

基于约束性CA的大都市郊区城镇增长的情景模拟与管控 ——以武汉市江夏区为例

王海军^{1,2}, 夏 畅¹, 张安琪^{1,3}, 邓 羽⁴

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学教育部地理信息系统重点实验室, 武汉 430079;
3. 北京大学城市规划与设计学院, 广东 深圳 518055; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:大都市郊区是快速城镇化进程中空间演变最为频繁、人地矛盾最为突出的区域, 尤其在中国加快推进“就地就近”城镇化战略的背景下, 把握大都市郊区小城镇土地利用时空变化过程及其演变机制, 对制定科学合理的管控政策和优化都市空间结构具有重要的现实意义。约束性元胞自动机(constrained Cellular Automata, constrained CA)能够通过简单的规则模拟复杂的城市动态演化过程。本文将土地利用总体规划指标、城镇空间发展战略布局、土地利用开发适宜性等, 嵌入约束性CA的转换规则中, 采用Logistic逐步回归法分析土地利用空间影响因素, 对严格约束下的武汉市江夏区2020年土地利用进行情景模拟分析, 并提出城市增长管控手段。结果表明: ①研究时段内, 江夏区城镇用地呈低效外延式扩张, 土地利用集约节约程度较低, 其人口规模并未有较大增长, 对主城区人口的分散作用尚未真正形成; ②约束性CA在模拟大都市郊区演化方面具有较高的可靠性, 能够真实反映近郊小城镇的未来空间布局与结构, 模拟结果与土地利用规划和城市规划较为契合; ③将规划目标导向与现实发展趋势下的模拟结果进行叠加分析, 可确定城镇增长需求与规划指标调控间冲突的空间分布, 从而划定土地督察的重点监测区域, 为加强大都市近郊区的违法用地监督和土地利用管控提供先验的预警知识。

关键词:约束性元胞自动机; 大都市郊区; 城镇增长; 情景模拟; 土地督察; 武汉市江夏区

1 引言

进入21世纪以来, 中国城市化进程迈入加速阶段, 城市蔓延、中心城市衰退和大城市病等日益凸显, 已成为制约城市可持续发展的关键问题。为了优化城市空间结构, 突破城市规模对城市发展的束缚, 缓解中心城区的就业、交通和环境压力, 大都市市区正在转型为“多中心”分散发展结构。大都市郊区呈现出“郊区城市化”, 其表现为中心城区的人

口、产业、服务等各要素逐渐向郊区外迁的一种离心扩散现象。郊区城市化的特点、动力机制及管控手段等研究已引起学者们的广泛关注(石忆邵等, 2007; 邵景安, 2009; 韩非等, 2010; 林涛, 2010)。大都市郊区由于土地成本低廉、生态环境优越, 成为特大城市快速城镇化进程中空间演变最为频繁、人地矛盾最为突出的区域, 也是对城市空间结构演进带来重大影响区域。在国家严守耕地红线及空间管制日趋完善的背景下, 自上而下的规划调控已

收稿日期: 2015-10; 修订日期: 2016-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571384, 71433008); 国家基础科学人才培养基金项目(J1103409); 国土资源部土地资源调查评价项目(DCPJ161207-01) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571384, No.71433008; Fund for Fostering Talents in Basic Science of the National Natural Science Foundation of China, No.J1103409; Land Resources Survey and Evaluation Project of Ministry of Land and Resources of China, No.DCPJ161207-01]。

作者简介: 王海军, 男, 博士, 教授, 主要从事土地资源评价和土地利用覆盖变化、地理元胞自动机理论与方法等方面的研究, E-mail: landgiswhj@163.com。

引用格式: 王海军, 夏畅, 张安琪, 等. 2016. 基于约束性CA的大都市郊区城镇增长的情景模拟与管控: 以武汉市江夏区为例[J]. 地理科学进展, 35(7): 793-805. [Wang H J, Xia C, Zhang A Q, et al. 2016. Scenario simulation and control of metropolitan outskirts urban growth based on constrained CA: A case study of Jiangxia District of Wuhan City[J]. Progress in Geography, 35(7): 793-805.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.07.001

难以满足近郊区对土地资源的巨大需求。随着大都市市区城市功能的外溢,近郊城镇迎来了快速发展的机遇,也遭遇了生态空间不断减少、环境危机日益突出的挑战。作为大都市空间增长的主要区域,郊区呈现蔓延和粗放式扩张,其耕地数量和质量不断下降,严重威胁到中国的粮食安全问题。如何控制近郊小城镇的空间无序蔓延,引导建设用地的合理增长,已经成为城市可持续健康发展过程中亟待解决的问题(宁越敏, 2012; 陈利顶等, 2013; Li et al, 2014; 孙平等, 2014)。

城镇用地扩张作为土地利用动态演化研究的重要领域,具有系统性、开放性、动态性、非线性、层次性、随机性和不确定性等特点,是一个具有高度复杂性的过程(周成虎等, 1999, 2009)。加强对城镇用地扩张机制的研究,有利于提高城市规划和土地利用规划的科学性,避免规划中主观性和随机性所带来的影响。随着研究的深入,大量辅助城镇用地规划决策的新方法与新理论不断涌现,利用约束性元胞自动机(constrained CA),对城镇用地扩张进行动态模拟和情景分析,已成为新的研究热点(黎夏等, 1999; 龙瀛等, 2009)。将元胞自动机模型与GIS技术等相结合,应用于城市土地利用动态演化研究中,能够弥补传统统计分析模型的不足,并提供具有时空特性的模拟结果。依据CA应用目的的不同,可以将其划分为约束性CA、预报性CA和描述性CA等3种主要类型(Geertman et al, 2007)。基于约束性CA模型的城镇扩张情景模拟分析,在一定程度上能够辅助土地利用规划决策,是一个颇具潜力的应用领域(马世发等, 2013);约束性CA与其他CA的不同之处为:该类CA模型的转换函数是根据规划目标和方针确定的,而不只是依靠历史数据和发展趋势来预测将来可能的情景(马世发等, 2014)。根据不同的规划目标与方针,可以模拟出不同的方案,然后进行综合比较与方案评估,从而吸取以往城市发展过程中的经验和教训,降低同类问题再次发生的概率。因此,基于约束性CA模型的城镇扩张情景模拟分析对政府的科学决策具有重要意义。

