

稿件标题：城市规划空间形态模拟及政策建议：以北京为例

作者姓名：龙 瀛

性别：男

出生年月：1980 年 5 月

最高学历：硕士

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，
100045

职称：高级工程师

联系电话：13661386623，010-88073660

传真：010-68031173

电子信箱：longying1980@gmail.com

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本论文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

龙 瀛

2010-1-29

城市规划空间形态模拟及政策建议：以北京为例*

龙瀛 沈振江 毛其智 杜立群

摘要：约束性元胞自动机（Cellular automata, CA）在模拟城市增长方面已有诸多实践，一方面，城市规划空间形态可以作为约束性 CA 的制度性约束条件，另一方面，也可以利用约束性 CA 模拟不同的城市发展情景，以辅助城市规划空间形态的制定。然而如何利用约束性 CA 模拟城市规划空间形态并没有文献探讨。在城市规划领域，需要哪些发展政策支持来实现城市规划空间形态，规划期限内不同阶段的城市空间的可能形态是什么，是广为关注的重要问题。本文提出了基于约束性 CA 城市模型模拟城市规划空间形态的方法，并可以给出相应需要的发展政策，并基于此方法开发了一个约束性 CA 模型，并以北京市域城市规划空间形态为例进行了模型应用，证明该方法具有较好的适用性，是将约束性 CA 的应用扩展到城市规划领域的又一尝试。

关键字：元胞自动机；规划布局；*MonoLoop*；Logistic 回归；城市规划；约束条件；北京

作者简介：

龙 瀛（1980-）男（汉），清华大学建筑学院博士研究生，北京市城市规划设计研究院高级工程师，主要研究方向为规划支持系统和城市系统微观模拟

沈振江（1965-），日本金泽大学环境设计学院，准教授，博士生导师

毛其智（1952-），清华大学建筑学院，教授，博士生导师，副院长

杜立群（1964-），北京市城市规划设计研究院，教授级高工，副院长

1 引言

在规划实践中，城市规划部门所确定的规划空间形态（Planned urban form，或期待空间布局 Desired urban form），往往和实际的城市发展有偏差，屡见被突破的现象，而规划部门对此又往往缺乏政策指导，不知道规划的空间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。根据规划实践的需求，如果已有一个规划方案，本文尝试提出了基于约束性 CA（Constrained Cellular Automata）模拟规划的空间形态并给出相应发展政策的方法¹，这一探索不同于约束性 CA 城市模型的传统应用，即城市规划空间形态作为约束性 CA 的制度性约束条件，或利用约束性 CA 模拟不同的城市发展情景，其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。

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。CA 包括元胞、元胞状态、邻域和规则四个部分。元胞可以是任何空间尺度上的对象，这些对象必然与某些其他对象相邻；元胞状态可用有限组数值描述；规则即状态转移函数，是根据元胞当前自身状态及其邻域状态决定下一时刻元胞状态的函数。CA 作为复杂性科学的重要研究工具，其特点是时间、空间、状态都离散，其状态改变的规则在时间和空间上都是局部的，因此 CA 适合模拟时空动态过程，

本文得到国家自然科学基金（编号：50808112）和国家十一五科技支撑计划项目（编号：2006BAJ14B08）资助

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(陈干和闫国年, 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, 一些城市开展了这方面的实践, 如美国辛辛那提(White 和 Engelen, 1997)、美国旧金山湾和华盛顿-巴尔的摩地区(Clark 和 Gaydos, 1998)、美国 Buffalo 市(Xie, 1994)、中国广州(Wu, 1998; Wu, 2002; Wu 和 Webster, 1998)、中国珠江三角洲(YEH 和 Li, 2001, 2002, 2006)、北京(He 等, 2008)。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(Pure CA)模型的基础上, 考虑其他影响城市增长的因素。部分学者开始关注在 CA 城市模型中引入约束条件(即约束性 CA 模型)来控制模拟过程(Clark 和 Gaydos, 1998; Wu, 1998; Ward 等, 2000; Li 和 Yeh, 2000; Alkheder 和 Shan, 2005; Guan 等, 2005), 总体上约束性 CA 模型的约束条件分为邻域、宏观社会经济、空间性和制度性四类约束条件。

城市规划作为政府进行城市空间管制、引导城市增长的重要手段, 与约束性 CA 城市模型的联系日益紧密, 一方面, 可以将城市规划作为 CA 的一种制度性约束条件模拟空间形态(Ward 和 Murray, 1999; White 等, 2004; Zhao 和 Murayama, 2007; 尹长林等, 2008), 另一方面, 也有研究利用约束性 CA 对城市空间形态进行情景分析, 辅助城市规划方案的制定(Engelen 等, 1997; Ligtenberg 等, 2001; Barredo 等, 2003; Nijs 等, 2004; 刘小平等, 2007; Stevens 等, 2007), 需要强调的是, 约束性 CA 在这里的作用仅限于“辅助”。本文的研究内容, 不同于这两个方面, 其目的在于检验城市规划空间形态的实现政策是否在 CA 模型考虑的因素范围内有效。具体是指根据已经制定的城市规划空间形态, 利用约束性 CA 的方法, 求取实现规划方案的政策参数。因此需要探索新的思路和方法来解决基于约束性 CA 的规划空间形态模拟及其所需的政策参数识别这一问题, 这也定将 CA 模型的应用扩展到一个全新的领域(约束性 CA 模型与城市规划的相互关系, 以及本文的研究内容参见图 1)。

