

# 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析

龙瀛<sup>1,2</sup>, 沈振江<sup>3</sup>, 毛其智<sup>1</sup>, 党安荣<sup>1</sup>

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045;  
3. 日本金泽大学环境设计学院, 日本金泽 920-1192)

**摘要:** 约束性元胞自动机 (Constrained cellular automata, Constrained CA) 在模拟城市增长方面已有诸多实践, 已有文献常利用各种反映土地利用需要、区位影响、管理制度等的政策参数, 设定不同的城市空间发展情景以反映未来的城市形态。在基于约束性CA进行城市形态情景分析时, 以各种政策参数作为情景条件的研究实例较多。而在中国的城市规划实践中, 城市规划用于建设管理的审批, 对应明确的城市形态, 因而如何利用城市形态作为情景条件分析所需政策, 也有实践意义, 可以解决一些广为关注的重要问题, 例如已有的发展政策是否与期望的城市形态相匹配, 不同规划方案所需采取的政策有什么区别等。本文提出了以城市形态作为情景条件 (即形态情景分析) 的新方法, 该方法基于约束性CA, 改变了传统的约束性CA情景条件的设置方法, 以期望的未来城市形态为目标, 识别相应需要的发展政策。并将北京市域的4个规划城市形态作为情景条件进行了实证分析, 对多个规划方案实施的可能性和政策参数进行对比分析, 证明该方法具有较好的适用性和可行性, 是将约束性CA的应用扩展到城市规划领域的又一尝试。

**关键词:** 元胞自动机; 城市形态; 期望情景; 城市规划; 北京

## 1 引言

在城市增长分析、模拟和预测中, 为了反映未来城市形态发展的不确定性, 常采用情景分析 (Scenario Analysis, SA) 的方法, 以拟采用的发展政策作为情景条件, 给出多个未来城市形态的可能方案, 作为决策参考的依据<sup>[1-5]</sup>。而本文与以发展政策作为情景条件的城市增长情景分析的思路相反, 提出了形态情景的概念和分析方法。形态情景采用城市形态作为情景条件, 探讨在以空间规划为发展前提的国家与地区, 分析配套的城市空间发展政策的科学性, 及不同情景所对应的发展政策的区别。在规划实践中, 某种城市形态的政策依托是广为关注的问题, 因此探讨形态情景这一问题具有重要的实践意义。针对形态情景, 本文提出了约束性元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 为理论基础的形态情景的分析方法, 分析所需要的发展政策并识别其政策参数。需要强调的是, 本文模拟的城市形态为城镇建设用地的空间分布, 即在约束性CA中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。

在中国, 区域规划一般以经济为主导, 而城市规划的形式多以空间规划为主, 有时甚至是在没有考虑社会经济发展规划条件下制定城市规划方案。这样, 反过来大家甚至习惯于先有合理的空间规划设想, 再来考虑社会和经济需要的可能性, 研究可以容纳多少社会经济的开发需求, 以及需要采取哪些配套政策来保障方案的实现。另外在规划实践中, 城

收稿日期: 2009-07-01; 修订日期: 2010-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50678088); 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAJ14B08) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.50678088; Technical Supporting Programs Funded by Ministry of Science & Technology of China, No.2006BAJ14B08]

作者简介: 龙瀛 (1980-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 中国地理学会会员 (S110007674M), 主要研究方向为规划支持系统和城市系统微观模拟。E-mail: longying1980@gmail.com

市规划部门所确定的城市规划方案,往往和实际的城市发展有偏差,屡见被突破的现象<sup>[6-7]</sup>,而规划部门对此又往往缺乏政策指导,不知道规划的城市形态需要哪些政策来支持以辅助其实现,这些政策又与现行的城市发展政策有何不同,以及从现状到规划期末之间不同阶段的城市空间的可能形态,都是城市规划部门所关心的重要问题。从这些角度来说,城市形态作为模拟的情景条件这种方式也有实际意义。

情景 (Scenario) 被定义为“是对一些有合理性和不确定性的事件在未来一段时间内可能呈现的态势的一种假定”<sup>[8-9]</sup>,而情景分析是“预测这些态势的产生并比较分析可能产生影响的整个过程,其结果包括对发展态势的确认、各态势的特性、发生的可能性描述,并对其发展路径进行分析”<sup>[10]</sup>。情景分析方法承认未来的发展是多样化的,有多种可能发展的趋势,其预测结果也将是多维的<sup>[11-12]</sup>。鉴于城市空间发展的不确定性,往往很难对未来的城市形态进行准确的预测,因此情景分析在城市增长模型中的应用较为普遍,一般根据不同的政策参数设置给出相应的城市形态。城市增长情景分析或土地使用情景分析<sup>[13]</sup>是对远景城市形态的判断,其在数学上可以表达为(公式1中, $x$ 和 $a$ 都应该有 $ij$ 脚标,用于表示空间位置,该公式中做了简化,没有标明):

$$\begin{aligned} Y &= \Psi(P) \\ P &= f(X, A) \\ X &= \{x_k^t | k = 1, 2, 3, \dots, n; t = 1, 2, 3, \dots, p\} \\ A &= \{a_k^t | k = 1, 2, 3, \dots, n; t = 1, 2, 3, \dots, q\} \\ T^p &= \{T_i^p | t = 1, 2, 3, \dots, p; T_i^p \in [T_s, T_e]\} \\ T^q &= \{T_i^q | t = 1, 2, 3, \dots, q; T_i^q \in [T_s, T_e]\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $A$ 变量的物理意义是城市发展政策及其空间作用范围(以下简称政策),在不同的发展阶段, $A$ 变量一般会有变化; $X$ 变量的物理意义是 $A$ 变量作用的强度(以下简称政策参数),即对应政策的执行力度,其也随时间变化的; $P$ 为根据发展政策 $A$ 和政策参数 $X$ 利用开发概率函数 $f$ 计算得到的开发概率或适宜度; $\Psi$ 为利用开发概率确定被开发区域的函数。 $Y$ 变量对应应在相应发展政策作用下的城市形态(某处的城市形态 $y_{ij} = 1$ 表示 $ij$ 处被开发,对应城镇建设用,地, $y_{ij} = 0$ 表示 $ij$ 处未被开发,对应非城镇建设用,地)。  $T_s$ 表示情景分析时的基准,即现状时间点,  $T_e$ 表示预测的,即未来时间点( $Y$ 对应该时间点),  $q$ 表示政策 $A$ 变化的次数,  $T^p$ 表示对应的时间点,  $p$ 表示政策参数 $X$ 变化的次数,  $T^q$ 表示对应的时间点。未来某一时间点的城市形态是基于现状到未来时间点的发展政策 $A$ 和政策参数 $X$ 综合作用的累计结果。本文对这一过程进行三条基本假设:

