

京津冀地区城镇空间扩张模拟与分析

刘翠玲¹, 龙 瀛²

(1. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 北京 100835; 2. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045)

摘要:准确把握城镇扩张过程中空间形态的变化规律对城镇规划水平的提高具有重要的现实意义。当前, 京津冀的协同发展已上升为国家战略, 为了对京津冀远景的城镇增长进行预测, 本文将北京城市空间发展分析模型(BUDEM)扩展到京津冀(JJJ)区域, 构建了京津冀城镇空间发展分析模型(BUDEM-JJJ)。该模型以城市增长理论和约束性元胞自动机(Constrained Cellular Automata, Constrained CA)模型为基础, 以京津冀区域为研究对象, 以 Logistic 回归和单一参数循环方法(Monoloop)为模型参数识别方法, 利用2000-2005年和2005-2010年两个历史阶段的城镇建设用地数据对模型进行了参数识别, 并进行了模型验证。在此基础上, 对京津冀区域2049年的城镇形态进行了多种情景模拟, 分析了不同发展情景(Scenario)下京津冀地区城镇空间发展格局的变化, 可为当前京津冀城镇发展方向的调整和下一轮的城镇规划提供参考。

关键词:元胞自动机; BUDEM-JJJ; 城镇扩张; 模拟; 京津冀

1 引言

当前世界正经历着一场前所未有的城市化过程, 中国作为世界上发展最快、人口最多的国家之一, 城市扩张所产生的负面影响已经蔓延, 如耕地占用、生态环境破坏(Kahn, 2000; 陆大道, 2007)。京津冀地区在中国区域经济发展格局中处于北方经济的中心地位, 目前, 在京津冀协同发展的大背景下, 一体化步伐正在加速。通过建立针对京津冀的模式来模拟城镇扩张, 深入分析城镇扩张的驱动力, 京津冀区域的城市空间格局与空间整合方向, 不仅可以作为技术平台支持京津冀区域空间规划和空间发展政策的制定与评估, 而且对提升区域整体经济实力, 增强中国整体竞争力具有重要的理论和现实意义。

城市扩张分析和模拟的历史悠久, 研究主要集中在时空过程探测、驱动机制分析、过程刻画与模拟及宏观生态效应评价等多个方面(刘纪远等, 2009)。用来表征城市扩张变化的城市模型主要经

历了形态和结构模型、静态城市模型、动态城市模型3个阶段, 其中动态城市模型又可分为两个阶段: 以动力学模型和赖利模型为代表的第一阶段; 以元胞自动机(Cellular Automata, CA)和多主体建模(Multi-agent Systems)为代表的第二阶段(周成虎等, 1999)。CA作为复杂性科学的重要研究工具, 适合模拟城市扩张这一时空动态过程, 对它的研究较多, 如Batty等(1994, 1997)利用CA模型模拟了纽约Buffalo市阿姆赫斯特镇的郊区扩张过程, White等(1993, 1997)模拟了Cincinnati市的土地利用变化。

CA模型在城市模拟方面具有以下优点: 能够在精细的尺度上表现城市空间结构的变化; 模拟过程简单、自然; 能够反映城市空间格局的变化以及由此带来的进一步的反馈作用; 可以在更长时间尺度上反映城市的产生、发展直到消亡的生命历程; 可以较好地模拟城市作为一个开放的耗散体系所表现的突变、自组织、混沌等复杂现象(陈述彭, 1999; 周成虎等, 1999; 何春阳等, 2002)。

收稿日期: 2014-04; 修订日期: 2014-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408039)。

作者简介: 刘翠玲(1986-), 女, 河北邯郸人, 助理工程师, 主要研究方向为城市扩张模拟, E-mail: liu_cuilin@163.com。

通讯作者: 龙瀛(1980-)男, 吉林四平人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为区域与城市规划、定量城市研究和应用城市模型, E-mail: longying1980@gmail.com。

引用格式: 刘翠玲, 龙瀛. 2015. 京津冀地区城镇空间扩张模拟与分析[J]. 地理科学进展, 34(2): 217-228. [Liu C L, Long Y. 2015. Urban expansion simulation and analysis in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Progress in Geography, 34(2): 217-228.]. DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.02.010

由于城市是一个复杂的系统,且CA模型也拥有一定的局限性,基于CA的城市模拟面临着以下一些问题:CA模型所考虑的微观个体间的相互作用与反馈机制通常仅由邻域像元的城市化密度简单定义,具有一定的随意性;不同的分辨率下所模拟的城市形态具有一定的差异性。针对传统CA的局限性,部分学者将一些约束条件引入到CA模型中,对其模拟过程进行控制(White et al, 1997; Ward et al, 2000),对模型进行了改进并取得了较好的模拟效果,如龙瀛等(2009)发展了将空间约束、制度性约束、邻域约束作为约束条件的北京城市空间发展分析模型(BUDEM)(Long et al, 2009)。还有一部分学者将CA模型与其他模型相结合,取长补短,发展了一些更加适合模拟城市动态变化的模型,如CA模型和GIS相结合(Wu, 1998; Yeh et al, 2001);CA模型和系统动力学模型的结合(何春阳等, 2005)。

2 数据来源

本文采用的数据有:2000、2005和2010年基于TM影像解译的京津冀土地利用现状数据;包含有各级行政中心信息的京津冀1:5万地形图;包含有铁路、高速公路、国道和省道等信息的京津冀区域1:25万地形图;京津冀禁止建设区数据;1995-2008年京津冀城市统计年鉴等。

首先从1:5万地形图上提取京津冀各级行政区划中心信息,从1:25万地形图上提取道路、边界线等数据作为BUDEM-JJJ模型的空间约束变量,禁止建设区数据作为制度约束变量,然后对空间约束和制度性约束变量进行标准化处理,将其范围都统一到0~1,越接近1表示被开发的概率越大,越接近0表示被开发的概率越小,邻域约束的值通过模型运算获得。统计结果如表1所示,由标准差可以看出,在京津冀地区制度性约束的系数较大,说明禁止建设区对建设用地的扩张没有起到很好的制约作用,与中国近年来城镇化的速度较快的国情相对应。