现阶段利用 CA 模拟城市增长的结果, 反映了城市的空间扩展和内部土地利用的变化, 但这一过程可以考虑的因素有限, 规划实践中, 规划空间形态是由规划师制定, 规划师的想法很难在 CA 模型中有所体现, 因此用 CA 城市模型来代替规划师来制定规划方案仍然有较大差距。反过来, 规划师制定的规划空间形态也有局限性, 但是可以反映 CA 模型无法反映的因素, 如经济的发展、产业结构的调整、领导等人的规划意图等。本文力图采用有限的因素来模拟作为复杂主体的规划师所制定的规划方案, 而 CA 本质之一就是利用简单的状态转换规则可以实现复杂物理现象的模拟, 因此从理论上可以采用约束性 CA 模拟城市规划空间形态。

在本文的第二部分, 将重点对基于约束性 CA 模拟规划空间形态的基本方法进行介绍, 第三部分给出基于该方法建立的约束性 CA 的理论模型, 第四至六部分利用约束性 CA 模型模拟北京 2020 年的规划空间形态, 识别对应的模型参数并给出相应的发展政策。最后在第七部分进行总结并展开讨论。

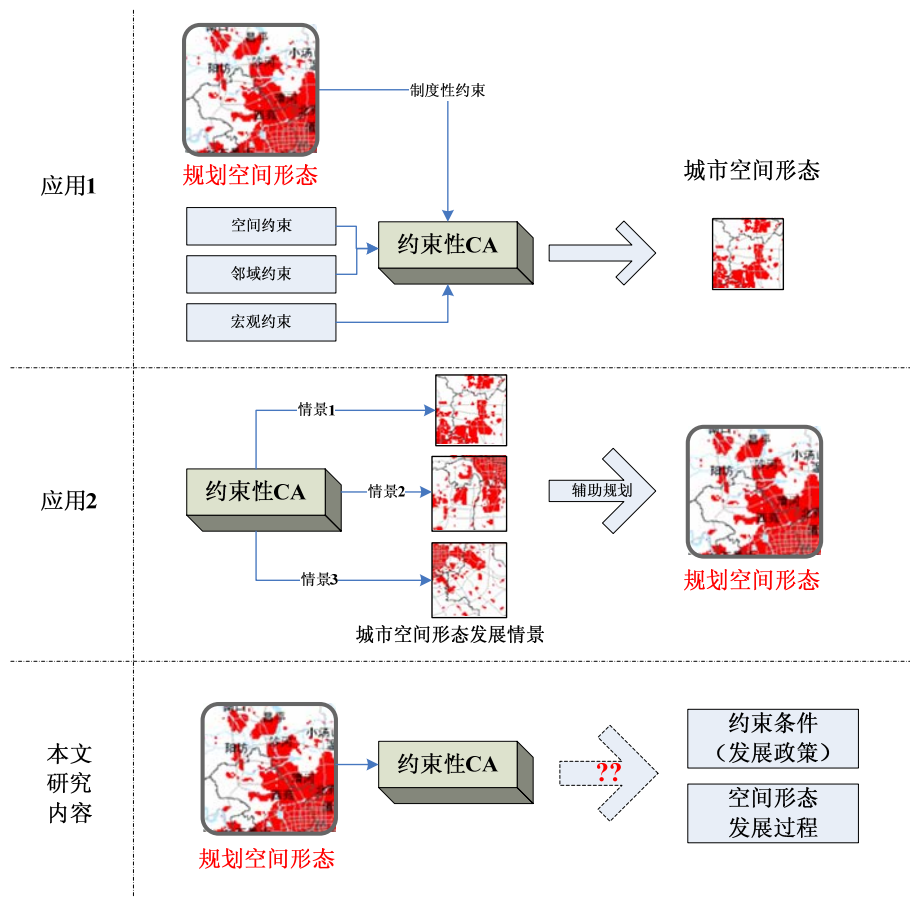


图 1 约束性 CA 与城市规划

Fig.1 Constrained CA and urban planning

2 方法

约束性 CA 模型的传统应用思路是利用设置好的状态转换规则模拟相应的空间形态，而利用约束性 CA 模拟规划空间形态，其特点为已知空间形态（即模型输出），求取 CA 状态转换规则（即模型输入条件，对应发展政策），这与 CA 模型的传统应用相反。要解决这个问题，其关键是如何根据 CA 模型的输出识别其状态转换规则，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。主要思路是将现状空间形态看作某一历史阶段（ $T1 \rightarrow T2$ ）的开始 $T1$ ，而将期望实现的规划空间形态看作某一历史阶段的结束 $T2$ ，则可以看出这个过程和 CA 传统应用中利用历史的空间形态变化求取相应阶段的状态转换规则的过程较为类似，进而将问题转变为传统参数识别（Calibration）问题，因此也可以采用 Logistic 回归、人工神经网络、遗传算法、Nested loops 等已有方法实现²。

考虑到通用性和易用性，采用 MCE（Multi-Criteria Evaluation）作为 CA 状态转换规则的形式，对于这类状态转换规则的提取，主要有 Logistic 回归和计算机自动计算不同参数组合（Nested loops）等方法。如在 Wu(2002)提出的状态转换规则中，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（Logistic Regression, LR）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，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(1998)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(1998)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。采用这种方法,如果参数增加,则运算时间将大幅增长,考虑了四类约束条件的约束性 CA 模型的参数可达十余个,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。

