

北京 2049：基于 CA 的北京城市空间增长模拟

龙 瀛¹，毛其智²，沈振江³，杜立群¹，高占平⁴

(1. 北京市城市规划设计研究院，北京 100045

2. 清华大学建筑学院，北京 100084

3. 日本金泽大学，日本金泽 920-1192

4. 首都师范大学资源环境与旅游学院，北京 100037)

EMAIL: Longying1980@gmail.com

摘 要：在后奥运分析、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 进行北京城市空间增长模拟。文中对相关的国际国内研究进展进行概述，具体给出了 BUDEM 所采用的数据，重点对模型的总体结构和技术细节进行了介绍。利用 Logistic 回归方法获取了北京市域不同发展阶段的的城市空间增长驱动力，在此基础上提出了北京 2049 年的城市空间增长的多种情景。

关键字：城市增长模拟；元胞自动机；Logistic 回归；北京市域；2049 年；BUDEM

1 引 言

2004 年北京完成了新一轮总体规划的修编工作，确定了“两轴两带多中心”的空间发展思路，同时在奥运经济和首都经济的带动下，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) 等未来不同阶段的的城市空间布局进行判断，进而为下一阶段开展规划实施评估和新一轮城市总体规划提供决策支持，同时作为京津冀区域 (或“大北京”) 研究的备用分析平台，笔者开发了北京城市发展模型 (Beijing Urban Developing Model, BUDEM)。

BUDEM 是基于元胞自动机 (Cellular automata, CA) 和多个体系统 (Multi-agent system, MAS) 的用于模拟北京城市空间增长的时空动态模型。BUDEM 第一阶段的定位为利用基于遥感解译的多年土地利用、适宜性、限制性等多种数据，建立基于 CA 的城市空间模拟模型框架，实现基本的城市空间模拟功能。第二个阶段将引入人的个体行为，结合效用模型和离散选择模型，模拟城市的空间发展变化。目前初步完成了该模型的第一阶段目标，获得了基于 CA 模拟北京城市空间增长的初步成果。本文将重点针对现阶段 BUDEM 的数据、结构、技术细节，以及初步成果进行介绍。

2 基于 CA 的城市空间增长模拟

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 是 20 世纪 50 年代冯·诺伊曼 (von Neumann) 为了构造一个能够自我复制的机器首次提出的，是一个时间和空间都离散的动力系统。元胞自

动机是一个生命自我复制程序,其系统演化过程是从无序的初始状态发展成有序结构,也就是说,元胞自动机是基于自组织理论的。不同于动力学模型,元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定,而是用一系列模型构造的规则构成。凡是满足这些规则的模型都可以算是元胞自动机模型。因此,元胞自动机是一类模型的总称,或者说是一个方法框架。其特点是时间、空间、状态都离散,每个变量只取有限多个状态,且其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的。元胞自动机的构建没有固定数学公式,元胞变种多,行为复杂。

作为复杂性科学的重要研究工具,CA 模型可以较好地模拟城市作为一个开放的耗散体系所表现出的突变、自组织、混沌等复杂特征(陈干等,2000)。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,美国加州 Santa Babara 大学的 Couclelis (1997)对细胞自动机在地理学中的应用潜力从理论上作了充分的阐述,将 CA 用于城市扩展、预测建模,她开创了利用 CA 模拟城市发展的先河,之后基于 CA 的城市模型便逐渐发展起来。Clark, K.C. (1998)等利用城市发展的历史数据,根据城市的交通、地形条件等参数,建立了与 GIS 集成的 SLEUTH 模型,并据此先后对旧金山和华盛顿都市区进行了成功模拟和长期预测。Silva 等 2002 年应用该模型对里斯本和波尔图进行了模拟和预测,之后,又有专家对该模型进行了评价和扩展。Batty (1989, 1994, 1997, 1999)关于 CA 进行了多年的系列研究,取得了较大的进展。Wu F (1998)基于 GIS 实现了 CA 与多因子评价模型(MCE)的有机集成,对我国广州市的城市扩张进行了模拟。

在国内,周成虎等(1999)在其建立的GeoCA-Urban模型中,给城市土地单元赋予了生命特征,遵循生命轮回,根据其活力,土地单元具有三个不同的状态值,“青年”、“中年”和“老年”,同时,不同的状态值将随之产生不同的行为规则。黎夏、叶嘉安等(2000, 2001, 2002, 2007)在MCE、ANN、灰度和主成份分析等方法提取转换规则方面的进展,同时开展了CA模型的不确定性的研究。武晓波等(2002)利用CA模型模拟海口市的城市发展,罗名海(2005)利用CA模型预测武汉市主城空间增长过程,李森林(2005)利用CA模型模拟福州市的城市发展,郭鹏等(2004)利用CA模型对西安市的城市增长过程进行模拟。

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,并在珠江三角洲、海口、武汉、福州等真实城市模拟的案例,以北京为研究区域的相关研究并没有文献报道;基于多个个体系统在真实城市进行城市空间增长模拟无论在国际还是国内,都处于探索阶段,多数文献都处于虚拟城市的研究阶段,个别文献在真实城市进行了初步的基本探索。

3 模型数据

BUDEM 的数据主要包括 8 类,土地利用(LANDUSE)、限建分区(CONSTRAIN)、土地等级(LANDRESOURCE)、可达性(ACCESSIBILITY)、城市规划(PLANNING)、政策区(POLICYZONE)、边界(BOUNDARY)和城市发展时间序列表(UrbanInfoSeries)¹等。空间数据都位于北京市域内,市域边界之外的数据统一为 NODATA,格式统一为 ESRI 的单一 band 的 GRID,空间参考相同。

