

北京城市空间发展分析模型

龙瀛 毛其智 沈振江 杜立群

Beijing Urban Spatial Development Model

LONG Ying¹, MAO Qizhi¹, SHEN Zhen-jiang², DU Liqun³

(1 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084 China; 2 School of Environment Design, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192 Japan; 3 Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045 China)

Abstract Now it is urgent to identify the future urban form for Beijing, which faces challenges of rapid growth in urban development. In this article, we develop Beijing Urban Spatial Development Model (BUDEM in short) to support urban planning and corresponding policies evaluation. BUDEM is the spatial-temporal dynamic model for simulating urban growth in Beijing metropolitan area, based on cellular automata (CA) approach. In the paper, concept model of BUDEM is introduced, which is established basing on prevalent urban growth theories. The method integrating Logistic regression and MonoLoop is used to retrieve weights in the transition rule by MCE. After model sensibility analysis, we apply BUDEM into three aspects of urban planning practices: 1 Identifying urban growth mechanism in various historical phases since 1986; 2 Identifying urban growth policies needed for the implementation of desired urban form (BEI-

摘要 北京近年来城市扩张的速度较快, 城镇建设用地从 1976 年的 495 km² 增长到 2006 年的 1 324 km², 为了应对城市的空间发展, 自新中国成立以来北京市已编制了五版市域城市总体规划, 为了对总体规划进行实施评价, 给出目前的规划城市空间布局实现所需的配套政策, 并对远景的城市增长进行预测, 自主开发了基于元胞自动机 (CA) 的北京城市空间发展分析模型 (BUDEM), 用于对北京的城市空间发展进行综合分析及预测。文中对基于 CA 的城市空间增长模拟的相关研究进展进行概述, 基于北京城市增长模拟的基本逻辑建立了 BUDEM 模型, 提出了基于 Logistic 回归和 MonoLoop 集成的方法获取 CA 的状态转换规则。在对 1976~2006 年各个阶段城市增长进行分析的基础上, 重点将模型应用于两个方面: ①给出了实现指定的城市空间形态, 即 2020 年北京规划空间布局方案, 所需要的保障政策; ②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不同约束条件下的情景分析。

关键词 元胞自动机 (CA); 政策模拟; 约束条件; 城市规划; 城市增长; 北京

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) 和新中国成立 100 周年 (2049 年) 等未来不同阶段的城市空间布局进行判断与预警, 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,

作者简介

龙瀛、毛其智, 清华大学建筑学院;
沈振江, 日本金泽大学环境设计学院;
杜立群, 北京市城市规划设计研究院。

JING2020), namely planned urban form;
3 Simulating urban growth scenarios of
2049 (BEIJING2049) basing on the ur-
ban form and parameter set of BEI-
JING2020

Keywords cellular automata (CA);
policy simulation; constrained condition;
urban planning; urban growth; Beijing

而北京在这一领域仍为空白, 因此开发了北京城市空间发展分析模型 (Beijing Urban Spatial Development Model, BUDEM), 该模型是基于元胞自动机 (cellular automata, CA) 和个体系统模拟 (agent based modelling, ABM) 的用于模拟北京城市空间增长、具体规划方案制定以及区位选择的时空动态的城市模型, 目前本模型已经完成了第一阶段, 即城市增长历史分析及城市增长模拟。

城市模型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。作为离散动力学的一种研究方法, 基于自组织理论的 CA 不同于系统动力学模型, 它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做是 CA 模型。因此 CA 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。CA 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, 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 and Engelen, 1997)、美国旧金山湾和华盛顿—巴尔的摩地区 (Clark and Gaydos, 1998)、美国布法罗市 (Xie, 1994)、中国广州 (Wu, 1998、2002; Wu and Webster, 1998)、中国珠江三角洲 (Li and Yeh, 1998、2000、2002、2004; Yeh and Li, 2001、2002、2006)、中国北方 13 省 (He et al, 2006)、北京 (He et al, 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

虑邻域影响^①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。广义地讲, 包括邻域影响在内的转换规则可以统称为约束条件。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 (Engelen et al, 1997; Clark and Gaydos, 1998; Wu, 1998; Ward and Murray, 1999; Ward et al, 2000; Li and Yeh, 2000; White et al, 2004; Alkheder and Shan, 2005; Guan et al, 2005; Zhao and Murayama, 2007)。

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、宏观社会经济约束条件、空间性约束条件和制度性约束条件四种。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 城市模型的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; 制度性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, 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, 二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, 二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。

对于已有的 CA 城市模型的约束条件, 考虑全部这四种约束条件的较少, 对于邻域的影响 (特别是历史阶段) 往往是通过主观赋值的方式确定的, 失之于科学性, 不能对历史过程中邻域的作用进行定量识别 (Wu and Webster, 1998)。特别地, 对于制度性约束条件, 在应用中考虑得较少: 第一, 对于制度性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, 制度性约束条件设置得过于简单, 使得对规划政策的模拟不够深入。

在笔者自主开发的 BUDEM 模型中, 状态转换规则充分考虑了约束条件的时空复杂性, 集成了宏观社会经济约束条件、邻域约束条件、空间性约束条件和制度性约束条件, 采用 MonoLoop 方法对邻域作用的复杂影响进行识别, 并考虑了城市规划、限建区规划等制度性约束条件, 利用 Logistic 回归的方法对制度性约束在历史城市增长中所起到的客观作用进行了识别。利用 BUDEM 模型, 可以基于对历史阶段的分析识别模型参数, 给出实现规划空间布局的政策参数, 并可以模拟不同约束条件作用

下的城市增长情景，进而给出反映不同规划政策控制力度的城市空间形态。

本文在第二部分介绍 BUDEM 模型建立的方法；第三部分介绍基于 Logistic 回归和 MonoLoop 的模型参数识别的方法与结果；作为 BUDEM 模型的应用，第四部分给出实现新版总体规划空间布局的政策参数；第五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，最后进行了总结并提出了相应的后续研究的考虑。

2 BUDEM 模型

2.1 模拟逻辑

中国的城市增长过程中既有自上而下的政府行为，又有自下而上的基层自发开发 (Long et al., 2008)。对于前者，根据宏观社会经济条件，政府制定宏观发展目标（存量及增量土地供应计划、近期建设规划、年度实施计划等），政府也参与部分一级开发；开发商持有指定的开发项目，由政府根据客观的土地综合评价（自然地形、规划控制等），寻找适宜的开发地区（有竞争的过程，即基层行政单位或区域的竞标）。对于后者，即自下而上发展，基层土地使用权持有者具有自发的开发行为（如农地开发、城镇中心附近、公路附近等的开发），这种行为也受到制度性约束（城市规划、生态保护政策等）和自然约束（坡度、灾害等）的影响；基层开发行为反馈至政府，调整规划或发展目标（影响社会经济条件，形成完整的反馈）。

参考中国城市增长的现实特点，即既受到宏观层面上政府的控制，也有微观层面的自发增长。本模型的模拟思路总体上分为两个步骤（图 1）：首先在宏观上由政府（或开发商）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）；之后在微观上采用 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。

2.2 CA 概念模型

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，阿郎索 (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；道萨迪斯 (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，即现有城市中心、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)，例如巴特勒 (Butler, 1982) 认为影响住宅价格的因素有三类：区位、建筑结构

和邻里环境。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^②：

(1) 区位变量 (空间约束)：与各级城镇中心的最短距离 (天安门 d_{tam} 、边缘集团 d_{edge} 、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} 、京津冀区域吸引力 f_{rgn} ；

(2) 邻里变量 (邻域约束)：邻域内的开发强度 $neighbor$ (即邻域内不包括自身的城镇建设用地面积与邻域内不包括自身的土地面积之商)；

(3) 政府变量 (制度性约束)^③：城市规划 $planning$ 、土地等级 $landresource$ ^④、禁止建设区 con_f 、限制建设区 con_r 。

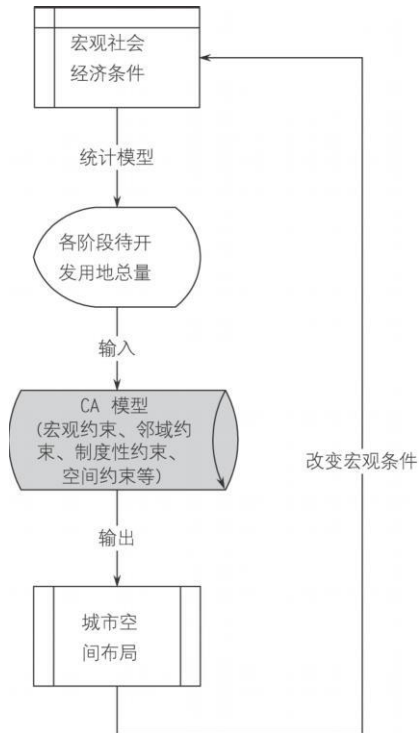


图1 BUDEM模型的模拟逻辑

BUDEM 模型建立的基本假设是：①城市是一复杂适应系统，可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促进增长因素和限制增长因素两类，同时也可分为市场驱动和政府引导两类，并且这些因素的影响随距离衰减；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，根据发展模式的不同生成不同的其他情景。

根据以上逻辑框架，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, 16 410 km² (可根据需要调整模拟范围);
- (2) 元胞 (cells): 500 m×500 m, 65 628 个^⑤;
- (3) 状态变量 (cell states): V=1 (城镇建设用地), V=0 (非城镇建设用地)^⑥;
- (4) 转换规则 (transition rules): 多属性分析 (multi-criteria evaluation, MCE);
- (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): 1 Iteration = 1 Month.

