水平年的城市空间的可

能形态，是北京市的规划管理部门所关心的重要问题。

如何实现指定的城市空间形态 (Desired form)，对于 CA 这种典型的非线性模型，是不能通过微分方程或最优化理论求解最佳的模型参数，前文也论述了采用计算机搜索算法的不现实性。基于“建模方法”部分所提出的 Logistic 回归和 MonoLoop 集成的建立状态转换规则的方法，求取实现指定空间形态的参数。

3.2.1 Logistic 回归

将PLANNING2004 与LANDUSE2006 作代数减法运算，作为Logistic回归的因变量，即可获得实现规划方案的权重系数 w^{f-13} 的数值，回归结果如表 2所示，回归的准确度可以达到 96.8%，同时各空间变量的显著程度较高。

表 2 2006 年~2020 年 Logistic 回归系数表

Step		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
1	isrural	6.88621	.311	489.806	1	.000	978.683
	isagri	6.97187	.212	1081.601	1	.000	1066.213
	d_tam	-.00010	.000	351.190	1	.000	1.000
	d_vcity	-.00003	.000	22.971	1	.000	1.000
	d_city	-.00010	.000	242.798	1	.000	1.000
	d_vtown	-.00028	.000	512.563	1	.000	1.000
	d_town	-.00011	.000	46.814	1	.000	1.000
	d_river	-.00052	.000	162.656	1	.000	.999
	d_road	.00096	.000	110.505	1	.000	1.001
	d_bdtown	-.00027	.000	10.079	1	.001	1.000
	planning	8.77071	.270	1055.034	1	.000	6442.743
	con_f	-.20097	.138	2.111	1	.146	.818
	landresource	-.09355	.039	5.850	1	.016	.911

3.2.2 MonoLoop

共尝试了 27 个 wN 的试验值，计算了 2997 个Iteration，用时 21.5h， dG/dw 曲线如图 1所示，可以看出， wN 取值范围处于 0~5 之间时， G 指标较为稳定，保持在 97.6%左右； wN 大于 5 之后， G 不断下降，直到 wN 为 35 时到达最低点 93.0%； wN 大于 35 之后， G 值继续上升，可达到 95.3%的水平，如果 wN 值继续增大，则第一次循环发生状态变化的元胞数量过大，甚至超过总的模拟目标，为不合适的取值。因此选取 $wN^* = 4.59808$ 用于BEIJING2020 的模拟，其点对点匹配度可以达到 97.6%的水平，距离最佳匹配度 98.9%相差 1.3%，较为理想。

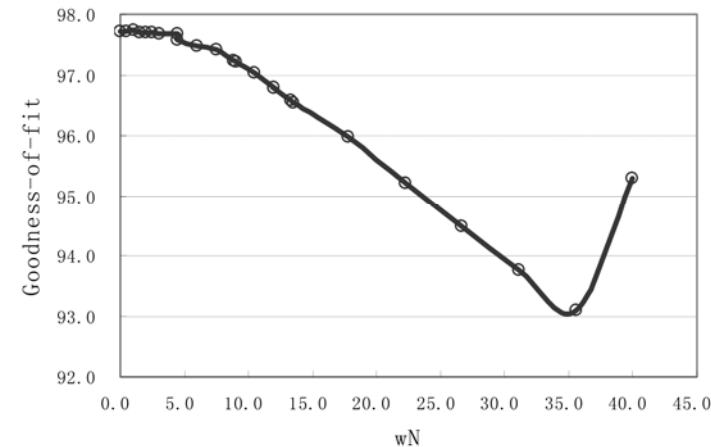


图 1 BEIJING2020 MonoLoop 过程的 dG/dw 曲线 (G 单位: %)

3.2.3 模拟结果

利用通过Logistic回归和MonoLoop所获取的权重系数 w^{I-13} 和 w^N ,代入元胞状态转换规则进行模拟,经过 208 次Iteration,总的已开发元胞达到 10104 个,模型停止运行,运算时间为 6297s (30.3s/Iteration)。模拟结果如图 2所示,从空间分布上也可以看出模拟的结果与规划方案的匹配程度较高。第 1~207 次Iteration的模拟结果对应未来不同阶段的可能的城市形态,与最终模拟结果一同,可以用于城市规划管理部门的预警。