已有研究表明,约束性CA在地理系统模拟和土地利用规划决策方面具有一定的优势和应用前景,如龙瀛等(2009)利用约束性CA进行城市增长边界(UGBs)模拟,马世发等(2014)基于约束性CA对土地利用规划方案进行预评估等。基于前人的研究,本文以大都市郊区生态环境恶化和城镇用地供

需不平衡为背景,探索针对近郊城镇快速增长的管控方案和技术途径。首先以城镇用地合理扩张为目标,在元胞自动机理论、土地利用规划和城镇空间发展战略等的指导下,重点研究约束性CA模型的构建方法及转换规则制定;然后以武汉市江夏区为案例,分析大都市郊区城镇增长特征与空间分布,并对未来城镇空间布局进行预测,验证约束性CA在复杂地理系统模拟方面的优势;最后探讨了采用约束性CA技术进行土地督察重点监测区划定的可行性,以期控制近郊城镇的空间无序蔓延,引导区域有序发展和疏散中心城市功能,从而推进特大城市可持续健康发展,为土地利用规划决策和管理优化提供方法与技术支撑。

2 研究方法

本文对城镇扩张约束因素进行了扩展,综合考虑城镇扩张驱动因素,并将土地利用规划、城镇空间发展战略等规划因素和思想,耦合于元胞自动机模型中,构建基于约束性CA的城镇用地扩张模拟模型。

2.1 元胞及元胞状态

在基于约束性CA的城镇用地扩张模型中,元胞空间不再是抽象空间,而是转变为笛卡尔坐标系下的地理空间(王海军, 贺三维, 张文婷, 2010; Wang et al, 2012; He et al, 2013);研究通常在二维元胞空间上进行,因此可采用GIS栅格数据中的栅格表示元胞。这样,每个元胞都被赋予了地理含义,元胞的大小对应于具有一定面积的地块,而研究区域则作为元胞空间(杨青生等, 2007; 王海军等, 2011)。

元胞的状态即地块的土地利用类型。本文将元胞的状态集合定义为:城镇用地、耕地、园地、林地、水体,映射到数学集合中为 $S=\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。

2.2 元胞邻域及元胞时间

CA模型中的邻域概念在地理空间上体现为邻近关系,模型中的邻域作用是对相邻地理实体间的相互作用规律的反映(张显峰等, 2001; 罗平等, 2004; 王海军, 张文婷, 贺三维等, 2010)。本文中采用 7×7 扩展的Moore型邻域,邻域内城镇用地元胞数决定着下一时刻该元胞的状态。模型中的时间概念用迭代次数来代替,由于模型耦合元胞自动机与土地利用规划,且为土地利用规划决策和管理辅助服务,因此设定每次迭代的时间与土地利用年度

计划一致,即一次迭代为一年。

2.3 模型转换规则

在CA模型中,转换规则决定着下一时刻元胞是否发展为城镇用地(杨国清等, 2007; He et al, 2008)。约束性CA在既定的土地利用结构调整方案上,对未来最可能的空间发展形态进行识别,其模拟的结果更为接近真实。本文主要探讨利用约束性CA进行不同政策条件下的城镇用地扩张情景模拟与分析,结合土地利用总体规划与城市规划,综合考虑土地利用规划指标、城镇空间发展战略及土地利用开发适宜性等约束条件来制定转换规则。

2.3.1 土地利用空间影响约束

城镇用地扩张趋势受制于土地利用惯性(黎夏等, 2002)。土地利用惯性可认为是一系列空间影响因子的函数,这些土地利用空间影响因子主要包括交通条件、水文、地形及经济状况等,通常可用到区中心的距离、到高速公路的距离、地形坡度和高程等空间变量来表示(刘耀林等, 2004; 黎夏等, 2009; 龙瀛等, 2010)。土地利用惯性一般通过对土地利用历史数据进行逻辑回归分析来获取(Wu, 2002; 黎夏等, 2010),用数学语言可以描述为:

$$S_0 = a_0 + \sum_{i=1}^k (D_i \times P_i) \quad (1)$$

式中: S_0 为土地利用惯性值; a_0 为常量; D_i 为土地利用空间影响因子 $i(i=1, 2, 3, \dots, k)$ 的集合; P_i 为空间影响因子 i 的参数值,通过逻辑回归模型的系数来确定。

在获取土地利用惯性值后,还要将土地利用惯性值转为土地利用开发概率(S_0'),其计算公式如下:

$$S_0' = \exp S_0 / (1 + \exp S_0) \quad (2)$$

2.3.2 邻域约束

土地利用惯性 S_0 是从相隔一段时间的两期土地利用历史数据中利用逻辑回归估算而得。由于土地利用空间影响因子基本不发生变化(除交通条件外),因此土地利用开发概率 S_0' 在模拟过程中变化很小;如果根据土地利用开发概率的最大值来布局未来土地利用结构,只会产生零乱的空间分布,因为地块的土地利用开发可能性不仅仅受到自身条件的影响,还与周围的土地利用状况有关。因此,考虑邻域对中心元胞的作用,可以增加模拟的紧凑度,防止空间分布散乱现象。