¹ 该序列表内包括摘自《北京 50 年》的建国以来各年北京的人口、资源、环境、经济和社会等方面的统计数据,本文不作具体介绍。

3.1 LANDUSE

LANDUSE 数据是 BUDEM 模型的核心数据之一，本研究获得了时间跨度达 40 余年的覆盖北京市域范围的遥感影像序列：

- ◇ LANDUSE2006 (TM 影像，2006 年 11 月 1 日)²
- ◇ LANDUSE2005 (TM 影像，2005 年 5 月 6 日)
- ◇ LANDUSE2004 (TM 影像，2004 年 4 月 1 日)
- ◇ LANDUSE2001 (TM 影像，2001 年 5 月 19 日)
- ◇ LANDUSE1996 (TM 影像，1996 年 5 月 29 日)
- ◇ LANDUSE1991 (TM 影像，1991 年 5 月 16 日)
- ◇ LANDUSE1986 (TM 影像，1986 年 10 月 25 日)
- ◇ LANDUSE1981 (MSS 影像，1981 年 6 月 23 日和 1981 年 4 月 21 日两景)
- ◇ LANDUSE1976 (MSS 影像，1976 年 6 月 5 日和 1976 年 9 月 20 日两景)
- ◇ LANDUSE1964 (DISP 航片，1964 年 4 月~1965 年 11 月多次)³

采用监督分类和目视解译结合的方法，配合以所掌握的其他来源的土地利用数据（如地形图、现状汇总图、国土部门的土地利用现状图），对以上遥感影像进行处理⁴，获得最终的 LANDUSE 数据（用地类型如表 1 所示，LANDUSE2005 如图 1 所示）。

表 1 LANDUSE 数据分类表⁵

GRIDCODE	土地利用类型名称
1	城镇建设用地（Urban built-up）
2	农村建设用地（Rural built-up）
3	水域（Water）
4	农地（Agriculture）
5	林地（Forest）
6	其他（Others）

² 2007 年的 TM 影像已经购买，目前正在处理中。

³ 数据来源：XiaoHang Liu, Department of Geography and Human Environmental Studies, San Francisco State University, San Francisco, CA 94132

⁴ 截至本文成文，2006 年 TM 影像尚在解译中，因此 BUDEM 以 LANDUSE2005 作为基准进行模拟。部分解译的数据与《北京空间发展战略规划》修编过程中总参采用 TM 影像获得的土地利用图（2002 年、1998 年、1992 年、1988 年和 1975 年）进行了对比，进行了数据校正的工作。

⁵ 在实际的模型应用中，仅模拟城市建设用地的空间增长，因此将 GRIDCODE 数值为 2、3、4、5、6 合并为 0，PLANNING 数据同。

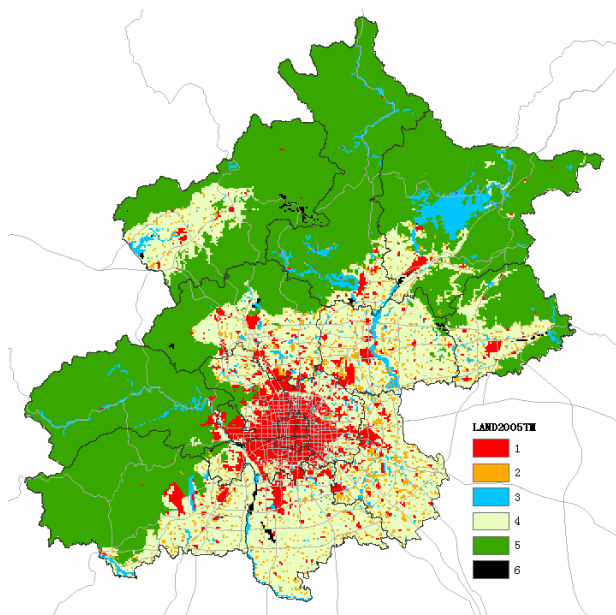


图 1 LANDUSE2005 数据分布图⁶

表 2 LANDUSE2005 数据描述表⁷

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1	4832	7.4	7.4	7.4
	2	2274	3.5	3.5	10.8
	3	2681	4.1	4.1	14.9
	4	19701	30.0	30.0	44.9
	5	35914	54.7	54.7	99.7
	6	226	.3	.3	100.0
Total		65628	100.0	100.0	

3.2 限建分区 CONSTRAIN

CONSTRAIN 数据用于表征不同区域对城镇建设的限制程度，其数据来源为 2006 年北京城市规划设计研究院编制的《北京市限建区规划（2006 年-2020 年）》，该规划系统考虑了河湖湿地、水源保护、地下水超采、洪涝调蓄、绿化保护、城镇绿化隔离、农地保护、文物保护、地质遗迹保护、平原区工程地质条件、地震风险、水土流失与地质灾害防治、污染物集中处理处置设施防护、电磁辐射设施（民用）防护、市政基础设施防护、噪声污染防治等 16 类要素对城市建设的限制，并结合现有的法律、法规和规范等，将市域划分为五个分区（图 2），即为 CONSTRAIN 数据，数据描述如表 3 所示。

1. 绝对禁建区：严格禁止一切城乡建设。
2. 相对禁建区：严格禁止与限建要素无关的建设。
3. 严格限建区：存在严格的生态制约条件，对城市建设的用地规模、用地类型、建设强度以及有关的城市活动、行为等方面的限制较多，难以克服或减缓限制要求与建设之间的冲突，否则易产生重大的负面影响。

⁶ 篇幅有限，其他年代的 LANDUSE 数据的空间分布和描述表不在此文列出。

⁷ Frequency 列的单位为 1 个元胞的面积，即 0.25Km²，第一列的数字对应表 1 的 GRIDCODE 值（GRID 格式的栅格数据的像素值），其余数据的描述表同此。

4. 一般限建区：存在较为严格的生态制约条件，尽管对城市建设的用地规模、用地类型、建设强度以及有关的城市活动、行为等方面加以限制，但在特殊情况下通过技术经济改造等手段可以减缓限制要求与建设之间的冲突。
5. 适宜建设区：生态制约条件较少，对城市建设的用地规模、用地类型、建设强度以及有关的城市活动、行为等方面的限制较为单一，在一般条件下可以适度开展城市建设的地区。