本研究对 Wu(2002)、Clark 和 Gaydos(1998)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,将除邻域作用的其余空间变量的参数根据 Logistic 回归的方式求解,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邻域作用的权重系数,识别的模型参数,可以作为实现城市规划空间布局的发展政策力度,例如通过参数系数的正负,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,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。基于模型参数的敏感性分析 (*Sensibility analysis*) 还可以评价现有发展政策的偏离对空间形态的影响。将识别的模型参数代入模型,可以实现城市规划空间形态的模拟,并可以给出现状到规划期末之间的可能的城市空间形态。这种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。下面给出利用该方法所建立的约束性 CA 理论模型,以及利用该模型识别要实现北京 2020 年规划空间形态的政策参数,并对其进行分析,提出相应的发展建议。

3 理论模型

规划实践中,在制订了城市规划空间形态后,其实现的过程,既有自上而下的政府行为,又有自下而上的基层自发开发。对于前者,政府根据宏观社会经济条件制定宏观发展目标,并根据客观的土地使用综合评价,对开发商提出的拟开发项目寻找适宜的开发地区;对于后者,基层土地所有权或使用权持有者具有自发的开发行为,这种行为受到多种约束条件的限制,如规划控制、工程技术条件等方面。参考城市增长的特点,用于模拟城市规划空间形态的理论模型(即约束性 CA 模型, *Constrained CA*) 的模拟思路总体上分为两步,首先在宏观层面由政府根据宏观社会经济条件确定每一阶段的待开发土地的总量(社会经济因素作为外生变量引入模型);之后在微观层面采用约束性 CA 的方法考虑各种约束条件,模拟城市增长,基于模拟结果进行拟开发总量的空间分配 (*Allocation*),给出与开发总量相对应的土地的空间分布。

约束性 CA 模型的邻域采用摩尔邻域 (3*3 矩形、8 个邻近元胞),离散时间的一次循环对应一个月,该模型的概念模型如公式 1 所示,元胞的状态受宏观社会经济约束、空间约束、制度性约束和邻域约束影响(模型参数的解释参见表 1)。

$$V_{i,j}^{t+1} = f \left\{ V_{i,j}^t, LOCATION, GOVERNMENT, NEIGHBOR \right\}$$

$$= f \left\{ \begin{array}{l} V_{i,j}^t, \\ d_tam_{i,j}, d_vcity_{i,j}, d_city_{i,j}, d_vtown_{i,j}, d_town_{i,j}, \\ d_river_{i,j}, r_road_{i,j}, d_bdtown_{i,j}, f_rgn_{i,j}, \\ planning_{i,j}, con_f_{i,j}, landresource_{i,j}, \\ neighbor_{i,j}^t \end{array} \right\}$$

公式 1

$V_{i,j}^t$ 为 t 时刻的 ij 位置的元胞状态

$V_{i,j}^{t+1}$ 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

约束性 CA 模型的状态转换规则如公式 2 所示，式中， $LandAmount$ 为元胞总增长数目， $stepNum^t$ 为第 t 次循环增加的已开发元胞数目， s_{ij}^t 为土地利用适宜性， w 为空间变量的权重系数， 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， α 为扩散系数（1-10）， p^t 为最终概率， p_{max}^t 为每次循环不同子循环内最终概率最大值，其数值在子循环内不断更新。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，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，最后在 Allocation（空间分配）过程中采用循环的方式进行需开发元胞的空间识别，完成一个 CA 离散时间的模拟。根据模拟的目标时间，确定循环次数，CA 模型不断循环（多次的 Allocation 过程），最终完成整个模拟过程。

$$\begin{aligned}
& 1. LandAmount = \sum_t stepNum^t \\
& 2. s_{ij}^t = w_0 \\
& \quad + w_1 * d_tam_{ij} + w_2 * d_vcity_{ij} + w_3 * d_city_{ij} + w_4 * d_vtown_{ij} + w_5 * d_town_{ij} \\
& \quad + w_6 * d_river_{ij} + w_7 * r_road_{ij} + w_8 * d_bdtown_{ij} + w_9 * f_rgn_{ij} \\
& \quad + w_{10} * planning_{ij} + w_{11} * con_f_{ij} + w_{12} * landresource_{ij} \\
& \quad + wN * neighbor_{ij}^t \\
& 3. p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \\
& 4. p^t = \exp \left[\alpha \left(\frac{p_g^t}{p_{g_{max}}^t} - 1 \right) \right] \\
& 5. for k = 1 to stepNum^t \\
& \quad if p_{ij}^t = p_{max}^t then V_{ij}^{t+1} = 1 \\
& \quad p_{ij}^t = p_{ij}^t - p_{max}^t \\
& \quad p_{max}^t \text{ update} \\
& \quad next k
\end{aligned}$$

公式 2

4 研究范围及数据

约束性 CA 模型的应用范围为北京市域（图 2），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 km²，2006 年城镇建设用地面积为 1324 km²。自北京 1958 年行政区划调整形成目前的市域范围以来，北京市域范围内开展的总体规划主要有五次，1958 年、1973 年、1982 年、1992 年和 2004 年（北京市规划委员会等，2006），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，以及“两轴一两带一多中心”的城市空间结构，进而形成中心城-新城-镇的市域城镇结构。本文以 2004 年版的城市规划空间形态（即城镇建设用地的空间分布）为研究对象，利用约束性 CA 模型识别实现该形态所需要的政策参数以及相应发展政策建议。