在一个 $N \times N$ 的邻域内,邻近城镇用地元胞数越

大,则该中心元胞发展为城镇用地的概率越大(何春阳等, 2003; 张磊, 2010; Sun et al, 2012),用数学语言描述为:

$$L_{ij} = \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(S_{ij} = \text{urban})}{N \times N - 1} \quad (3)$$

式中: L_{ij} 为元胞 ij 受到的邻域影响; S_{ij} 为元胞状态, $\text{con}(S_{ij} = \text{urban})$ 表示一个条件函数,如果元胞状态为城镇用地,则返回1,否则返回0。

2.3.3 限制约束

约束性CA模型需要考虑客观的土地利用限制条件,主要为全局性的作用于所有元胞的限制因素,如土地利用规划中的基本农田保护区、生态安全控制区等(何春阳, 2003; 舒帮荣等, 2013),用数学语言描述为:

$$Z_{ij} = \text{con}(S_{ij} = \text{suitable}) \quad (4)$$

式中: Z 为限制条件判断函数,当元胞 ij 位于土地利用限制开发区内时, $Z=0$,不能发展为城镇用地;当元胞 ij 位于允许开发建设区时, $Z=1$,允许发展为城镇用地。

2.3.4 随机约束

城镇扩张过程中存在诸多随机因素和偶然事件的干预,因此城镇扩张具有不确定性。为使模型能够反映出这种不确定性,应该在约束性CA模型中引入随机干扰因子(杨青生等, 2007; 刘翠玲等, 2013),用数学语言描述为:

$$R = 1 + (-\ln a)^k \quad (5)$$

式中: R 为随机干扰因子; a 为随机数,取值在0~1之间; k 为整数,是调控随机干扰强度的系数,取值在1~10之间。

综合考虑土地利用空间影响约束、邻域约束、限制约束和随机约束的影响,任何元胞在时刻 T 发展为城镇用地的概率(张显峰等, 2001; 徐昔保等, 2009)都可以表示为:

$$P_0 = \frac{\exp S_0}{(1 + \exp S_0)} \times L_{ij} \times Z_{ij} \times R \quad (6)$$

2.3.5 土地利用规划指标约束

城镇扩张过程中,不仅土地利用空间影响因素会对空间布局产生影响,规划指标调控也会影响土地利用布局。作为约束性CA,需要考虑城镇用地增长规模限制及土地利用类型转换规模限制(杨俊等, 2015)。本文根据土地利用总体规划指标体系,并结合区域发展规划,将新增城镇建设用地规模、新增城镇建设用地占用耕地规模及基本农田面积

作为元胞状态更新的指标约束条件。由于城镇增长规模的限制,约束性CA模型不宜采用阈值转换模式,而是选择固定迭代次数和每次迭代转换元胞数(龙瀛等, 2009)。在此基础上,选择区域内发展概率最高的元胞进行转换,假设迭代次数为 d ,新增城镇建设用地规模为 C ,新增城镇建设用地占用耕地规模为 n ,则每次迭代转换元胞数 $stepN=C/d$,用数学语言可描述为:

$$S_{ij}^{T+1} = \begin{cases} \text{urban if } P_{ij} \in \max \cap \text{con}(\text{change} < n) = 1 \cap S_{ij} \neq \text{Basic} \\ S_{ij}^T & \text{if } P_{ij} \notin \max \cup \text{con}(\text{change} < n) = 1 \cup S_{ij} = \text{Basic} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_{ij}^T 为 T 时刻元胞 ij 的状态; S_{ij}^{T+1} 为 $T+1$ 时刻元胞 ij 的状态; P_{ij} 为元胞 ij 的开发概率; \max 为区域内发展概率最高的 $stepN$ 个元胞的集合。当新增城镇建设用地占用耕地元胞数小于指标值,且元胞状态不是基本农田时,若元胞 ij 的开发概率属于该集合,则元胞发展为城镇用地,否则元胞状态不发生改变。

2.3.6 城镇空间发展战略约束

利用约束性CA模拟城镇扩张时,需要将地理空间发展的差异性和不均衡性考虑进元胞自动机转换规则的制定中(龙瀛等, 2010)。将城镇空间发展战略约束融入规划决策,能够有效避免“摊大饼”式城镇空间发展模式。因此,结合土地利用总体规划和城市规划,解析土地利用空间发展定性规则,作为元胞自动机状态转变的重要约束条件,可描述为:

$$\varphi_{ij} = \sum_{k=1}^n \{ \text{con}(h_{ij}^k) \times \lambda^k \} \quad \lambda^k \in (0, 1) \quad \varphi_{ij} \in [0, 1] \quad (8)$$

式中: φ_{ij} 用于判断元胞 ij 受政策的影响程度; $\text{con}(h_{ij}^k)$ 表示一个条件函数,元胞 ij 受到政策 h^k 的影响,则返回1,否则返回0; λ^k 为政策 h^k 的权重; n 为政策总数, $k=1, 2, \dots, n$ 。

3 模型应用及结果分析

3.1 研究区与数据

江夏区是武汉市6个远城区之一,地处 $114^{\circ}01'E \sim 114^{\circ}35'E$, $29^{\circ}58'N \sim 30^{\circ}32'N$ 之间,全区土地总面积约为 2018 km^2 。江夏区北部紧邻武汉市东湖高新技术开发区和洪山区,南与咸宁市及嘉鱼县相连,东面通过梁子湖与大冶市、鄂州市接壤,西边与武汉市汉南区和蔡甸区隔江相望(图1)。

本文基于 ArcGIS 10.0 平台对武汉市江夏区2007年和2011年土地利用矢量数据进行预处理,根据城镇扩张模拟研究的需要,将土地利用类型归为城镇用地、耕地、园地、林地及水体5类,并将矢量数据栅格化。同时,采用了武汉市江夏区土地利用总体规划(2006-2020年)、城镇发展中心、交通路网等数据。