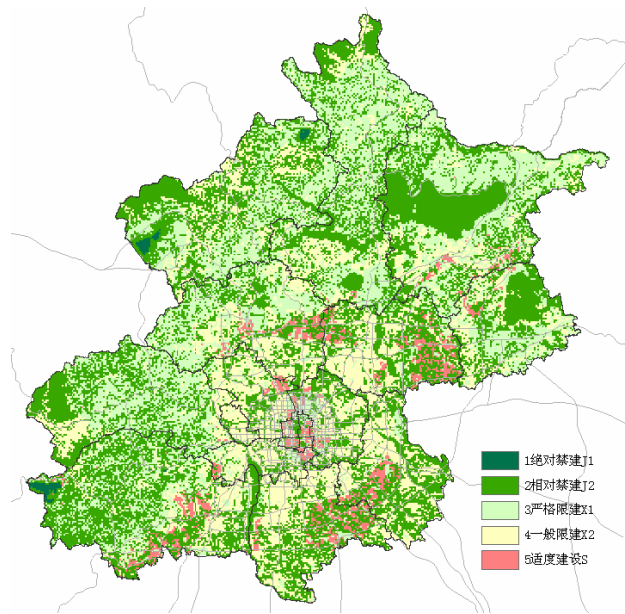


图 2 CONSTRIN 数据分布图

表 3 CONSTRIN 数据描述表

GRIDCODE	限建分区	面积（平方公里）	百分比（%）
1	绝对禁建区	55.5	0.3
2	相对禁建区	7130.1	43.5
3	严格限建区	4819.2	29.4
4	一般限建区	3878.2	23.6
5	适度建设区	527.1	3.2

3.3 土地等级 LANDRESOURCE

LANDRESOURCE 数据⁸用于表征市域土地的农业适宜性，将土地分为一类地到八类地，依次不适合农业耕作，具体如表 4 所示。

表 4 LANDRESOURCE 数据分类表

GRIDCODE	类型说明
1	土地质量好，限制因素强度为零级，一般无旱、涝、盐、碱、砂等限制性因素。土地适宜性广，生产力高。
2	土地质量较好，有旱、涝、砂、姜等限制性因素，但强度轻微，均为一级。土地适宜性和生产力较高。

⁸ 数据来源：北京市计划委员会国土环保处（1988 年），北京国土资源，北京：北京科学技术出版社

GRIDCODE	类型说明
3	土地质量中等，易旱、易涝、易盐渍化，限制强度达二级。应采取各种土地改良措施。
4	土地质量较差，限制性因素较多，有砂、粘、涝、盐、风蚀、坡度、土层厚度等限制性因素，限制强度为三级，土地改良困难。
5	土地质量很差，限制因素强度达到四级，不宜农耕。
6	土地质量更差，土薄、坡陡、限制强度达到五级，仅能宜牧。
7	土地质量极差，限制强度达到五级活六级。缺少细土层，质地粗疏，宜封滩育草或固定沙丘。
8	限制因素强度最大，主要是裸岩等难以利用的土地。

LANDRESOURCE 数据的空间分布如图 3 所示，数据描述如表 5 所示。

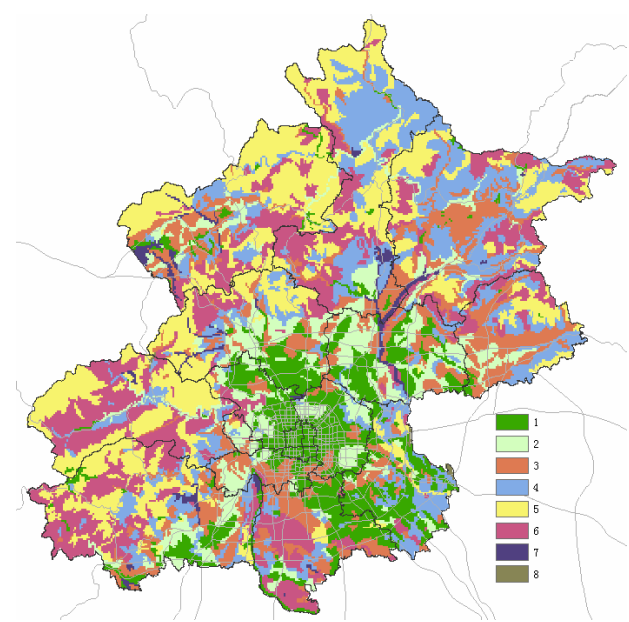


图 3 LANDRESOURCE 数据分布图

表 5 LANDRESOURCE 数据描述表

	Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid				
1	8647	13.2	13.2	13.2
2	6883	10.5	10.5	23.7
3	10047	15.3	15.3	39.0
4	11803	18.0	18.0	57.0
5	15446	23.5	23.5	80.5
6	11760	17.9	17.9	98.4
7	980	1.5	1.5	99.9
8	59	.1	.1	100.0
Total	65628	100.0	100.0	

3.4 可达性 ACCESSIBILITY

ACCESSIBILITY (可达性) 数据, 用于表征市域不同地区的区位条件 (或开发适宜性), 主要包括与 TOWN (城镇中心) (具体包括天安门 ctam, 边缘集团 cedge, 重点新城 cvcity, 新城 ccity, 重点镇 cvtown, 一般镇 ctown 等不同城镇体系) \ ROAD (道路) \ FACILITY (公共设施) \ RIVER (河流) \ GREEN (绿色空间) 和 RESORT (旅游景点) 的最近距离。基于可达性要素的空间分布图层, 采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 Distance/Straight Line 命令, 可以获取与可达性要素欧式距离 (Euclidean distance) 的空间分布, 即为 ACCESSIBILITY 数据 (单位: m), 部分数据的描述性统计如表 6 所示, 其中 ROAD 和 D_ROAD 的空间分布如图 4 所示。

表 6 ACCESSIBILITY 数据描述性统计表

	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
d_facility	65628	0	19039	3853.90	3155.50
d_green	65628	0	22147	2815.18	3305.90
d_resort	65628	0	26953	5405.68	3752.46
d_river	65628	0	14230	3212.68	2416.59
d_road	65628	0	23547	2615.95	3310.81
Valid N (listwise)	65628				



图 4 ROAD 及 D_ROAD 数据分布图⁹

3.5 城市规划 PLANNING

北京 1958 年进行了行政区划调整, 形成了目前的市域范围。1958 年以来北京市域范围开展的总体规划主要有五次: 1958 年、1973 年、1982 年、1993 年和 2004 年。PLANNING 数据即为各阶段城市总体规划的空间分布图, PLANNING1993 的空间分布如图 5 所示, 数据描述见表 7。¹⁰