BUDEM 的概念模型如公式 1 所示，总体上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。现阶段 BUDEM 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。

$$\begin{aligned}
 V_{k,j}^{t+1} &= f\{V_{k,j}^t, Global, Local\} \\
 &= \{V_{k,j}^t, LOCATION, GOVERNMENT, NEIGHBOR\} \\
 &= f\left\{ \begin{array}{l} V_{k,j}^t, \\ d_tam_{k,j}, d_vcity_{k,j}, d_city_{k,j}, d_vtown_{k,j}, d_town_{k,j}, \\ d_river_{k,j}, r_road_{i,j}, d_hltown_{k,j}, f_rgn_{i,j}, \\ planning_{k,j}, con_f_{i,j}, landresource_{k,j}, \\ neighbor_{k,j}^t \end{array} \right\}
 \end{aligned} \tag{公式 1}$$

式中：

$V_{i,j}^t$: 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）

BUDEM 作为一种基于规则的模型 (Rule-based Modelling, RBM)，是通过调整宏观参数、各个空间变量的权重系数和空间变量本身进行调整实现城市增长模拟的，其中宏观参数用于控制城市空间增长速度（即为宏观社会经济约束），权重系数的大小表示相应政策的作用（或实施）的强度显著性，如限制、鼓励等，而参数自身的空间分布表示空间发展政策的作用范围，即规划方案实例 (Scenario)。BUDEM 包括的空间变量及其对应的政策如表 1 所示。

表 1 BUDEM模型的空间变量一览

Type	Name	Value	Description	Policy	Data ^①
LOCATION (空间约束)	<i>d_tam</i>	≥ 0	与天安门的距离	中心地区发展政策	LOCATION
	<i>d_vaty</i>	≥ 0	与重点新城的距离	重点新城发展政策	LOCATION
	<i>d_aty</i>	≥ 0	与新城的距离	新城发展政策	LOCATION
	<i>d_vtown</i>	≥ 0	与重点镇的距离	重点镇发展政策	LOCATION
	<i>d_town</i>	≥ 0	与一般镇的距离	一般镇发展政策	LOCATION
	<i>d_river</i>	≥ 0	与河流的距离	滨水开发政策	LOCATION
	<i>d_road</i>	≥ 0	与道路的距离	沿路发展政策	LOCATION
	<i>d_batown</i>	≥ 0	与乡镇边界的距离	行政界线影响政策	BOUNDARY
GOVERNMENT (制度性约束)	<i>f_rgn</i>	0~1	京津冀区域的吸引力	区域影响政策	LOCATION
	<i>planning</i>	0 1	城市总体规划用地类型	城市规划政策	PLANNING
	<i>con_f</i>	0 1	是否为禁止建设区	生态保护及风险避让政策	CONSTRAIN
NEIGHBOR (邻域约束)	<i>landresource</i>	1 2 3	针对农业用地适宜的 土地等级	优质农田 保护政策	LANDRESOURCE
		4 5 6 7 8			
NEIGHBOR (邻域约束)	<i>neighbor</i>	0~1	邻域内的城市建设元胞数目 /8	紧凑发展政策	LANDi *

* LANDi 为 CA 循环过程中生成的城镇建设用地分布数据, 其中城镇建设用地为 1, 其余为 0

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, 其获取方法有多种: 多准则判断 (MCE)、灰度、主成分分析 (PCA)、人工神经网络 (ANN)、遗传算法 (GA)、Fisher 判别、非线性核学习机、蚁群算法和支持向量机等 (黎夏等, 2007), 本研究采用 MCE 作为元胞状态转移规则的具体形式。

兰迪斯 (Landis, 1994、1995; Landis and Zhang, 1998a、1998b) 所开发的用于模拟城市发展形态的 CUF 和 CUF-2 (California Urban Future Model), 是 MCE 方法在城市增长方面的典型应用, 但其基本研究单元为矢量的 DLU (developing landuse unit, 开发土地单元, 类似于规划支持系统 “What if” 中的 Uniform Analysis Zone (UAZ) 的概念), 并没有基于 CA 的方法。基于 CA 模拟城市增长方

面, 吴缚龙 (Wu, 2002) 和黎夏等 (2007) 提出了 $P_c^i = P_g \times con (s_{ij}^t = suitable) \times \Omega_j$ 形式的状态转换规则, 其中, P_g 为基于 MCE 方法的城市增长适宜性 (或全局概率, global probability), 乘以局部的邻域作用 Ω 、环境约束 con 后得到最终的耦合概率 (joint probability)。吴缚龙 (Wu, 1998)、吴缚龙和韦伯斯特 (Wu and Webster, 1998) 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, 吴缚龙 (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。吴缚龙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映历史的发展趋势; 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。

而克拉克和盖多斯 (Clark and 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。克拉克考虑了五个参数 (每个参数分别有 6、6、6、5、7 个取值), 进而生成共 7 560 个参数组, 共运算 252 个小时识别最优参数组, 谢一春等 (Xie et al., 2005) 也采用了类似的方法应用于基于 CA 对苏州的城市增长进行模拟。采用这种方法, 如果参数增加, 则运算时间将大幅增长, BUDEM 共 13 个参数 (权重变量), 如果每个参数有 6 个选择, 运算时间过大, 不可接受。

本研究对吴缚龙、克拉克和盖多斯二者的方法进行综合并作一定改进, 结合二者的优点, 将除邻域作用 $neighbor$ 变量外的其余 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), 选取点对点匹配度 (goodness-of-fit, GOF) 最大的系数作为识别的 $neighbor$ 的权重系数 wN^* , 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。另外, 最终确定的状态转换规则如公式 2 所示^⑤, 首先根据宏观条件, 确定不同阶段的元胞转换数目, 之后基于约束条件计算城市增长的适宜性 s_{ij}^t , 进而计算全局概率 p_g^i 和最终概率 p^i , 最后在 Allocation 过程中, 根据 $stepNum$ 数值, 识别需要转变的元胞。

$$\begin{aligned}
 1. \quad & LandAmount = \sum_t stepNum^t \\
 2. \quad & s_{ij}^t = w_0 \\
 & + w_1 \times d_tam_{ij} + w_2 \times d_vcity_{ij} + w_3 \times d_city_{ij} + w_4 \times d_vtown_{ij} + w_5 \times d_town_{ij} \\
 & + w_6 \times d_river_{ij} + w_7 \times r_road_{ij} + w_8 \times d_bdtown_{ij} + w_9 \times f_rgn_{ij} \\
 & + w_{10} \times planning_{ij} + w_{11} \times con_f_{ij} + w_{12} \times landresource_{ij} \\
 & + wN^* \times neighbor_{ij}^t
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 3. \quad p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \\
 & 4. \quad p^t = \exp \left[\alpha \left[\frac{p_g^t}{p_{gmax}^t} - 1 \right] \right] \\
 & 5. \quad \text{for } k = 1 \text{ to stepNum}^t \\
 & \quad \quad \text{if } p_{ij}^t = p_{max}^t \text{ then } V_{ij}^{t+1} = 1 \\
 & \quad \quad p_{ij}^t = p_{ij}^t - p_{max}^t \\
 & \quad \quad p_{max}^t \text{ update} \\
 & \quad \text{next } k
 \end{aligned}$$

公式 2

式中:

$LandAmount$: 元胞总增长数目

$stepNum^t$: 每次循环元胞增长数目

s_{ij}^t : 土地利用适宜性

w : 空间变量权重系数

p_g^t : 变换后的全局概率

p_{gmax}^t : 每次循环中全局概率最大值

α : 扩散系数 (1~10)

p^t : 最终概率

p_{max}^t : 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

在公式 2 中, $stepNum$ 表示每个 iteration (1 个 CA 离散时间) 发生状态转变的元胞数目, 可根据宏观的社会经济发展指标来确定, 用以表征政府的土地供应政策的松紧 (尤其是增量土地部分), 以控制增长的速度。通过统计年鉴, 历史各阶段的 $stepNum$ 可以获得, 中长期来看, 研究区域内未来每年城镇建设用地增长 30 km^2 (10cells / iteration)。

基于所建立的 CA 状态转换规则, BUDEM 的模拟流程如图 2 所示。首先设置模型的环境变量、空间变量及相应系数, 并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 过程中采用循环的方式进行元胞的空间识别, 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。

2.4 参数识别方法

在状态转换规则中, 初始概率是 13 个空间变量所构成的函数, 因变量是二项分类常量, 即将土地

利用分为开发的（由非城镇建设用地转变为城镇建设用地）和未开发的（未从非城镇建设用地转为城镇建设用地），不满足正态分布的条件，这时采用 Logistic 回归分析方法获取 CA 的状态转换规则（Wu, 2002），其具体形式如公式 3 所示，为半对数方程，回归系数 b 反映了变量的敏感性，即变量变化 1 个单位对整体概率的影响，其绝对值越大，则其对应变量越敏感。

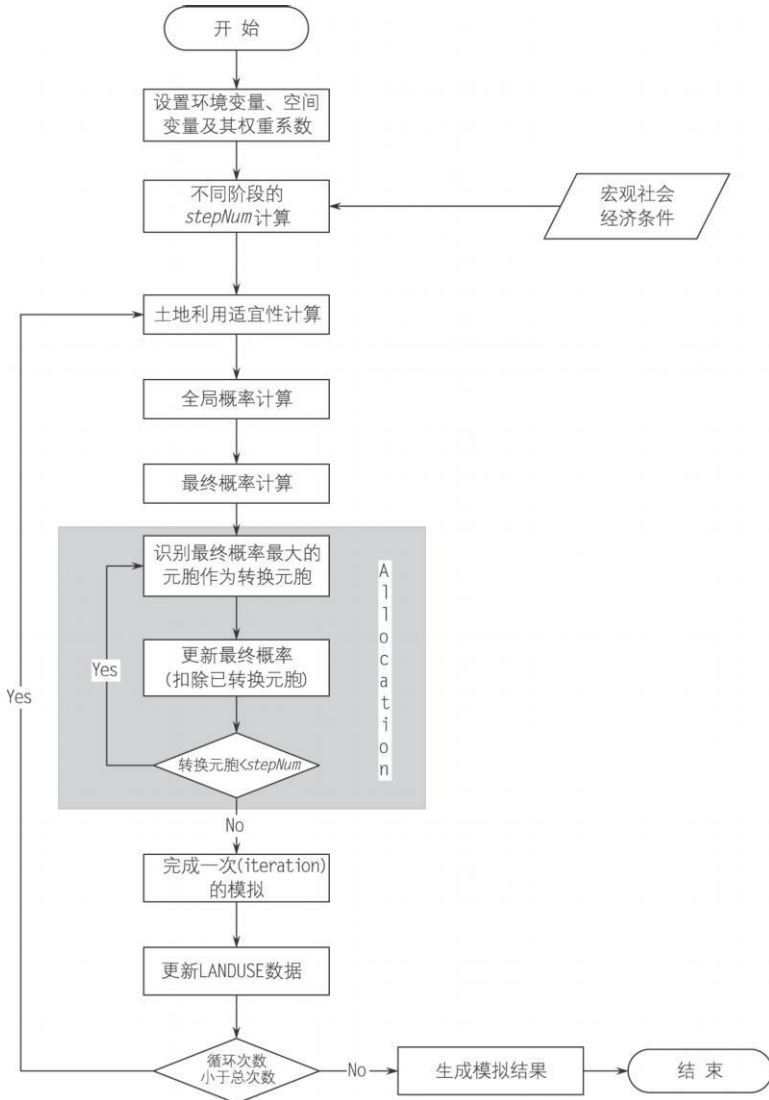


图 2 BUDEM模拟流程

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

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

公式 3

式中:

a : LOGISTIC 回归模型的常数项

b_k : LOGISTIC 回归模型的系数

x_k : 空间变量

$P_{Logistic}$: 基于 LOGISTIC 的转变概率

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。利用 ESRI ArcGIS 的 SAMPLE 工具, 对自变量对应的空间数据进行部分采样^④, 获得自变量数据, 对不同阶段之末和之初的 LAND-USE 数据作栅格代数减法运算获得因变量数据 (黎夏等, 2007)。将自变量和因变量在 SPSS 环境中进行分析^⑤, 可以获得 w_{1-12} , 它的大小反映了开发概率受这 12 个空间变量影响的基本规律。

