

综合约束 CA 城市模型：规划控制约束及城市增长模拟

龙 瀛 毛其智 沈振江 杜立群 高占平

提 要 早期的仅考虑邻域作用的简单元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 已应用于城市增长的模拟, 而城市增长过程既受到自然的约束又受到人为的规划控制, 多数学者开始关注在 CA 城市模型中引入约束条件来反映这一客观条件, 以模拟更为真实的城市增长过程。笔者提出了集成考虑近邻约束条件、宏观社会经济约束条件、空间约束条件和规划控制约束条件的综合约束 CA 城市模型, 对约束条件本身从时间复杂性和空间复杂性角度进行了深入的分析, 提出了适应综合约束条件的状态转换规则识别方法, 并在模型应用中, 以控制北京市域的城市空间增长为目的, 讨论如何设置包括城市规划、限建区规划和优质农田保护政策的规划控制约束条件, 以模拟更为可持续的城市空间形态, 并将其与趋势增长模式进行了对比, 证明在敏感用地保护方面具有明显优势。

关键词 城市模型 约束条件

禁建区 元胞自动机 时空复杂

城市规划 北京市

中图分类号 TU984

文献标识码 A

文章编号 1000-3363(2008)04-0083-09

作者简介

龙 瀛, 北京市城市规划设计研究院工程师, 清华大学建筑学院博士生, longying1980@gmail.com

毛其智, 清华大学建筑学院, 教授, 博士生导师

沈振江, 日本金泽大学环境设计学院, 准教授

杜立群, 北京市城市规划设计研究院, 教授级高级工程师

高占平, 首都师范大学资源环境与旅游学院, 硕士生

Comprehensive Constrained CA Urban Model: Institutional Constraints and Urban Growth Simulation

LONG Ying, MAO Qizhi, SHEN ZhenJiang, DU Liqun, GAO Zhanping

Abstract: In recent years, it is prevailing to simulate urban growth by means of cellular automata (CA for short), which is based on self-organizing theory and different from the system dynamic type models. Distinguished from pure CA, the CA model applied for urban growth simulation should not only consider neighborhood influence, but also other factors with respect to urban developing. We bring forward the term of comprehensive constrained CA (CC-CA for short), which integrates the constrained conditions of neighborhood, macro socio-economic, spatial and institutional. Particularly, constructing constrained zoning planning, as one institutional constrained condition, is considered in CC-CA model. In this paper, the conceptual model of comprehensive constrained CA model is introduced together with the form of transition rule. The CC-CA model for Beijing is developed, and we discuss the comprehensive constrained conditions in Beijing. Furthermore, we show how to set institutional constraints in the scenario of planning control to control the urban growth pattern in Beijing.

Keywords: urban model, constrained condition, prohibited-construction area, cellular automata, spatio-temporal complex, urban planning, Beijing

城市模型的研究始于 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, 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, 近年来开展了基于 CA (Cellular Automata, 元胞自动机) 的城市模型方面的研究, 主要用于模拟城市空间增长。将 CA 应用于城市空间增长的模拟, 鉴于城市增长的复杂性 (既有自然的约束, 又有人类的扰动), 需要在仅考虑邻域 (Neighborhood) 影响的简单 CA (Simple CA, Pure CA) 模型的基础上, 考虑其他影响城市增长的因素。广义地讲, 邻域影响之外的转换规则可以统称为约束条件 (Constraint, Constrained condition) (White, 1997)。部分学者开始关注在 CA 城市模型中引入约束条件来控制模拟过程 (即约束性 CA 模型, Constrained CA model)。如在 SLEUTH 模型中, 专门设置一层为排除层 (Exclusive), 用以约束城市的生长 (Clark 和 Gaydos, 1998); White 等 (1997) 提出了约束性 CA 模型 (Constrained CA) 的概念, 其中考虑了城市增长的空间约束条件; Engelen 等 (1997) 考虑了宏观社会经济等宏观约束条件, 开发了集成约束性 CA、GIS 和决策支持工具的城市规划支持系统; Wu (1998) 所开发的 Simland 模型也设置有专门的变量用于表示城市开发的约束条件 (Constraints to land develop-

ment); Ward 等 (1999, 2000) 在其 CA 城市模型中除了考虑宏观社会经济约束外 (Macro socio-economic), 还考虑了物理性约束条件 (Physical constraint)、地理约束条件 (Geographic constraints) 和规划控制约束条件 (Institutional controls); Li 和 Yeh (2000)、Yeh 和 Li (2001) 在其约束性 CA 模型中考虑了局部 (Local)、区域 (Regional) 以及全局性 (Global) 约束; David 等 (2000) 在 CA 城市模型中考虑了宏观社会经济等全局约束条件; White 等 (2004) 在其 CA 城市模型中考虑宏观约束的同时, 还考虑了物理约束 (Physical characteristics)、可达性约束 (Accessibility) 和区划约束 (Zoning); Alkheder 和 Shan (2005) 在美国 Indianapolis 城市 CA 模型中将河流和湖泊作为城市增长的约束条件 (Exclusive Layer); Guan 等 (2005) 在基于人工神经网络的约束性 CA 城市模型中考虑了宏观社会经济和规划控制约束条件; Zhao 和 Murayama (2007) 在东京都市区城市增长 CA 模型中考虑了用地适宜性 (Suitability)、区划状态 (Zoning status) 和可达性 (Accessibility) 等约束条件; 刘小平等 (2007) 提出了基于生态位的 CA 模型, 用于快速发展的广州市土地可持续发展过程的模拟, 其中考虑了宏观约束条件和空间约束条件。