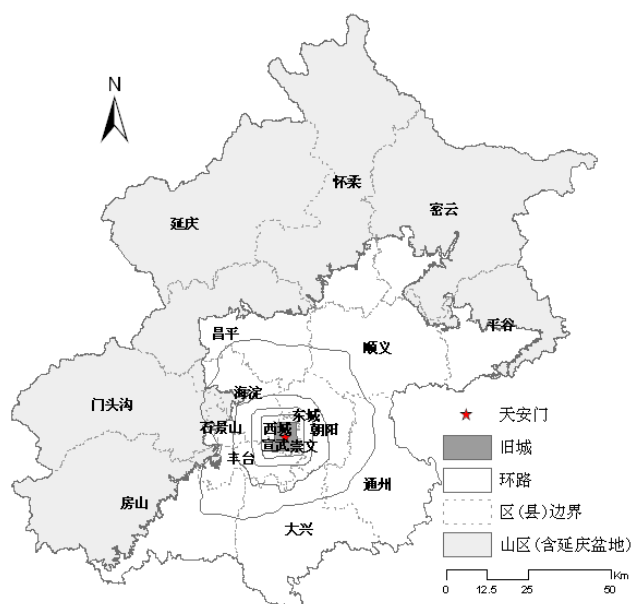


图 2 约束性 CA 模型应用范围图

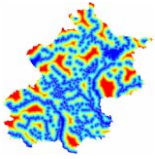
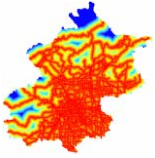
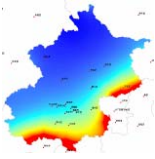
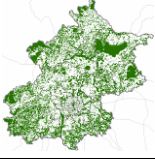
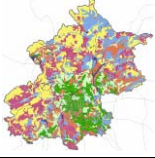
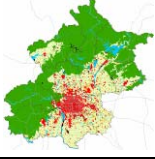
Fig.2 Study area map

约束性 CA 模型的变量及相应的数据如表 1 所示，其中给出了变量的名称、取值范围、空间分布及数据来源。

表 1 约束性 CA 模型变量及相应数据一览表

Tab.1 Dataset in constrained CA model

类型	变量	变量名称	数值	数据	数据来源
空间 约束 条件	d_{tam}	与天安门距离	≥ 0		基础数据 空间分析
	d_{vcity}	与重点新城距离	≥ 0		基础数据 空间分析
	d_{city}	与新城距离	≥ 0		基础数据 空间分析
	d_{vtown}	与重点镇距离	≥ 0		基础数据 空间分析
	d_{vtown}	与一般镇距离	≥ 0		基础数据 空间分析

类型	变量	变量名称	数值	数据	数据来源
	<i>d_river</i>	与河流距离	≥ 0		基础数据 空间分析
	<i>d_road</i>	与 2006 年道路距离	≥ 0		2006-11-01TM 影像解译
	<i>d_bdtown</i>	与镇行政边界距离	≥ 0		基础数据 空间分析
	<i>f_rgn</i>	京津冀区域吸引力	≥ 0		潜力模型计算 ³
制度 性约 束条 件	<i>planning</i>	城市总体规划（2004 版，2020 年目标）	0、1		北京市规划委员会等, 2006
	<i>con_f</i>	禁止建设区	0、1		北京市规划委员会, 2007 ⁴
	<i>landresource</i>	针对农业用地适宜性的土地等级	1、2、3、4、 5、6、7、8		北京市计划委员会国土环保处, 1988
邻域 约束 条件	<i>neighbor</i>	邻域内的开发强度	0~1		2006-11-01 的 TM 影像解译

5 政策参数模拟

基于 ESRI ArcObjects 组件，采用 VBA 语言开发了约束性 CA 模型，模型精度即元胞大小为 500 m*500 m（应用范围内共 65628 个元胞）。用约束性 CA 模型模拟规划空间形态，空间变量的空间分布已知，最为主要的是识别每次循环发生状态转变的元胞数量 *stepNum* 和各个空间变量的权重系数。对于前者，假定从现状到规划方案实现这一阶段的的城市增长保持匀速，即各个阶段的 *stepNum* 数值相同，其计算方法如公式 3 所示。

$$stepNum = \frac{C_T - C_t}{(T - t) / t_0}$$

C_T : 规划空间形态的城市建设元胞数量 公式 3

C_t : 现状空间形态的城市建设元胞数量

T : 期望规划实现时刻

t : 现状时刻

t_0 : 每个循环对应的真实时间

根据 2006 年现状空间形态 (REAL2006), $C_t=5297$ 。规划空间形态 (PLAN2020) 中的城镇建设用地元胞为 9376 个, 考虑到之外的 712 个元胞为现状城镇建设用地, 在规划中没有被化定位城镇建设用地, 因此 $C_T=9376+712=10088$ 。约束性 CA 模型的循环次数为 $(2020-2006)*12/1=168$, 则每次循环的新增元胞数量 $stepNum=4791/168=28.6$, 最后取值为 29。