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 的模拟值与观察值, 将具有最佳匹配度的 wN^* 与 Logistic 回归获得的 w_{1-12} 一同代入状态转换规则, 即可实现城市空间形态模拟的功能。模拟值与观察值的匹配度的表征指标较多, 本文选择 GOF, 即点对点匹配度 (整体精度), 来评价模拟值与观察值的匹配度, 其理论上的最大值为 100%^⑥。

2.5 模型开发

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。在模型开发过程中, 首先在研究范围内选取一个典型的小区域作为虚拟空间, 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, 最后在整个研究范围内开展模型的应用工作。通过在模拟的过程中生成日志文件, 记录每次循环的指标变化以辅助模型测试, 并可用于了解模型的运行情况。

BUDEM 模型的系统结构如图 3 所示, 主要包括模型输入模块、模型计算模块和结果输出模块。

本研究还开发了友好的 BUDEM 模型的中英文图形界面 (GUI), 可以方便地对模拟的输入参数进行设置, 并对输出结果进行显示, 界面如图 4 所示, 实现了 GIS 与 CA 的紧密集成, 相比松散的集成, 这种模式提高了模型的易用性。

2.6 研究区域及模型数据

北京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。作为 BUDEM 模型的研究范围, 北京市域总面积为 16 410 km² (图 5)。北京的平原区为高程在 100 m 以下的平原及台地, 总面积 6 338 km² (不含延庆盆地), 占全市面积的 39%; 山区面积 10 072 km², 占全市面积的 61%。

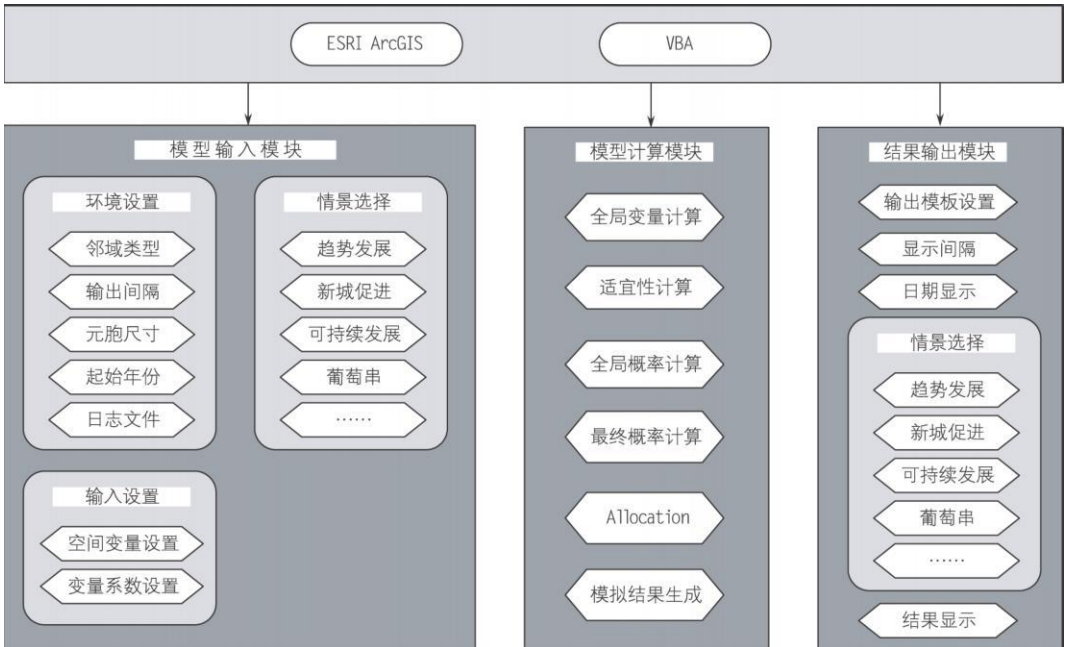


图 3 BUDEM 模型系统结构

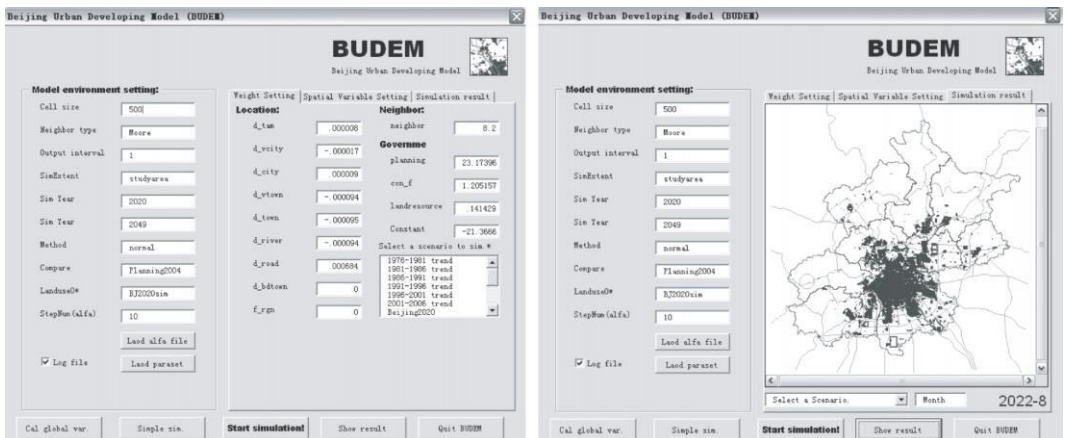


图 4 BUDEM 主界面 (参数设置及模拟结果显示)

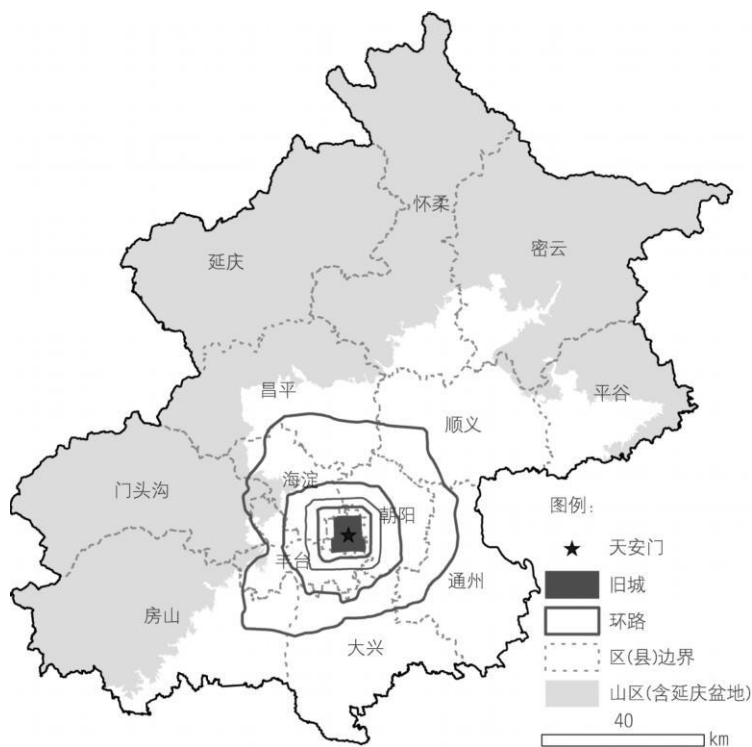


图5 研究区域

BUDEM 模型主要涉及八类基础数据, 土地利用 (LANDUSE)、限建分区 (CONSTRAIN)、土地等级 (LANDRESOURCE)、区位 (LOCATION)、城市规划 (PLANNING)、边界 (BOUNDARY)、政策区 (POLICYZONE) 和宏观社会经济 (SOCIO-ECONOMIC) 等。空间数据都位于北京市域内^②, 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 (空间数据的数据精度最低为 500 m, 同时考虑到 BUDEM 模型主要用于区域发展的宏观模拟, 因此元胞大小选为 500 m, 所有原始数据因此都重采样为该精度)。

(1) LANDUSE 数据解译自 1986 年、1991 年、1996 年、2001 年和 2006 年 TM 影像 (精度为 30 m, 重采样为 500 m), 土地利用类型分为六类, 城镇建设用地、农村建设用地、农地、林地、水域和未利用地, *landuse* 变量对应于该数据, 为城镇建设用地为 1, 否则为 0。

(2) CONSTRAIN 数据用于表征不同空间对城镇建设的限制程度, 考虑 110 多项自然资源保护和风险规避要素对城市建设的复杂约束条件, 并结合现有的法律、法规和规范等, 将市域划分为禁止建设区、限制建设区和适宜建设区 (龙瀛等, 2006), *con_f* 变量对应禁止建设区。该数据精度为

100 m, 重采样为 500 m。

(3) LANDRESOURCE 数据用于表征市域土地的农业适宜性, 根据北京市计划委员会国土环保处(1988)将土地分为一类地到八类地, 依次不适合农业耕作, *landresource* 变量对应于该数据。鉴于北京在城市增长过程中与基本农田的矛盾较大, 因此引入该数据。该数据的精度为 200 m, 重采样为 500 m。

(4) LOCATION 数据, 用于表征市域不同地区的区位条件(或开发适宜性, 这一数据已分配至各个元胞), 主要包括与各类城镇中心(天安门、重点新城、新城、重点镇、一般镇)、道路(到城市主干路层次)、河流(到二级河流层次)、乡镇边界的最近距离^③以及京津冀吸引力(京津冀区域对研究区域的吸引力)。基于各类区位要素(点、线)空间分布的 GIS 图层, 采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 Distance Straight Line 命令, 可以获取相应的区位数据(距离)。对于京津冀吸引力 *f_rgn* 变量, 根据城市空间相互作用理论, 采用潜力模型(Potential Model)计算京津冀区域内各县对北京市域不同元胞的吸引力(党安荣等, 2002; Weber, 2003), 以此表征研究范围之外的区域对北京城市空间增长的影响(该变量为 GRID 格式, 包括每个元胞所受到的京津冀区域的吸引力)。

(5) PLANNING 数据包括自北京 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五次总体规划, 分别为 1958 年、1973 年、1982 年、1992 年和 2004 年(北京市规划委员会等, 2006), 土地利用类型分为城镇建设用和非城镇建设用; *planning* 变量对应于该数据, 其中规划城镇建设用为 1, 其余为 0。