约束性 CA 城市模型的约束条件总体上可以分为近邻约束条件 (Neighborhood constrained condition)、宏观社会经济约束条件 (Macro socio-economic constrained conditions)、空间约束条件 (Spatial constrained conditions) 和规划控制约束条件 (Institutional constrained conditions)。近邻约束条件是指周边的城市开发对自身的影响, 即 CA 中的邻域影响, 这一约束条件是约束性 CA 城市模型最为复杂的一个约束条件, 可以使城市增长过程产生“涌现” (Emergence) 现象, 该约束条件自身在时间上不同阶段都在进行非线性变化, 因此很难用微分方程来进行描述, 其影响程度

的定量识别 (或与其他空间变量作用的对比) 也没有文献报道; 宏观社会经济约束条件是指宏观经济、人口发展等城市发展的宏观因素, 用于控制模拟的城市开发总量, 其作用相比侧重于在空间上发生约束作用的近邻、空间性和规划控制约束条件, 空间特性不明显, 一般用于控制城市增长的速度, 即 CA 在每一个循环中所转变的元胞数量; 空间约束条件是指区位因素, 如与人口密集区、道路等的可达性; 规划控制约束条件是指政府针对城市开发所制定的城市规划、区划、重点开发区、自然保护政策等。

这些约束条件, 在时间上和空间上都较为复杂 (图 1), 其中时间上, 约束条件本身的空间分布 (如邻域作用的空间分布, 道路网分布) 以及约束条件所产生的作用可能随时间而不同; 而在空间上, 约束条件的空间分布没有明显规律, 不同区域的约束条件所产生的作用也往往不相同 (空间分异)。其中, 空间约束条件和规划控制约束条件鉴于其在空间上一般都具有固定的形态, 两者在数学上起相似的作用, 不像近邻约束条件在不同的模拟步骤的形态都进行非线性的变化, 两者的时空复杂性也相对近邻约束条件要弱很多, 因此这两类约束条件的出现, 一定程度上削弱了近邻影响, 但却增大了其他约束条件作用下的近邻约束条件的复杂性, 因为其非线性的过程受到了扰动。

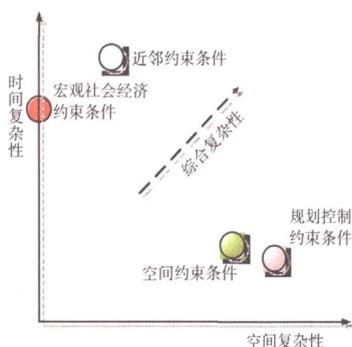


图 1 约束条件分析示意图

而对于已有的 CA 城市模型的约束条件, 考虑这四类约束条件较少 (也少有考虑约束条件的时空复杂性), 对于邻域的影响往往是通过主观赋值的方式确定, 失之于科学性。特别地对于规划控制约束条件这一类, 在应用中考虑较少, 对于个别引入规划控制约束的 CA 城市模型, 其规划控制约束条件设置比较简单, 第一, 对于规划控制约束条件在城市的历史发展阶段所起到的作用并没有进行识别, 致使在模拟的过程中, 这类约束条件的参数设置过于主观; 第二, 规划控制约束条件设置的过于简单, 因而对规划政策的模拟还有待深入研究。

因此, 基于对 CA 城市模型约束条件复杂性的分析, 笔者提出了综合约束 CA 城市模型 (Comprehensive Constrained CA, CC-CA) 的概念, 在状态转换规则的设置中该模型考虑了约束条件的时空复杂性, 集成了近邻约束条件、宏观社会经济约束条件、空间约束条件和规划控制约束条件, 采用 MonoLoop 方法对邻域作用的复杂影响进行识别 (Long 等, 2008), 并特别地考虑了限建分区规划这一规划控制约束条件, 其综合考虑了 16 类、110 多项涉及自然资源保护和风险规避的城市增长控制因素 (限建要素), 用于表征不同空间对城镇建设的限制程度 (龙瀛等, 2006)。如果不对这些约束条件进行综合考虑, 一方面会带来对自然资源的破坏; 另一方面还会带来严重的环境灾难, 同时还会造成城市建设过于分散、缺乏整体性。利用 Logistic 回归的方法对历史各个阶段各约束因素所起的作用进行识别和对比, 可以模拟不同约束条件作用下的城市增长情景, 进而给出反应不同规划政策控制力度的城市空间形态。笔者在第一部分介绍综合约束 CA 城市模型的概念模型及其转换规则的形式, 第二部分建立北京的综合约束 CA 城市模型, 讨论其综合约束条件, 给出了主要数据构成, 并在第三部分以控制北京市域的城市空间

增长为目的, 讨论如何设置规划控制的规划情景, 在第四部分进行了总结并提出了相应的后续研究的考虑。

1 研究方法

1.1 概念模型

参考城市经济学基础理论, 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:

1.1.1 空间性约束变量^②: 与各级城镇中心的最短距离 (中心区 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 $d_{bd-town}$;

1.1.2 近邻约束变量: 邻域内的开发强度 neighbor (即 Moore 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);