3.2 模型参数识别与规划约束

3.2.1 空间变量参数识别

城镇用地扩张受到包括自然、社会及宏观政策等多方面因素的影响,本文在参考城镇用地扩张模型惯用驱动因素的基础上,结合江夏区的实际特点,并考虑到数据的可获取性,选取区中心、一级镇中心、二级镇中心、三级镇中心、四级镇中心、高速公路、铁路和主干道等8个影响因子,利用 Logistic 逐步回归方法进行参数识别; Logistic 回归分析是研究土地利用时空演变过程的重要手段,其变量选择方法包括后退法(Backward)、前进法(Forward)和全要素法(Enter)3种。其中,全要素法未考虑变量的显著性及多元共线性问题,将所有变量进入模型中;后退法从模型中逐次剔除变量,充分考虑各空间变量对城市发展概率的贡献度,从而筛选出与土地利用变化相关性更大的因子(韩会然等, 2015);前进法通过逐步向模型中加入变量进行因子筛选。已有研究表明,后退法较前进法能更好地评价抑制效应,消除变量之间的明显共线性(黄明等, 2012),因此本文采用后退法筛选空间变量,并与全变量法相比较,分别计算全要素法和后退法的空间影响因子参数值。另外,由于江夏区地处平原地带,区域内部高差较小,因此可以不考虑地形坡度与高程因子的影响。

空间变量参数值具有明确的地理含义,可以有

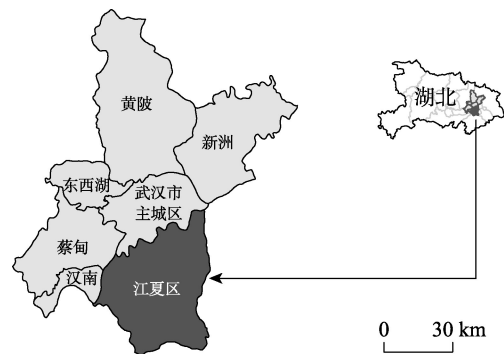


图1 研究区位置

Fig.1 The study area

效反映空间影响因子对城市扩张的影响作用大小。参数值为负,表示越靠近空间变量的元胞区位优势越明显,发展为城市用地的概率越大;参数值为正,则说明越靠近空间变量的元胞发展为城市用地的概率越小(杨青生等, 2007)。从参数识别结果来看,2007-2011年间,对江夏区城镇用地发展概率贡献最大的是主干道距离、一级镇距离和区中心距离,其参数均为负且绝对值较大;研究时段内新增城镇用地主要集中在区域北部,为主干道、一级镇中心、区中心等空间变量集中分布的位置,城镇扩张受到这3种因素的综合作用。2007-2011年间,江夏区中南部乡镇的城市扩张进程缓慢,二级镇中心、三级镇中心及高速公路对城镇扩张相对没有吸引力,其权重参数识别为正值;而与铁路和四级镇距离对城镇用地发展概率影响不显著,在后退法中未进入模型(表1)。











3.2.2 城镇空间发展战略约束

城镇发展具有空间不均衡性,将差异性空间发展战略嵌入CA模型转换规则中,有利于避免“摊大饼”式城镇空间发展模式。江夏区与其他相对独立发展的城市有所不同,其北部邻近武汉市主城区,受到主城区的强大吸引作用,因此在考虑区域内部因素作用的同时,需要将主城区的作用凸显出来。江夏区北部作为武汉市南部新城组群,具有以黄家湖、汤逊湖及青菱湖等水域为基础的良好自然生态

环境,邻近主城科技发展区的优势,以及武纸公路、107国道、沪蓉高速公路、京广铁路等优越对外交通条件,其功能定位为武汉地区教育科研中心及物流基地;重点发展包括纸坊新城、黄家湖、豹澥及流芳在内的南部新城组团。南部新城组团主要以外环高速公路及京广铁路为发展轴线,依托地铁5、7、8号线,向南拓展。确立“三区两轴”的集聚轴向式的空间结构,其中“两轴”即沪蓉线经济发展轴和京广线经济发展轴,“三区”是指沪蓉线沿线城镇及城北地区(北部片)、京广线中部矿业带(中部片)和南部农业综合开发区(南部片)。其发展战略规划为“依托主城、确保中心、重点发展、逐步推进”。“依托主城”是指江夏区城镇发展主要受主城区的吸引作用;“确保中心”即将纸坊新城作为城镇发展的一个中心;“重点发展,逐步推进”即以北部片为发展的重要对象,同时严格控制新增城镇用地,逐步推进城镇扩张过程。另外,纸坊新城作为发展战略的重点,受城市结构及空间限制,近期将以优化老城区、适度向东扩张为目标。

综合上述发展政策,利用空间规则解析法进行分析,对比各政策因素影响力的相对大小,根据已有规划文本和图件,确定各政策因素的影响范围并划分为多个梯度,分别对其进行权重赋值,将背景值设为0.15,并依据空间叠加结果进行调整和标准化处理,从而实现各定性战略的定量化和指标化

表1 城镇扩张空间影响因子参数识别
Tab.1 Parameter identification of spatial factors for urban expansion

空间变量	参数值		数据	空间变量	参数值		数据
	全要素法	后退法			全要素法	后退法	
一级镇距离	-4.1712	-3.6130		主干道距离	-10.0329	-9.7699	
二级镇距离	6.0128	5.7475		高速公路距离	1.9001	1.9052	
三级镇距离	2.8394	3.0808		规划主干道	—	—	
四级镇距离	-0.0338	0.0000		规划高速公路	—	—	
区中心距离	-3.5039	-3.6449		常量	-1.5174	-1.5697	
铁路距离	0.5293	0.0000					