2000、2005和2010年的京津冀土地利用数据主要包括城镇建设用地、农村建设用地、林地、草地、农田、水域和未利用地7种土地利用类型。由于

表1 BUDEM-JJJ模型变量及相应统计描述数据

Tab.1 Variables and dataset of the BUDEM-JJJ model

类型	变量	最小值	最大值	均值	标准差	数据
空间约束	与北京中心的距离	0	1	0.0029	0.0269	图1a
	与天津、石家庄中心的距离	0	1	0.0059	0.0380	图1b
	与河北地级市中心的距离	0	1	0.0254	0.0767	图1c
	与京津冀小城镇的距离	0	1	0.2082	0.1931	图1d
	与铁路的距离	0	1	0.3797	0.3141	图1e
	与高速公路的距离	0	1	0.2662	0.3043	图1f
	与国道的距离	0	1	0.3690	0.2925	图1g
	与省道的距离	0	1	0.5519	0.2711	图1h
制度性约束	是否为禁止建设区	0	1	0.1300	0.3350	图1i
邻域约束	邻域内城镇建设元胞数目/8	0	1	-	-	-

此次只模拟城镇建设用地的变化,因此将用地类型进一步分为两类:城镇建设用地和非城镇建设用地,将农村建设用地、林地、草地、农田、水域和未利用地归并为非城镇建设用地,合并结果如图1。

3 BUDEM-JJJ模型建立

3.1 模型构建思路

由于城镇是一个复杂的、动态的空间系统,城镇的发展具有“自下而上”的自组织特征(Long et al, 2008),这与元胞自动机(CA)“自下而上”的自组织演变特性是相符合的,因此利用以CA模型为基础的BUDEM-JJJ模型(图2)来模拟城镇扩张变化是可取的。

标准CA由元胞、元胞空间、状态、邻域及转换规则构成,可表示为公式: $A=(L_d, S, N, f)$ (Amorosos et al, 1972)。式中, L_d 表示1个元胞空间, S 是元胞有限的、离散的状态集合, N 表示所有邻域内元胞的组合, f 表示转化规则。由于BUDEM-JJJ模型是从标准CA上转换而来的,因此它也包括这些要素。

模型的元胞大小沿用BUDEM模型的元胞大小 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ ^①,所有原始数据都需要重采样为该

①BUDEM-JJJ模型由BUDEM模型发展而来,BUDEM的元胞大小为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$,因为新版北京城市总体规划的90%建设用地区块平均大小为 25.6 万 m^2 ,即 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 左右,取得了较好的模拟效果,因此沿用 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 元胞大小。

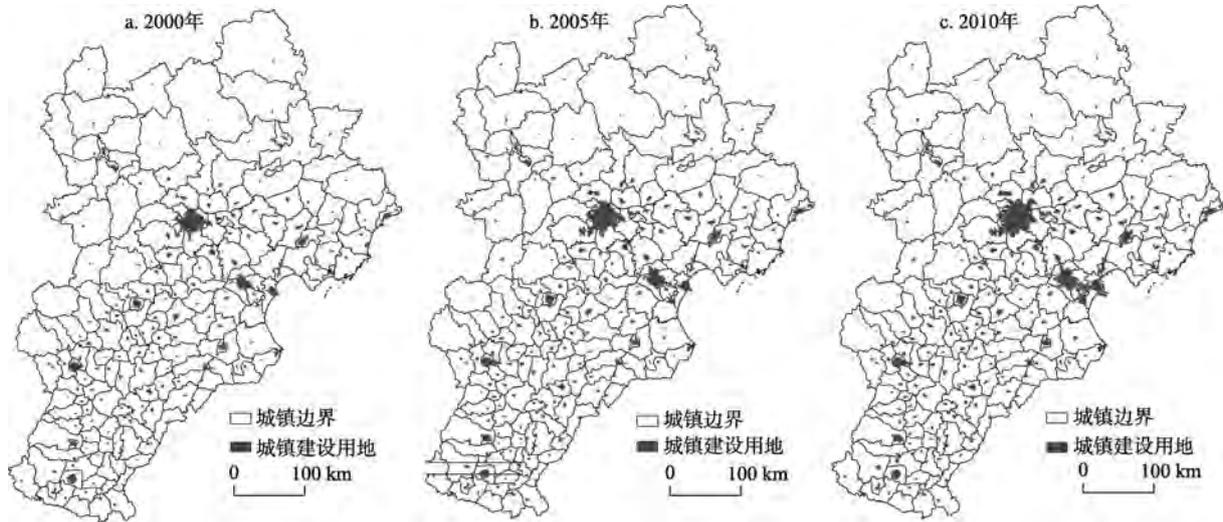


图1 2000、2005、2010年的多时相遥感数据土地利用重分类

Fig.1 Land-use reclassification based on multi-temporal remote sensing data in 2000, 2005 and 2010

精度。

BUDEM-JJJ模型设立的目标是模拟非城镇建设用地向城镇建设用地的转换,因此只需设置两种状态:城镇建设用地和非城镇建设用地。两种状态的集合定义为 $S=\{\text{城镇建设用地, 非城镇建设用地}\}$,用数学集合来表示为 $S=\{1,0\}$,1表示城镇建设用地,0表示非城镇建设用地。

BUDEM-JJJ模型的邻域采用摩尔邻域(Moore邻域, 3×3 矩形、8个邻近元胞),状态转换规则采用多指标评价(Multi-criteria Evaluation, MCE)的方法。

BUDEM-JJJ模型是根据Hedonic模型(Hedonic Price Model, 享乐价格模型/方法)的理念转换而来的,而Hedonic模型认为商品或服务的价格可以反映消费者对其属性的喜好之和,而城市建设用地的开发也是可以反映开发商对相关地块的属性之和。参考Hedonic模型(Lancaster, 1966)的理论框架,同时考虑到数据的可获得性,选择以下要素作为BUDEM-JJJ模型的空间变量:

(1) 区位变量(空间约束)。到各个区位的最短距离。相对于BUDEM模型,BUDEM-JJJ模型中最小的行政中心为镇,并且对不同道路进行了细分,如铁路,高速公路,国道,省道,由于数据的限制没有考虑河流。

(2) 邻里变量(邻域约束)。为邻域内的开发强度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)。禁止建设区constrain。制度性约束条件由于数据来源的限制,现阶段

只考虑陡坡地区、河湖湿地、滞洪区等作为constrain的地区。

模型的模拟思路总体上分为两个步骤:首先在宏观层面上根据宏观社会条件确定每一阶段待开发土地的总量(社会因素作为外生变量引入模型);之后在微观层面上模拟城镇增长,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。BUDEM-JJJ的模拟流程如图3。

在本文中,BUDEM-JJJ模型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,也不考虑城镇再开发过程和城镇的退化情况。