1.1.3 规划控制约束变量: 城市规划 planning、土地等级 landresource、限建分区 con_f。

其中城市规划表示城市总体规划的城镇用地范围, 可以反映政府的土地开发和城市形态的控制政策, 土地等级表示农业用地的适宜性, 即农田的分类保护, 可以反映政府保护农业用地的政策, 限建分区表示城市发展的限制性因素, 可以反映政府在自然资源保护、风险避让方面的政策。城市规划、土地等级和限建分区这三个变量构成的规划控制约束条件, 可以一同作为政府控制城市增长的有力制度性手段。

在 CC-CA 中还考虑了宏观社会经济约束, 如人口控制、经济发展等, 其对城市增长速度有较大影响, 可以通过调整未来的宏观政策, 改变城市增长的速度, 进而改变城市空间增长方案, 将该约束作为模型的外生变量引入。同时, 现阶段只模拟非城镇建设用地向城镇建设用地的转变, 逆向过程不模拟, 也不考虑城市再开发过程。

1.2 约束条件与状态转换规则

笔者采用多指标评价 (Multi-criteria evaluation, MCE) 作为 CC-CA 状态转移规则的具体形式, 利用这种形式的转换规则可以在一个框架下对城市增长的动力因素和阻力因素进行考虑。在 MCE 形式的状态转换规则中, 因变量是两项分类常量, 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, 这时可采用 Logistic 回归分析方法获取 CA 的状态转换规则 (Wu, 2002)。笔者对 Wu (2002)、Clark 和 Gaydos (1998) 两者的方法进行综合并作一定改进, 结合两者的优点, 将除邻域作用 neighbor 变量外的其余 12 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_1-12 , 在此基础上利用单一参数循环方式 (MonoLoop), 根据最佳匹配度 (Goodness-of-fit, GOF) 的原则识别 neighbor 的权重系数 w_N , 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 (也定量识别了综合约束条件的影响); 另一方面大大降低了模型运算的时间。转换规则的建立方法, 尤其是 neighbor 变量的权重系数的识别方法具体见文献 Long 等 (2008)。

最终确定的状态转换规则如公式 1 所示, 首先利用历史数据获取不同阶段的约束条件的权重系数 w , 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 ; 并将初始转换概率变换为转换概率 p_{ij}^t ; 对比转换概率与城市增长阈值, 如果大于阈值, 则认为发生非城镇建设用地向城镇建设用地的转变, 即为 1, 反之不发生转变, 即为 0。

$$s_{ij}^t = w_0 + w_1 * d_{tam_{ij}} + w_2 * d_{vcity_{ij}} + w_3 * d_{city_{ij}} + w_4 * d_{vtown_{ij}} + w_5 * d_{town_{ij}} + w_6 * d_{river_{ij}} + w_7 * r_{road_{ij}} + w_8 * d_{bd-town_{ij}} + w_9 * f_{rgn_{ij}} + w_{10} * planning_{ij} + w_{11} * con_{f_{ij}} + w_{12} * landresource_{ij} + w_N * neighbor_{ij}^t$$

公式 1

$$P_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}}$$

$$P_{ij}^t = \exp \left[a \left(\frac{P_g^t}{P_{g_{max}}^t} - 1 \right) \right]$$

if $P_{ij}^t > P_{threshold}$ then $v_{ij}^{t+1} = 1$

式中:

- s_{ij}^t : 开发适宜性;
- w : 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 : 转换概率;
- $P_{threshold}$: 控制城市增长的阈值 (即转换概率达到多少则可以发生城市增长);
- α 为离散系数。

对于 CC-CA 模型的状态转换规则, 可以根据不同阶段的历史数据识别各个约束条件的权重系数, 也可以根据未来各个阶段发展政策的不同, 实现不同发展阶段基于不同的转换规则进行模拟, 以解决约束条件的空间复杂性。另外, 通过对不同区域的历史发展数据可以提取不同空间的状态转换规则, 也可以设置未来不同区域采用不同的发展模式, 实现具有区域发展规律或特色的空间增长模拟, 进而解决转换规则的空间复杂性。下面给出 CC-CA 模型在北京市域的应用实践。

2 北京市的应用模型

受全国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, 为了对远景的城市空间布局进行判断和预警, 将 CC-CA 模型应用于北京市域 (16410km²), 模型精度为 500m (65628 个元胞)。开发平台为 VBA 和 ESRI Arcobjects9.0, 实现了基于不同城市发展政策模拟城市空间增长的功能, 可以给出考虑城市的自发增长、区位条件以及规划控制的城市空间布局。

2.1 研究范围

研究区域北京市域位于华北平原的北端，西以西山与山西高原相接，北以燕山与内蒙古高原相接，东南面向平原，距渤海西岸约 150km。北京的平原区为高程在 100m 以下的平原及台地，总面积 6338km²（不含延庆盆地），占全市面积的 39%；山区面积 10072km²，占全市面积的 61%（图 2）。2006 年全市总人口 1581 万人，GDP7870 亿元，城镇建设用地面积 1324km²。