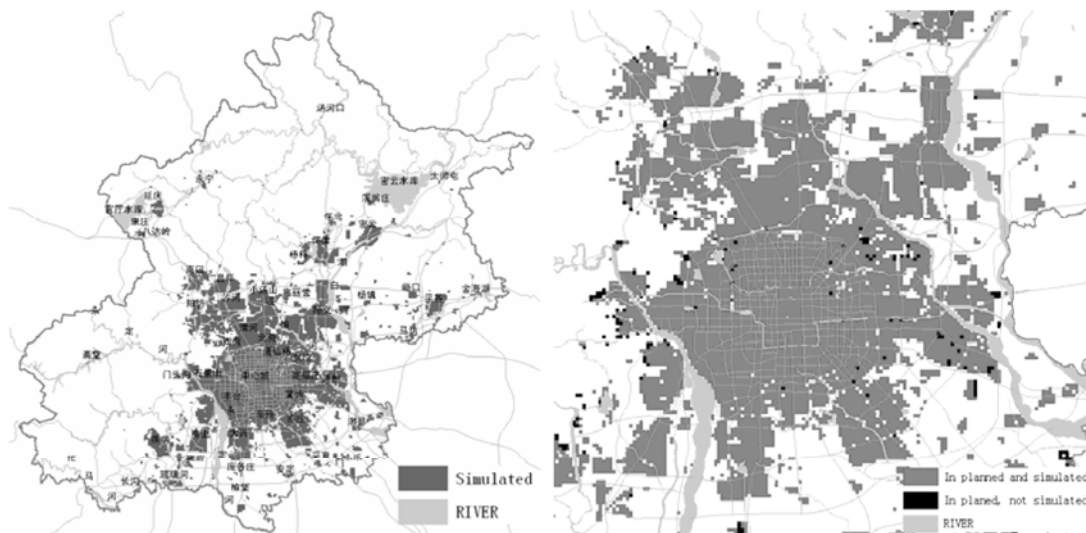


图 2 BEIJING2020 模拟结果 (左) 及局部区域与规划对比图 (右)

3.2.4 结果分析

根据回归获取的系数与不同历史阶段的回归系数进行对比,进而可以给出要实现 BEIJING2020 的空间发展政策。以与 2001-2006 年的回归系数的对比结果为例,相比这一历史阶段的城市增长政策,规划期内需大力强化规划政策的实施力度,并重视沿道路的城市发展,加大重点镇的建设强度,同时,规划期内对禁止建设区的保护力度不需要强于该历史阶段。

通过将 BUDEM 模型应用于 BEIJING2020,可以判断现有的城市空间增长政策与模型识别的政策是否相符,如果不符合,可以给出相应的政策调整措施。同时通过调整不同空间变量的权重系数,可以实现其他不同空间政策作用下的空间发展情景的模拟,也可以对政府的拟采用的空间发展政策进行模拟,进而给出相应的空间预警。

3.3 BEIJING2049

目前北京市的规划部门制定的城市总体规划的规划期末为 2020 年,而对 2049 年即北京作为新中国首都 100 周年这一时期的城市空间形态并没有进行规划或预测。为了对下一轮总体规划修编做好技术储备并做好规划的预警工作,有必要对 2020 年至 2049 年的城市空间形态进行模拟,主要包括两方面,首先是对城市建设用地总量的预测,其次为对该总量在空间上分布的模拟。

假定 2020 年的规划方案可以实现,在 2020 年的规划方案的基础上进行 BEIJING2049 的预测,相比在 2006 年现状土地利用的基础上进行预测,如果假定 BEIJING2020 年的规划方案可以实现,可以