(1) 函数 $f$ 以多指标评价 (Multi-Criteria Evaluation, MCE) 的形式(即加权平均)来表示,函数 $\Psi$ 采用开发概率与阈值相比较的方式以确定某区域是否被开发;

(2)  $X$ 和 $A$ 保持 $T_s$ (现状执行的政策)或 $T_e$ (计划未来实施的政策)时刻的状态不变,即 $p$ 和 $q$ 都等于1;

(3)  $X$ 是空间静态变量,即在空间上的分布是均匀的。

“三条基本假设”会造成分析与实际有一定的误差,但鉴于数据和计算方面的限制,本文采取这些假设。公式(1)则转变为公式(2)的形式。

$$\begin{aligned} X &= \{x_k | k = 1, 2, 3, \dots, n\} \\ A &= \{A_k | k = 1, 2, 3, \dots, n\} \\ &\text{where } A_k = \{a_{k,ij} | k = 1, 2, 3, \dots, n; ij \in \Omega\} \\ \text{prob}_{ij} &= \sum_{k=1}^n x_k \times a_{k,ij} \\ y_{ij} &= 1, \text{ if } \text{prob}_{ij} \geq p_{\text{threshold}} \\ Y &= \{y_{ij} | ij \in \Omega\} \in \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $a_{k, ij}$  表示第  $k$  项发展政策在  $ij$  处的状态值,  $A_k$  表示第  $k$  项发展政策的空间分布,  $X_k$  表示第  $k$  项发展政策的政策参数的数值,  $\Omega$  表示整个研究区域,  $ij$  表示地理空间坐标,  $prob_{ij}$  表示  $ij$  处的开发概率,  $p_{\text{threshold}}$  表示开发概率的阈值,  $prob_{ij}$  大于等于该概率则  $y_{ij}$  被开发。

在已有的城市增长情景分析研究中, 一般也沿用这“三条基本假设”。例如, Klosterman<sup>[1]</sup>开发的规划支持系统“*What if?*”中,  $A$  对应其中的土壤条件、洪水淹没区、交通条件等发展政策, 而  $X$  对应相应的权重系数; Landis<sup>[2-5]</sup>所开发的 CUF 和 CUF-2 (California Urban Future Model) 中,  $A$  对应每个开发单元 (Developing land unit, DLU) 的区位、环境条件、土地使用、区划 (Zoning)、现状开发密度和交通可达性等, 而  $X$  对应这些政策的权重系数。在常规的城市增长情景分析中,  $X$  和  $A$  是情景条件, 基本的方法是根据不同城市发展偏好所设置的  $A$  变量和  $X$  变量, 求取相应的城市形态  $Y$ , 对于任意  $X$  和  $A$ , 在数学上都可以有相应的情景  $Y$  对应, 即不同的发展政策都可以得到相应的城市形态。需要指出的是, 在已有的城市增长情景分析的研究中, 多数都是调整政策作用力度  $A$ , 而政策本身  $X$  保持不变。

而本文提出的形态情景, 遵循“三条基本假设”, 可以看作常规的城市增长情景分析的逆过程, 其以城市形态 ( $Y$ ) 作为情景条件, 分析不同的城市形态方案所对应的城市发展政策 ( $X$  和  $A$ ) 的可能性和差别。在数学上, 对于作为情景条件的城市形态  $Y$ , 则可能有以下两种情况: ① 无解, 没有  $X$ 、 $A$  满足条件, 即该形态不满足当前的政策设置; ② 至少一组解, 即要实现该城市形态, 可以有至少 1 个政策和政策参数的组合。

利用约束性 CA 的方法, 通过不同的期望城市形态  $Y$  (即形态情景) 和已知政策  $A$ , 可以验证政策参数  $X$  的可行性, 以及不同形态政策参数组间的对比, 进而定量地识别政策参数的需求影响。这样对约束性 CA 的应用是一个创新, 结合城市规划, 特别是土地利用规划的多个方案进行模拟, 可以提高约束性 CA 在规划实践、城市增长分析方面的实用性。

如上所述, 本文尝试提出了基于约束性 CA 进行形态情景分析, 进而给出发展政策建议, 这一探索不同于约束性 CA 的传统应用, 其从规划实践的需求出发, 分析在有具体的政策和方针的条件下, 规划师从综合的角度制定的多个规划方案, 其形态实现的可能性。

## 2 方法

有关约束性 CA 的应用研究, 并没有将城市形态作为情景条件来设置的先例研究。约束性 CA 可否用于形态情景分析, 城市形态能不能作为情景条件? 需要先回顾一下约束性 CA 的状态转换规则的获取方法。早期的约束性 CA 方面的研究, 多侧重于研究如何识别并设置 CA 的状态转换规则, 然后据此规则进行模拟<sup>[14-18]</sup>。状态转换规则确定的过程中, 往往根据某个历史阶段的城市形态 ( $Y$ ), 以及已知的约束条件 ( $A$ ), 识别约束条件的参数 ( $X$ )。本文的形态情景分析也是根据  $Y$  和  $A$  求取  $X$  的过程, 与前者不同点在于, 城市形态是未来形态, 不是历史数据。

利用约束性 CA 进行形态情景分析, 其特点为根据已知的空间形态  $Y$ , 求取 CA 状态转换规则。要解决这个问题, 其关键是根据形态求参数解。该问题可以参考已有的根据历史数据进行参数率定 (Calibration) 的方法实现  $X$  的识别, 主要思路是将现状空间形态看作某一历史阶段 ( $T_1 \rightarrow T_2$ ) 的开始时间点  $T_1$ , 而将期望实现的空间形态看作这一历史阶段的结束时间点  $T_2$ , 即利用现状的形态到期望形态的变化过程。识别方法可以采用 Logistic 回归、人工神经网络、遗传算法、Nested loops 等。其关键是如何根据 CA 的输出识别其状态转换规则。