(表2)。利用ArcGIS 10.0的邻域分析及叠加分析等工具绘制江夏区城镇空间发展战略分布图(图2)。

3.2.3 土地利用开发适宜性

本文根据江夏区的实际情况,将水域及基本农田保护区作为禁止建设区,嵌入约束性CA模型的转换规则中。在ArcGIS 10.0中利用2020年武汉市土地利用规划图,勾画出江夏区基本农田保护区,同时与江夏区2011年水体面积相叠加,得到江夏区宜建区分布图(图3)。

3.2.4 土地利用规划指标约束

城镇扩张过程中,规划指标调控会对土地利用空间布局产生影响。本文根据土地利用总体规划指标体系,考虑城镇用地增长规模约束及土地利用类型转换约束,并结合区域实际情况,将新增城镇建设用地占用耕地规模及基本农田面积作为约束性CA元胞状态更新的约束条件,将新增城镇建设用地规模作为模型迭代的终止条件。

本文通过分解《武汉市江夏区土地利用总体规划2006-2020年》中的各规模指标来确定模型迭代

的控制条件。其中,2020年必须确保至少有60845 hm²的基本农田,而根据江夏区宜建区分布图,基本农田保护区面积约在80000 hm²以上,因此,通过将基本农田保护区作为禁止建设区,可以达到确保基本农田面积的目的。据规划文件,江夏区2011-2020年期间的建设用地增量规模需要控制在7543 hm²以内,新增建设用地占用耕地规模不得超过5080.88 hm²。而2010年江夏区内建设用地总规模为30624.16 hm²,其中城镇用地(包括城市、建制镇等)为9507.85 hm²,约占建设用地总面积的32%。因此,可以得到2011-2020年建设用地增量规模为7543 hm²,而2010年城镇用地约占建设用地的32%,据此估算新增城镇用地规模为2414 hm²,新增城镇用地占用耕地规模为1626 hm²。

为使模拟结果能够表现出城镇扩张过程的不确定性,在CA模型中引入随机干扰因子,随机干扰强度设置为2。另外,本文中元胞大小设为200 m×200 m,采用7×7扩展的Moore型邻域,增强模拟结果的紧凑度及真实性,防止土地利用布局散乱。

表2 江夏区城镇空间发展战略指标化
Tab.2 Spatialization of urban development strategy in Jiangxia Distict, Wuhan City

政策	定量依据	空间解析	范围/m	权重
“依托主城”	综合测度武汉市主城区与江夏城区之间的空间距离及路网联系	武汉市主城区边界向南做缓冲区	0~2000	0.25
			2000~5000	0.15
“确保中心”	武汉市及纸坊新城规划图件与文本	纸坊新城中心向东方向做扇形缓冲区	0~3000	0.25
			3000~5000	0.15
“三区两轴”	轴线影响范围=城镇用地面积/轴长	发展轴线向两侧做缓冲区	0~2000	0.15
“轨道交通”	已有文献经验与实地调研	地铁线路向两侧做缓冲区	0~1000	0.30

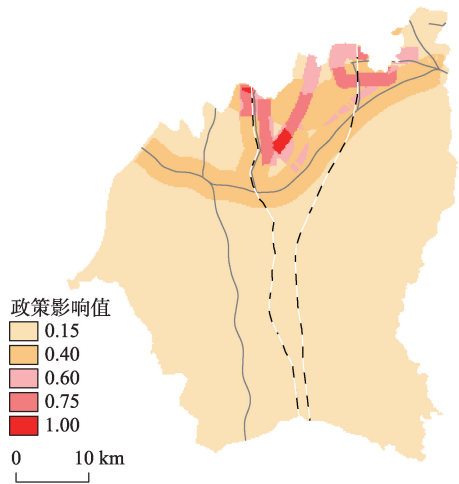


图2 江夏区城镇空间发展战略分布
Fig.2 Strategic distribution of urban space development in Jiangxia District, Wuhan City

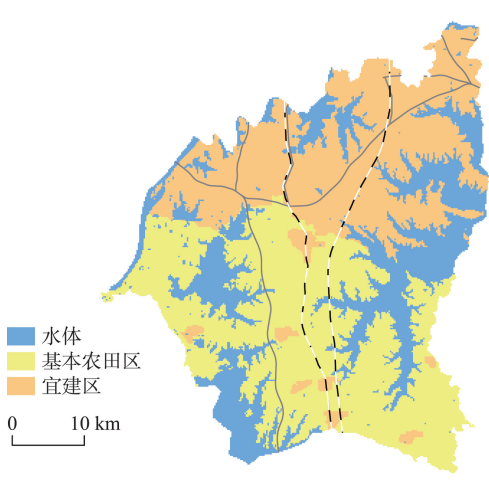


图3 江夏区宜建区分布
Fig.3 Distribution of suitable construction area in Jiangxia District, Wuhan City

3.3 模型精度检验

以2007年江夏区土地利用现状为基点,对江夏区2011年的城镇扩张过程进行模拟,根据全要素法与后退法的空间影响因子参数,分别构建全要素模型和多要素模型,并与真实的城镇用地格局进行对比,验证模型的可行性。

从整体上比较2个模型的模拟结果可以发现(图4),在整体的扩张形态和方向上,两者区别不大,其中江夏区城镇扩张主要发生在纸坊街区,以及紧靠东湖高新技术开发区的流芳街和豹澥镇;而在江夏区南部及西部的安山、山坡、法泗、金口、湖泗和舒安等乡镇,城镇化速度较缓慢,这与江夏区实际的城镇扩张形态一致;在模拟精度方面,两者的Kappa系数分别为0.66和0.67,多要素模型较全要素模型的一致性检验结果略优;两者的总体精度相近且都高于95%,但多要素模型一定程度上改善了城镇用地的模拟精度,将精度值由69%提升至70%。