基于上述约束条件模型采用多指标评价作为约束CA状态转移规则的具体形式,公式为:

$$V_{ij}^{t+1} = \{V_{ij}^t, LOCATION, GOVERNMENT, NEIGHBOR\} = f \left\{ \begin{array}{l} V_{ij}^t, \\ f_ctr_bj_{ij}, f_ctr_tjsz_{ij}, f_ctr_cty_{ij}, f_ctr_other_{ij}, \\ f_rail_{ij}, f_r_high_{ij}, f_r_nat_{ij}, f_r_pro_{ij}, \\ constrain_{ij}, \\ neighbor^t_{ij} \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中: V_{ij}^t 为 t 时刻 ij 位置的元胞状态; V_{ij}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻 ij 位置的元胞状态; $LOCATION$ 为空间约束变量; $GOVERNMENT$ 为制度约束变量; $NEIGHBOR$ 为邻域约束变量; f 为元胞的状态转换函数(转化规则); $f_ctr_bj_{ij}$ 为 ij 位置距离北京中心的距离; $f_ctr_tjsz_{ij}$ 为 ij 位置距离天津、石家庄中心的距离;

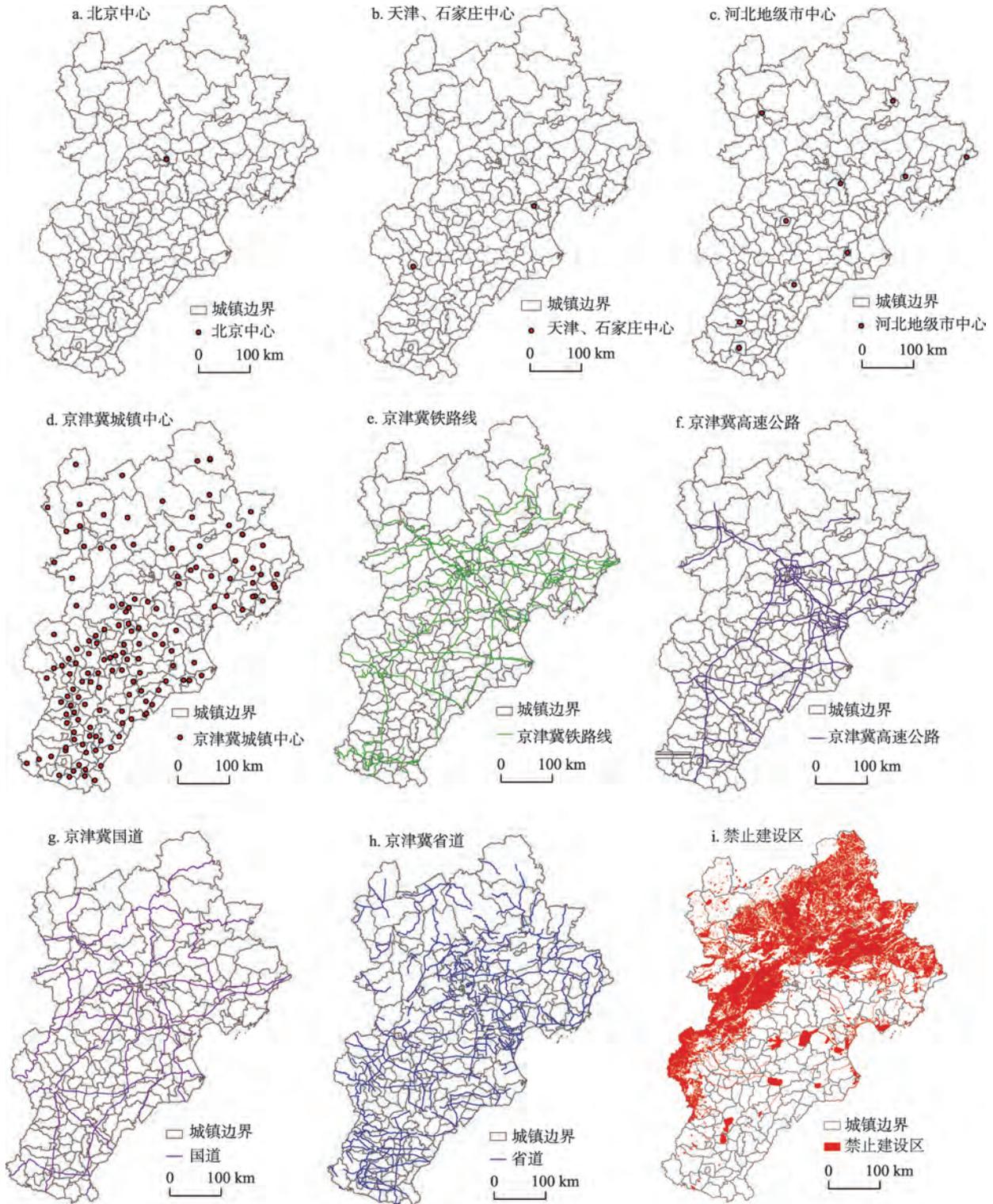


图2 BUDEM-JJJ模型空间数据

Fig.2 Spatial data for the BUDEM-JJJ model

$f_{ctr_other_{ij}}$ 为 ij 位置距离河北地级市中心的距离;
 $f_{ctr_cty_{ij}}$ 为 ij 位置距离京津冀小城镇的距离; $f_{rail_{ij}}$
 为 ij 位置距离铁路的距离; $f_{r_high_{ij}}$ 为 ij 位置高
 速公路的距离; $f_{r_nat_{ij}}$ 为 ij 位置距离国道的距离;

$f_{r_pro_{ij}}$ 为 ij 位置距离省道的距离; $constrain_{ij}$ 表示 ij
 位置是否为禁止建设区; $neighbor$ 为 ij 位置邻域内
 城镇建设元胞数目/8。

基于上面的转换规则,建立转换函数如下:

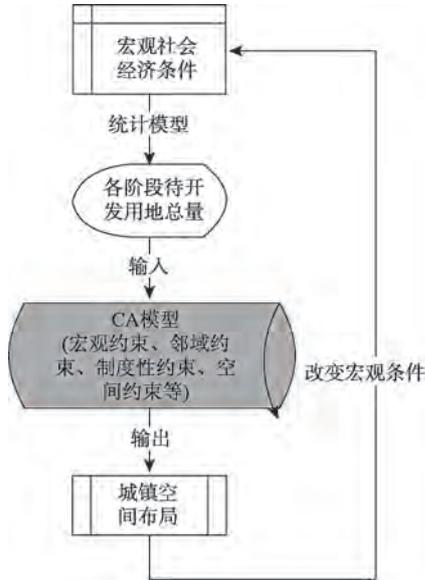


图3 BUDEM-JJJ模型的模拟逻辑流程图
Fig.3 BUDEM-JJJ model simulation process

$$\begin{aligned}
 &1. LandAmount = \sum_t stepNum^t \\
 &2. s_{ij}^t = w_0 + w_1 \times f_ctr_bj_{ij} + w_2 \times f_ctr_tjsjz_{ij} + \\
 &\quad w_3 \times f_ctr_cty_{ij} + w_4 \times f_ctr_other_{ij} + \\
 &\quad w_5 \times f_rail_{ij} + w_6 \times f_r_high_{ij} + w_7 \times \\
 &\quad f_r_nat_{ij} + w_8 \times f_r_pro_{ij} + w_9 \times \\
 &\quad const\ rain_{ij} + wN \times neighbor^t_{ij} \\
 &3. p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \quad (2) \\
 &4. p^t = \exp \left[\delta \left(\frac{p^t}{p_{gmax}^t} - 1 \right) \right] \\
 &5. for instepID = 1 to stepNum \\
 &\quad if p_{ij}^t = p_{max}^t \text{ then } V^{t+1}_{ij} = 1 \\
 &\quad p_{ij}^t = p_{ij}^t - p_{max}^t \\
 &\quad p_{max}^t \text{ update}
 \end{aligned}$$