⁹ 篇幅有限, 其他类型的 ACCESSIBILITY 数据的空间分布不在此文给出。

¹⁰ 其他年代的规划图没有电子版, 因此采用人工数字化的方式获得相应的 PLANNING 数据。PLANNING 数据的 GRIDCODE 定义与 LANDUSE 数据相同, 区别在于 PLANNING 数据中没有农村建设用地 (GRIDCODE 值为 2)。

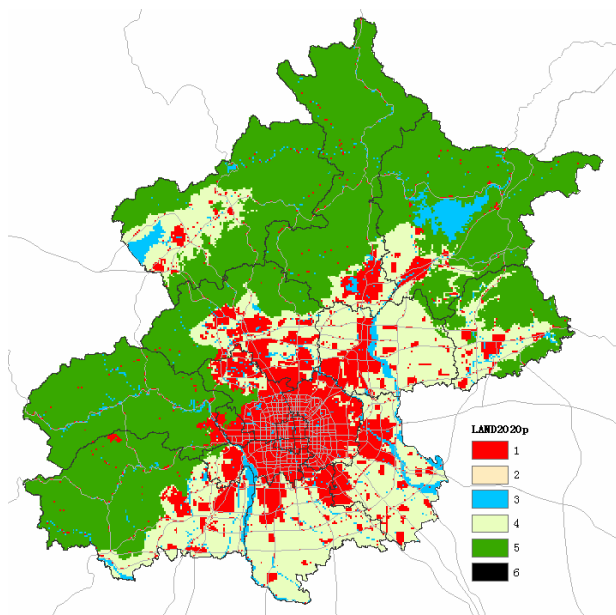


图 5 PLANNING1993 数据分布图¹¹

表 7 PLANNING1993 数据描述表

		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	1	10836	16.5	16.5	16.5
	3	2863	4.4	4.4	20.9
	4	16303	24.8	24.8	45.7
	5	35626	54.3	54.3	100.0
	Total	65628	100.0	100.0	

3.6 政策区 POLICYZONE

POLICYZONE 数据用于表示在 PLANNING 数据中没有表达的拟重点开发的地区，目前在模型中设定北京大兴区南部的首都第二国际机场备选区域为 POLICYZONE，如图 6 所示。设定 POLICYZONE 的 GRIDCODE 值为 1，其他市域内的像素的 GRIDCODE 值为 0。

¹¹ 篇幅有限，其他年代的 PLANNING 数据的空间分布和描述表不在此文列出。

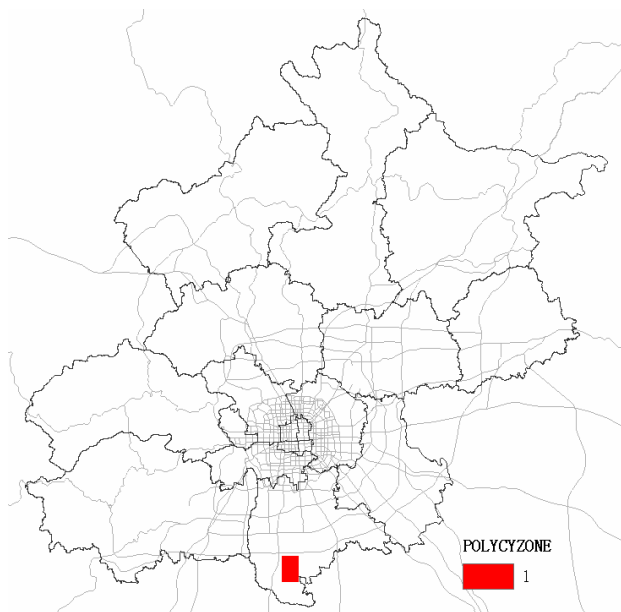


图 6 POLICYZONE 数据分布图

3.7 边界 BOUNDARY

BOUNDARY 数据用于表征北京市域范围内的不同级别的行政边界（如区县边界、乡镇边界、行政村边界、中心城边界）自然边界（如生态功能区边界、流域边界、平原区边界、山区边界和环路边界（如二至六环边界）等，其中乡镇边界数据（BOUNDARYtown）分布如图 7 所示¹²，其 GRIDCODE 为连续整数，表示不同的乡镇。

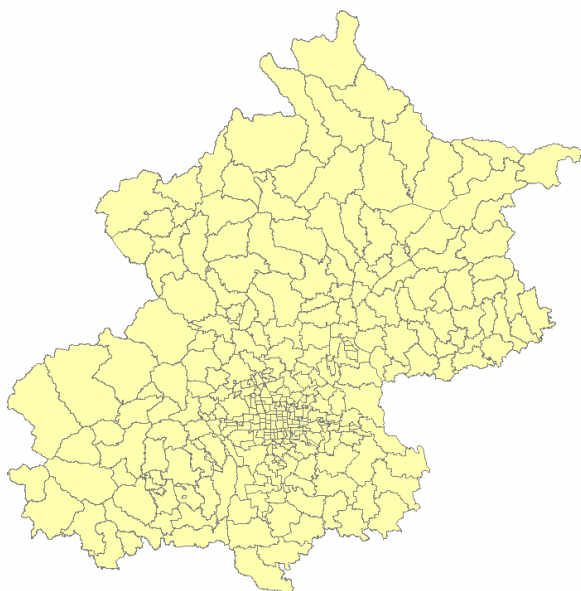


图 7 BOUNDARYtown 数据分布图

¹² 篇幅有限，其他的 BOUNDARY 数据的空间分布和描述表不在此文列出。

4 模型结构

4.1 模型总体结构

BUDEM 模型建立的逻辑框架是：(1) 城市是一复杂适应系统，采用自下而上的方法进行城市空间增长的模拟；(2) 城市增长的驱动力分为刺激增长因素（城市规划学科的适宜性评价）和限制增长因素（城市生态学理论）两类；(3) 历史的规律适用于预测同样趋势的未来；(4) 可在基准空间增长情景（即延续历史发展趋势）的基础上，根据空间增长政策的不同，生成不同的其他空间增长情景。