以什么标准作为未来城市形态能否实现的标准, 是需要确定的, 这里认为通过形态情景分析所识别的政策参数  $X$  作为输入条件, 模拟生成的形态  $Y$  与所设置的形态情景的

$Kappa$  系数小于 80%，则认为无解，即该形态情景没有可依托的政策；反之，如果  $Kappa$  系数大于等于 80%，则认为这套参数可以反映所设置的形态情景，即有解的情况。一般情况，对于有解的情况，并不是仅有一组  $X$  满足该条件，而是多个，是一个集合（或者称之为解空间）： $\{X|y' = f(X, A), Kappa(y, y') \geq 80\%\}$ ，其中  $y$  为所设置的形态情景， $y'$  为通过识别的政策参数利用约束性 CA 模拟生成的形态。

本文沿用 Wu<sup>[19]</sup>、Li 和 Yeh<sup>[20]</sup> 等已建立的概念模型，具体如公式 (3) 所示。约束性 CA 的邻域采用摩尔邻域 (Moore、3×3 矩形、8 个邻近元胞)，离散时间的一次循环对应一个月，元胞的状态受宏观社会经济约束 ( $A_{mac}$ )、空间约束 ( $A_{spa}$ )、制度性约束 ( $A_{ins}$ ) 和邻域约束 ( $A_{nei}$ ) 影响 (其中宏观社会经济约束条件没有对应的实施力度  $x$ )。发展政策  $A$  对应 4 类约束条件的空间范围或数值，空间性和制度性约束在城市增长的过程中可以假设其与现状或规划的一致，宏观社会经济约束可以体现为城市形态的总规模 (如城市开发面积、建筑量)，而邻域约束则随着城市增长的过程不断变化，因此，发展政策  $A$  中除了邻域约束外其他都可以假定为已知，即与现状或未来规划一致。邻域约束对应的政策  $a$  则在模拟中根据城市形态的变化不断作相应的改变。

$$V_{i,j}^{t+1} = f(V_{i,j}^t, A_{mac}, A_{spa}, A_{ins}, A_{nei}^t) \quad (3)$$

式中： $V_{ij}^t$  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； $f$  为元胞的状态转换规则；

本文的约束性 CA 的状态转换规则如公式 (4) 所示 (第  $t+1$  次模拟)，采用 MCE 作为 CA 状态转换规则的形式。

$$\begin{aligned} & 1. i \text{ andAmount} = \sum_t \text{stepk um}^t \\ & \text{fn iteration } t+1: \\ & 2. s_{ij}^t = x_0 + \sum_{k=1}^{n-1} x_k * a_k + x_n * a_n^t = s_0 + x_n * a_n^t \\ & 3. p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \\ & 4. p_{ij}^t = \exp \left[ \alpha \left( \frac{p_g^t}{p_{g \max}^t} - 1 \right) \right] \\ & 5. \text{if } p_{ij}^t \geq p_{\text{threshold}} (p_{ij}^t | \text{stepk um}^{t+1}) \text{ } p^{t+1}(ij) = a \text{ eveloped} \\ & \quad \text{otherwise } p^{t+1}(ij) = r \text{ na eveloped} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $LandAmount$  为总的元胞增长数目 (对应总开发规模)， $stepNum$  为每次循环 (iteration 或 step) 中被新开发的元胞数目， $s_{ij}^t$  为土地利用适宜性， $p_g^t$  为变换后的全局概率， $p_{g \max}^t$

为每次循环中全局概率最大值， $\alpha$  为扩散系数 (1-10)， $p_{ij}^t$  为最终概率， $x_0$  为常数项， $a_n$  表示土地整理与开发的邻域影响，反映成片且具有连续性的土地整理与开发的规划引导与建设管理，在本文中称邻域政策， $x_n$  表示邻域政策参数， $a_k$  表示除邻域之外的政策， $x_k$  表示除邻域之外的政策参数， $s_0$  表示各个步骤中适宜性保持不变的部分 (邻域开发强度保持不变变化)， $S^{t+1}(ij)$  表示元胞  $ij$  在  $t+1$  步模拟中的状态，而  $P_{\text{threshold}} (P_{ij}^t, stepNum^{t+1})$  表示控制元胞开发速度和数量的邻域，其数值随着  $P_{ij}^t$  和  $stepNum^{t+1}$  而改变，每次模拟中其数值一般不同，以保证在第  $t+1$  步模拟中，有  $stepNum^{t+1}$  个元胞被开发。

模拟的基本过程是，首先基于宏观社会经济条件计算不同时间阶段的  $stepNum$  参数 (被开发元胞的数量)，在 CA 环境中计算土地利用适宜性、全局概率和最终概率等变量，

最后采用空间分配的思路, 根据最终概率和待开发元胞的数量, 进行待开发元胞的空间识别, 完成一个CA离散时间 (Iteration) 的模拟。根据模拟的目标时间, 确定循环次数, CA不断循环, 完成整个模拟过程。

下面探讨基于上面建立的理论模型, 如何求取模型参数, 进而实现形态情景分析。需要识别的模型参数主要是政策参数  $stepNum$  和  $X$ 。从参数识别的方法和流程上, 依次是  $stepNum$ 、 $x_k$  和  $x_n$  的识别, 其中  $stepNum$  采用简单的增速计算方法,  $x_k$  采用 Logistic 回归方法, 而  $x_n$  采用 MonoLoop 方法, 下面对其具体进行说明。

对于  $stepNum$  参数 (对应经济发展所需要的土地总量), 假定从现状到形态实现这一阶段的城市增长保持匀速, 即各个阶段的该数值相同, 其计算方法如公式 (5) 所示。

$$stepNum = \frac{C_r - C_{T_r}}{(T_e - T_s) / t_0} \quad (5)$$

式中:  $C_r$  为期望空间形态的城市建设元胞数量;  $C_{T_r}$  为现状空间形态的城市建设元胞数量;  $T_e$  为形态实现深刻;  $T_s$  为现状时刻;  $t_0$  为每个循环对应的真实时间。