式中： $LandAmount$ 为元胞总增长数目； $stepNum^t$ 为每次循环元胞增长数目； s_{ij}^t 为土地利用适宜性； $w_1 - w_8$ 为空间变量权重系数； p_g^t 为变换后的全局概率； p_{gmax}^t 为每次循环中全局概率最大值； δ 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； $update$ 表示其数值在子循环内不断更新。

对于每一阶段所需土地开发总量的 $stepNum$ 参数,采用传统的人口因素预测城镇建设用地量的方法,根据公式 $stepNum = P \times A / 10000$ 进行计算, P 代表

城镇人口/人, A 代表规划期城镇人均建设用地指标(m^2 /人)。每一阶段的城镇人口数通过时间趋势外推法,根据模型 $P = a + bY$ 来进行计算, Y 为年份, a 和 b 为常量,常量值通过回归分析来获取。

空间约束的8个空间变量的权重系数 $w_1 - w_8$ 通过对历史数据的Logistic回归分析来获取。

w_9 为二值系数： $w_9 = \{0, 1\}$,如果 $w_9 = 0$,则此元胞不可以开发;如果 $w_9 = 1$,则此元胞可以开发。

在 $w_9 = 1$ 时,利用单一参数循环方式(Mono-Loop)来获得 $neighbor$ 的权重系数 wN ,选取点对点匹配度(goodness-of-fit, GOF)最大的系数作为 $neighbor$ 的权重系数 wN 的值。

MonoLoop方法必须建立在Logistic回归基础之上,是CA城市模型的一部分,是识别邻域变量参数的一种方法。具体过程为:通过Logistic回归方法确定除 $neighbor$ 变量之外的空间变量的权重参数之后,保持这些参数不变,在CA城市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(Simulation)与观察值(Observation),将具有最佳匹配度的 wN^* 与Logistic回归获得的 w_{0-k+m} 一同代入MCE形式的状态转换规则,即可实现城市空间形态模拟的功能(Butler, 1982; 龙瀛等, 2010)。

3.2 参数识别与模型验证

3.2.1 京津冀地区历史参数识别

历史参数识别是模型预测的关键,是预测未来城镇建设用地布局的基础。对同一阶段历史参数进行纵向对比可以判断此阶段影响城镇扩张的主要驱动力,对不同历史阶段同一个自变量的参数进行横向对比可以判断出此自变量对城镇扩张影响力的变化趋势(龙瀛等, 2008)。

在统计分析时发现:两个时间段内非建设用地的样本个数($S=0$)比建设用地的样本个数($S=1$)大许多,数据属于不平衡数据,如果按此数据继续进行回归,将会影响回归的精度。因此在作回归之前需要对不平衡数据进行处理。

目前,不平衡数据分类的方法研究主要集中在数据层面、算法层面、判别准则3个层面(杨明等, 2008)。本文采用算法层面上的代价敏感方法来对数据进行处理,对小样本数据赋予较大的权重,对大样本数据赋予较小的权重,以此来平衡数量上的差异。主要试验了7种权重比例,将大样本0的权重恒设为1,小样本1的权重分别设置为50, 100,

200, 300, 500, 1000, 10000, 并计算回归的匹配度以及 Kappa 值, 结果如表 2。

表 2 中, 权重为 200 时, 两个时间段内 0 的数目和 1 的数目差距较小, 数据平衡性较好, GOF 和 Kappa 值也都较好, 因此选取 1 的权重为 200 时的回归结果。并且回归后的相关系数矩阵中有效变量的相关系数都接近零, 由此可以判断有效系数之间显著不相关, 并且所有变量的显著性水平都处于 0.000 水平, 进一步证明了回归的有效性, 回归结果如表 3。

3.2.2 模型验证

在 Logistic 回归分析中, 我们可以求出模型中除邻域约束变量(*neighbor*)之外其他变量的系数, *neighbor* 采用 MonoLoop 的方法来求解, 求取具有最佳匹配度的值作为 *neighbor* 的系数, 因此模型验证过程也是 *neighbor* 系数的求取过程。MonoLoop 方法在获取 *neighbor* 的权重系数方面比传统的主观赋值方法更加准确, 并且运算速率较高, 如果不同的历史阶段都采用 MonoLoop 方法, 则可以对邻域作用进行动态对比(刘翠玲等, 2013)。本文利用 2005-2010 年的城镇建设用地的求解 *neighbor* 的系数并进行模型验证, 利用二分法从 0~100 取整数值, 经过多次实验之后发现当 $wN=8$ 时的点对点匹配度最高, 为 99.3%, Kappa 值为 0.87(图 4), 说明这是一个精度比较高的模型, 可以用于对后续阶段京津冀区域城镇建设用地扩张的模拟预测。

表 2 2000-2010 年权重变化表
Tab.2 Weight variations, 2000-2010

时段	权重	0 的数目	1 的数目	比例	GOF/%	Kappa
2000-2005	1	856697	4942	17335/100	99.40	0.000
	50	856697	247100	347/100	86.90	0.613
	100	856697	494200	173/100	85.30	0.686
	200	856697	988400	87/100	87.00	0.737
	300	856697	1482600	58/100	88.30	0.741
	500	856697	2471000	35/100	90.40	0.733
	1000	856697	4942000	17/100	93.50	0.714
	10000	856697	49420000	2/100	98.30	0.577
2005-2010	1	857661	3978	21560/100	99.50	0.000
	50	857661	198900	431/100	87.60	0.580
	100	857661	397880	216/100	85.60	0.671
	200	857661	795600	108/100	86.70	0.734
	300	857661	1193400	72/100	87.10	0.730
	500	857661	1989000	43/100	89.60	0.741
	1000	857661	3978000	22/100	93.20	0.741
	10000	857661	39780000	2/100	98.70	0.612