(6) BOUNDARY 数据用于表征北京市域范围内的不同级别的行政边界、环路边界、生态功能区边界、流域边界等, 用于状态转换规则的空间分异, 进而实现在不同区域采用不同的状态转换规则, *d_bdtown* 变量为基于其中的乡镇行政边界并采用 ESRI ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块的 Distance / Straight Line 命令获得。

(7) 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。该数据可在相应的模拟阶段将其空间范围代入 *landuse* 变量, 作为新增的城镇建设用, 以实现模拟该政策的作用。

(8) SOCIO-ECONOMIC 数据主要摘自北京市统计局(1999)自 1952 年以来北京各年的人口、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量(或历年增量)与各宏观指标的关系。

3 历史参数识别

参数识别即参数率定, 是识别模型参数的过程。对于 BUDEM 模型中的相应参数, 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的城市增长模式进行对比, 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,假设 d_tam 、 d_vcity 、 d_city 、 d_vtown 、 d_town 、 d_bdtown 、 $landresource$ 、 con_f 等变量均相同,假定上述变量不随时间变化,而 $planning$ 、 d_road 和因变量^⑩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(B表示回归系数),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)。各个历史阶段城市增长的共同点是沿道路开发显著,对禁建区的保护显著。横向对比不同要素随时间的变化,可以看出空间要素在不同历史阶段所起的作用不尽相同,甚至相反。

表2 不同历史阶段的 Logistic 回归系数

变量	B (2001~2006年)	B (1996~2001年)	B (1991~1996年)	B (1986~1991年)
d_tam	-0.000016*	-0.000035*	-0.000041*	
d_vcity	-0.000025*	-0.000031*		-0.000031*
d_city	-0.000019*	-0.000066*	-0.000033*	
d_vtown			0.000025*	0.000058*
d_town		0.000089*	0.000066*	
d_river	-0.000138*			
d_road	-0.000256*	-0.000804*	-0.000524*	-0.001092*
d_bdtown		-0.000377*		
f_rgn	4.302458*	-13.737258*		
$planning$	-0.410472*	0.254173	0.575671*	1.310654*
con_f	-0.521103*	-0.453115*	-0.497453*	-1.506241*
$landresource$			-0.075543	-0.233262
Constant	-0.174524	0.588961	-0.998267*	-3.610055*

*显著性处于0.001水平。

根据2001~2006年的历史回归,并采用 MonoLoop 方法,得到 $wN^* = 12.5$, $GOF = 97.920\%$,可以接受,模拟结果如图6所示,通过模拟结果与 LAND2006TM 数据的对比,可以看出本模型具有较高的精确度,这也证明了所建立的 BUDEM 模型和所采用的 MonoLoop 方法在北京城市增长模拟方面的可应用性,是对 BEIJING2020 和 BEIJING2049 应用的先期检验。

4 BEIJING2020: 实现规划形态的政策识别

2004年国务院批复了《北京城市总体规划(2004~2020)》,其空间布局图即为 PLANNING2004
 ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

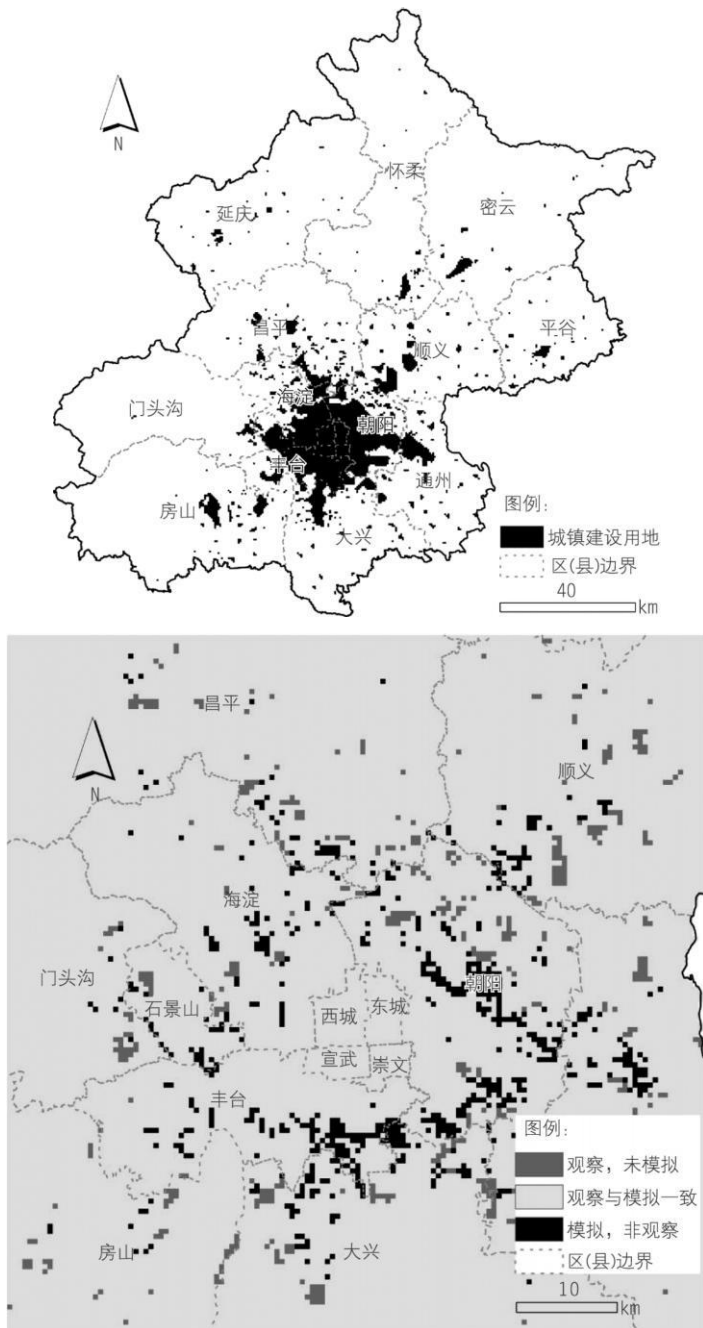


图6 2006年模拟结果及中心地区与观察数据对比

数据, 如何实现该总体规划所确定的空间布局, 需要哪些政策支持, 需要的发展模式与现状的发展模式有何区别, 以及目前到 2020 年之间不同水平年的城市空间的可能形态, 都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, 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, “建模方法” 也论述了采用计算机搜索算法的不现实性, 因此采用 “2.4 参数识别方法” 部分所提出的 Logistic 回归和 MonoLoop 集成的方法获取 CA 的状态转换规则, 进而进行 BEIJING2020 的模拟^⑤。

4.1 参数识别

PLANNING2004 的城镇建设用地元胞为 9 376 个, 2006 年土地利用现状数据 LAND2006TM 的城镇建设用地元胞为 5 297 个, 通过 OVERLAY 分析 (图 7), 发现 712 个元胞为规划外的现状城镇建设用地, 5 256 个元胞为规划新增的城镇建设用地, 59 660 个元胞的现状与规划用地类型一致。则模拟终期的城镇建设用地所占的元胞预期总量为: $9\ 376 + 712 = 10\ 088$ 个, 需发生状态转变的元胞数量为 $10\ 088 - 5\ 297 = 4\ 791$ 个 (由于有规划外的现状城镇建设用地, 因此理论上的最高匹配度 $GOF = (65\ 628 - 712) / 65\ 628 = 98.915\ %$)。

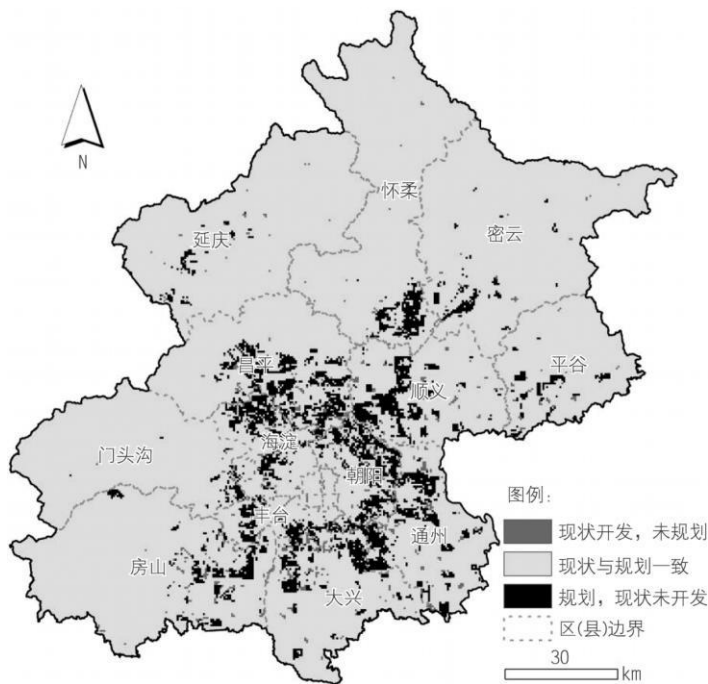


图 7 规划与现状城镇建设用地对比

将 PLANNING2004 与 LAND2006TM 作代数减法运算, 作为 Logistic 回归的因变量 (采样范围选取全部元胞样本), 即可获得实现规划方案的权重系数 w_{l-12} 以及常数项的数值, 回归结果如表 3 所示 (B 表示变量的回归系数), 回归的准确度可以达到 96%, 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 3 2006~2020 年 Logistic 回归系数

变量	B	S E	Wald	df
d_tam	0.00001	0	10.542	1
d_vcity	-0.00002	0	55.241	1
d_city	0.00001	0	11.149	1
d_vtown	-0.00009	0	383.699	1
d_town	-0.00010	0	192.663	1
d_river	-0.00009	0	33.037	1
d_road	0.00068	0	128.971	1
d_bdtown				
$region$				
$planning$	23.17397	3.482	44.286	1
can_f	1.20516	0.064	352.253	1
$landresource$	0.14143	0.019	53.82	1
Constant	-21.36664	3.513	36.997	1

Logistic 回归之后, 根据模型分析的结果, 利用 MonoLoop 方法识别具有最佳 GOF 的 $neighbor$ 的权重系数 (w_N), 进而完善 CA 的转换规则。关于 w_N 范围的选择, 本研究先在较大的范围内选择其取值 (0~100), 根据分析结果缩小取值范围 (类似二分法), 以降低 MonoLoop 过程的模型运算时间。同时在 MonoLoop 的过程中, w_N 之外的其余参数保持不变。