基于以上逻辑框架，基于 CA 建立 BUDEM 模型。对应于 CA 的基本要素，BUDEM 的基本情况如下：

- (1) 元胞空间 (Lattices)：北京市域，16410km²
- (2) 元胞 (Cells)：500m*500m，65628 个
- (3) 状态变量 (CellStates)：1 (城市建设用地)，0 (非城市建设用地)
- (4) 转换规则 (TransitionRules)：基于多属性分析 (MCE) 方法，具体见模型技术细节部分
- (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 (DiscreteTime)：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

总体上，城市空间增长模拟的流程首先是采用宏观发展模型预测未来的建设用地总量，然后基于 CA 模拟不同政策下的对应于预测总量的在空间上的布局。BUDEM 的概念模型如公式 1 所示：

$$V_{i,j}^{t+1} = f \left\{ \begin{array}{l} V_{i,j}^t, NEIGHBORHOOD_{i,j}, FORM_{i,j}, ACCESSIBILITY_{i,j}, \\ ENV_{i,j}, PLANNING_{i,j}, POLICYZONE_{i,j}, RI_{i,j}, \\ MidConstrain, MacroConstrain \end{array} \right\} \quad \text{公式 1}$$

$V_{i,j}^t$: t时刻的ij位置的元胞状态

$V_{i,j}^{t+1}$: t+1时刻的ij位置的元胞状态

f: 元胞的状态转换函数 (转换规则)

其中，NEIGHBORHOOD 为自然增长变量，FORM 为城镇中心变量，ACCESSIBILITY 为可达性变量，ENV 为环境限制变量，PLANNING 为城市规划变量，POLICYZONE 为特殊政策区变量，RI 为随机项，MidConstrain 为中观约束，MacroConstrain 为宏观约束。下面对上述变量以及 BUDEM 的其他技术细节进行介绍。

4.2 模型技术细节

4.2.1 变量解释

1、NEIGHBORHOOD

NEIGHBORHOOD 变量表示元胞邻域内状态为 1，即城市建设用地的元胞的数目占邻

域内所有元胞数目的比例，采用 ESRI ARCGIS 的 Focal Statistics 工具可获得不同年代 LANDUSE 数据的 NEIGHBORHOOD 变量图层，在模型循环过程中，NEIGHBORHOOD 变量一直处于变化状态。

假定 NEIGHBORHOOD 越大，则由非城市建设用地向城市建设用地转换的概率 (P) 越大。利用 NEIGHBORHOOD 变量可以模拟沿已有城市建设用地扩展的城市空间增长政策，形成所谓的“摊大饼”城市空间形态。

2、FORM

FORM 变量与 ACCESSIBILITY 数据中的 TOWN 数据的具体分类，如与天安门 (D_CTAM) 与边缘集团¹³的距离 (D_CEDGE) 与重点新城¹⁴的距离 (D_CVCITY) 与新城的距离 (D_CCITY) 与重点镇的距离 (D_CVTOWN) 与一般镇的距离 (D_CTOWN) 等有关，FORM 变量的计算见公式 2：

$$FORM = \exp \left[\frac{-b * (w_1 * [D_CTAM] + w_2 * [D_CEGE] + w_3 * [D_CVCITY] + w_4 * [D_CCITY] + w_5 * [D_CVTOWN] + w_6 * [D_CTOWN])}{1} \right] \quad \text{公式 2}$$

b: 衰减系数

w_i: 权重系数

假设距离各级城镇中心越近，则转换概率 P 越大¹⁵。利用 FORM 变量可以模拟不同形态的空间增长政策，如围绕中心城发展、围绕新城重点发展、围绕重点镇重点发展等，从而给出单中心、多中心等不同的城市空间发展形态。

3、ACCESSIBILITY

ACCESSIBILITY 变量与距离道路的距离 (D_ROAD) 距离水系的距离 (D_RIVER) 距离绿色空间的距离 (D_GREEN) 距离景点的距离 (D_RESORT) 距离设施的距离 (D_FACILITY) 有关，ACCESSIBILITY 变量的计算见公式 3：

$$ACCESSIBILITY = \exp \left[\frac{-b * (w_1 * [D_ROAD] + w_2 * [D_RIVER] + w_3 * [D_GREEN] + w_4 * [D_RESORT] + w_5 * [D_FACILITY])}{1} \right] \quad \text{公式 3}$$

b: 衰减系数

w_i: 权重系数

假设距离各类 ACCESSIBILITY 要素越近，则转换概率 P 越大。利用 ACCESSIBILITY 变量可以模拟沿道路发展、沿河流发展、利用绿色空间边缘效益发展、沿公共设施发展等城市空间增长政策所对应的城市空间形态。

4、ENV

ENV 变量主要用于表征城市空间增长所受到的限制，主要与 CONSTRAIN、LANDRESOURCE 和 LANDUSE 数据有关，即受到限建分区的限制、受到土壤的限制、受到现状河流、林地等土地利用类型的限制。ENV 变量的计算公式如下：

¹³ 包括西苑、清河、北苑、酒仙桥、东坝、定福庄、垡头、南苑、丰台和石景山十个，位于北京中心城的中心地区外围。

¹⁴ 亦庄、通州和顺义为《北京城市总体规划（2004 年-2020 年）》确定的重点新城。

¹⁵ 为初步假设，实际的趋势有可能与其相反，在 Logistic 回归中对其进行了具体的判断。ACCESSIBILITY 变量部分同。

$$ENV = CON([CONSTRRAIN] \leq clsCONS, 0, 1) * CON([LANDRESOURCE] \leq clsLR, 0, 1) * CON([LANDUSE] = clsLU, 0, 1)$$

公式 4¹⁶

clsCONS: 限制的限建分区
clsLR: 限制的土壤等级
clsLU: 限制的土地利用类型

ENV 变量如果为 1，则表示对城市增长没有限制，如果为 0，则表示有限制，转换概率 P 为 0（绝对禁止发展）或较小。利用 ENV 变量可以模拟不同程度的环境约束政策（如基本农田保护、土壤可持续利用、自然资源保护、灾害避让等）对城市空间增长的影响。