4 基于 BUDEM-JJJ 模型的远景城镇扩张情景分析

为了更好地服务于下一轮的城镇规划, 本文模拟了 2049 年的京津冀城镇空间形态。模拟京津冀区域未来城镇空间形态, 需要先预测未来城镇建设用地总量, 为此利用京津冀区域 1995-2008 年城市统计年鉴提取该地区人口数量, 通过回归分析获得人口预测计量公式 $P=-228812+116y$, R^2 为 0.929, 拟合优度较好, 显著性处于 0.000 水平, 说明了公式的可用性。根据获得的公式, 再利用人均城镇用地面积, 求得 2049 年的城镇建设用地面积。

4.1 各形态情景分析

本文设置了 6 种情景来对 2049 年的京津冀城镇布局进行情景分析。各种情景都是以 2010 年的城镇建设用地布局为基准(包括所有变量的系数、城镇人均用地面积), 在此基础上改变各种政策的实施力度, 从而形成不同的空间发展情景。

(1) 基准情景(即稳定发展情景)。延续 2005-2010 年的发展趋势, 得到“基准情景”, 这种情景表现在尚未出现重大的国土开发政策下, 稳定的土地供应政策, 稳定的经济与人口发展情景, 在该情景下, 2049 年京津冀城镇开发面积将达到 16423 km² (65692 个元胞), 模拟结果如图 5。

(2) 高速发展情景。该情景表明了快速的经济发展所带来的对城镇建设用地需求的大量增加, 在该情景下, 2049 年京津冀城镇开发面积将达到 20000 km² (80000 个元胞), 模拟结果如图 6。

(3) 低速发展情景。该情景表明了经济发展所

表 3 不同阶段的 Logistic 回归系数
Tab.3 Logistic regression coefficient in two periods

变量	B(回归系数)	
	2000-2005 年	2005-2010 年
与北京中心的距离	0.911	-2.188
与天津、石家庄中心的距离	-1.989	-2.903
与河北地级市中心的距离	-0.328	2.016
与京津冀小城镇的距离	1.435	1.021
与铁路的距离	2.940	2.276
与高速公路的距离	3.451	4.051
与国道的距离	1.520	1.524
与省道的距离	3.981	4.025
是否为禁止建设区	-1.197	-0.813
邻域内城镇建设元胞数目/8	-6.953	-7.485

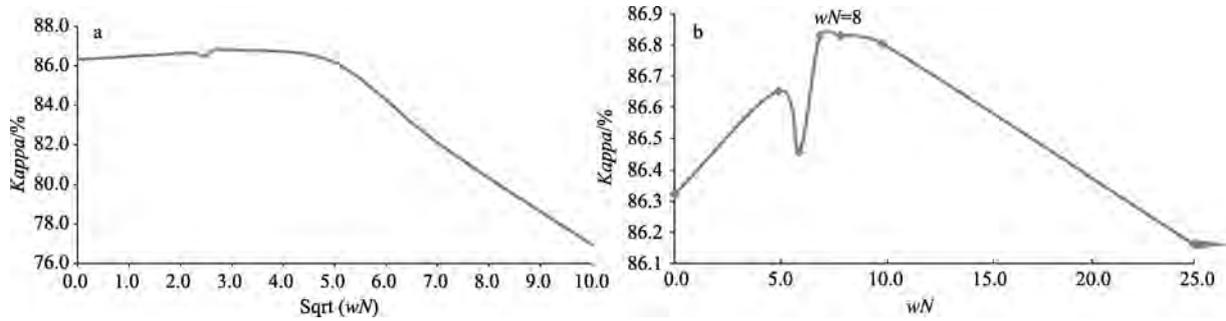


图4 MonoLoop过程曲线(b为a的局部放大)

Fig.4 Process curve of MonoLoop (Fig.4b is the partial magnification of Fig.4a)

带来的对城镇建设用地的增加已经超出了资源环境的承载能力,从而对土地的供应采取紧缩政策,在该情景下,2049年京津冀城镇开发面积将达到12500 km² (50000个元胞),模拟结果如图7。

在基准情景下改变不同变量的系数可获得更多的情景,具体如下:

(4) 高速公路指状发展情景。高速公路在城市群的演变方面影响较大(王成新等, 2011),京津冀作为一个城市群,人们对高速公路的利用率较高,因此将提高沿高速公路的开发力度,模拟结果如图8。

(5) 小城镇促进发展情景。大城市发展到一定程度,会受到资源环境的约束,此时区域产业结构调整,将提高小城镇的开发力度,模拟结果如图9。

(6) 交通引导发展情景。沿铁路、高速公路、国道、省道的开发力度得到加强,模拟结果如图10所示。

各个形态情景的状态转换系数如表4。

4.2 情景对比分析

本文主要采用两种方式对京津冀2049的多种情景进行对比分析:

(1) 京津冀各个市域内城镇建设用地的元胞个数及所占比例。用于描述各情景下城镇建设用地的空间分布,如表5和图11所示。

由表5和图11可以看出,不同的情景下各个市域城镇建设用地的开发量及比例有显著的差别,开发总量增加时各个市域的开发量都会相应的增加,并且各市域城镇建设用地的增长速度与现有城镇