对于空间变量的权重系数识别, 采用 Logistic 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), 自变量为公式 2 中的除 *neighbor* 之外的 12 个空间变量。将 PLAN2020 与 REAL2006 作代数减法运算, 其结果作为 Logistic 回归的因变量。经过回归即可获得实现规划方案的权重系数 w^{1-12} 以及常数项的数值, 回归结果如表 2 和表 3 所示, 回归的总精度可以达到 96%, Kappa 精度为 72.5%, *d_bdtown* 和 *region* 变量没有进入回归方程, 其余所有变量的显著水平均为 0.001, 回归结果可以接受。

表 2 Logistic 回归结果分类表

Tab.2 Classification result of LR

		Predicted		
		Y		Percentage Correct
Observed		0	1	
Y	0	59079	1603	97.4
	1	1046	3900	78.9
Overall Percentage				96

表 3 Logistic 回归系数表

Tab.3 Coefficients of LR

变量	B	S.E.	Wald	df
<i>d_tam</i>	0.000008	0	10.542	1
<i>d_vcity</i>	-0.000017	0	55.241	1
<i>d_city</i>	0.000009	0	11.149	1
<i>d_vtown</i>	-0.000094	0	383.699	1
<i>d_town</i>	-0.000095	0	192.663	1
<i>d_river</i>	-0.000094	0	33.037	1
<i>d_road</i>	0.000684	0	128.971	1
<i>d_bdtown</i>				
<i>region</i>				
<i>planning</i>	23.173968	3.482	44.286	1
<i>con_f</i>	1.205157	0.064	352.253	1
<i>landresource</i>	0.141429	0.019	53.82	1
<i>Constant</i>	-21.366643	3.513	36.997	1

通过 Logistic 回归方法确定除 *neighbor* 之外 12 个空间变量的权重参数之后，保持这些权重参数不变，在模型中增加一个循环过程，不断调整 *neighbor* 的权重系数 wN ，对比不同 wN 的模拟值（SIM2020）与观察值（PLAN2020），将具有最佳匹配度（匹配度的表征指标较多，本文选择 *Goodness-of-fit*，即 *GOF* 指标，点对点匹配度，其理论最大值为 1）的 wN^* 作为 *neighbor* 变量的权重系数。共采集了取值范围位于 0~100 的 69 个 wN 的取值样本，用时 22.5h。 $dGOF/dwN$ 曲线如图 3 所示， wN 取值范围处于 0~20 之间时，*GOF* 较为稳定，保持在 98.4% 左右； $wN > 20$ ，*GOF* 不断下降，经过 $wN=76$ 这一拐点，最终 $wN=100$ 时 *GOF* 达到最小值 92.7%；最后选取 $wN^*=8.2$ 用于 2020 年规划空间形态的模拟，其点对点准确度可达到 98.493% 的水平，距离最佳准确度 98.915% 差 0.422%，较为理想⁵。

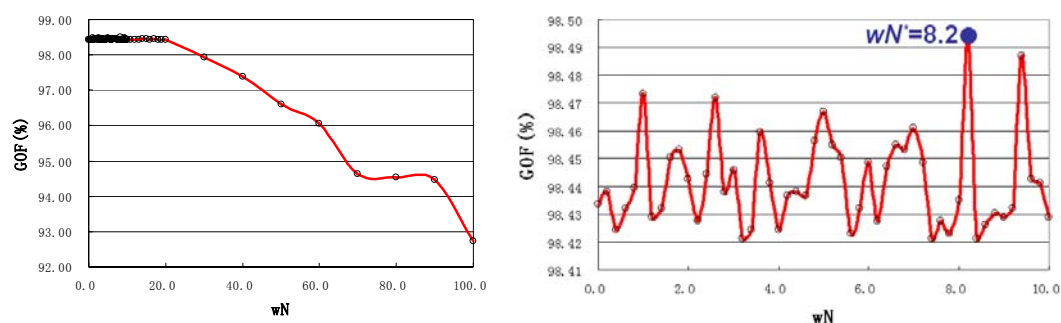


图 3 MonoLoop 过程的 $dGOF/dwN$ 曲线

Fig.3 $dGOF/dwN$ curve of MonoLoop

最后的参数识别最终结果参见表 4，将识别的模型参数 $stepNum$ 、 w^{1-12} 和 wN^* 代入约束性 CA 模型进行模拟，经过 168 个 Iteration，模型停止运行，总的已开发元胞达到 10104 个。2020 年的模拟结果如图 4 所示（SIM2020），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 1~168 次 Iteration 的模拟结果对应未来不同阶段的可能的空间形态，图 5 给出部分年份的模拟结果，与 SIM2020 一同，可以用于城市规划管理部门的预警。