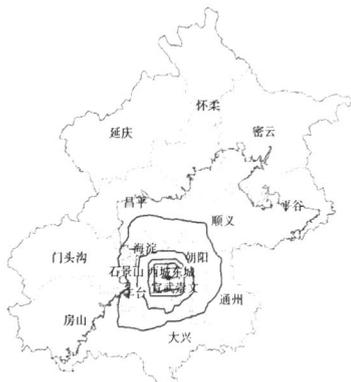


图 2 研究区域图（灰色为山区）

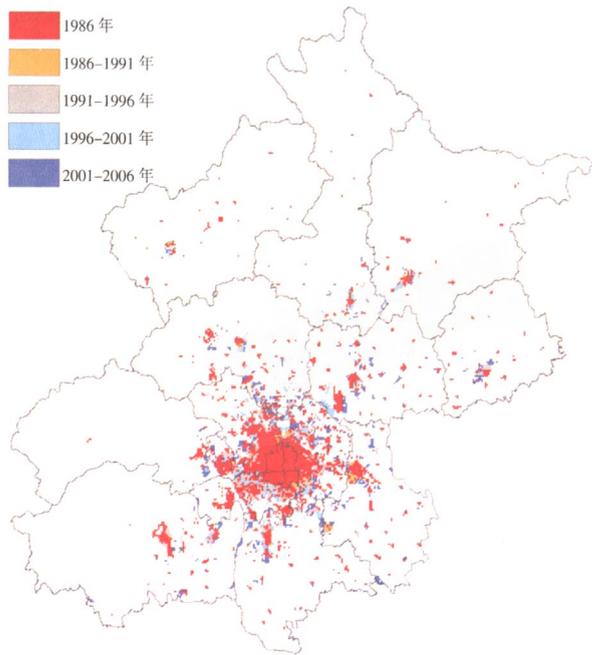


图 3 1986-2006 年不同阶段土地利用图

2.2 数据

北京的应用模型主要涉及 6 类基础数据。

2.2.1 土地利用

涵盖 1986、1991、1996、2001、2006 五年的解译自 TM 遥感影像的数据（图 3），土地利用类型分为 6 类：城镇建设用地、农村建设用地、农地、林地、水域和未利用地。在模型应用中，将城镇建设用地之外的 5 类用地合并为非城镇建设用地。

2.2.2 限建分区规划

以自然地形、资源保护、风险避让等方面来设置对城市增长控制的制度性等级，综合考虑了包括河湖湿地、水源保护、地下水超采、洪涝调蓄、陡坡地区、绿化保护、城镇绿化隔离、农地保护、文物保护、地质遗迹保护、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、电磁辐射设施防护、市政基础设施



图 4 某区域限建要素（左）及相应 UAZ（右）示意图

防护、噪声污染防治等 17 类，110 多项限建要素^③。结合现有的法律、法规和规范等，将研究范围分为五个分区：绝对禁建区、相对禁建区、严格限建区、一般限建区和适宜建设区。

由于限建要素多达 110 项，同时空间尺度不一，其重叠现象比较普遍，因此对所有限建要素进行综合，生成相应的均一分析单元（Unified Analysis Zone, UAZ）图层（图 4），在一个 UAZ 单元内，限建要素的空间分布情况相同。

考虑到同为严格限建或一般限建的限建要素，其限建程度也可能存在较大

的差异，并且每个 UAZ 内的限建要素构成一般都不相同，因此引入了限建指数的概念，其相比限建分区更能表征每个 UAZ 对城镇建设的限制程度。利用限建指数可以模拟更为连续的城市增长控制。同时，在分区方案中禁止建设、限制建设的对象是城镇建设用地，而不是具体的每一类城镇建设用地。实际上每一类城镇建设用地的人类活动强度、开发强度等各不相同，则相对应对生态造成的破坏或受环境灾难的影响程度各不相同，所以研究中对每一类城镇建设用地划定了相应的限建分区，进而为模拟不同城市用地类型提供了基础。