对模拟结果的局部差异进行分析,发现在全要素模型中新增城镇用地分布较为发散,而多要素模型模拟结果相对紧凑合理,与2011年江夏区土地利用现状更为贴近。从模拟结果的精度及空间布局来看,采用后退法构建多要素模型较全要素法更为合理,有效地改善了模拟结果精度与空间分布;从模型构建的角度出发,在不影响模型合理性的基础上,有效地降低了模型的复杂度,在简化和改善模型方面具有一定的价值。

3.4 结果分析

3.4.1 城镇增长特征

武汉市是中国中部地区的特大城市,是国家“中部崛起”的战略支点和“两型社会”建设的重要示范区。武汉市严格控制中心城区规模,积极促进新城发展,构建以主城为核心、新城为重点、中心镇和一般镇为基础的网络状城镇体系。其主城用地因受严格控制而增长逐渐缓慢,但近郊城镇增长速度十分迅速,大量耕地和水体遭到侵占,从而引发了严峻的生态环境问题。“十一五”期间,武汉市近郊区城镇用地增幅为主城区的3倍,近郊区成为武汉城市扩张的重点区域,截至2011年,武汉市近郊区城镇用地现状规模已与主城区相当。从人口规模来看,近郊区远低于主城区,第六次全国人口普查结果表明,截至2010年末,武汉都市发展区常住人口为817万人,而新城组群地区^①仅为210余万人,约仅占全市人口的25%(吴之凌等,2013)。

随着快速轨道交通的日趋完善,近郊城镇成为联结城市和乡村的纽带,不仅是中心城区功能外溢的承载区,更是构建区域生态安全格局的保育区,在解决大城市过度扩张所引发的城市问题和实现大都市空间结构优化方面发挥着重要的作用。因此,合理控制大都市近郊城镇空间增长,有利于规划引导和管控城市用地空间结构,构建集约有序的空间拓展模式(于伟等,2012)。

江夏区作为武汉市南部远城区,是中心城区重要的功能、产业和人口疏散地,也将面临着城镇扩

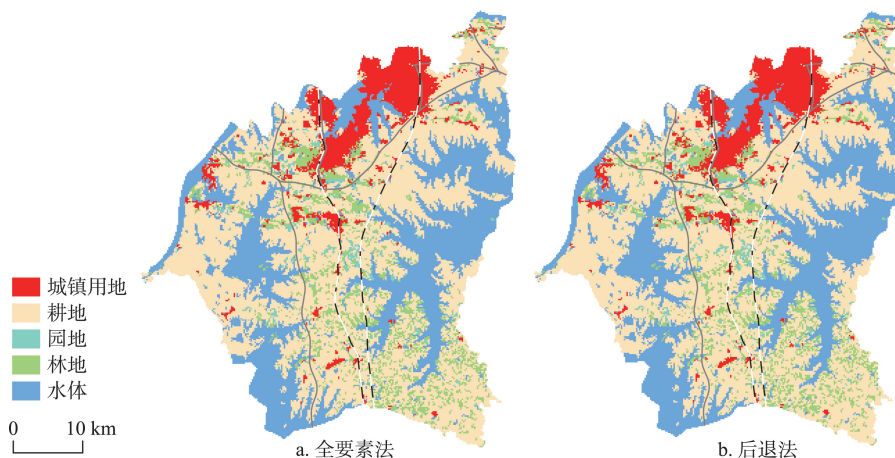


图4 模型精度检验

Fig.4 Accuracy test of modeling result

^①武汉市推进“主城+新城组群1+6”城市格局,武汉市新城组群地区是指除主城区外的远城区,等同于近郊区。

张与生态保护之间的突出矛盾。江夏区城镇扩张过程具有空间不平衡性,区域差异明显(图5)。江夏区城镇用地主要集中分布于沪蓉高速公路以北区域。江夏区北部作为新型城镇化的重点发展区,城镇化程度较高;而中南部作为现代农业生产基地,经济发展水平较低,城镇化进程缓慢。从城镇空间拓展情况来看,江夏区呈现出典型的团块聚集和跳跃式发展特征,原有连续的绿色廊道和空间遭到破坏。2007-2011年间江夏区城镇用地实际增加约57 km²,平均增加速度为14.25 km²/a;城镇用地扩张规模较大,主要发生在江夏区北部靠近武汉市主城区的流芳街、豹澥镇及纸坊街。其中,纸坊街作为主城区的卫星城,主要吸纳中心城区的人口扩散,适当分散部分主城区的行政和居住功能;而邻近东湖高新技术开发区的流芳街和豹澥镇则主要承载中心城区的工业产业外溢。由于短时间内城镇扩张规模过大,导致城镇用地低效外延扩张,土地利用集约节约程度较低。从区域人口规模来看,2007年江夏区常住人口为63万,第六次全国人口普查时为64.5万,研究区内人口规模未有较大增长,对主城区人口的分散作用尚未真正形成。但是,随着城镇化的推进,江夏区的交通路网和基础设施得以不断完善,其吸引和承载中心城区人口与产业外溢的能力将持续增强。

3.4.2 城镇扩张情景模拟与分析

本文采用约束性CA分别对规划目标方案(情景I)与现实发展趋势方案(情景II)进行模拟(图6);情景I将城镇空间发展战略和土地利用规划指标调控作为重要的约束条件,保证城市发展与规划目标