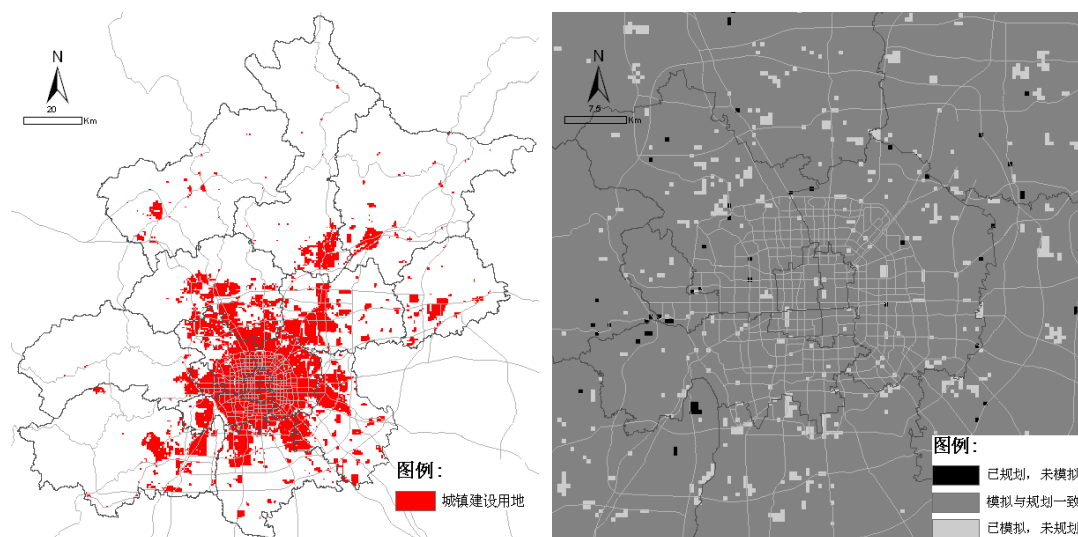


图 4 模拟结果（左）及中心地区与规划对比图（右）

Fig.4 Simulated urban form (Left) and comparative image with planned form in central area (Right)

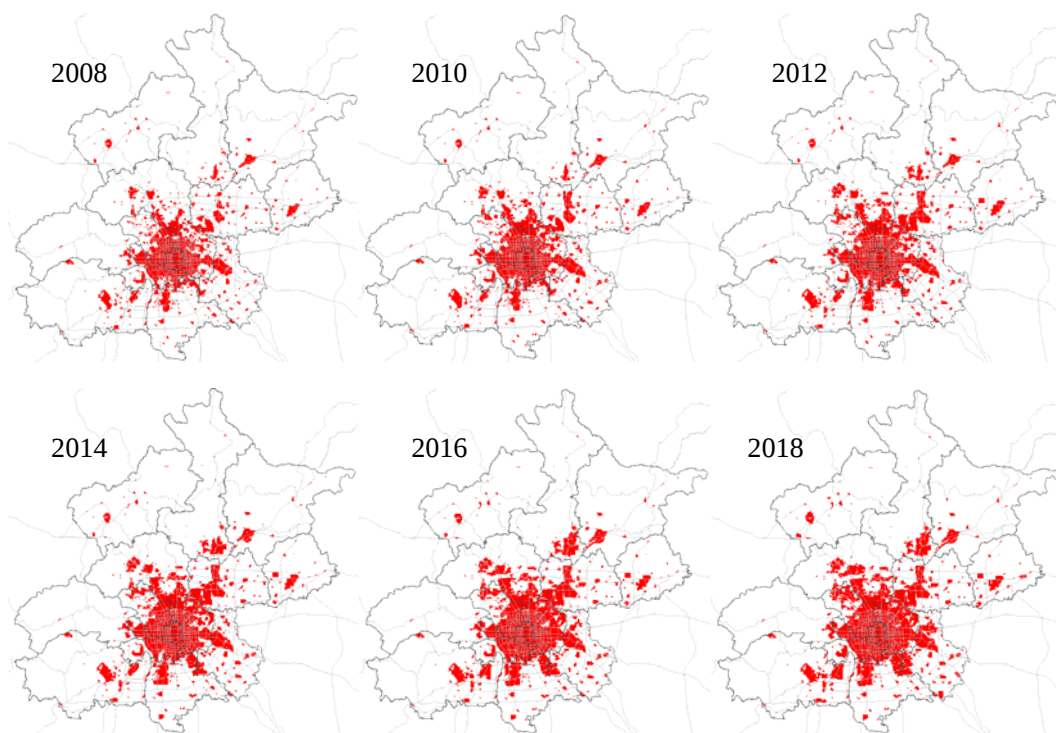


图 5 2008-2018 年的模拟空间形态图

Fig.5 Simulated urban form from year 2008 to 2018

将规划空间形态 PLAN2020 和模拟空间形态 SIM2020 采用空间格局验证、空间结构验证等方法进行模拟结果的验证，总体上二者的匹配性较高，模拟结果可信。

6 参数分析与发展政策建议

识别的模型参数可以作为要实现规划空间形态的发展政策，即需要怎样的政策才可以保障实现规划方案，如果现行的政策与所需政策不符合，则可以给出相应的调整建议。对于 *stepNum* 参数，通过与历史阶段进行对比，可以看出城市增长速度的变化，进而可以给出需要的宏观政策情况；对于空间变量的权重系数，可以利用公式 4 计算政策的实施力度变化情况，进而给出相同的政策在历史和未来的对比效果（即政策倾向的变化）。

$$k_i = \frac{w_i}{w_i^*}$$

$$i = 1-13$$

k_i : 政策*i*的实施力度变化

w_i : 政策*i*的识别的权重系数

w_i^* : 政策*i*的历史阶段的权重系数

公式 4

根据参数识别的结果可以看出，2006-2020 年每年增长的城镇建设用地规模为 $29 \times 12 / 4 = 87$ 平方公里，如果按人均城镇建设用地 100 平方米指标计算，则每年预期的人口增长规模为 87 万人；应该大力促进重点新城的发展，而对于中心城的扩展应该加以限制；禁止建设区需要有一定的突破，否则无法较好地实现规划空间形态，这也是因为在规划方案的制定过程中对禁止建设区的考虑不足；相比新城和中心城，重点镇和一般镇则更应该作为发展的重点；沿道路的发展应该受到控制，同时促进滨水空间的发展。