降低预测的不确定性。因为在中国土地的开发受规划的引导作用较强，规划可以解释的土地开发比例

$$y = a + b * (x - c)^d$$

较大，即大多数开发都处于规划区范围内。以公式 5 进行 BEIJING2049 的城市建设用地总量的预测：

公式 4

式中， $a=2344 \text{ km}^2$ （为 2020 年的规划城市建设用地规模）， $b=30 \text{ km}^2/\text{a}$ （每年增长 30 km^2 ）， $c=2020$ ， x 为年份， y 为预测的城市建设用地总量（ km^2 ）， d 为增长系数， $d=1$ 时为线性增长，每年增长 30 km^2 ， $d < 1$ 时为递减增长，每年增长的面积小于 30 km^2 ， $d > 1$ 时为递增增长，每年增长的面积大于 30 km^2 ，不同的 d 值对应不同的城市建设用地总量的增长情景。

在总量预测的基础上，利用 CA 对城市建设用地的空间分布进行模拟，不同的空间发展情景，可以产生相同总量原则下不同的城市空间形态。在 CA 的状态转换规则中，参数权重的大小表示相应政策实施的强度（当为 0 时表示不采用该政策），而参数自身的空间分布也属于空间发展政策的范畴，因此，通过调整空间变量的权重系数和空间变量的自身分布，可以实现不同空间发展政策模拟的功能。

利用 BUDEM 可以模拟的 BEIJING2049 的发展情景可以包括：蔓延情景、“葡萄串”情景、可持续发展情景、新城促进发展情景、中心城继续发展情景、小城镇促进发展情景、滨河发展情景、道路促进发展情景、农村建设用地控制情景、农田保护情景、区域协调情景（区县、乡镇层次）、基准发展情景（不同历史阶段）等。篇幅有限，本文仅给出可持续发展情景，即在充分考虑城市惯性增长的前提下，综合考虑城市增长的促进因素，又对城市发展的约束条件进行统筹考虑。模拟结果如图 3 所示，该情景的特点是实现的可能性较大，在尊重城市经济基本理论的前提下尽可能地尊重自然资源的保护和风险的避让。

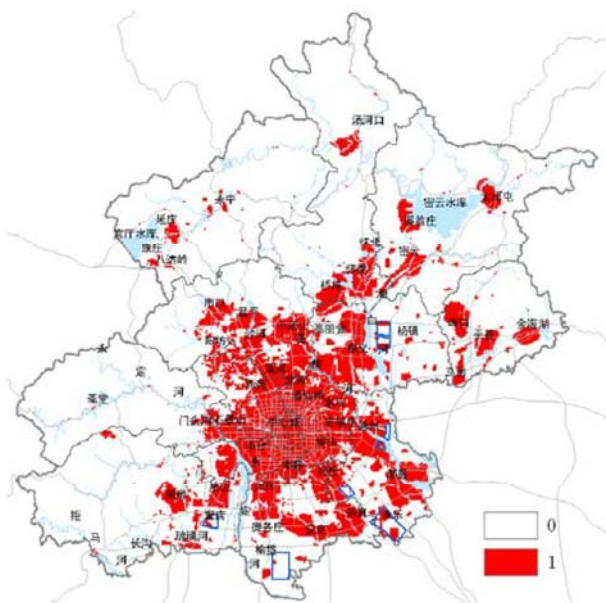


图 3 BEIJING2049 空间形态模拟图

4 结论与讨论

本文在系统整理自 1986 年以来北京市域土地利用、道路，以及其他重要的基础数据，建立完善

的城市空间增长模拟的数据平台基础上,识别了不同阶段的城市空间增长的驱动力,并在横向对各阶段的驱动因素进行了对比分析,在纵向对不同阶段的发展模式进行了对比;针对北京 2020 年的期望空间布局(总体规划),提出基于 Logistic 回归和 MonoLoop 结合的方法获取状态转换规则,通过与历史驱动力的对比给出规划方案的实现策略;针对北京 2049 年,给出不同的空间发展政策作用下的城市空间增长的情景。

作为 BUDEM 第一阶段工作的完善,计划将 BUDEM 模型应用于北京市的规划管理和规划编制的实践,模拟不同的空间发展政策对城市空间增长的影响,同时考虑在模拟城市空间沿平面扩展的基础上,向纵向即城市发展密度模拟的方向扩展,并拟将元胞状态扩展到多种用地类型,进行中观即街区尺度的城市空间形态模拟的尝试,深化 CA 部分的模型工作。