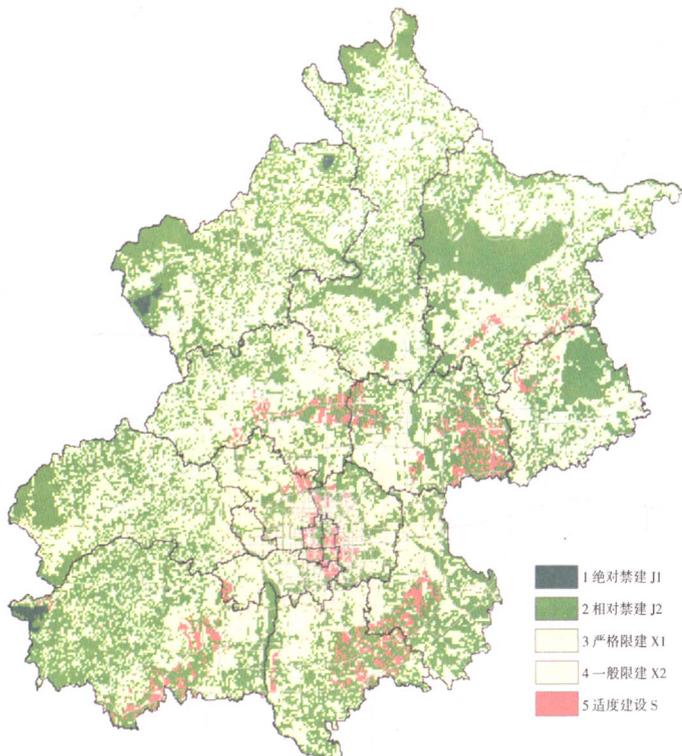


图5 限建分区规划数据空间分布图

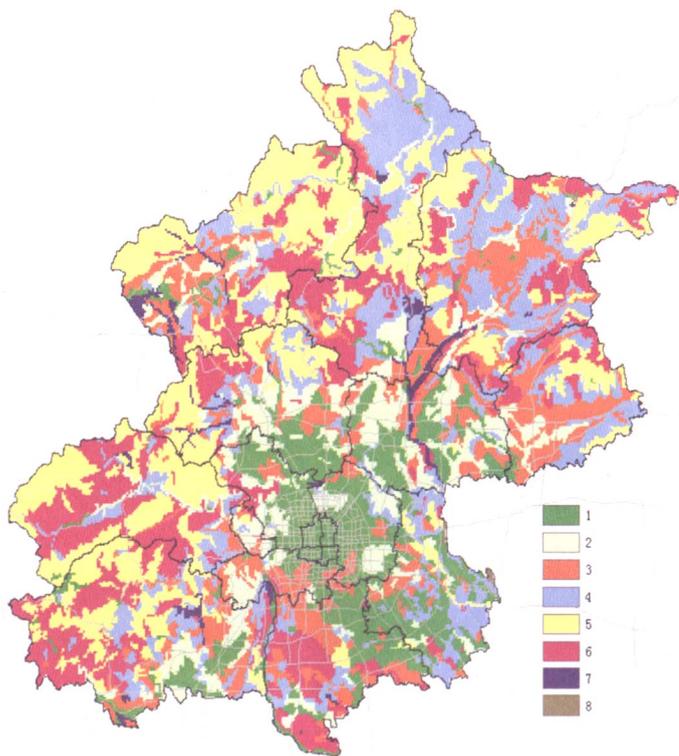


图6 土地等级数据空间分布图

北京市域的限建分区如图5所示。本次应用没有考虑限建指数和各种用地类型的限建分区,而是采用了基本的限建分区方案作为规划控制约束条件。规划控制约束限建分区变量对应其中的绝对禁建区和相对禁建区之和^④,该规划控制约束的实施力度越大,则禁止建设区在城市增长的过程中被侵占的概率越低。同时,对于政府而言,也可以通过新建国家公园、自然保护区、生物通道,识别新的地质灾害易发区等政策,改变禁止建设区的空间分布,进而也可以对城市增长起到规划控制约束的作用。

2.2.3 土地等级

用于表征市域土地的农业适宜性,将土地分为1-8类地(图6),依次不适合农业耕作(具体如表1所示),土地等级变量对应应该数据。这一数据是根据土地的土壤、气候气象、地形等自然条件对土地耕种适宜性的客观评价,可以看出良田主要分布于平原区的中心地区、昌平东南部、亦庄新城地区,这与已有的城镇建设用地的空间分布有较大的矛盾,即越适宜农业耕种的地区,现状城镇的发展也往往规模越大,其根源在于农业用地的适宜性评价标准与建设用地适宜性的评价标准有较大的交叉。因此利用土地等级这一规划控制约束条件,可以反映政府对良田的保护政策,即该政策的实施力度越大,则将有更多的良田在城市增长的过程中得以保护而非被侵占。

2.2.4 区位

用于表征市域不同地区的区位条件(或开发适宜性),主要包括与各级城镇中心、道路、河流、乡镇边界的最近距离。该数据为基于相应的基础数据,利用ESRI Spatial Analyst扩展模块计算获得。

2.2.5 城市规划

自北京1958年行政区划调整形成目前的市域范围以来,北京市域内开展的总体规划主要有五次(1958年、1973年、1982年、1992年和2004年),模

表 1 土地等级数据分类表

栅格值	类型说明
1	土地质量好, 限制因素强度为零级, 一般无早、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, 有早、涝、砂、碱等限制性因素, 但强度轻微, 均为一级。土地适宜性和生产力较高。
3	土地质量中等, 易早、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, 限制强度为二级, 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, 限制强度达到五级或六级。缺少细土层, 质地稀疏, 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。