共采集了取值范围位于 0~100 的 69 个 w_N 的取值样本, 用时 22.5h。 $dGOF/dw_N$ 曲线如图 8 所示, w_N 取值范围处于 0~20 时, GOF 较为稳定, 保持在 98.4% 左右; $w_N > 20$, GOF 不断下降, 经过 $w_N=76$ 这一拐点, 最终 $w_N=100$ 时 GOF 达到最小值 92.7%; 最后选取 $w_N^*=8.2$ 用于 BEIJING2020 的模拟, 其点对点准确度可以达到 98.493% 的水平, 距离最佳准确度 98.915% 差 0.422%, 较为理想。

4.2 模拟结果

利用通过 Logistic 回归和 MonoLoop 所获取的权重系数 w_{l-12} 和 w_N^* , 代入 CA 状态转换规则进行模拟, 经过 168 个 Iteration, 模型停止运行, 总的已开发元胞达到 10104 个, 运算时间为 6.297s (30.3s/Iteration)。模拟结果如图 9 所示 (BEIJING2020 基准情景), 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。

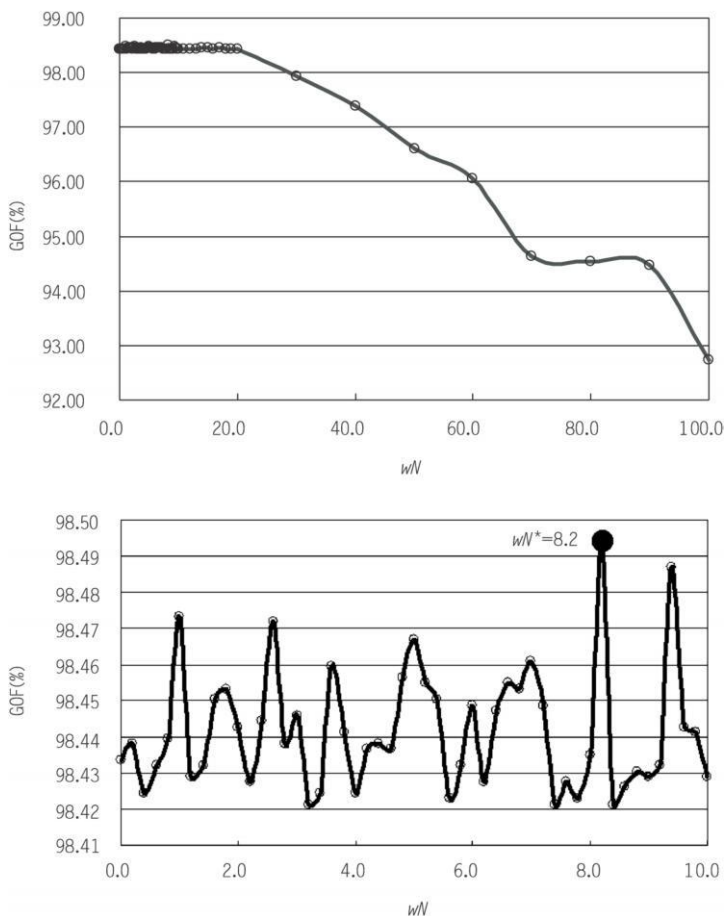


图 8 BEIJING2020 MonoLoop 过程的 $dGOF/dwN$ 曲线（下图为上图的局部放大）

4.3 结果验证

利用规划的城市形态 (PLANNING2004) 数据和模拟的城市形态 (BEIJING2020) 对比, 验证模拟结果, 采用 GOF 验证、空间格局验证、空间结构验证三种方法进行模拟结果的验证。

(1) GOF 验证

MonoLoop 的过程就是对 GOF 验证优化的过程, GOF 为 98.493%。

(2) 空间格局验证

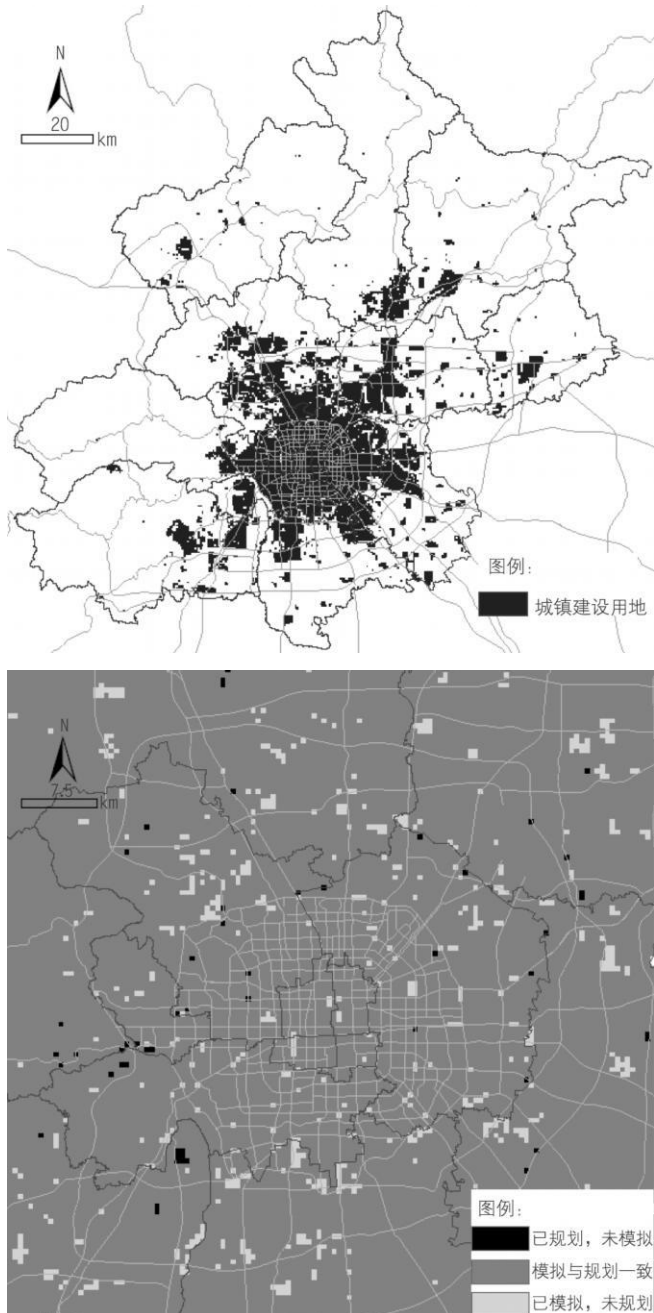


图 9 BEIJING2020 模拟结果 (上) 及中心地区与规划对比 (下)

① Moran I 指数验证。该指数用于描述空间分布的集聚程度, PLANNING2004 的数值为 0.12 ($Z \text{ Score} = 31.1$), 而 BEIJING2020 的数值为 0.14 ($Z \text{ Score} = 38.0$), 二者都比较集聚, 模拟的比规划的更为集聚 (相差 16.7%)。② Separate clusters 验证。将城市增长的栅格转换为矢量多边形, 彼此不相邻的多边形即为 1 个 Separate cluster (独立簇, 每个簇至少由 1 个 cell 构成), 分别获取 PLANNING2004 与 BEIJING2020 的簇的大小和数量 (表 4), 用于表征城市形态的空间格局。经过对比可以看出, 二者总体上比较相似, 仅 1~5 个 cell 构成的 cluster 存在细微差别。③ Edge cells 验证。Edge cells 是至少有一边与非城市建设元胞相接的城市建设元胞, 其数量可以作为表征城乡边缘区这一现象 (边缘长度), PLANNING2004 的边缘元胞数目为 4 045 个, 而 BEIJING2020 为 4 219 个, 相差 4.3%, 二者吻合度很好。

表 4 Separate clusters 验证结果

Cluster size (cell)	Cluster number	
	规划布局	模拟布局
1~5	173	238
6~10	32	39
11~20	23	27
21~50	15	17
51~100	2	1
> 100	11	11
sum	256	333

(3) 空间结构验证

参考北京环路和新城、乡镇的分布, 以到天安门的不同距离 (d_{tam}) 将市域分为 10 个圈层, 可以用于描述元胞的空间分布。对比不同圈层内的模拟结果与规划方案的城市建设元胞数目 (表 5), 总体上二者的匹配度较好。

表 5 空间结构验证结果

ID	d_{tam} (km)	规划布局		模拟布局		变化 (%)
		cell	%	cell	%	
1		317	3.1	305	3.3	-4.2
2	0~5	296	2.9	287	3.1	-4.9
3	5~7	624	6.1	604	6.4	-4.8
4	7~10	525	5.2	513	5.5	-5.7
5	10~12	1 849	18.2	1 737	18.5	-1.9
6	12~18	3 238	31.8	3 010	32.1	-0.8
7	18~30	2 204	21.7	1 938	20.7	4.8
8	30~50	868	8.5	789	8.4	1.4
9	50~70	237	2.3	189	2.0	15.6
10	70~100	12	0.1	4	0.0	176.6
sum	100~150	10 170	100.0	9 376	100.0	

总体上, 观察值 PLANNING2004 与模拟值 BEIJING2020 在 GOF、空间格局和空间结构三方面的验证都表明, 二者的匹配性较高, 模拟结果可信。同时这也反映了在 MonoLoop 过程中, 单纯地控制 GOF 指标也可以实现空间格局和空间结构方面的匹配^⑧。

4.4 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, 进而可以进行空间政策方面的对比, 即需要怎样的政策才可以保障实现 PLANNING2004 这一规划方案, 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。以与 2001~2006 年的回归系数对比结果为例 (表 6), 相比这一历史阶段的城市增长策略, 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城镇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 PLANNING2004 方案的编制对禁止建设区的考虑不充足。

表 6 BEIJING2020 及 2001~2006 年回归系数对比

变量	B (2001~2006 年)	BEIJING2020
<i>neighbor</i>	12.5	8.2
<i>d_tam</i>	-0.000016	0.000008
<i>d_vcity</i>	-0.000025	-0.000017
<i>d_city</i>	-0.000019	0.000009
<i>d_vtown</i>		-0.000094
<i>d_town</i>		-0.000095
<i>d_river</i>	-0.000138	-0.000094
<i>d_road</i>	-0.000256	0.000684
<i>d_batown</i>		
<i>f_rgn</i>	4.302458	
<i>planning</i>	-0.410472	23.173968
<i>con_f</i>	-0.521103	1.205157
<i>landresource</i>		0.141429
<i>Constant</i>	-0.174524	-21.366643

如果不以 BEIJING2020 基准情景, 即面向规划实现的发展模式, 而采用延续 2001~2006 年的发展模式, 则 2020 年北京的城市增长如图 10 所示, 该情景的 $GOF=93.526\%$, 与 BEIJING2020 相差 4.967% 。相比 BEIJING2020 发展模式, 延续目前的发展模式, 北部昌平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。