参考文献

1. Alonso, W. (1964). *Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
2. Batty, M. (1991). Cities as Fractals: Simulating Growth and Form. In T. Crilly, R. A. Earnshaw, and H. Jones (eds.), *Fractals and Chaos*. Springer-Verlag, New York, 41-69.
3. Batty, M., and Xie, Y. (1994). From Cells to Cities. *Environment and Planning B*, 21, 31-48.
4. Batty, M., and Xie, Y. (1996). Preliminary Evidence for a Theory of the Fractal City. *Environment and Planning A*, 28, 1745-1762.
5. Batty, M. (1997). Cellular Automata and Urban Form: A Primer. *Journal of the American Planning Association*, 63, 266-274.
6. Batty, M., and Xie, Y. (1997). Possible Urban Automata. *Environment and Planning B*, 24, 175-192.
7. Batty, M., Couclelis, H., and Eichen, M. (1997). Urban Systems as Cellular Automata. *Environment and Planning B*, 24, 159-164.
8. Batty, M. (1998). Urban Evolution on the Desktop: Simulation Using Extended Cellular Automata. *Environment and Planning A*, 30, 1943-1967.
9. Batty, M., Xie, Y., and Sun, Z. (1999). Modeling Urban Dynamics through GIS-Based Cellular Automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, 205-233.
10. BUTLER, R.W.H. (1982). A structural analysis of the Moine Thrust zone between Loch Eriboll and Foinaven, NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, 4, 19-29.
11. Clark, K.C. and Gaydos, L.J. (1998). Loose-Coupling a Cellular Automation Model and Gis: Long-Term Urban Growth Prediction For San Francisco and Washington/Baltimore. *Geographical Information Sciences*, 12(7), 699-714.
12. Douglass B. Lee. (1973). Requiem for Large-Scale Models. *JAPA*, 39, 163-78.
13. Lancaster, K. (1966). A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy*, 74(2), 132-157.
14. Landis L D. (1994). The California urban future model: a new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B*, 21(4), 399-420.
15. Landis L D. (1995). Imaging land use futures: applying the California urban future model. *Journal of American Planning Association*, 61(4), 438-457.
16. Landis L D and Zhang M. (1998a). The second generation of the California urban future model. Part1: Model logic and theory. *Environment and Planning B*, 25(5), 657-666.
17. Landis L D and Zhang M. (1998b). The second generation of the California urban future model, Part2: Specification and calibration results of the land-use change submodel. *Environment and Planning B*, 25(6),

- 795-824.
18. White, R. W., and Engelen, G. (1993). Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns. *Environment and Planning A*, 25, 1175-1193.
 19. White, R. W., and Engelen, G. (1997). Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modeling. *Environment and Planning B*, 24, 235-246.
 20. Wu F. (1998a). Simland: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(1), 63-82.
 21. Wu F, Webster C J. (1998b). Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B*, 25, 103-126.
 22. Wu, F. (2002). Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International journal of Geographical Information Science*, 16(8), 795-818.
 23. Xie, Y. (1994). *Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban Dynamics*. Unpublished Ph.D. dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
 24. 吴良镛. (2001). *人居环境科学导论*. 北京: 中国建筑工业出版社.

作者简介

龙瀛, 1980 年 5 月, 男, 硕士, 中国城市规划学会会员, 北京市城市规划设计研究院, 工程师, 主要研究方向为规划支持系统和生态环境规划。

稿件标题: 北京城市发展模型: 城市空间形态模拟的平台

作者姓名: 龙瀛

性 别: 男

出生年月: 1980 年 5 月

最高学历: 硕士

职 称: 工程师

工作单位: 北京市城市规划设计研究院

通讯地址: 北京市西城区南礼士路 60 号北京市城市规划设计研究院 2005 房间

邮政编码: 100045

传 真: 010-68031173

电子邮箱: longying1980@gmail.com