一致;情景II则主要考虑城镇扩张惯性驱动及土地利用开发适宜性,在该情景中,城市扩张保持原有发展速率不变。另外,在现有的城镇扩张模拟研究中,往往较少考虑到交通可达性等空间因子在研究时段内对城市发展的影响(邓羽等, 2015),这与现实情况相悖。本文所架构的CA模型结合现状路网和规划路网,综合考虑了道路信息的时空变化。情景I中,2011-2020年间,江夏区城镇扩张主要集中在纸坊新城、临近主城区且有地铁线路经过的黄家湖,以及东北部的流芳街和豹澥镇,而位于江夏区中部及南部的城镇扩张不明显,城镇化速度十分缓慢。将江夏区2007、2011和2020年土地利用布局加以对比,发现2011-2020年江夏区城镇扩张速度

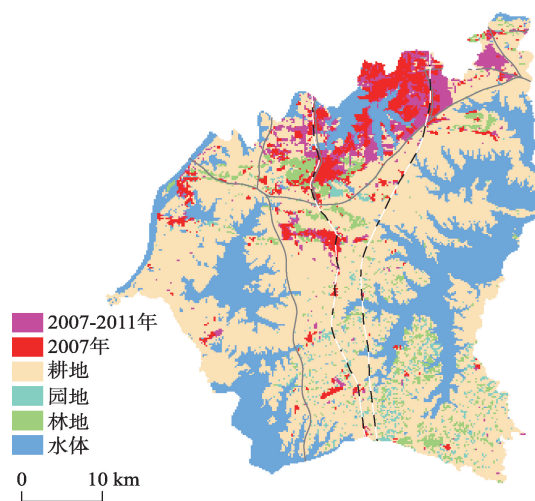


图5 2007-2011年江夏区城镇扩张空间分布

Fig.5 Spatial distribution of urban expansion in Jiangxia District, Wuhan City, 2007-2011

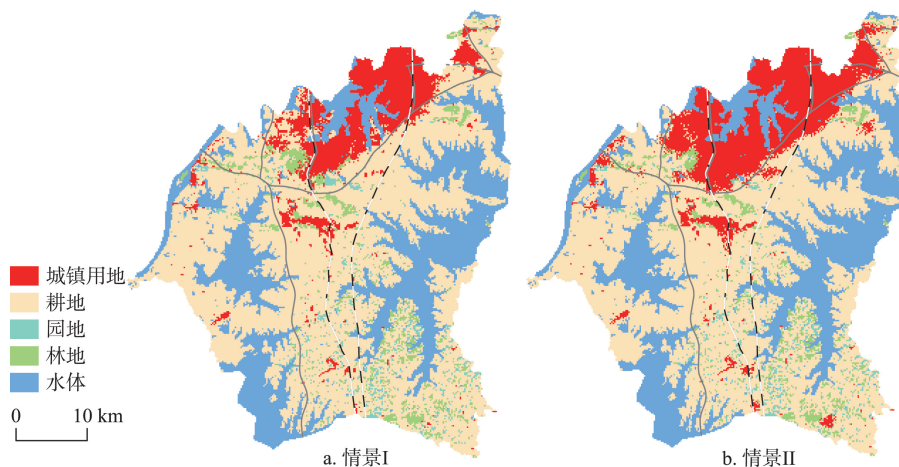


图6 基于规划目标方案与趋势发展方案的情景模拟结果

Fig.6 Scenario simulation results based on constrained CA

得到明显抑制,从 $14.25 \text{ km}^2/\text{a}$ 减至 $2.72 \text{ km}^2/\text{a}$;城市发展比较紧凑,只是在原有城镇用地的基础上向外适度扩张,这与土地利用总体规划目标及江夏区城镇发展定位十分吻合,这也证明基于约束性CA模型的大都市近郊城镇增长模拟是可行的。

对比情景I和情景II的模拟结果,可得出以下结论:现实状况下的江夏区城镇扩张速度明显高于规划控制下的城镇用地增长速率,如果不对城镇用地扩张加以调控,城镇规模将不断扩大,并不断向腹地呈无序蔓延状态;其中,江夏区北部的流芳街、豹澥镇向东南方向扩张十分明显,纸坊街区向四周呈发散状扩张,靠近主城区的黄家湖地区发展十分迅速,并不断向南拓展;而江夏区中部及南部城镇化进程十分缓慢,区域空间发展差异不断加大。因此,江夏区需要合理控制城镇扩张规模,对当前的城镇扩张速度加以控制,将新增城镇用地规模控制在规划目标内,以避免城镇大规模扩张对耕地及水体的侵占。一方面,应高度重视土地集约节约利用,优化城镇用地空间布局,防止城市低效蔓延式扩张;另一方面,应合理引导城镇扩张方向,积极带动经济发展相对滞后的南部片城镇扩张,消除经济发展的锁定效应和区域差异,促进全区协调发展。

3.4.3 土地督察重点监测区划定

城市空间扩展的不确定性制约了城市模型的预测精度,即使是综合社会、经济、自然等各方面因素构建更为复杂的模型也只能相对逼近客观实际(邓羽等, 2015)。现有的利用约束性CA对模拟城市增长边界或进行土地利用规划方案预评估仍具有一定的价值和借鉴意义。城市增长边界通过划定边界线控制城市蔓延,是引导城市合理增长和可持续发展的重要手段,但划定城市增长边界将城市建设活动限制在固定区域内,会导致城市增长需求的空间与之不相匹配等问题(冯科等, 2008);而通过简单对比模拟结果与规划图中城市边界线的一致性来评判规划方案的优劣,也存在较大局限性(张兵等, 2014)。本文提出利用约束性CA技术进行土地督察重点监测区的划定(图7),可在控制城市建设用地规模的基础上为城市发展的不确定性留有余地,避免由于模拟精度不足而造成的较大影响。该方法对于大都市郊区快速增长、城镇空间呈跳跃式扩张的地区具有借鉴和参考意义。