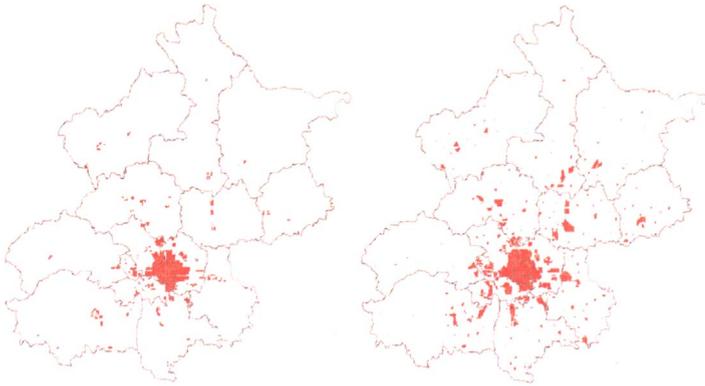


图 7 1982 年版(左)及 1992 年版(右)规划建设用地分布图

表 2 不同历史阶段的 Logistic 回归系数表

变量	2001-2006 年	1996-2001 年	1991-1996 年	1986-1991 年
d_tam(与中心区的最短距离)	-0.000016*	-0.000035*	-0.000041*	
d_vcity(与重点新城的最短距离)	-0.000025*	-0.000031*		-0.000031*
d_city(与新城的最短距离)	-0.000019*	-0.000066*	-0.000033*	
d_vtown(与重点镇的最短距离)			0.000025*	0.000058*
d_town(与一般镇的最短距离)		0.000089*	0.000066*	
d_river(与河流的最短距离)	-0.000138*			
d_road(与道路的最短距离)	-0.000256*	-0.000804*	-0.000524*	-0.001092*
d_bdtown(与镇行政边界的最短距离)		-0.000377*		
f_rgn(区域影响力)	4.302458*	-13.737258*		
planning(城市规划)	-0.410472*	0.254173	0.575671*	1.310654*
con_f(限建分区)	-0.521103*	-0.453115*	-0.497453*	-1.506241*
landresource(土地等级)			-0.075543	-0.233262
Constant(常数项)	-0.174524	0.588961	-0.998267*	-3.610055*

* 显著性处于 0.001 水平

型应用了后三个版本的规划数据, 其中 1982 年和 1992 年规划建设用地见图 7, 2004 年规划的规划期为 2004-2020 年, 其规划建设用地见图 8 中的“2020

年土地使用规划图”。该数据的土地使用类型分为城镇建设用和非城镇建设用, 城市规划变量对应这些数据, 其中规划城镇建设用为 1, 其余为 0。对

于政府而言, 城市规划这一规划控制约束的实施力度越大, 则规划建设用地被开发的概率越大, 同时政府也可以通过调整城市规划方案, 如划定开发新区等手段, 对城市增长进行干预, 进而达到预期的目标。

2.2.6 宏观社会经济

包括 1952 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, 主要用于建立宏观层次的城镇建设用总地量(或历年增量)与各宏观指标的关系, 进而用于宏观社会经济约束条件的制定。

3 综合约束条件与规划控制情景

3.1 综合约束条件的历史分析

通过 Logistic 回归对历史数据进行分析, 可以获得不同历史阶段的相应参数, 进而对不同历史阶段约束在城市增长过程中所起到的作用进行对比分析, 并可作为模型模拟参数设定的依据, 避免了主观赋值的武断性, 是模型应用的重要基础工作。根据数据的可获得情况, 可以分析的历史阶段主要有: 1986-1991 年、1991-1996 年、1996-2001 年以及 2001-2006 年。在各个历史阶段的回归中, d_tam、d_vcity、d_city、d_vtown、d_town、d_bdtown、landresource、con_f 等变量均保持不变(假设这些要素的空间分布不随时间变化), 而 planning、d_road 和因变量^⑥各个阶段不同, 不考虑 neighbor 变量。各个历史阶段的回归系数如表 2 所示, 表中空格

表示该变量对城市增长的影响不显著,系数为0。

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。横向对比规划控制约束条件随时间的变化,可以看出,城市规划除2001—2006年为负外其余均为正值,1986—1991年所起到的作用最大,而近年来不断弱化,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,而近年来随着社会主义市场经济的强化,使得开发受市场选择的影响不断增大;限建分区一直保持负值,其中1986—1991年的绝对值最大,即对禁建区的保护力度最大,而近年来基本持平,总体上限建分区对城市增长在各个历史阶段都起到了限制作用;土地等级在1996年以后对城市增长的影响不显著,1986—1996年保持负值,但1986—1991年的绝对值更大,即近年来土地等级因素所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。

通过 Logistic 回归可以识别各类约束条件在城市增长过程中所起到的作用及其随时间的变化,回归系数可以作为模型模拟的基本参数用于近期及远景的城市增长的模拟,同时不同阶段的回归系数适用于解决 CC-CA 模型的时间复杂性,即实现不同阶段的模拟采用不同的约束条件。下面给出基于回归系数所设置的城市增长情景,篇幅有限,下面仅对趋势增长情景和规划控制情景进行模拟。

3.2 根据现状设置基本情景^①

目前,北京市的规划部门制定的城市总体规划为2004年版本,其规划期末为2020年,而对2049年即北京作为新中国首都100周年这一时期,乃至其他远景的城市空间形态并没有进行规划或预测。为了对下一轮城市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—2049年的城市空间形态进行模拟。通过强化以城市规划为

主的规划控制约束,可以实现2020年的规划方案,具体的政策支持参见 Long 等(2008)。在预测2020—2049年的城市增长的过程中,假定在2020年现行的城市规划用地方案已经实现,并基于其进行2049年城市增长的预测。这种预测模式相比在现状土地利用的基础上进行预测,可以降低预测的不确定性,因为中国的城市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较大,即大多数开发都处于规划区范围内。

以每年增长30km²城镇建设用地的速度(2049年的城镇建设用地总量则为3412 km²,13650个元胞)和2001—2006年的历史回归结果,以及采用 MonoLoop 方法识别的邻域作用的权重系数作为模型的输入参数^②,即2020—2049年的城市空间增长采用2001—2006年的增长模式(即道路、新城和中心城引导开发,乡镇的开发不显著),模拟2049年的空

间增长,模拟结果如图8所示(红色为城镇建设用地)。可以看出,总体上城市空间增长略呈蔓延态势,主要的增长点位于顺义、昌平、通州等新城地区,南城相比北城的发展较为缓慢,同时小城镇的发展速度不大。