对于政策实施力度参数  $X$  的识别, 主要有 Logistic 回归和计算机自动计算不同参数组合等方法。如 Wu<sup>[21]</sup> 基于 MCE 方法的适宜性乘以局部的邻域作用、环境约束后得到最终的耦合概率 (Joint Probability), 其中 MCE 形式的城市增长适宜性是基于 Logistic 回归通过对历史数据进行分析获得的, 该方法的不足之处在于, 在 Logistic 回归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换规则中的参数设定会失之于主观 (Over-arbitrary), 不能完全反映历史阶段的城市空间增长的真实机制。而 Clark 和 Gaydos<sup>[22]</sup> 提出了 Nested loops 方法, 通过利用计算机自动计算不同参数组合产生的模拟结果, 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 和 Gaydos<sup>[22]</sup> 考虑了 5 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。采用这种方法, 如果参数增加, 则运算时间将大幅增长, 本文考虑了 4 类约束条件的约束性 CA 的参数可达十余个, 如果每个参数有 6 个选择, 每次循环按照同样的运行时间, 则总运行时间可达 50000 年, 这尚没有考虑每个参数仅有 6 个供选择数值的不足, 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。

因此在约束性 CA 模型中, 对 Wu<sup>[21]</sup>、Clark 和 Gaydos<sup>[22]</sup> 二者的方法进行综合并作一定改进, 结合二者的优点, 利用历史数据, 将除邻域之外的政策参数  $x_k$  根据 Logistic 回归的方式求解, 在此基础上利用单一参数循环方法 (MonoLoop, 详见参考文献[23]), 以 Kappa 指标最大为原则识别邻域的政策参数  $x_n$ 。最后识别的模型参数  $x_k$  和  $x_n$  (记为  $X^*$ ) 可以作为实现各个形态情景的发展政策实施力度。该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, 一方面大大降低了模型运算的时间。将模拟形态和所设置的形态情景进行点对点对比, 如果 Kappa 大于等于 80%, 即为有解的情形, 则  $X^*$  对应的是通过已有的政策 A 能够得到的具有最高形态匹配度的政策参数, 此时还有其他政策参数同样能够产生与形态情景的 Kappa 大于等于 80% 的模拟形态。如果不考虑邻域政策的 Logistic 回归过程中所得到的 Kappa 系数低于 50%, 则没有必要开展 MonoLoop 过程, 根据经验, 此时在 MonoLoop 过程后, Kappa 系数仍然不会超过 80%。本文仅考虑  $X^*$ , 其他满足条件的参数集合将在后续研究中开展。

通过政策参数  $X$  的正负, 可以判断该政策应该鼓励还是避免, 通过各个变量之间参数的横向对比, 可以看出不同政策应该给予的倾向。同时通过和其他历史阶段的模型参数对比, 鉴于对历史阶段的政策参数的了解, 可以更为形象地给出要采用的发展政策与其他历

史阶段对应政策的差异。对于  $X$  可以利用公式 (6) 计算政策的实施力度变化情况 ( $dt$ ), 进而给出相同的政策在历史 (或现状) 和未来的对比效果 (即政策倾向的变化)。

$$dt_k = \frac{x_k}{x_k^*} \quad (6)$$

式中:  $dt_k$  为政策  $k$  随时间的实施力度变化;  $x_k$  为政策  $k$  的识别的权重系数;  $x_k^*$  为政策  $k$  在历史阶段的权重系数。

下面基于所建立的约束性 CA 实现形态情景分析的实例, 以北京 2020 年城市总体规划为例, 分析根据所设置的多个形态情景和确定的政策, 求取政策参数在模拟上是否有效, 并对其进行横向对比, 给出相应的政策含义。

### 3 应用

#### 3.1 研究区域与数据

约束性 CA 模型的应用范围为北京市域 (图 1), 其位于华北大平原的北端, 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 150 km, 总面积为 16410 km<sup>2</sup>, 2006 年城镇建设用地图面积为 1324 km<sup>2</sup>。

约束性 CA 模型的政策变量 ( $A$ ) 及相应的数据如表 1 所示。宏观约束条件中, 增长速度参数  $stepNum$  作为一个控制指标, 反映为土地开发的总量, 对应社会经济发展规划的目标; 空间约束条件主要反映了城镇体系、防洪、交通发展等方面的规划政策 (或专项规划); 制度性约束条件主要反映了生态保护、灾害防治、耕地保护等方面的规划政策 (或专项规划); 而邻域约束条件则反映了对开发规模的控制政策。

为了便于进行政策参数  $X$  的识别和横向、纵向的对比, 我们对政策  $A$  进行了标准化处理, 将其范围都统一为 0-1 之间, 数值越大表示假设被开发的概率越大, 反之则概率越小。对于空间类约束条件, 其原始数据为各类政策的 GIS 图层, 采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 “Distance/Straight Line” 工具, 可以获取相应的欧式距离数据  $dist_k$ , 通过  $a_k = e^{-\beta \cdot dist_k}$  可以计算吸引力  $a_k$ , 其中  $\beta$  参数根据经验取值 0.0001。对于制度性约束条件, 禁止建设区中数值为 0 表示禁止一切城乡建设, 反之为 1; 农业用地适宜性表示对耕作的适宜条件, 数值越大表示适宜性越低。

上述各个政策  $A$  的参数  $X$  的大小则反映了政策或规划的执行力度, 与政策  $A$  一同, 都和模拟的形态直接相关。

#### 3.2 形态情景的设置

自 1958 年行政区划调整形成目前的市域范围以来, 北京市域范围内开展的总体规划主要有 5 次, 1958 年、1973 年、1982 年、1992 年和 2004 年<sup>[27]</sup>, 其中 2004 年版总体规划的规划目标为 2020 年, 确定了 1800 万的人口发展规模 (对应建设用地上 2300 km<sup>2</sup>), 以及

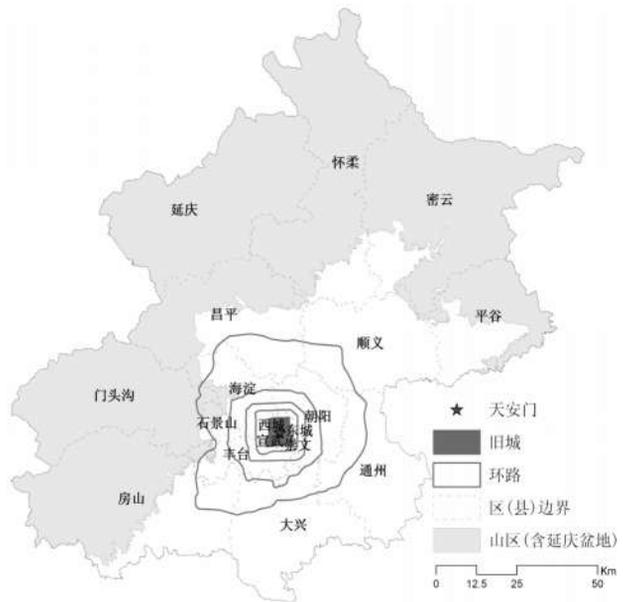
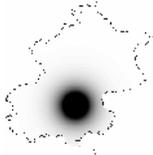
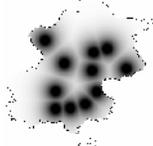