为了进行政策的历史对比，以 2001-2006 年这一历史阶段为例，利用约束性 CA 模型采用类似的参数识别方法，可以获得 2001-2006 年的模型参数（表 4）。相比这一历史阶段的城市增长策略，规划期（2006-2020）内的城市增长速度为 2001-2006 年的 2.6 倍，这也就需

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，规划期内需强化规划的实施力度，强化乡镇的发展，弱化中心城的扩张和建设用地的自发增长，增大对良田的保护力度。但规划期内对禁止建设区的保护力度弱于该历史阶段，这也说明规划方案的编制对禁止建设区的考虑不充足。

表 4 模型参数对比表

Tab.4 Parameters of constrained CA compared with historical ones

变量	历史参数（2001-2006）	规划期内参数（2006-2020）	比例(规划期/历史)
<i>stepNum</i>	11	29	2.64
<i>wN*</i>	12.5	8.2	0.66
<i>d_tam</i>	-0.000016	0.000008	-0.50
<i>d_vcity</i>	-0.000025	-0.000017	0.68
<i>d_city</i>	-0.000019	0.000009	-0.47
<i>d_vtown</i>		-0.000094	
<i>d_town</i>		-0.000095	
<i>d_river</i>	-0.000138	-0.000094	0.68
<i>d_road</i>	-0.000256	0.000684	-2.67
<i>d_bdtown</i>			
<i>f_rgn</i>	4.302458		
<i>planning</i>	-0.410472	23.173968	-56.46
<i>con_f</i>	-0.521103	1.205157	-2.31
<i>landresource</i>		0.141429	
<i>Constant</i>	-0.174524	-21.366643	

如果不以面向规划实现的发展模式，而采用延续 2001-2006 的发展模式，则 2020 年北京的城市增长如图 6 所示（城镇建设用地规模保持与 SIM2020 相同），该情景的 $GOF=93.526\%$ ，与面向规划发展模式相差 4.967%，同时北部昌平也将面临更大的发展机遇。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。

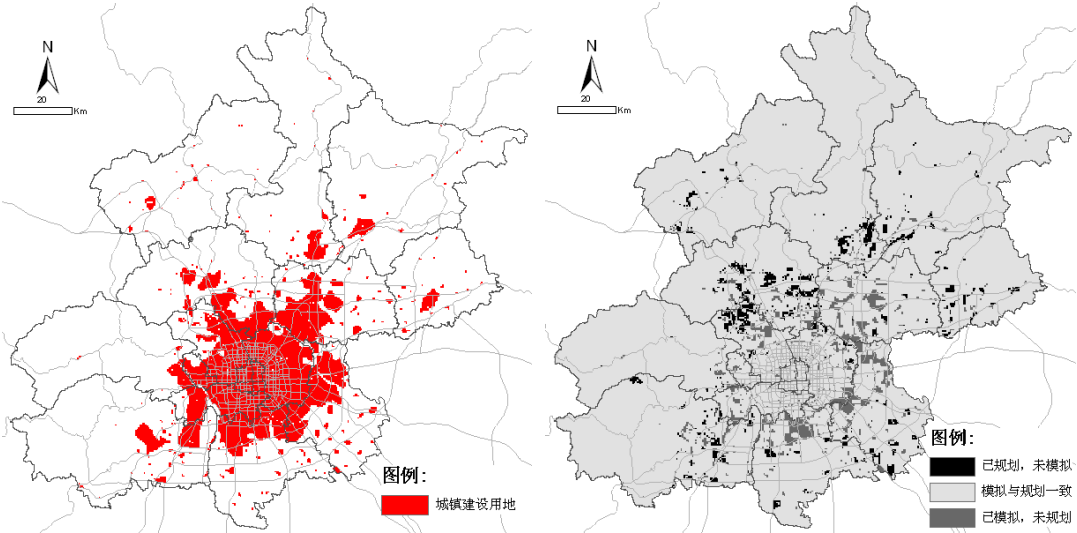


图 6 延续 2001-2006 年发展模式的模拟结果

Fig.6 Simulated urban form with parameters set of 2001-2006 (Left) and comparative image with planned urban form (Right)

7 结论与探讨

通过对模型模拟结果的验证,可以看出城市规划空间形态可用约束性 CA 的空间变量进行有效解释,通过与历史参数的对比,可以更为形象地给出实现规划空间形态所需要的发展政策。这一方法将约束性 CA 城市模型的应用领域扩展到了城市规划,是 CA 模型的应用的突破。该方法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。

下一阶段,考虑在模拟的过程中不仅仅通过对空间变量的权重系数进行识别,拟增加对空间变量分布的识别功能,以得到实现规划空间形态所需要配套的物理设施。同时,如果考虑参数的空间分异,则可以给出不同区域如果要想实现规划方案,所需要采取的不同政策。将来,也可以尝试采用 MAS 的方法来反映规划师、领导等人的意图,以从另一个方面研究如何实现规划空间形态。

注释 (Notes)

¹ 本文模拟的城市空间形态为城镇建设用地的空间分布,即在约束性 CA 模型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。下一步工作拟模拟多种土地利用类型的城市规划空间形态。