3.3 调整约束条件设置规划控制情景

利用 CC-CA 模型可以在趋势增长情景的基础上,通过对宏观约束条件的调整,进而控制城市增长的速度,实现模拟不同宏观约束条件作用下的城市增长情景的目的(如紧凑城市策略、人口控制政策等);可以通过制定新的规划控制约束条件(即规划方案)改变城市增长的格局,如修建七环路、制定新的发展促进区、新建自然保护区等政策;另外还可以通过改变政府对相应规划控制约束条件的实施力度,生成不同发展侧重的城市空间增长情景。比如给出通过调整相应规划控制约束条件的实施力

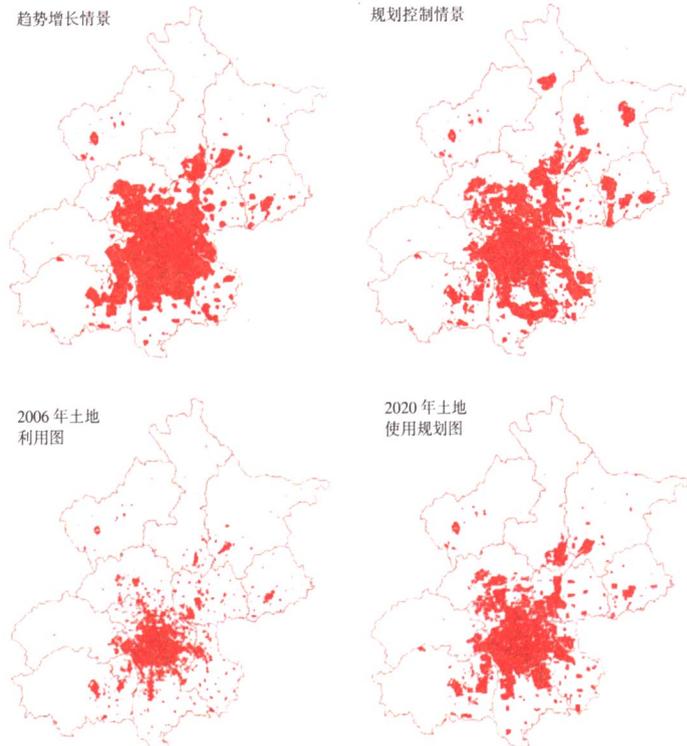


图8 趋势增长情景、规划控制情景模拟结果及现状和规划用地图

表 3 趋势增长及规划控制情景模拟结果对比表 (面积单位: km²)

情景名称	占用禁建区面积	占用绿化隔离地区面积	占用农村建设用地面积	集中程度 Moron I ^⑥
规划方案	538	1128	169	0.14
趋势增长情景	843	1595	284	0.25
规划控制情景	765	1181	248	0.13

度形成的规划控制情景,在尊重城市经济基本理论的前提下尽可能地尊重自然,并反映政府规划的控制力,这符合中国规划制度的国情,对于规划实现的指导意义较大。

规划控制情景中,假设城镇建设用地增长速度保持与趋势增长情景相同,通过改变相应规划控制约束条件的实施力度实现模拟。其中,限建分区的实施力度 $w_{11} = -2$ (趋势增长情景为 -0.521103),土地等级的实施力度 $w_{12} = 0.2$ (趋势增长情景为 0),而其余参数保持与趋势增长情景相同,城市规划的实施力度 w_{10} 也与趋势增长情景相同^⑧,均为 -0.410472 。通过参数设置,强化了规划控制约束(限建分区和土地等级)的实施力度,形成了如图 8 所示的城市空间格局,相比趋势增长情景,因为限建分区考虑了城市生态的约束条件,土地等级考虑了对优质农田的保护,所以该情景的城镇建设用地相对分散,可以保证城市增长对自然资源的破坏和受灾害风险的影响更小,是相比趋势增长情景更为可持续的城市增长模式。

为了对趋势增长情景和规划控制情景进行对比,选择四个指标进行分析,分析结果如表 3 所示。可以看出规划控制情景相比趋势增长情景,在禁止建设区和绿化隔离地区的占用方面明显处于较低水平,这也体现了“可持续”的特点,同时规划控制情景的城镇建设用地的集中程度也较低。

4 结论与讨论

笔者提出了综合约束 CA 城市模型,包括近邻、宏观社会经济、空间和规划控制四类约束条件,对于其中的规划控制约束条件的限建分区,识别了对城市

增长起阻碍(限制、控制)作用的 110 项限建要素,能够和城市规划、土地等级等规划控制约束条件一起反映城市空间增长所面临的制度性的复杂约束。通过将这些约束条件集成到经典的 CA 城市模型,可以更为真实地模拟城市的自组织增长过程,并能够对各个基本因素进行专门的情景分析,作为政府控制、引导城市增长的政策模拟平台。

在综合约束 CA 城市模型在北京市域的应用中,通过历史回归分析,能够识别约束条件在城市增长过程中所起的作用,进而能够清晰地分析城市增长动力因素和阻力因素在这一过程中动态的影响。通过对趋势增长情景的模拟,可以识别在同样约束条件作用下未来的城市布局,在趋势增长情景基础上,通过实施更为严格的约束对应的政策力度,可以给出更为可持续的城市空间布局方案。