5、PLANNING

PLANNING 变量对应 PLANNING 数据，其计算公式如下：

$$PLANNING = CON([PLANNING] = 1, 1, 0) \quad \text{公式 5}$$

假设位于城市规划区的非城市建设用地元胞具有更高的转换概率，利用 PLANNING 数据可以模拟城市规划这一政府主导的城市空间增长政策对城市空间的影响。

6、POLICYZONE

POLICYZONE 变量对应 POLICYZONE 数据，其计算公式如下：

$$POLICYZONE = CON([POLICYZONE] = 1, 1, 0) \quad \text{公式 6}$$

假设位于特殊政策区内的非城市建设用地元胞具有更高的转换概率，利用 POLICYZONE 变量可以在宏观层面模拟特殊的政策区因素，如第二机场建设、开发区建设、首钢搬迁、工业区改造等，对城市空间增长的影响。

7、RI

城市空间扩展存在各种政治因素、人为因素、随机因素和偶然事件的影响和干预，特别是人的干预，使其更为复杂（郭鹏，2004），引入随机项（Random Item, RI）可以使模拟的结果更接近于城市空间扩展的实际情况。

$$RI = 1 + (g - 0.5) / a$$

g: 0~1范围内的随机数 公式 7
a: 控制RI数值大小的参数
a=10, RI在0.95~1.05之间浮动

8、MidConstrain

MidConstrain 变量作为中观尺度上的约束，它考虑了城市增长因素的空间分异，基于 BOUNDARY 数据，可以实现不同区域分异政策的模拟。¹⁷

9、MacroConstrain

MacroConstrain 变量为城市建设用地总量所对应的元胞数目，计算方式见公式 8¹⁸：

¹⁶ CON(A,B,C)为条件判断函数，如条件 A 为真，则返回 B，反之则返回 C。

¹⁷ 本研究目前尚未在模拟的过程中考虑 MidConstrain 变量。

¹⁸ 研究过程中，笔者试图识别 GDP、人口与城市建设用地数量的相关性，进而通过预测 GDP 或人口规模来预测城市建设用地总量。鉴于 2049 年各类因素的确定性，间接预测的方法反而会增加预测的不确定性，因此选用简单的公式直接进行城市建设用地总量的预测。

$$MacroConstrain = [a + b * (x - c)^d] * 4$$

$$a = 1208$$

$$b = 30$$

公式 8

$$c = 2005$$

d: 增长系数

x: 预测年份

MacroConstrain 是时间的函数，可以作为模型运行状态结束的判断依据，并可以建立 CA 的离散时间与真实时间的对应关系。对公式 8 中的增长系数 d 进行调整，可以方便地实现城市建设用地高、中、低增长方案的总量预测。

4.2.2 状态转换规则及其获取

公式 1 给出了 BUDEM 的概念模型，在提取具体的元胞转换规则（Transition Rules）的过程中，本研究分别尝试采用了决策树（Decision Tree）和多准则评价（Multi-criteria Evaluation, MCE）方法，建立元胞状态转移规则，最终选取 MCE 方法建立如公式 9 所示的状态转移规则：

MCE形式的状态转换规则：

$$P_{i,j}^t = ENV_{i,j} * \left(b_1 * NEIGHBORHOOD_{i,j}^t + b_2 * FORM_{i,j} + b_3 * ACCESSIBILITY_{i,j} + b_4 * PLANNING_{i,j} + b_5 * POLICYZONE_{i,j} \right) * RI_{i,j} \quad \text{公式 9}$$

$P_{i,j}^t$: 转换概率，表征由非城市建设用地向城市建设用地转变的可能性

b_i : 各因素的权重

$P_{threshold}$: 状态转变的概率阈值

$P_{i,j}^t \geq P_{threshold}$ 则转变为城市建设用地

4.2.3 采用 Logistic 回归方法获取历史驱动力

假设一个区位的发展概率是一系列独立变量所构成的函数，因变量是二项分类常量，即将土地利用分为发展的 Developed 和未发展的 Undeveloped，不满足正态分布的条件，这时采用 Logistic 回归分析，利用 Logistic 回归方法获取 CA 的转换规则（Wu, 2002）。

Logistic 回归的因变量是是否发生由非建设用地向建设用地的转变（发生转变为 1，不发生转变为 0），自变量为状态转移规则中的 NEIGHBORHOOD 变量、FORM 中的各变量、ACCESSIBILITY 中的各变量和 PLANNING 变量。利用 ESRI ARCGIS 的 SAMPLE 工具¹⁹，对自变量对应的空间数据图层进行采样，获取自变量数据，对 LANDUSE1985 和 LANDUSE2005 数据进行采用，得到因变量数据（黎夏等，2007）。采用公式 10 进行 Logistic 回归分析：

¹⁹ 由于发生转变的元胞数目相比未发生转变的元胞数目较少，因此对发生转变的元胞全部进行采样，而对未发生转变的元胞进行 10% 随机采样。

$$y = \frac{1}{1 + e^{-z_{ij}}}$$

$$z_{ij} = a + \sum_k b_k x_k$$

公式 10

a : LOGISTIC回归模型的常数项

b_k : LOGISTIC回归模型的系数

x_k : 自变量

y : 因变量

采用不同年代的 LANDUSE 数据, 可以获得不同时期的城市空间增长的驱动力, 经过分析, 各发展阶段不同驱动力的影响程度和影响方向的差异较大。

4.2.4 模型开发及调试

鉴于 ESRI ARCGIS 具有完善的 GIS 数据处理、分析和表达功能, 同时其空间分析模块的部分功能与 CA 模型的连接性较好, 因此 BUDEM 基于 ArcObjects 组件, 采用 VBA 语言进行开发, 并在 ArcMap 环境中进行调试。在模型开发过程中, 通过在研究范围内选取一个典型的小区域作为虚拟空间 (Virtual Space), 同时设定了一系列的观测变量, 用于调试模型参数, 测试 BUDEM 的运行结果。²⁰