图 1 研究区域 (该图曾用于参考文献[24])

Fig. 1 The Beijing Metropolitan Area as the study area of the constrained CA

表 1 约束性CA模型变量及相应数据一览表

Tab. 1 Dataset of the constrained CA model

类型	变量	政策	数值	数据	数据来源
宏观约束条件	stepNum	增长速度	[ M		土地利用数据
	a <sub>1</sub>	天安门 (城镇体系)	M1		基础数据 空间分析
	a <sub>2</sub>	新城 (城镇体系)	M1		基础数据 空间分析
空间约束条件	a <sub>3</sub>	镇 (城镇体系)	M1		基础数据 空间分析
	a <sub>4</sub>	河流 (防洪)	M1		基础数据 空间分析
	a <sub>5</sub>	2M6年道路 (交通发展)	M1		2M6-11-M TM 影像解译
	a <sub>6</sub>	禁止建设区 (环境保护、 灾害防治等)	M 1		北京市规划 委员会 <sup>[26]</sup> , 2MT <sup>*</sup>
制度性约束条件	a <sub>7</sub>	针对农业用地适宜性的 土地等级 (耕地保护)	M1		北京市计划委员会 国土环保处 <sup>[26]</sup> , 1988
邻域约束条件	a <sub>n</sub> <sup>t</sup>	邻域开发强度	M1		土地利用数据及模型生成

\* 禁止建设区的划定方法参见文献[25]。

图中黑色表示 1, 白色表示 M 灰度表示 M-1

“两轴—两带—多中心”的城市空间结构，进而形成中心城—新城—镇三级的城镇结构。在该规划的制定中，制定了四个规划方案(图2)，各个规划方案的总用地规模基本一致(略有少量偏差，具体见表2)，只是城市布局有较大差别(反映了规划师或领导的不同偏好)，但当时并没有对这些方案政策实施的可能性进行分析就进行了方案比选。本文拟对这些形态情景进行分析，分析其政策参数的可行性(上文的各个政策A的空间分布也是在本次总规编制时的相关政策或专项规划内容)，进而对城市形态与相关政策、专项规划的协调性进行识别。

各个形态情景的基本情况如下：

情景A ( $y_A$ )：规划情景，对应2004版北京城市总体规划中所确定的城市形态<sup>[26-28]</sup>，其

主要特点是控制中心城的继续蔓延, 大力发展新城;

情景 B ( $y_B$ ): 蔓延情景, 继续在中心城周边开发, 新城的开发规模较小, 即为所谓“摊大饼”的城市形态;

情景 C ( $y_C$ ): 葡萄串情景, 大力发展小城镇及沿交通走廊的开发, 新城和中心城基本保持原有规模, 进而形成指状、葡萄串状的城市形态;

情景 D ( $y_D$ ): 生态保护区情景, 在开发过程中尽量避免对禁建区的占用和对优等农田的蚕食, 进而形成所谓的可持续城市形态, 从布局上看, 鉴于考虑了较为零散的禁止建设区, 这种形态较为分散。

### 3.3 政策参数识别

我们开发了一个求取形态情景参数的工具。基于 ESRI Geoprocessing、采用 Python 脚本语言开发了约束性 CA 模型, 模型精度即元胞大小为  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$  (研究区域共 65628 个元胞)。根据 2006 年现状空间形态 ( $y_{2006}$ ),  $C_r = 5011$ 。以情景 A 为例, 空间形态中的城镇建设用地元胞为  $C_r = 9254$  个。约束性 CA 的循环次数为  $(2020-2006) \times 12 = 168$ , 则每次循环的新增元胞数量  $stepNum = (9254-5011)/168 = 25.3$ , 最后取值为 25。其他情景的  $stepNum$  识别方法相同。

对于  $X$  的识别, 采用 Logistic 回归和 MonoLoop 集成的方法实现。Logistic 回归的因变量是否发生由非城镇建设用地向城镇建设用地的转变 (发生转变为 1, 不发生转变为 0), 自变量为表 1 中的除邻域之外政策 A。将各情景的形态与现状形态作代数减法运算, 其结果作为 Logistic 回归的因变量, 回归结果如表 2 所示。表 2 中,  $Kappa_{回归}$  是指不考虑邻域政策, 根据 Logistic 回归结果计算的点对点匹配系数,  $Kappa_{最终}$  考虑了邻域政策, 为基于识别