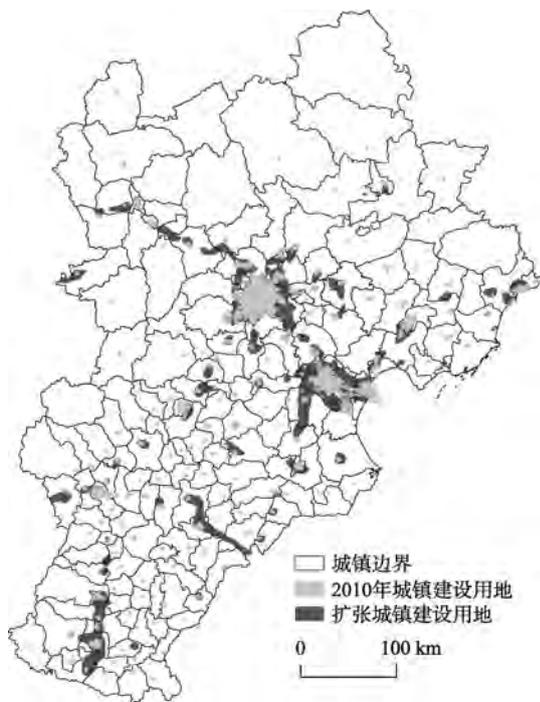


图5 基准情景

Fig.5 Basic scenario



图6 高速发展情景

Fig.6 High-speed growth scenario



图7 低速发展情景

Fig.7 Low-speed growth scenario

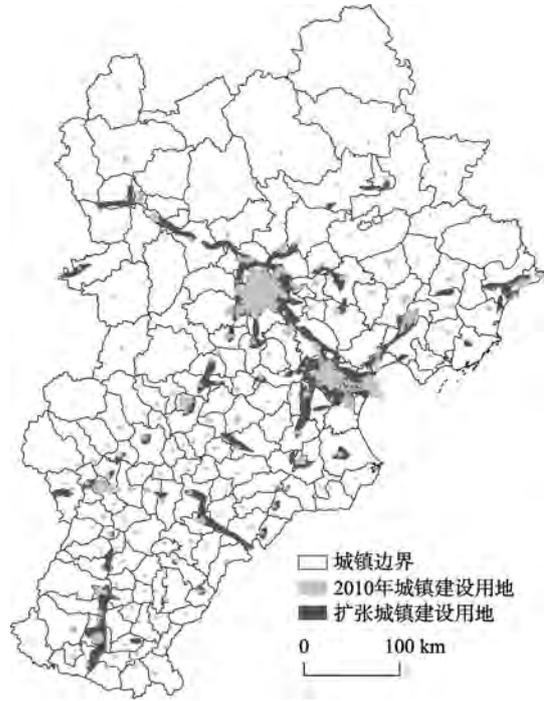


图8 高速公路指状发展情景

Fig.8 Highway finger-shaped growth scenario



图9 小城镇促进发展情景

Fig.9 Small cities and towns promoting growth scenario

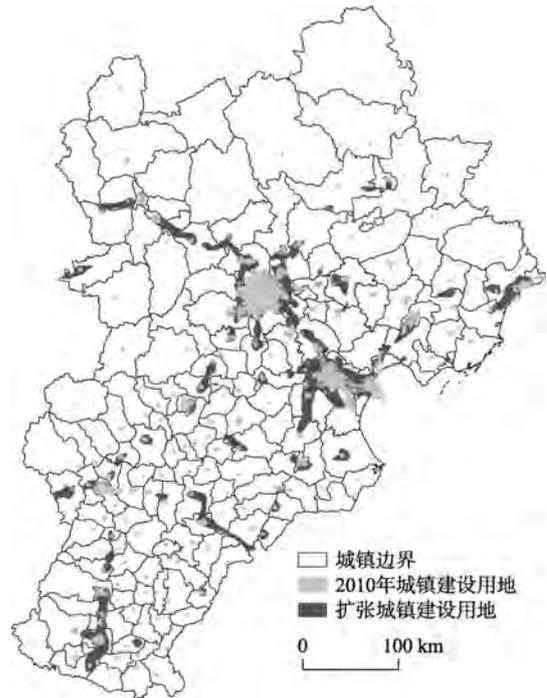


图10 交通引导发展情景

Fig.10 Transportation-led growth scenario

面积成反比;高速公路指状发展情景对高速公路沿线市域开发的促进作用比较明显;交通引导发展情景对交通网密度大的市域开发的促进作用比较明显;小城镇促进发展情景对县镇级行政区划比较多

的市域开发的促进作用比较明显。

(2) 城市扩张情况对比。从防范空间风险的角度出发,利用GIS的空间分析功能,将模拟得到6种情景的城镇建设用地与现状农田、草地、林地、水

表4 形态情景分析结果
Tab.4 Form scenario analysis results

类型	变量	基准情景	高速发展情景	低速发展情景	高速公路指状发展情景	小城镇促进发展情景	交通引导发展情景
宏观约束	城镇建设用地元胞数目	65692	80000	50000	65692	65692	65692
空间约束	与北京中心的距离	-2.188	-2.188	-2.188	-2.188	-2.188	-2.188
	与天津、石家庄中心的距离	-2.903	-2.903	-2.903	-2.903	-2.903	-2.903
	与河北地级市中心的距离	2.016	2.016	2.016	2.016	2.016	2.016
	与京津冀小城镇的距离	1.021	1.021	1.021	1.021	5.021	1.021
	与铁路的距离	2.276	2.276	2.276	2.276	2.276	2.276
	与高速公路的距离	4.051	4.051	4.051	8.051	4.051	6.051
	与国道的距离	1.524	1.524	1.524	1.524	1.524	3.524
	与省道的距离	4.025	4.025	4.025	4.025	4.025	6.025
制度性约束	是否为禁止建设区	-0.813	-0.813	-0.813	-0.813	-0.813	-0.813
邻域约束	邻域内城镇建设元胞数目/8	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
常量		-7.485	-7.485	-7.485	-7.485	-7.485	-7.485

表5 形态情景空间结构验证
Tab.5 Spatial structure verification of the scenarios

市域	基准情景		高速发展情景		低速发展情景		高速公路指状发展情景		小城镇促进发展情景		交通引导发展情景	
	元胞/个	元胞/%	元胞/个	元胞/%	元胞/个	元胞/%	元胞/个	元胞/%	元胞/个	元胞/%	元胞/个	元胞/%
北京市	16554	25.2	18960	23.7	13850	27.7	15766	24.0	16489	25.1	15963	24.3
天津市	15372	23.4	18000	22.5	12100	24.2	15306	23.3	15635	23.8	14649	22.3
石家庄市	3416	5.2	4160	5.2	2700	5.4	3482	5.3	3547	5.4	4007	6.1
邯郸市	4533	6.9	5360	6.7	3050	6.1	3613	5.5	4073	6.2	4336	6.6
邢台市	3022	4.6	3680	4.6	2500	5.0	2956	4.5	2693	4.1	2890	4.4
衡水市	3613	5.5	4160	5.2	2800	5.6	3153	4.8	3416	5.2	3088	4.7
保定市	3679	5.6	4560	5.7	2800	5.6	3942	6.0	3744	5.7	3744	5.7
廊坊市	2234	3.4	2880	3.6	1450	2.9	2036	3.1	2234	3.4	2234	3.4
秦皇岛市	2234	3.4	2880	3.6	1450	2.9	2628	4.0	2365	3.6	2234	3.4
沧州市	3547	5.4	4880	6.1	2400	4.8	4007	6.1	3547	5.4	3876	5.9
唐山市	3088	4.7	4080	5.1	2400	4.8	3547	5.4	3219	4.9	3219	4.9
张家口市	3810	5.8	5200	6.5	2100	4.2	4270	6.5	4007	6.1	4533	6.9
承德市	591	0.9	1280	1.6	450	0.9	985	1.5	657	1.0	920	1.4
京津冀	65692	100	80000	100	50000	100	65692	100	65692	100	65692	100