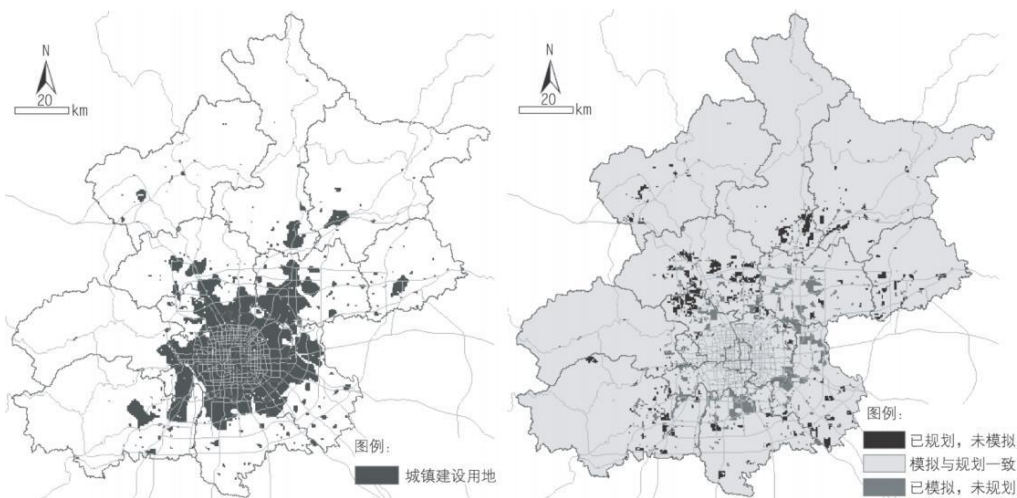


图 10 延续 2001~2006 年发展模式的 BEIJING2020 模拟结果

5 BEIJING2049: 远景城市增长模拟

5.1 基准情景

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 周年这一时期的远景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。

假定 2020 年的规划方案可以实现 (需要的政策支持在“4.2 模拟结果”部分已经给出), 在 2020 年的规划方案的基础上进行 BEIJING2049 的预测。这种预测模式相比在 2006 年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, 因为在中国土地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, 因此可以认为 BEIJING2020 规划方案实现的不确定性小于以现状为基准进行预测的不确定性。而在西方部分发达国家, 土地的权属私有居多, 政府对城市增长的控制作用不如中国显著, 尤其是对远景的预测。

保持 BEIJING2020 的基准参数集不变, 每年增长 30 万人/年^①, 新增人口的人均城镇建设用地标准为 100 m^2 /人, 2049 年人口规模为 2 670 万人, 城镇建设用地总量为 $3 412 \text{ km}^2$ ($13 650 \text{ cells}$) 作为输入条件模拟 2049 年的空间增长 ($\text{stepNum}=10$), 即为 BEIJING2049 的基准情景, 模拟结果如图 11 所示 (鉴于 BUDEM 是基于规则模型, 因此这里不需要进行模拟结果的验证): 基准情景的城市空间增长主要位于顺义、昌平、通州以及密云水库周边, 南城相比北城的发展较弱; 新版“总规”所划定的部分发展备用地并没有得到较大发展 (永乐、潮白河东岸)。基准情景是在延续 BEIJING2020 发展政策的基础上生成的, 如果不采取该政策, 则相应的空间增长将会发生变化, 在“5.2 情景分析”

部分中将分别给出其他发展条件下的城市空间增长。

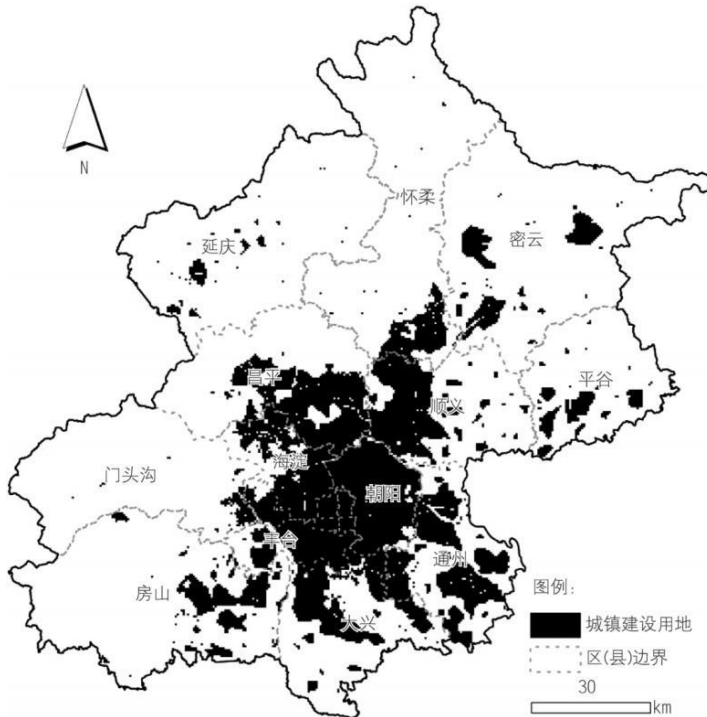


图 11 BEIJING2049 基准情景模拟结果

5 2 情景分析

5 2 1 宏观政策情景模拟 (A)

宏观政策, 如人口发展、经济发展等, 对城市增长速度 ($stepNum$) 有较大影响, 通过计量分析, 可以识别它们之间的关系, 如 $stepNum$ 可以写为 GDP、总人口、平均城市工资、交通费用、农地产出、工业用地面积、交通设施等数值的函数, 因此可以通过调整未来的宏观政策改变 $stepNum$ 的数值。这里参考规划城镇建设用地的计算思路, 考虑人均城镇建设用地指标和人口规模, 采用公式 4 计算 $stepNum$, 进而改变城市空间增长的方案。

$$stepNum = \frac{y_t - y_{t_0}}{t - t_0} = dPOP \times x \times k \quad \text{公式 4}$$

式中:

y_t : 第 t 年的城镇建设用地面积, km^2

y_{t_0} : 第 t_0 年的城镇建设用地面积, km^2

$dPOP$: 每年增长的人口数量, 万人/年

x : 人均城镇建设用地面积, $\text{m}^2/\text{人}$

k : 调节参数

A类情景的参数设置同BEIJING 2020,即认为目前到2049年的城市空间增长规律与BEIJING 2020一致,只通过调整人口增长速度、人均城镇建设用地指标等参数调整 $stepNum$ 的数值。设置了A1人口高速增长情景和A2人口低速增长情景。其中,A1情景假设2020~2049人口增长速度为86万人/年,(2049年全市总人口4294万人),如新增人口的人均城镇建设用地标准为 $100\text{m}^2/\text{人}$,则2049年的城镇建设用地总规模为 5023.5km^2 (20094 cells),模拟结果如图12所示。

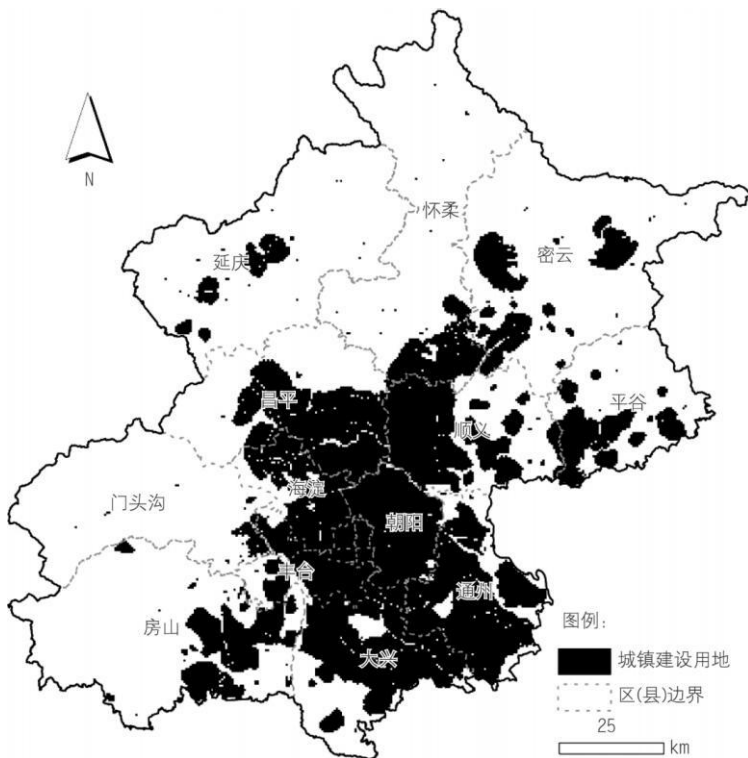


图12 人口高速增长情景模拟结果

5.2.2 规划方案情景模拟(B)

除了通过宏观政策控制城市空间增长的速度,还可以通过制定新的规划方案改变城市空间增长的格局。B类情景仅调整相关变量的空间分布,如调整城镇中心的位置、路网布局、控制发展区范围等,以改变空间政策有效作用的空间范围,而其他参数保持与BEIJING2049基准情景相同(空间变量系数及 $stepNum$)。可以模拟的情景包括B1新建七环情景、B2新城中心移动情景和B3新建自然保护区情

景，篇幅有限，不在这里列出，通过 BUDEM 模型平台可以实现这些情景的模拟功能。

5.2.3 规划政策模拟情景 (C)

C 类情景假设人口增长速度、用地标准和规模与 BEIJING2049 基准情景相同，即每年增长 30 万人年，新增人口的人均城镇建设用地标准为 $100 \text{ m}^2/\text{人}$ ，2049 年人口规模为 2 670 万人，城镇建设用地总量为 $3\,412 \text{ km}^2$ ，因此参数设置中， $stepNum=10$ 。变量的空间分布也保持与基准情景相同，仅调整各空间变量的权重系数，即通过改变相应空间政策的实施力度（当系数为 0 时表示不引入该政策），生成不同发展侧重的城市空间增长情景：C1 趋势发展情景、C2 蔓延情景、C3 “葡萄串”情景、C4 可持续发展情景、C5 新城促进发展情景、C6 滨河促进发展情景、C7 道路促进发展情景和 C8 区域协调发展情景（篇幅有限，下面仅给出前 4 个规划政策模拟情景）。