但是在综合约束 CA 城市模型的应用中,并没有考虑约束条件的空间复杂性,后续将在不同的行政区域分别进行转换规则的获取工作,进而实现转换规则的空间分异,解决空间复杂性的问题;同时,目前仅以强调综合的限建分区和土地等级作为规划控制约束引入规划控制情景的模拟过程,后续将拟以限建指数作为约束条件之一,用以模拟更为真实的城市增长,同时拟利用针对不同用地类型的限建分区,将综合约束 CA 城市模型扩展到多种土地利用(如居住、商业、工业等),实现街区尺度的城市增长模拟,将具有更深层次的借鉴意义。

(感谢北京市城市规划设计研究院对本研究的支持)

注释

- ① 通过空间相关性分析方法,可以识别综合约束条件中各个约束条件的空间相关性,如果两个约束条件的空间相关性约束性很强,则需要剔除其中的一个变量。
- ② 区位变量的设置可以根据研究范围和重点的不同有所改变。
- ③ 关于该约束条件的深入介绍,参见文献(龙瀛等,2006)。
- ④ 利用社会统计软件 SPSS 进行禁建区 con_f 和限建区 con_r 的空间相关性分析,结果显示 con_f 与 con_r 相关系数为 -0.936 ,负相关,因此删除 con_r 变量,仅在模型中引入 con_f 用于表示限建分区。
- ⑤ 因变量利用各个阶段之末的土地利用栅格数据和之初的土地利用栅格数据作代数减法获得。
- ⑥ 本文对北京城市空间增长的模拟结果仅代表笔者个人的观点,与笔者所在单位无关。
- ⑦ 也可以以其他历史阶段的回归系数作为模型输入,从而模拟按照其他历史阶段发展趋势的城市增长情景。
- ⑧ 因为已经假定 2020 年的规划建设用地完全实施,因此城市规划的实施力度对远景的城市增长预测不敏感,原则上可以通过制定 2049 年的新的规划用地方案作为城市规划约束引入模拟过程,进而通过调整其实施力度模拟相应的城市增长,但北京目前尚没有制定 2049 或 2020 年之后的规划用地布局方案,因此此处不调整城市规划政策的实施力度。
- ⑨ Moron I 指数用于描述空间自相关性,可以用于分析城市建设用地分布的集中与分散的程度,其最大值为 1,该值越小则反应集中程度越低,即城市建设用地分布越分散。

参考文献

- [1] ALKHEDER S, SHAN J. Cellular automata urban growth simulation and Evaluation—a case study of indianapolis. proceedings of the 8th International Conference on GeoComputation. Uni-

- versity of Michigan, United States of America, 31 July - 3 August 2005.
- [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] DAVID O S, PAUL M. Torrens. Cellular models of urban systems[M]. CASA working paper, 22. 2000.
- [4] ENGELEN G, WHITE R, ULJEE I. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban and regional planning and policy making. Timmermans, H. (Ed): *Decision support systems in urban planning*. London: E&F N Spon. 1997: 125-155.
- [5] GUAN G, WANG L, CLARK K C. An artificial-neural-network-based, constrained CA model for simulating urban growth [J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2005, 32(4), 369-380.
- [6] LANDIS L D. The California urban future model: a new generation of metropolitan simulation models [J]. *Environment and Planning B*, 1994, 21 (4): 399-420.
- [7] LANDIS L D. Imaging land use futures: applying the California urban future model [J]. *Journal of American Planning Association*, 1995, 61(4): 438-457.
- [8] LANDIS L D, ZHANG M. The second generation of the California urban future model[J], Part1: Model logic and theory. *Environment and Planning B*, 1998a, 25 (5), 657-666.
- [9] LANDIS L D, ZHANG M. The second generation of the California urban future model[J], Part2: Specification and calibration results of the land-use change sub-model. *Environment and Planning B*, 1998b, 25(6), 795-824.
- [10] LI X, YEH A G O. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14 (2), 131-152.
- [11] LONG Y, SHEN Z, DU L, MAO Q, GAO Z. BUDEM: an urban growth simulation model using CA for Beijing metropolitan area [M]. *Geoinformatics*, Guangzhou, China, 2008: 28-29.
- [12] WARD D P, MURRAY A T. An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 7 (5): 235-250.
- [13] WARD D P, MURRAY A T, PHINN S R. A stochastically constrained cellular model of urban growth [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(6): 539-558.
- [14] WHITE R, ENGELEN G, ULJEE I. The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24: 323-343.
- [15] WHITE R, STRAATMAN B, ENGELEN G. Planning scenario visualization and assessment—a cellular automata based integrated spatial decision support system [M]//GOODCHILD M F, JANELLE D G, SHRORE Z G. (Eds.), *Spatially integrated social science*. Oxford University Press, 2004: 420-442.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] YEH A G O, LI X. A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS[M]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28, 733-753.
- [19] ZHAO Y, MURAYAMA Y. A Constrained CA Model to Simulate Urban Growth of the Tokyo Metropolitan Area. *Proceedings of the 9th International Conference on GeoComputation [M]*. National University of Ireland, Maynooth, Ireland, 3 -5 September, 2007.
- [20] 刘小平, 黎夏, 彭晓娟. “生态位”元胞自动机在土地可持续规划模型中的应用[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2391-2402.
- [21] 龙瀛, 何永, 刘欣, 杜立群. 北京市限建区规划: 制订城市扩展的边界[J]. *城市规划*, 2006, 30(12): 20-26.

收稿日期: 2008-09