域、未利用地图层分别进行叠加,计算城镇增长过程中的潜在空间风险;从空间形态分析的角度出发,利用景观分析方法,分别利用6种情景下斑块数,平均斑块面积,聚合度指数,分离度指数,蔓延度指数来分析京津冀城镇空间集聚形态。表6为城镇扩张情况对比。

从以上各情景的对比可以看出,高速发展情景对农田的占用明显高于其他情景,平均斑块面积、分离度指数最大,而蔓延度指数最低,说明高速增长情景会过多的占用农用地,不利于农用地的保

护,并且城镇建设用地比较分散,与聚集经济效益理论背道而驰,不利于社会的可持续发展;而低速发展情景对各类非建设用地的占用最低,聚合度指数和蔓延度指数最高,说明这是一种比较好的发展模式;其他各类情景分别验证了在基准情景基础上做扩张得到的不同发展情景对城镇布局的影响。

5 结论

本文在BUDEM模型的基础上,从参数识别、

模型结构调整、情景方案设计等方面进行了扩展,建立了京津冀版本的BUDEM模型BUDEM-JJJ,可用于支持京津冀区域规划的开展。研究结论为:

(1) 在模型建立方面,基于约束性CA的BUDEM-JJJ模型,在状态转换规则中集成了空间约束条件、制度性约束条件、邻域约束条件,比传统的简单CA(Pure CA)在模拟城镇扩张变化方面具有更多的优势。采用了Logistic回归和MonoLoop集成的

方法建立了CA的状态转换规则,比主观的人工赋值具有更高的科学性。

(2) 基于约束性CA的BUDEM-JJJ模型,适合模拟京津冀区域尺度的城镇空间扩张。对2005-2010年京津冀的模拟发现,Kappa指数显示模拟效果较好,模拟结果与实际情况的GOF非常高,为BUDEM-JJJ模型在其他区域相同尺度上的应用奠定了理论基础。

(3) 对同一区域城镇建设用地和非城镇建设用地的数据不平衡所导致的模拟不精确问题,采用通过加大小样本数据的权重来平衡数据的方法,取得了较好的模拟效果。

(4) 根据京津冀的实际情况和研究的需要,设置了以延续目前城镇发展趋势为基础,从不同的城镇建设模式(基准发展、高速发展、低速发展)到不同驱动力(高速公路、小城镇、交通引导)6种情景来预测2049年京津冀区域的城镇空间布局,为下一轮的城镇规划提供了参考和科学依据。

由于城镇是一个复杂的系统,城镇扩张受到多方面复杂因素的影响,在本文中,没有面面俱到的考虑到所有有关因素:如制度性约束方面,没有考虑基本农田保护区约束;空间约束方面,对空间位置变量的考虑仅局限于欧氏距离,没有考虑地表阻力,没有考虑河流的吸引力和港口的吸引力,也没有将不同区域按照自身的特殊情况分别进行模拟等等。这些将在后续研究中予以关注。因此,要将本模型真正的用于辅助决策支持,还有必要对约束条件和约束变量进一步的改进,并在多个区域进行验证,以求取得更好的模拟效果。

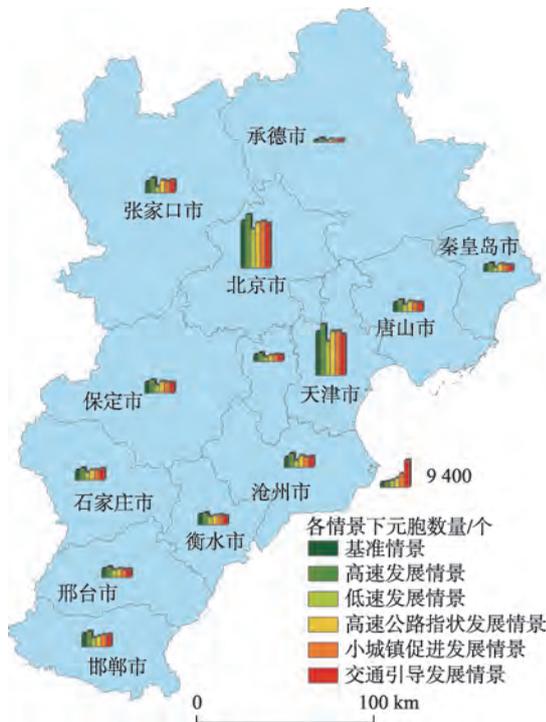


图 11 各情景对比图

Fig. 11 Urban form scenarios comparison in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

表 6 城镇扩张情况对比

Tab. 6 Urban expansion under the various scenarios

方案名称	基准情景	高速发展情景	低速发展情景	高速公路指状发展情景	小城镇促进发展情景	交通引导发展情景
占用农田的面积/km ²	7229.54	9733.45	4654.94	7515.81	7251.04	7327.31
占用林地的面积/km ²	530.64	770.09	313.77	530.63	543.06	563.18
占用草地的面积/km ²	182.99	290.72	81.84	221.73	192.12	221.66
占用水地的面积/km ²	690.28	841.00	72.88	680.40	696.70	643.07
占用未利用地的面积/km ²	27.02	28.32	17.49	16.62	26.82	24.03
斑块数	237	217	255	255	238	234
平均斑块面积/m ²	90890.19	99267.17	84474.41	84474.41	90508.30	92055.45
聚合度指数	99.05	99.02	99.08	98.91	99.04	98.98
分离度指数	1.17	1.22	1.18	1.18	1.17	1.17
蔓延度指数	77.59	74.52	81.11	76.90	77.47	77.30

参考文献(References)