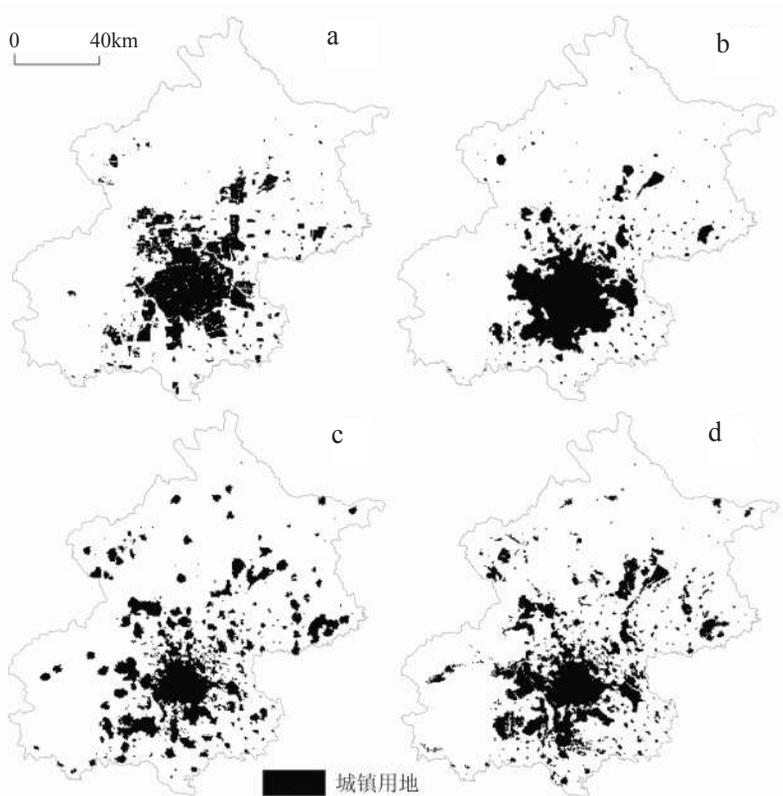


图2 形态情景设置图

Fig. 2 Predefined urban form scenarios in the Beijing Metropolitan Area

表2 形态情景分析结果

Tab. 2 Form scenario analysis results

变量	情景 A	情景 B	情景 C	情景 D	历史(1976-2006)
总规模	9254	9270	9895	10679	3119(5011-1892)
stepNum	25	25	29	34	9
$x_0$	-8.700	-30.696	-63.599	-55.624	-12.263
$x_1$	15.268	54.558	15.106	20.849	11.782
$x_2$	3.575	10.294	10.046	9.701	2.490
$x_3$	-0.717	5.272	31.639	7.807	-1.872
$x_4$	4.105	8.765	24.348	11.622	7.574
$x_5$	1.368	6.027	7.627	8.113	0.917
$x_6$	1.193	3.672	4.078	23.000	1.535
$x_7$	-2.396	5.066	6.094	12.003	-1.179
$x_n$	15	17	9	7	20
$Kappa_{回归}$	42.9	76.0	79.7	71.3	41.9
$Kappa_{最终}$	69.4	91.8	85.0	85.8	67.5
是否通过有效性 检验	否	是	是	是	否

的全部参数利用约束性CA模拟结果计算得到的点对点匹配系数。情景B、C和D的  $Kappa_{\text{回归}}$  系数均超过80%，自变量的显著性均为0.001水平，回归结果可以接受，说明已有的除了邻域之外的政策就可以解释所设定的形态情景，而情景A的  $Kappa_{\text{回归}}$  系数仅为42.9%，说明除邻域外的已有政策不能够解释所设定的形态情景。

对每个规划情景，通过 Logistic 回归方法确定  $x_i$  ( $i = 0 \sim 7$ ) 之后，保持这些政策参数不变，采用 MonoLoop 方法识别邻域政策  $a_n$  的系数  $x_n$ ，得到各情景的各项政策参数。之后对各个情景的  $x$  参数的进行比较。

**3.4 形态情景有效性检验**

MonoLoop的过程其实就是对所设置的形态情景进行检验的过程(采用  $Kappa$  一致性检验的方法)， $Kappa_{\text{最终}}$  低于80%的形态情景，不能够通过形态情景的有效性检验，而高于80%的形态情景，通过了有效性检验，被证明有政策参数

能够满足所设置的形态情景以较高的精度实现。为了进行说明，将表2中所识别的各形态情景的政策参数 ( $stepNum$ 、 $x_{0-7}$  和  $x_n$ ) 作为约束性CA的输入条件，经过168个循环，模型停止运行，得到相应的模拟城市形态  $y'$  (第1~168次循环的模拟结果对应未来不同阶段的可能的空间形态)，并将其与所设置的形态情景  $Y$  进行对比，如图3所示，具体的精度统计见表3 (因为在各个形态情景中，开发元胞所占比例较低，与未开发元胞的数量有较大的差别，属于非平衡数据 unbalanced dataset)。所

表3 模拟结果与形态情景对比精度表

Tab. 3 The precision table of the comparison between the predefined and simulated urban form scenarios

形态情景		观察 (0)	观察 (1)	合计	用户精度 (B)
A	模拟 (0)	53919	2428	56347	95.7
	模拟 (1)	2440	6826	9266	73.7
	合计	56359	9254	65613	
	生产精度 (B)	95.7	73.8		总精度 92.6B
B	模拟 (0)	55482	620	56102	98.9
	模拟 (1)	793	8650	9443	91.6
	合计	56275	9270	65545	
	生产精度 (B)	98.6	93.31		总精度 97.8B
C	模拟 (0)	54391	1256	55647	97.7
	模拟 (1)	1259	8639	9898	87.3
	合计	55650	9895	65545	
	生产精度 (B)	97.7	87.3		总精度 96.2B
D	模拟 (0)	53590	1273	54863	97.7
	模拟 (1)	1276	9406	10682	88.1
	合计	54866	10679	65545	
	生产精度 (B)	97.7	88.1		总精度 96.1B

1表示已开发为城镇建设用地，0表示未开发

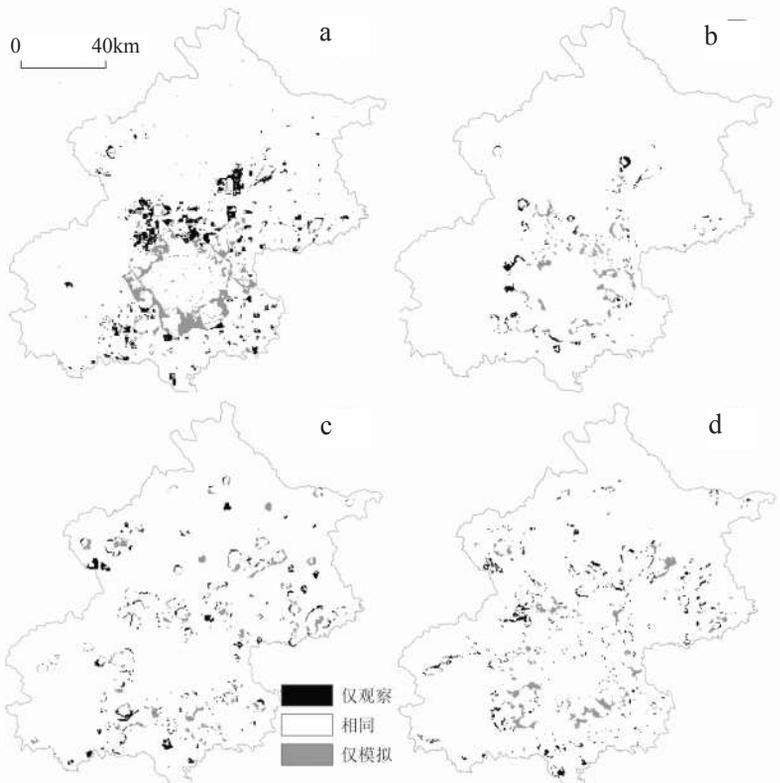


图3 模拟结果与形态情景对比图

以总精度数值普遍比较高)。根据 *Kappa* 检验的结果以及图 3 的对比结果, 情景 B、C 和 D 的政策参数对应的  $y'$  能够保证与所设置的形态情景具有较高的点对点匹配精度。在基于 *Kappa* 验证的基础上, 还采用空间格局验证 (Moran I、Separate clusters、Edge cells)、空间结构验证 (根据到天安门的直线距离划分若干圈层) 等方法进行验证, 匹配程度同样较高。