5 模拟结果

利用 BUDEM 模型第一阶段的研究成果, 对 2049 年北京的城市空间增长进行模拟, 给出不同的城市空间增长情景²¹。设定公式 8 中的增长系数 $d=0.8$, 预测水平年 $year=2049$, 则 $MacroConstrain=7309$, 即 2049 年的城市建设用地元胞数目为 7309 个, 以此作为模型运行结束的判断条件。将基于 Logistic 回归获得的系数代入状态转移方程, 可以进行基准发展预测²², 即保持 1985 年至 2005 年的城市空间增长趋势和驱动力作用强度, 预测 2049 年的城市空间增长形态 (图 8)。

²⁰ 目前尚未开展具体的模拟结果的验证工作。

²¹ 为了便于比较, 本文中提到的所有情景的城市建设用地总量相同。

²² 根据相隔几年的规则应用于一个周期内的 CA 状态循环中, 仍然具有争议 (黎夏等, 2007)。

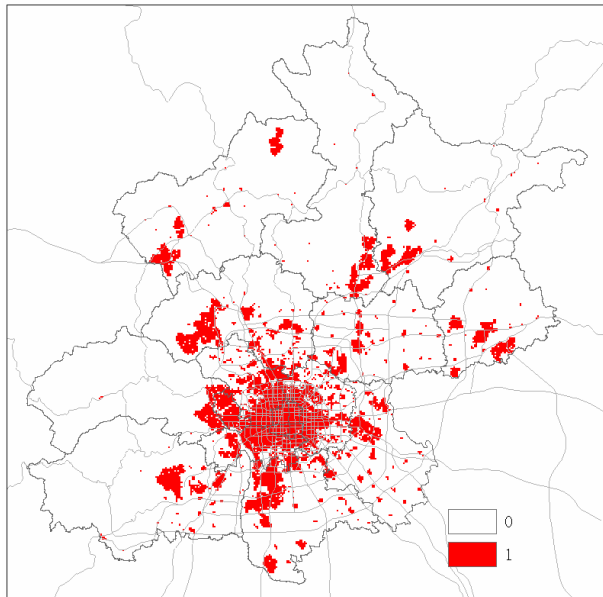


图 8 基准发展情景

在基准增长情景的基础上，对状态转移方程中的各变量的权重进行调整，可以获得不同的城市空间增长政策作用下的城市空间增长情景。

- (1) 蔓延情景：不考虑环境限制因素，城市建设用地仅沿原有的城市建设用地扩展，这是一个典型的城市蔓延的空间增长情景（图 9）；

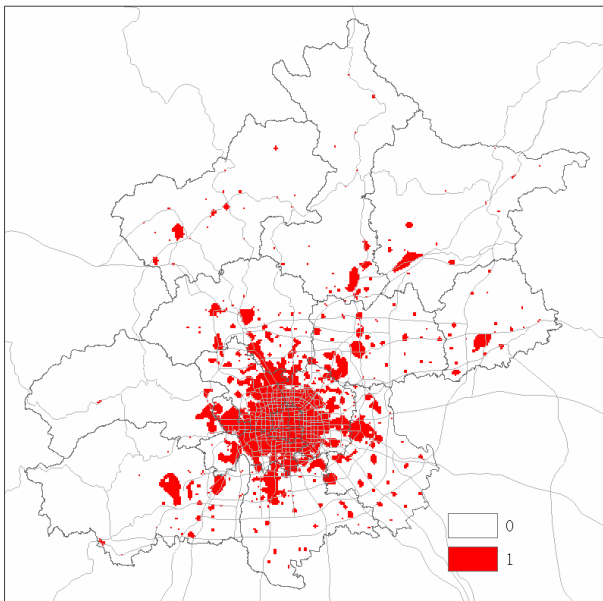


图 9 蔓延情景（仅考虑 NEIGHBORHOOD 变量）²³

- (2) 葡萄串情景：不考虑环境限制因素，城市建设用地除沿原有的城市建设用地扩展外，距离道路和镇中心的元胞将获得更高的发展概率，形成以交通干线为脉络、以小城镇为节点的“葡萄串”式的空间增长情景（图 10）；

²³ 对于没有考虑的变量，是指在状态转移方程，设定其权重系数为 0，下同

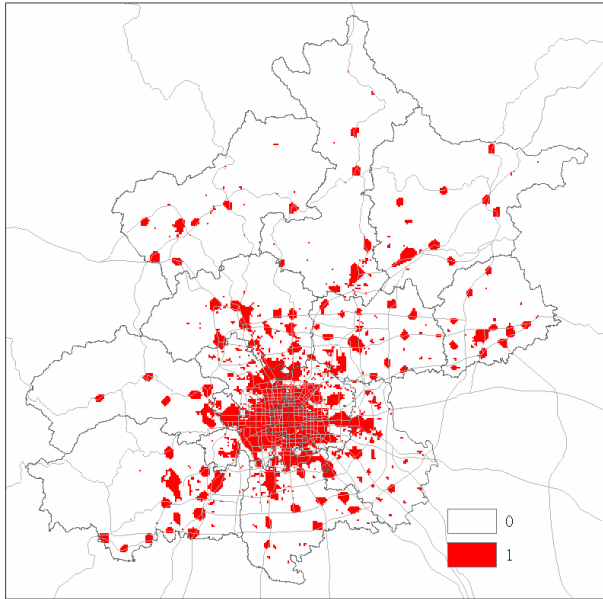


图 10 葡萄串情景（考虑 NEIGHBORHOOD、FORM 和 ACCESSIBILITY 变量）

- (3) 小城镇促进发展情景：在考虑环境因素的情况下，城市建设用地除沿原有的城市建设用地扩展外，距离镇中心的元胞将获得更高的发展概率，小城镇的空间增长速度较快，进而形成小城镇促进发展的空间增长情景（图 11）；