- 陈述彭. 1999. 城市化与城市地理信息系统[M]. 北京: 科学出版社. [Chen S P. 1999. Chengshihua yu chengshi dili xinxi xitong[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 何春阳, 陈晋, 史培军, 等. 2002. 基于CA的城市空间动态模拟研究[J]. 地球科学进展, 17(2): 188-194. [He C Y, Chen J, Shi P J, et al. 2002. Study on the spatial dynamic city model based on CA(cellular automata)model[J]. Advances in Earth Science, 17(2): 188-194.]
- 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 2005. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究[J]. 中国科学: 地球科学, 35(5): 464-473. [He C Y, Shi P J, Chen J, et al. 2005. Land use scene model based on system dynamics model and CA model[J]. Science China: Earth Science, 35(5): 464-473.]
- 刘翠玲, 龙瀛, 王艳慧. 2013. MonoLoop: CA城市模型状态转换规则获取的一种方法. 测绘与空间地理信息[J], (4): 122-125. [Liu C L, Long Y, Wang Y H. 2013. MonoLoop: a new approach to retrieves status transition rule of CA urban model[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, (4): 122-125.]
- 刘纪远, 邓祥征. 2009. LUCC时空过程研究的方法进展[J]. 科学通报, 54(21): 3251-3258. [Liu J Y, Deng X Z. 2009. Progress of the research methodologies on the temporal and spatial process of LUCC[J]. Chinese Science Bulletin, 54(21): 3251-3258.]
- 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 2009. 利用约束性CA制定城市增长边界[J]. 地理学报, 64(8): 999-1008. [Long Y, Han H Y, Mao Q Z. 2009. Establishing urban growth boundaries using constrained CA[J]. Acta Geographica Sinica, 64(8): 999-1008.]
- 龙瀛, 毛其智, 沈振江, 等. 2008. 综合约束CA城市模型: 规划控制约束及城市增长模拟[J]. 城市规划学刊, (6): 83-91. [Long Y, Mao Q Z, Shen Z J, et al. 2008. Comprehensive constrained CA urban model: institutional constraints and urban growth simulation[J]. Urban Planning Forum, (6): 83-91.]
- 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 等. 2010. 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析[J]. 地理学报, 65(6): 643-655. [Long Y, Shen Z J, Mao Q Z, et al. 2010. Form scenario analysis using constrained cellular automata[J]. Acta Geographica Sinica, 65(6): 643-655.]
- 陆大道. 2007. 我国的城市化进程与空间扩张[J]. 城市规划学刊, (3): 16-22. [Lu D D. 2007. Urbanization process and sprawl in china[J]. Urban Planning Forum, (3): 16-22.]
- 王成新, 王格芳, 刘瑞超, 等. 2011. 高速公路对城市群结构演变的影响研究: 以山东半岛城市群为例[J]. 地理科学, 31(1): 61-67. [Wang C X, Wang G F, Liu R C, et al. 2011. The impact of highway on the structure evolution of urban agglomeration: a case of urban agglomeration of Shandong Peninsula[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(1): 61-67.]
- 杨明, 尹军梅, 吉跟林. 2008. 不平衡数据分类方法综述[J]. 南京师范大学学报: 工程技术, 8(4): 7-12. [Yang M, Yin J M, Ji G L. 2008. Classification methods on imbalanced data: a survey[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 8(4): 7-12.]
- 周成虎, 孙战利, 谢一春. 1999. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社. [Zhou C H, Sun Z L, Xie Y C. 1999. Dili yuanbao zidongji yanjiu[M]. Beijing, China: Science Press.]
- Amorosos S, Patty Y N. 1972. Decision procedures for surjectivity and injectivity of parallel maps for tessellation structures[J]. Journal of Computer and System Sciences, 5(6): 448-464.
- Batty M, Xie Y. 1994. From cells to cities[J]. Environment and Planning B, 21: 531-548.
- Batty M, Xie Y. 1997. Possible urban automata[J]. Environment and Planning B, 24: 175-192.
- Butler R W H. 1982. A structural analysis of the Moine Thrust Zone between Loch Eriboll and Foinaven, NW Scotland [J]. Journal of Structural Geology, 4(1): 19-29.
- Kahn M. 2000. The environmental impact of suburbanization [J]. Journal of Policy Analysis and Management, 19: 569-586.
- Lancaster. 1966. A new approach to consumer theory[J]. Journal of Political Economy, 74(2): 132-157.
- Long Y, Mao Q Z, Dang A R. 2009. Beijing urban development model: urban growth analysis and simulation[J]. Tsinghua Science and Technology, 14(6): 782-794.
- Long Y, Shen Z J, Du L Q, et al. 2008. BUDEM: an urban growth simulation model using CA for Beijing metropolitan area[J]. Proceedings of the SPIE- Geoinformatics, 71431D-1-15.
- Ward D P, Murray A T, Phinn S R. 2000. A stochastically constrained cellular model of urban growth[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 24: 539-558.
- White R, Engelen G. 1993. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land - use patterns[J]. Environment and Planning A, 25: 1175-1199.
- White R, Engelen G, Uijee I. 1997. The use of constrained cellular automata for high- resolution modelling of urban land-use dynamics[J]. Environment and Planning B, 24: 323-343.
- 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: 63-82.

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, 28: 733-753.

Urban expansion simulation and analysis in the Beijing–Tianjin–Hebei Region

LIU Cuiling¹, LONG Ying²

(1. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Beijing 100835, China;

2. Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045, China)

Abstract: In order to predict future urban layout in the Beijing–Tianjin–Hebei Region (JJJ), we developed a BUDEM-JJJ model on the basis of the Beijing urban development model (BUDEM). BUDEM, based on prevalent urban growth theory and constrained cellular automatic, was developed in 2008 for analyzing and simulating urban growth for the Beijing Metropolitan Area(BMA). It is proved that the model is capable of analyzing historical urban growth mechanisms and predicting future urban growth for metropolitan areas in China. In this research, we extended the study of BUDEM from the BMA to the Beijing–Tianjin–Hebei Region (JJJ), via replacing the datasets of the model and making necessary adjustments to the parameters. In BUDEM-JJJ, the parameters include minimum distance to the center of Beijing (f_{ctr_bj}), minimum distance to the centers of Tianjin and Shijiazhuang (f_{ctr_tjsjz}), minimum distance to the centers of prefecture-level cities of Hebei province (f_{ctr_other}), minimum distance to the centers of other urban areas (f_{ctr_cty}), minimum distance to railways (f_{rail}), minimum distance to highways (f_{r_hig}), minimum distance to national roads (f_{r_nat}), minimum distance to provincial roads (f_{r_pro}), location in or outside areas prohibited for construction (constrain), and neighborhood development intensity (neighbor). The model BUDEM-JJJ was used to identify urban growth mechanisms in two historical phases from 2000 to 2005 and from 2005 to 2010, to simulate urban growth scenarios for 2049. Six urban growth scenarios were put forward, including the base (business as usual) scenario, high-speed growth scenario, low-speed growth scenario, highway finger-shaped growth scenario, small cities and towns promoting growth scenario, and transportation-led growth scenario. BUDEM-JJJ considers the heterogeneity of driving force and model parameters, and fulfills accurate simulation in large-scale. Using the model urban layout can be predicted for each scenario. From the number of increased cellular and the occupation of farmland, grassland, forestland, and unused land, we found that the different scenarios have different effects on the environment. BUDEM-JJJ is the first applicable urban growth model in the Beijing–Tianjin–Hebei Region. These scenarios can be applied in several planning projects and also can be used to evaluate the present urban growth rate.

Key words: cellular automata; BUDEM-JJJ; urban expansion; simulation; Beijing–Tianjin–Hebei Region