而情景 A 的政策参数对应的  $y'$ , 则与  $y_A$  的点对点匹配精度较低, 不能用于  $y_A$  的模拟。情景 A 的分析结果显示, 在当前的空间政策的背景下, 没有政策实施强度的组合能够实现预期的规划城市形态。要保障规划方案的实现, 需要调整规划的城市形态  $y_A$  或空间发展政策 A 的设置, 以实现政策参数与形态情景的一致性。对于前者, 可以基于本文的约束性 CA 模型根据政策参数设置模拟未来的城市空间增长模式, 进而基于龙瀛等<sup>[24]</sup>提出的方法制定合理的城市增长边界, 作为规划的城市形态, 可以保证规划方案更加符合未来的城市增长趋势。对于后者, 则需要更改城市发展政策的空间分布, 如道路规划方案、城镇体系设置或基本农田保护范围等, 不断调整, 以实现预期的规划城市形态。对于后者, 也有另外一种解决方案, 通过引入政策参数的空间分异, 强化局部地区的规划实现比例, 即针对不同的行政边界 (如乡镇、区县等) 或自然边界 (如流域、地貌分区等), 逐一采用形态情景分析的方法求取政策参数, 也有望提高规划方案的实现比例。这点在真实的城市增长中客观存在, 有学者的研究显示, 中国的城市区域的增长驱动力存在空间异质性, 即区域内不同子区域的城市增长的政策参数存在差异<sup>[29-30]</sup>。

### 3.5 比较形态情景的政策参数

根据参数识别的结果, 可以对要实现通过有效性检验的各个形态情景 (B、C 和 D, 不包括 A) 的政策需求进行解释, 主要可以体现在 3 个方面:

(1) 情景内各参数横向对比: 以情景 B 为例, 根据 *stepNum* 参数, 2006-2020 年每年增长的城镇建设用地规模为  $25 \times 12/4 = 75 \text{ km}^2$ , 如果按人均城镇建设用地  $100 \text{ m}^2$  指标计算, 则每年预期的人口增长规模为 75 万人。对其他政策参数可进行横向对比, 系数越大表示该政策的执行力度需要越大, 以实现所设置的形态情景, 如该情景应该大力促进中心城开发、新城开发和滨河开发 (相比其他政策)。

(2) 情景间各参数横向对比: 针对各个政策参数进行情景间的对比分析, 可以更为形象地了解要实现各个形态情景所需要采取的政策间的差别。例如情景 B 的参数  $x_1$  高于情景 C, 说明要实现情景 B, 相比实现情景 C, 沿中心城的开发力度应该更高, 即更应该大力促进中心城的开发; 而情景 D 的参数  $x_6$  明显高于情景 C, 说明要实现情景 D, 相比实现情景 C, 对禁止建设区的保护力度应该更高。

(3) 与历史阶段进行对比: 以 1976-2006 年这一历史阶段为例, 利用约束性 CA 采用类似的政策参数识别方法 (因为时间范围不同, 历史时期的政策与各形态情景的政策 A 不同), 可以获得 1976-2006 年的模型参数 (表 2 最后一列)。参照公式 (6), 相比这一历史阶段的城市增长策略, 各个形态情景在规划期 (2006-2020 年) 内的城市增长速度为 1976-2006 年城市增长速度的 2~3 倍, 这也就要实现所设置的各个形态情景, 未来需要从宏观社会经济的角度, 促进城市的经济发展, 提高人口的增长速度, 以保证实现规划的城镇建设用地规模。同时, 相比历史阶段, 各情景邻域扩展趋势都需要控制, 尤其是情景 C 和 D; 情景 A 应该强化中心城扩张、道路引导开发政策; 情景 B、C 和 D 除了邻域开发政策弱化外, 其余政策的实施力度都应该得以强化, 如需强化禁止建设区的保护力度、小城镇的开发力度等。

## 4 结论与讨论

析, 作为决策部门进行城市发展决策的参考, 这种应用较为普遍并且已经较为成熟。但在很多情况下, 尤其是在城市规划领域, 往往是先有根据规划师所制定的城市形态, 其反映了规划师的想法, 但是部分所制定的形态往往不可能实现, 与配套制定的或已有的发展政策不协调, 这种情况下或者需要调整所制定的形态, 或者改变发展政策, 以实现二者的匹配。

规划实践中, 规划空间形态是由规划师制定, 规划师的想法因人而异, 有主观的因素, 很难在CA中体现。规划师所制定的规划空间形态可以反映CA无法反映的因素, 如经济的发展、产业结构的调整、领导等人的规划意图等。本文是对以城市形态作为情景分析条件的初步尝试, 能够探讨所设置的城市形态情景在目前政策框架下的可行性。这一探索从规划实践的要求出发, 分析在有具体的规划政策和方针的条件下, 规划师从综合的角度制定的规划空间形态, 从地理条件、发展需要来看, 其形态实现的可能性, 是CA应用的突破, 对于促进解决规划行业所面临的常见、棘手的问题具有一定的作用, 并可以用于评估规划形态与各个专项规划或政策的协调程度。