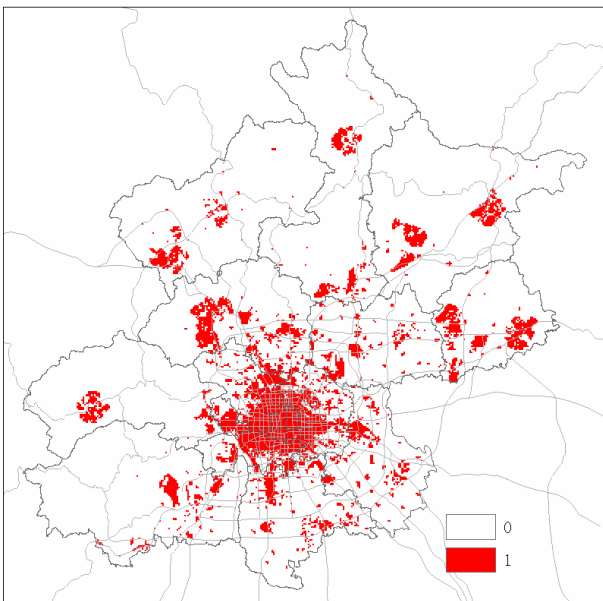


图 11 小城镇促进发展情景（考虑 NEIGHBORHOOD、FORM 和 ENV 变量）

- (4) 可持续发展情景：在既考虑历史的城市建设用地增长趋势和动因、资源环境限制，又考虑了城市规划、特殊政策区等因素，综合考虑了政府和市场两方面的作用，最终形成可持续的空间增长情景，即北京 2049 年的最可能的城市空间布局形态（图 12）。

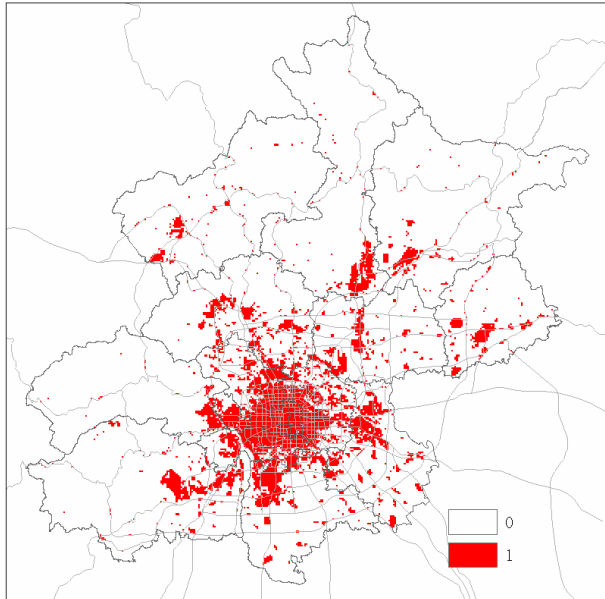


图 12 可持续发展情景（综合考虑各变量）

6 结论与探讨

本研究系统整理了北京全市域范围内的土地利用时间序列数据，识别了不同阶段的城市空间增长物理层面的驱动力，实现了时空动态的城市空间增长模拟（总量、空间布局），可以对北京 2049 年的不同城市增长政策作用下的发展情景进行模拟。²⁴

下一个阶段，将继续完善不同年代的土地利用数据，获取不同时期的路网数据，在完善历史驱动力识别的基础上，进一步调整模型中的状态转移方程，并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，同时拟将元胞状态扩展到多种用地类型。远景拟引入多个体系统（MAS）离散选择模型，模拟个人行为，如居住区位选择、就业区位选择等，对城市空间扩展的影响。

注：本文对北京 2049 年的城市空间增长的模拟结果是 BUDEM 的初步成果，仅代表笔者个人的观点，与所在单位无关。

中国科学院遥感所的吕宁负责完成 2006 年、1981 年和 1976 年的遥感影像解译工作，首都师范大学的马兰艳协助完成了 LANDRESOURCE 和 PLANNING 等数据的数字化工作，美国洛杉矶州立大学的刘晓航博士提供了 1964 年北京遥感影像，北京市城市规划设计研究院的谷一帧为本研究提出了中肯的建议，同时北京市城市规划设计研究院对此项目提供了资金支持，在此一并表示感谢。

²⁴ 研究过程中整理的数据并没有完全应用于模拟过程，还可以有更多、更深入的后续应用。

参考文献

1. Batty M. 1997. Cellular automata and urban form: a primer. *Journal of the American Planning Association*, 63(2): 266~274
2. Batty M, Longley P, Fotheringham S. 1989. Urban growth and form: scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation. *Environment and Planning A*, 21: 1447~1472
3. Batty M, Xie Y. 1994. From cells to cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21: 531~548
4. Batty M, Xie Y. 1997. Possible urban automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2): 175~192
5. Batty M, Xie Y, Sun Z. 1999. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(3): 205~233
6. 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
7. Couclelis H. 1997. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, (24): 165-174
8. Li Xia. 2001. Constrained CA-Model for the Simulation and Planning of Sustainable Urban forms by Using GIS. *Environment and Planning B*, (28): 733-753
9. Li X, Yeh A G O. 2000. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2): 131~152
10. Li X, Yeh A G O. 2002. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS.
11. Wu F. An Empirical Model of Intra-metropolitan Land Use Change in a Chinese City. *Environment and Planning B*. 1998, (25): 245-263
12. Wu F. 2002. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban conversions. *International*
13. 郭鹏, 薛惠锋等. 2004. 基于复杂适应系统理论与CA模型的城市增长仿真. *地理与地理信息科学*. 20(2)
14. 李森林. 2005. 基于细胞自动机的城市模型研究——以福州市为例. 福州大学硕士学位论文
15. 黎夏, 叶嘉安等. 2007. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社
16. 黎夏, 叶嘉安. 2001. 主成分分析与 Cellular Automata 在空间决策与城市模拟中的应用, *中国科学*, 31(8): 683~690
17. 黎夏, 叶嘉安. 2002. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟, *地理学报*, 57(2): 159-166
18. 罗名海. 2005. 利用 CA 模型进行城市空间增长动力的研究——以武汉市主城空间增长过程分析为例. *武汉大学学报(信息科学版)*. (1)
19. 武晓波, 赵健等. 2002. 细胞自动机模型用于城市发展模拟的方法初探——以海口市为例. *城市规划*. 8
20. 周成虎, 孙战利, 谢一春. 1999. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社

作者简介: 龙瀛 (1980~) 男 (汉), 吉林四平, 北京市城市规划设计研究院, 主要研究方向为规划支持系统和生态环境规划. 通信地址: 北京西城区南礼士路 60 号北京市城市规划设计研究院 邮编 100045
联系电话: 010-88073660 电子信箱: longying1980@gmail.com