² 如果需要将实现规划所需要采取的政策与其他历史阶段进行对比,则不能够采用人工神经网络这类黑箱模型。

³ 计算方法参见文献(Long 等, 2008)。

⁴ 划定方法参见文献(龙瀛等, 2006)。

⁵ 由于有规划外的现状建设用地,因此实际的最大匹配度 $GOF=(65628-712)/65628=98.915\%$ 。

参考文献 (References)

1. Alkheder, S. and Shan, J. (2005). Cellular Automata Urban Growth Simulation and Evaluation - A Case Study of Indianapolis [C]. Proceedings of the 8th International Conference on GeoComputation, University of Michigan, United States of America, 31 July - 3 August 2005.
2. Ligtenberg, A., Bregt, A.K., and Lammeren, R.V. (2001). Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents [J]. Landscape and Urban Planning, 56(1-2), 21-33.
3. Clark, K.C. and Gaydos, L.J. (1998). Loose-Coupling a Cellular Automata Model and Gis: Long-Term Urban Growth Prediction For San Francisco and Washington/Baltimore [J]. Geographical Information Sciences, 12(7), 699-714.
4. Engelen, G., White, R., and Uljee, I. (1997). Integrating Constrained Cellular Automata Models, GIS and Decision Support Tools for Urban and Regional Planning and Policy Making [M]. Timmermans, H. (Ed): Decision Support Systems in Urban Planning. London: E&FN Spon. pp. 125-155.
5. Guan, G., Wang, L., and Clark, K.C. (2005). An artificial-neural-network-based, constrained CA model for simulating urban growth [J]. Cartography and Geographic Information Science, 32(4), 369-380.
6. He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P., and Zhang, J. (2008). Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with cellular automata. Landscape and Urban Planning, 86, 79-91.
7. Li, X., and Yeh, A G O. (2000). Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS [J]. International Journal of Geographical Information Science, 14(2), 131-152.
8. Long, Y., Shen, Z., Du, L., Mao, Q., and Gao, Z. (2008). BUDEM: an urban growth simulation model using CA for Beijing metropolitan area [C]. Geoinformatics, Guangzhou, China, 28 - 29 June.
9. Barredo, J., Kasanko, M., McCormick, N., and Lavalle, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata [J]. Landscape and Urban Planning, 64(3), 145-160.
10. Stevens, D., Dragicevic, S., and Rothley, K. (2007). iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making [J]. Environmental Modelling & Software, 22(6), 761-773.
11. Nijs, T.C.M., Niet, R.D., and Crommentuijn, L. (2004). Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030 [J]. Journal of Environmental Management, 72(1-2), 35-42.
12. Ward, D. P. and Murray, A. T. (1999). An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions [J]. International Journal of Geographical Information Science, 7 (5): 235 - 250.
13. Ward, D. P., Murray, A. T., and Phinn, S. R. (2000). A stochastically constrained cellular model of urban growth [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 24(6), 539-558.
14. White, R. W., and Engelen, G. (1997). Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modeling [J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 24, 235-246.
15. White, R., Straatman, B., and Engelen, G. (2004). Planning scenario visualization and assessment - cellular automata based integrated spatial decision support system [M]. In: Goodchild, M.F., Janelle, D.G., Shrore, Z.G. (Eds.), Spatially Integrated Social Science, Oxford University Press. pp. 420-442.
16. Wu, F. (1998). 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*, 12(1), 63-82.
17. Wu, F. (2002). Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions [J]. *International journal of Geographical Information Science*, 16(8), 795-818.
18. Wu, F, and Webster, C J. (1998). Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, 103-126.
19. Xie, Y. (1994). *Analytical Models and Algorithms for Cellular Urban Dynamics* [D]. Unpublished Ph.D. dissertation, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
20. Yeh, A G O, Li, X. (2001). A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, 733-753.
21. Yeh, A G O, Li, X. (2002). A cellular automata model to simulate development density for urban planning [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29, 431-450.
22. Yeh, A G O, Li, X. (2006). Errors and uncertainties in urban cellular automata [J]. *Computers, Environment and Urban systems*, 30(1), 10-28.
23. Zhao, Y. and Murayama, Y. (2007). A Constrained CA Model to Simulate Urban Growth of the Tokyo Metropolitan Area [C]. *Proceedings of the 9th International Conference on GeoComputation*, National University of Ireland, Maynooth, Ireland, 3 – 5 September.
24. 北京市规划委员会. (2007). 北京市限建区规划 (2006 年-2020 年) [R].
25. 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. (2006). 北京城市规划图志 (1949-2005) [R].
26. 北京市计划委员会国土环保处. (1988). 北京国土资源 [M]. 北京: 北京科学技术出版社.
27. 陈干, 闫国年. (2000). 城市模型的发展及其存在问题 [J]. *经济地理*, 20(5), 59-63.
28. 刘小平, 黎夏, 彭晓娟. (2007). “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*, 27(6), 2391-2402.
29. 龙瀛, 何永, 刘欣, 杜立群. (2006). 北京市限建区规划: 制订城市扩展的边界 [J]. *城市规划*, 30(12), 20-26.
30. 尹长林, 张鸿辉, 朱建军, 曾永年. (2008). 城市规划 CA 模型在城市空间形态演化中的应用研究 [J]. *测绘科学*, 33(3), 133-137.