但本文在进行情景分析这一复杂问题时, 进行了一系列的假设工作, 如不考虑政策参数随时间、空间的动态变化, 不考虑多种土地使用类型等。下一阶段, 可以从以下几个方面深化并扩展形态情景分析的研究。① 进行多种用地类型的形态情景分析, 例如多种城市用地类型——居住、商业和工业等, 以适应控制性详细规划方案的情景分析; ② 考虑政策参数的空间分异, 针对不同区域进行形态情景分析; ③ 考虑政策和政策参数随时间的变化, 以动态交互反馈的方式进行形态情景分析; ④ 考虑在模拟的过程中不仅仅通过对政策参数进行识别, 拟增加对政策本身的空间分布进行识别的功能, 以得到实现不同形态情景所需要配套的空间政策; ⑤ 也可以尝试采用多主体系统 (Multi-agent system, MAS) 的方法, 引入规划师主体 (Planner Agent) 来反映规划师、领导等人的意图, 以从另一个角度研究如何实现所设置的形态情景。

## 参考文献 (References)

- [1] Klosterman R E. The what if? Collaborative planning support system. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1999, 26(3): 393-408.
- [2] Landis L D. The California urban future model: A new generation of metropolitan simulation models. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1994, 21(4): 399-420.
- [3] Landis L D. Imaging land use futures: Applying the California urban future model. *Journal of American Planning Association*, 1995, 61(4): 438-457.
- [4] Landis L D, Zhang M. The second generation of the California urban future model (Part 1): Model logic and theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998, 25(5): 657-666.
- [5] Landis L D, Zhang M. The second generation of the California urban future model (Part 2): Specification and calibration results of the land-use change submodel. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998, 25(6): 795-824.
- [6] Han H, Dang A R. Assessment of the implementation of urban construction boundaries in Beijing City by using remote sensing data/The 16th International Conference on Geoinformatics & Joint Conference on GIS and Built Environment. Guangzhou, China, 2008.
- [7] Han H, Lai S, Dang A et al. Effectiveness of Urban Construction Boundaries in Beijing: An Assessment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 2009, 10(9) 1285-1295.
- [8] Kahn J, Wiener A J. *The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next 33 Years*. New York: MacMillan Press, 1967.
- [9] Pearman A D. Scenario construction for transportation planning. *Transportation Planning and Technology*, 1988, 7: 73-85.
- [10] Ratcliffe J S. Scenario building: A suitable method for strategic property planning? Cambridge: RICS Cutting Edge Conference, 1999.

- [11] Schoemaker P J H. Scenario planning: A tool for strategic thinking. *Sloan Manage. Rev.*, 1995: 25-40.
- [12] Ringland G. Scenario planning: Managing for the Future. New York: John Wiley, 1998: 3-15.
- [13] Janssen R, Herwijnen M V, Stewart T J et al. Multiobjective decision support for land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2008, 35: 740-756.
- [14] Li X, Yeh A G O. Principal component analysis of stacked multi-temporal images for monitoring of rapid urban expansion in the Pearl River delta. *International journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1501-1518.
- [15] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4): 323-343.
- [16] Li X, Yeh A G O. Data mining of cellular automata's transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18(8): 723-744.
- [17] Liu X, Li X. Simulating complex urban development using kernel-based non-linear cellular automata. *Ecological Modelling*, 2008, 211(1/2): 169-181.
- [18] Liu X, Li X, Liu L et al. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(11/12): 1247-1269.
- [19] Wu F. Simland: A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(1): 63-82.
- [20] Li X, Yeh A G O. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(2): 131-152.
- [21] Wu F. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(8): 795-818.
- [22] 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. *Geographical Information Sciences*, 1998, 12(7): 699-714.
- [23] Long Y, Shen Z, Du L et al. BUDEM: An urban growth simulation model using CA for Beijing metropolitan area. *Proceedings of the SPIE - Geoinformatics*, 2008, 71431D-1-15.
- [24] Long Ying, Han Haoying, Mao Qizhi. Establishing urban growth boundaries using constrained CA. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 999-1008. [龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性CA制定城市增长边界. *地理学报*, 2009, 64(8): 999-1008.]
- [25] Long Ying, He Yong, Liu Xin et al. Planning of the controlled-construction area in Beijing: Establishing urban expansion boundary. *City Planning Review*, 2006, 30(12): 20-26. [龙瀛, 何永, 刘欣等. 北京市限建区规划: 制订城市扩展的边界. *城市规划*, 2006, 30(12): 20-26.]
- [26] Beijing Planning Commission. *Land Resources in Beijing*. Beijing: Beijing SciTech Press, 1988. [北京市计划委员会国土环保处. *北京国土资源*. 北京: 北京科学技术出版社, 1988.]
- [27] Beijing Municipal Planning Committee, Beijing Institute of City Planning, Beijing Academy of Urban Planning. *Beijing Urban Planning Atlas (1949-2005)*, 2006. [北京市规划委员会, 北京市城市规划设计研究院, 北京城市规划学会. *北京城市规划图志 (1949-2005)*, 2006.]
- [28] Beijing Municipal Planning Committee. *Ecologically Limited Land-use Planning in Beijing (2006-2020)*, 2007. [北京市规划委员会. *北京市限建区规划 (2006-2020)*, 2007.]
- [29] Liu X H, Wang J F, Liu M L et al. Spatial heterogeneity of the driving forces of cropland change in China. *Science in China: Series D*, 2005, 48: 2231-2240.
- [30] Li X, Yang Q S, Liu X P. Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 86: 177-186.

## Form Scenario Analysis Using Constrained Cellular Automata

LONG Ying<sup>1,2</sup>, SHEN Zhenjiang<sup>3</sup>, MAO Qizhi<sup>1</sup>, DANG Anrong<sup>1</sup>

(1. *School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045, China;*

3. *School of Environment Design, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan)*

**Abstract:** Scenario analysis has been widely applied in the realm of urban and regional planning. In most of current scenario analysis researches of urban growth, developing policies are set as the input scenario conditions to generate various urban forms, which can be referenced by policy makers and urban planners. This paper reverses the line of current scenario analysis for urban growth, in which the term of form scenario analysis (FSA), a spatial explicit approach, is novelly defined, employing the urban form as the scenario condition and aiming at identifying whether any policies set can be implemented to realize the predefined form. If yes, what the detailed policy implications are for the scenario form should be answered. A constrained cellular automata model (CA) is developed for FSA, which borrows the routine model calibration method of constrained CA using historical observed forms from existing literatures. Four planned schemes of Beijing Master Plan 2020 for the Beijing Metropolitan Area are analyzed using constrained CA to test FSA approach, and the corresponding required policy parameters are generated, together with policy implications for the study area. FSA is proved to be suitable for urban planning practice.

**Key words:** cellular automata; urban form; desired future; urban planning; Beijing