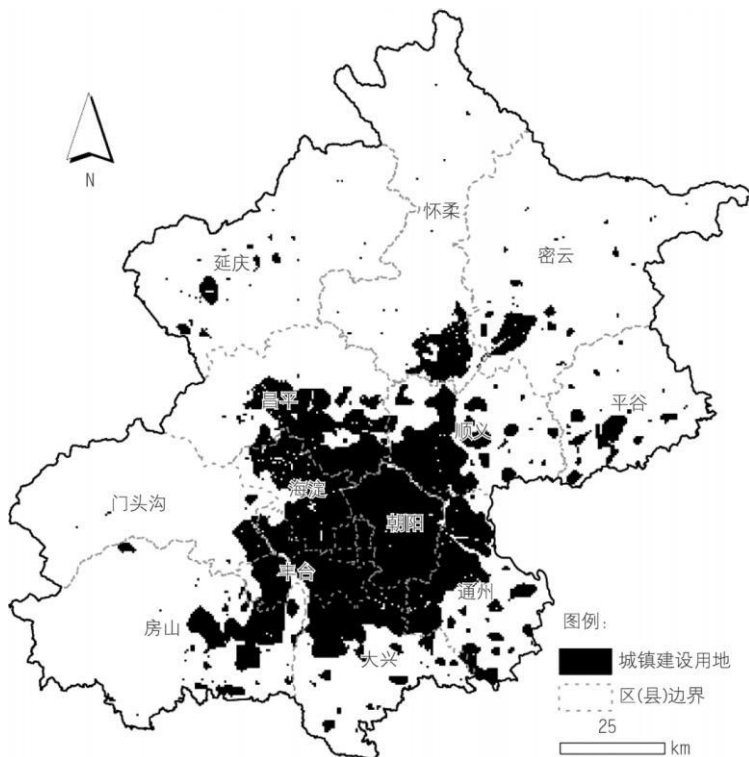


图 13 趋势增长情景模拟结果

5.3 情景对比

为了对 BEIJING2049 的各情景进行对比，选择以下几个参数进行分析：占用禁建区面积 $conf$ 、限建区面积 $conr$ 、占用绿化隔离带（第一道和第二道之和）面积 $green$ 、基本农田面积 $agri$ 、农村建设用地面积 $rural$ 和蔓延程度 ($Moron I$)，分析结果如表 7 所示。

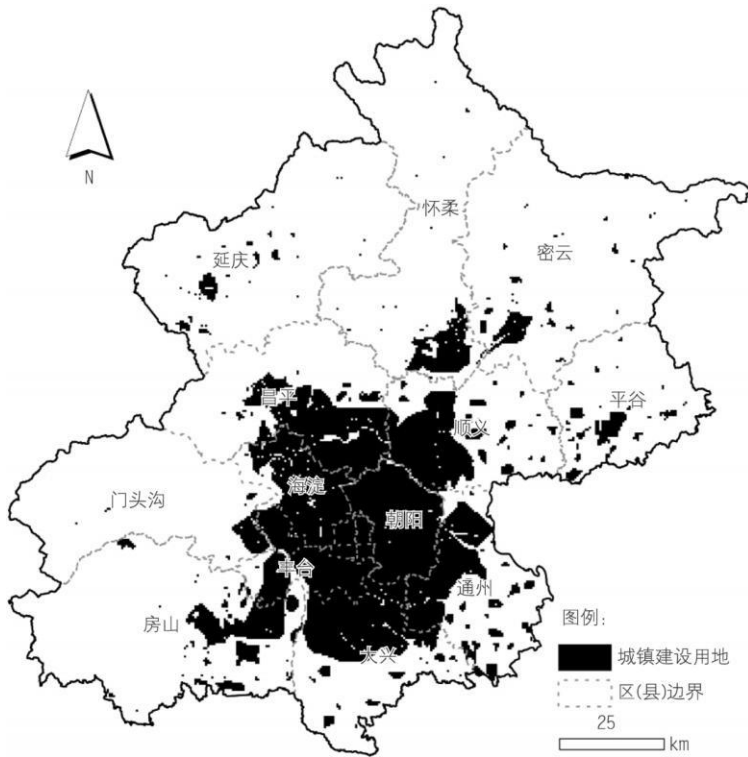


图 14 蔓延情景模拟结果

表 7 各情景模拟结果对比 (km²)

方案名称	<i>conf</i>	<i>conr</i>	<i>green</i>	<i>agri</i>	<i>rural</i>	<i>Mbran l</i>
BEIJING2020 基准情景	538	1 807	1 128	150	169	0 14
BEIJING2049 基准情景	1 050	2 119	1 312	542	244	0 19
A1	1 890	2 775	1 539	1 227	403	0 14
A2	768	1 976	1 287	347	201	0 18
C1	843	2 376	1 595	397	284	0 25
C2	918	2 257	1 630	469	272	0 25
C3	912	2 253	1 369	455	258	0 20
C4	765	2 214	1 181	492	248	0 13
C5	1 007	2 230	1 457	563	280	0 17
C6	906	2 352	1 555	438	268	0 24
C7	905	2 345	1 526	438	266	0 22
C8	919	2 385	1 544	445	269	0 23

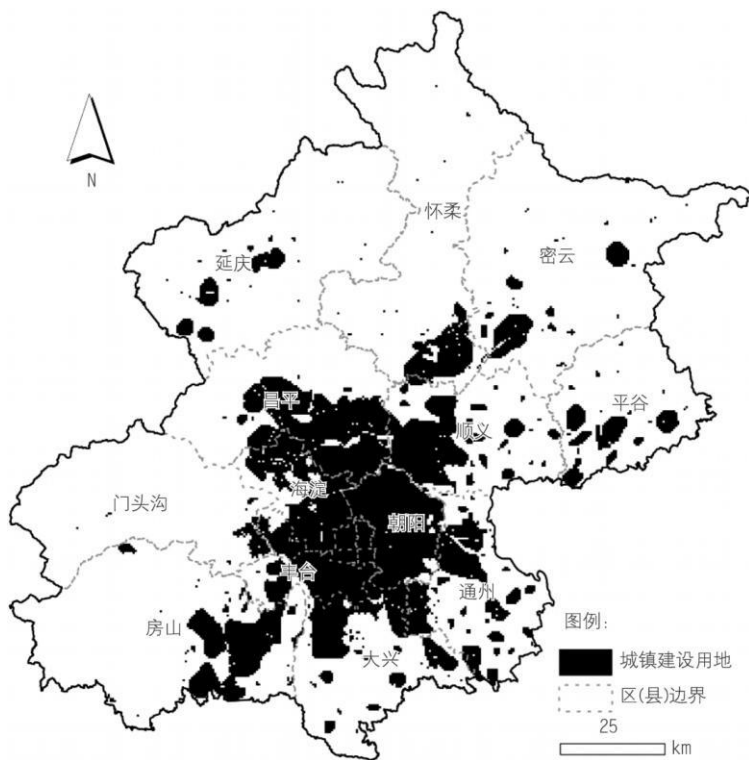


图 15 “葡萄串”情景模拟结果

从分析结果可以看出，A 类情景中，同规模增长情景 A1 对各类敏感性用地的占用都明显高于低增长情景 A2，聚集程度低于 A2；C 类情景中，可持续发展情景 C4 相比其他情景，在敏感性用地的占用方面都处于最低，这也体现了“可持续”的特点；趋势发展情景 C1 对农村建设用地的占用最大，这点在 2001 ~ 2006 年已有所体现；蔓延情景 C2 的集聚程度最高，而可持续发展情景 C4 最低。

6 结论与讨论

本阶段的 BUDEM 模型在理论研究和实证研究方面，都取得了一定的创新成果。在理论研究方面：①结合中国城市增长的特点，基于城市增长理论以及 Hedonic 模型选择 CA 模拟的空间变量，使得 BUDEM 模型的建立具有更为坚实的理论基础；②引入京津冀吸引力变量，用于表征京津冀区域（大北京）对北京城市空间增长的影响，从而在常规 CA 模型没有考虑区域因素这一方面有理论突破，这点也可以为其他空间模型参考；③在建模方法上，BUDEM 采用笔者首次提出的 Logistic 回归和

MonoLoop 集成的方法获取 CA 状态转换规则, 是 CA 模型参数识别的一种新方法; ④提出根据预先设定的城市形态 (如规划布局), 识别所需要的政策参数, 是传统的城市模型所没有考虑的, 具有较强的理论突破和规划实践意义。在实证研究方面, 侧重于中国大城市地区的规划实践: ①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, 可以用于模拟宏观政策、规划方案、城市空间发展策略等, 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; ②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制度性约束的研究视角; ③提出了结合中国国情的基于中期规划方案预测远景城市空间增长的模式 (基于 2020 规划预测 2049), 降低长期城市形态预测的不确定性。

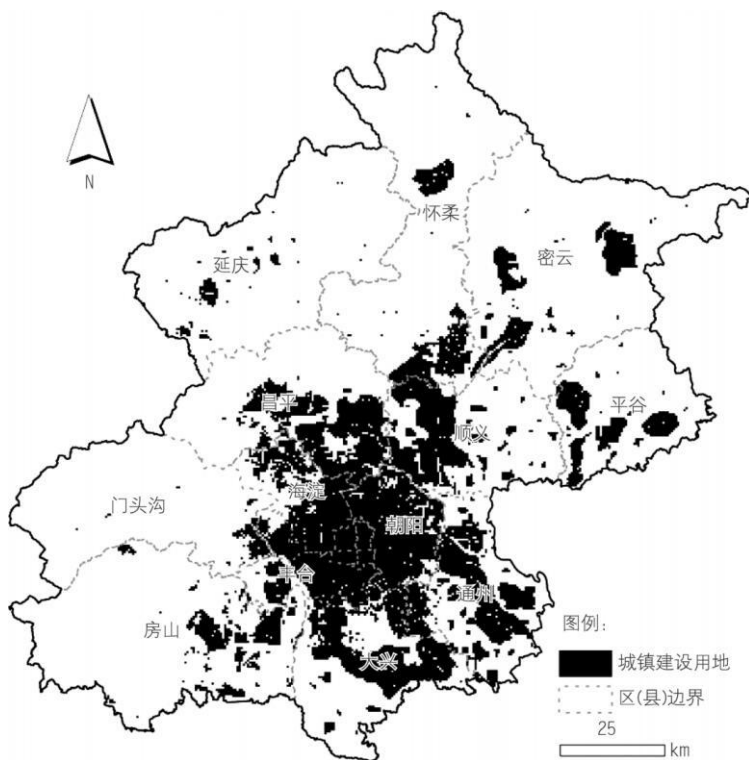


图 16 可持续发展情景模拟结果

本项目仅为 BUDEM 模型的第一个研究阶段, 研究小组将在近期将本阶段的 BUDEM 应用于北京市的规划管理和规划编制的实践, 如南城复兴、总体规划实施评价、二机场选址等研究, 模拟不同的空间发展政策对城市空间增长的影响, 在实践中进一步完善基于 CA 的 BUDEM 模型, 使其真正成为可应用的城市模型。

研究经历有限, BUDEM 模型在一些方面还不尽完善, 如在不确定性方面仍存在一定问题, 尤其

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.>

是尺度效应，还需要进一步的工作加以完善；模型中提取的状态转换规则适用于整个研究范围，并没有考虑空间分异现象。下一阶段，拟针对这几点进行模型的改善，并拟在基于 CA 模拟的城市形态的基础上，以北京五环内为研究范围，细化研究尺度，对掌握的不同区域的现状图和规划图进行数据挖掘，得到决策树形式的规划师的规则，用于辅助规划师制定不同偏好的初步城市规划方案（商业、居住、工业用地），经过人工干预调整，得到正式的城市规划方案。

致谢

本文受国家自然科学基金项目（NSFC 50678088）、国家“十一五”科技支撑计划项目（2006BAJ14B08）资助。本文也得到北京市城市规划设计研究院资助。中国科学院遥感所的吕宁博士生和首都师范大学的林飞娜同学负责完成 2006 年的遥感影像解译工作，首都师范大学的高占平和马兰艳协助完成了部分数据的数字化工作，北京市城市规划设计研究院的谷一桢为本研究提出了中肯的建议，在此一并表示感谢。

注释

- ① 本文也将近邻约束作为约束条件的一种。
- ② 宏观社会经济条件约束，不属于 CA 的空间变量，是 CA 模型的外生（exogenous）变量，没有对应的空间分布，是具体的数字，如人口数目、城镇建设用地总量等。利用社会统计软件 SPSS 进行各空间变量的相关性分析， con_f 与 con_r 相关系数为 -0.936，负相关，删除 con_r 变量； d_edge 与 d_tam 的相关系数为 0.994， d_edge 与 d_vaty 的相关系数为 0.751，删除 d_edge 变量。
- ③ 制度性约束的三个变量，与空间约束和邻域约束相同，都具有相应的空间分布，用于表示政府的政策所对应的空间范围，如城市规划变量表示规划城镇建设用地的范围，禁止建设区变量对应禁止城镇开发的用地的空间范围。
- ④ 具体指可耕作性，即农业用地适宜性，用于表征农田的保护政策。
- ⑤ 新版北京城市总体规划的 90% 建设用地地块平均大小为 25.6 万 m^2 ，即 500 m × 500 m 左右；1950~2006 年，北京市规划委员会的用地许可证地块平均大小为 200 m × 200 m 左右；2005 年北京市域现状用地图中城市建设用地的图斑平均大小为 190 m × 190 m 左右；北京市中心城控制性详细规划中的地块平均大小为 20.345 m^2 ，即 140 m × 140 m 左右。BUDEM 模型之所以选择 500 m 作为研究尺度，取决于其为区域尺度的模型，模拟的目的是城镇建设用地扩张的趋势。
- ⑥ BUDEM 也可以模拟多种用地类型（城镇建设用地、农村建设用地、农田、林地、未利用地、水域等）的时空动态变化，为了简化，这里仅进行城市建设用地与非城市建设用地的模拟。
- ⑦ 该列对应于“2.6 研究区域及模型数据”部分的数据。
- ⑧ 实际上，转换规则存在空间分异（类似于经济学上的“分市场效应 submarkets”），即不同地区的转换规则不同，本研究假定转换规则具有区域同质性，对空间分异（spatial heterogeneity）这一现象并没有考虑。
- ⑨ 采样范围的选取对回归结果存在不确定性，本研究尚未考虑。
- ⑩ 为了对比不同的回归的系数，所进行的每次 Logistic 回归的样本范围保持不变，考虑常数项，采用 SPSS 软件中的 Regression /Binary logistic 的 FORWARD, LR 方法。

- ⑪ 对于 wN 数值范围的选择, 为了降低 MondLoop 过程的模型运行时间, 先在较大的范围内不断尝试各个数值进行计算, 之后根据其计算结果不断细化数值选择的范围。不同的 wN 值的模拟过程中, 其余参数保持不变, 包括目标城镇建设用地总规模。
- ⑫ 宏观社会经济数据是对北京市域的整体描述数据。
- ⑬ 直线距离在宏观阶段可以选用, 如果研究范围缩小、研究精度增大, 则可以考虑细化道路等级, 并引入轨道交通站点、快速路出入口、高速公路出入口等要素, 以及时间因素。
- ⑭ 因变量利用各个阶段之末的 *landuse* 栅格数据和之初的 *landuse* 栅格数据作代数减法获得。
- ⑮ 关于根据预先设定的城市形态识别相应的空间政策的研究方法, 在龙瀛等 (Long et al., 2009) 中被定义为“形态情景分析”, 更为深入的方法参见此文献。
- ⑯ 不排除这属于个案。
- ⑰ 假设均为城市人口, 在模拟的过程中, 可以根据对宏观社会经济发展的判断对此参数进行调整, 30 万人/年这一参数设置来自对北京过去 5 年的人口统计数据设定。如果降低此参数, 则可以模拟未来人口增长过程进入平稳期的情景。

参考文献

- [1] Alkheder, S. and Shan, J. 2005 Cellular Automata Urban Growth Simulation and Evaluation—A Case Study of Indianapolis. Proceedings of the 8th International Conference on GeoComputation, University of Michigan, United States of America, 31 July-3 August
- [2] Alonso, W. 1964 *Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent*. Cambridge, MA: Harvard University Press
- [3] Butler, R. W. H. 1982 A Structural Analysis of the Moine Thrust Zone between Loch Eriboll and Foinaven, NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, No. 4
- [4] 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. *Geographical Information Sciences*, Vol. 12, No. 7
- [5] 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. In Timmermans, H. (ed.), *Decision Support Systems in Urban Planning*. London: E&FN Spon
- [6] Guan, G., Wang, L. and Clark, K. C. 2005 An Artificial-Neural-Network-Based Constrained CA Model for Simulating Urban Growth. *Cartography and Geographic Information Science*, Vol. 32, No. 4
- [7] He, C., Okada, N., Zhang, Q., Shi, P. and Zhang, J. 2006 Modeling Urban Expansion Scenarios by Coupling Cellular Automata Model and System Dynamic Model in Beijing, China. *Applied Geography*, No. 26
- [8] 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*, No. 86
- [9] Lancaster, K. 1966 A New Approach to Consumer Theory. *Journal of Political Economy*, Vol. 74, No. 2
- [10] Landis, L. D. 1994 The California Urban Future Model: A New Generation of Metropolitan Simulation Models. *Environ*
- ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- ment and Planning B: Planning and Design, Vol 21, No 4
- [11] Landis, L D 1995 Imaging Land Use Futures: Applying the California Urban Future Model *Journal of American Planning Association*, Vol 61, No 4
- [12] 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: Planning and Design*, Vol 25, No 5
- [13] 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: Planning and Design*, Vol 25 No 6
- [14] Li X and Yeh A G O 1998 Principal Component Analysis of Stacked Multi-Temporal Images for Monitoring of Rapid Urban Expansion in the Pearl River Delta *International Journal of Remote Sensing*, Vol 19, No 8
- [15] Li X and Yeh A G O 2000 Modeling Sustainable Urban Development by the Integration of Constrained Cellular Automata and GIS *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 14, No 2
- [16] Li X and Yeh A G O 2002 Neural-Network-Based Cellular Automata for Simulating Multiple Land Use Changes Using GIS *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 16, No 4
- [17] Li X and Yeh A G O 2004 Data Mining of Cellular Automata's Transition Rules *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 18, No 8
- [18] Long Y, Shen Z, Du L, Mao Q and Gao Z 2008 BUDEM: An Urban Growth Simulation Model Using CA for Beijing Metropolitan Area *Proc SPIE*, Vol 7143
- [19] Long Y, Shen Z, Mao Q and Dang A 2009 *Form Scenario Analysis Using Constrained CA* CUPUM, HK
- [20] Ward D P and Murray, A T 1999 An Optimized Cellular Automata Approach for Sustainable Urban Development in Rapidly Urbanizing Regions *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 7, No 5
- [21] Ward D P., Murray, A T and Phin, S R 2000 A Stochastically Constrained Cellular Model of Urban Growth *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol 24, No 6
- [22] Weber, C 2003 Interaction Model Application for Urban Planning *Landscape and Urban Planning*, No 63
- [23] White, R W and Engelen G 1997 Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modeling *Environment and Planning B: Planning and Design*, No 24
- [24] White, R., Straatman, B and Engelen, G 2004 Planning Scenario Visualization and Assessment—A Cellular Automata Based Integrated Spatial Decision Support System In Goodchild M F., Janelle D G., Shroff Z G (eds), *Spatially Integrated Social Science* Oxford University Press
- [25] Wu F 1998 Simland: A Prototype to Simulate Land Conversion Through the Integrated GIS and CA with AHP-Derived Transition Rules *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 12, No 1
- [26] Wu F 2002 Calibration of Stochastic Cellular Automata: The Application to Rural-Urban Land Conversions *International Journal of Geographical Information Science*, Vol 16, No 8
- [27] Wu F and Webster, C J 1998 Simulation of Land Development through the Integration of Cellular Automata and Multicriteria Evaluation *Environment and Planning B: Planning and Design*, No 25

- [28] 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.
- [29] Xie, Y., Batty, M. and Zhao, K. 2005 Simulating Emergent Urban Form: Desakota in China Center for Advanced Spatial Analysis (University College London), Working Paper 95 London
- [30] Yeh, A. G. O. and Li, X. 2001 A Constrained CA Model for the Simulation and Planning of Sustainable Urban Forms by Using GIS *Environment and Planning B: Planning and Design*, No. 28
- [31] Yeh, A. G. O. and Li, X. 2002 A Cellular Automata Model to Simulate Development Density for Urban Planning *Environment and Planning B: Planning and Design*, No. 29
- [32] Yeh, A. G. O. and Li, X. 2006 Errors and Uncertainties in Urban Cellular Automata *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 30, No. 1
- [33] Zhao, Y. and Murayama, Y. 2007 A Constrained CA Model to Simulate Urban Growth of the Tokyo Metropolitan Area Proceedings of the 9th International Conference on GeoComputation, National University of Ireland, Maynooth, Ireland, 3-5 September
- [34] 北京市规划委员会:《北京市限建区规划(2006~2020)》, 2007年。
- [35] 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年。
- [36] 北京市计划委员会国土环保处:《北京国土资源》, 北京科学技术出版社, 1988年。
- [37] 北京市统计局:《北京50年》, 中国统计出版社, 1999年。
- [38] 党安荣、毛其智、王晓珠:“基于GIS空间分析的北京城市空间发展”,《清华大学学报》(自然科学版), 2002年第2期。
- [39] 黎夏等:《地理模拟系统:元胞自动机与多智能体》, 科学出版社, 2007年。
- [40] 龙瀛、何永、刘欣、杜立群:“北京市限建区规划:制定城市扩展的边界”,《城市规划》, 2006年第12期。
- [41] 吴良镛:《人居环境科学导论》, 中国建筑工业出版社, 2001年。