随着城市用地的迅速扩张及用地需求的不断增长,国家亟需借助有效的技术手段及时掌握和监

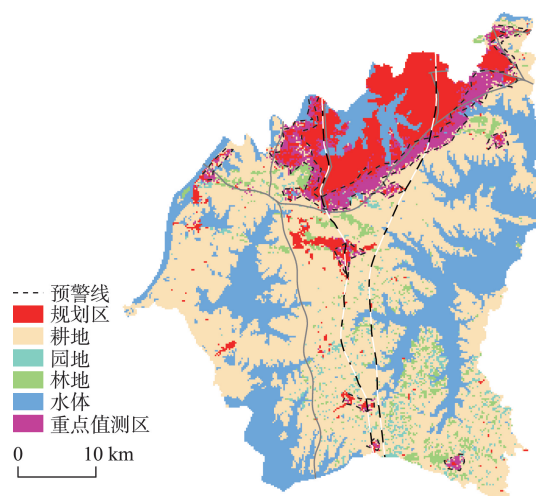


图7 土地督察重点监测区划定

Fig.7 Key monitoring areas of land use supervision

管土地利用和管理情况(吕晓等, 2012; 范伯乃等, 2014);江夏区作为武汉市南部新城组团空间拓展的重点区域,其依托交通廊道呈组团式发展,承担疏散中心城区人口和吸纳区域农业人口的职能,承接主城区部分工业、居住和商业等功能外溢。江夏区北部城镇空间快速增长态势和无序外延式扩张模式给区域带来了巨大的生态环境压力。将规划目标导向和现实发展趋势下的模拟结果在GIS环境中进行空间叠加分析,可比对出规划目标与趋势发展之间存在的冲突区域,即在土地利用总体规划实施过程中应重点监管的区域(马世发等, 2014)。通过梳理规划指标调控与用地需求的空间错位分布特征,获取有针对性的查违区域,为实施严格的违法用地督察和土地利用空间管制提供事先的预警,以期控制近郊小城镇的空间无序蔓延,引导区域有序增长。江夏区今后应在不突破城镇用地规模的前提下,尽量避让城市和组团之间的生态屏障系统,依据城镇体系空间布局规划,协调绿色空间与农村居民点、基础设施布局的空间关系,形成集聚发展的土地利用空间格局。本文提出的划定土地督察重点监测区方法,可为快速确定违法高危区,提升土地督察的管理水平,从而实现国土资源的现代化管理提供参考和借鉴。

4 结论

本文在传统CA模型的基础上,结合土地利用总体规划、城镇空间发展布局及土地利用开发适宜性等,构建约束性元胞自动机模型,利用武汉市江

夏区2007年和2011年土地利用数据,进行了大都市郊区城镇增长的情景模拟与管控分析,主要结论如下:

(1) 2007-2011年间江夏区城镇用地实际增加约57 km²,平均增加速度为14.25 km²/a,城镇用地扩张规模较大且呈外延式扩张,土地利用集约节约程度较低。研究时段内江夏区逐渐承载中心城区的功能和人口外溢,其中,纸坊新城作为主城区的卫星城主要吸纳中心城区的扩散人口,适当分散部分主城区的行政和居住功能;而邻近东湖高新技术开发区的流芳街和豹澥镇则主要承载中心城区的工业产业外溢;但该时段内江夏区人口规模并未得到较大增长,对主城区人口的疏散作用尚未真正形成。

(2) 在当前政府主导的土地管理政策框架下,约束性CA在模拟大都市郊区演化方面具有较高的可靠性,与土地利用规划和城市总体规划较为契合。因此,在空间管制日益趋紧的背景下,约束性CA的模拟结果能较真实地反映近郊城镇的未来空间布局与结构。

(3) 通过对比规划目标情景和趋势发展情景下的模拟结果,有利于判断现势状况下城镇用地扩张速率的合理性,评价城市发展可能带来的潜在影响,为城市规划和土地管理工作提供重要的科学依据与技术支持。同时,将两种情景进行空间叠加分析,还可以确定规划指标调控与城镇用地需求冲突的空间分布,从而划定土地督察的重点监测区,为加强近郊区的违法用地监测和土地利用管控提供预警。

本文仍存在一定不足之处,虽然约束性CA模型将政府的相应决策及政策因素考虑进元胞的转换行为中,但是土地利用动态演化作为一个复杂系统,受社会、经济及自然等多方面因素影响,如果能在模型构建过程中考虑人口结构与经济社会因素,将使得模型模拟结果更加贴近实际,这些有待在今后研究中进一步解决。

参考文献(References)

陈利顶,孙然好,刘海莲. 2013. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J]. 生态学报, 33(4): 1042-1050. [Chen L D, Sun R H, Liu H L. 2013. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives[J]. Acta Ecologica Sinica, 33(4): 1042-1050.]

邓羽,司月芳. 2015. 北京市城区扩展的空间格局与影响因素[J]. 地理研究, 34(12): 2247-2256. [Deng Y, Si Y F. 2015. The spatial pattern and influence factors of urban expansion: A case study of Beijing[J]. Geographical Research, 34(12): 2247-2256.]

范伯乃,张电,张晓玲,等. 2014. 县市级政府土地利用和管理绩效评估指标体系研究: 基于土地督察的视角[J]. 中国土地科学, 28(9): 25-31. [Fan B N, Zhang D D, Zhang X L, et al. 2014. The construction of a performance evaluation index system for county-level governmental land use and administration: From the perspective of land supervision[J]. China Land Science, 28(9): 25-31.]

冯科,吴次芳,韦仕川,等. 2008. 城市增长边界的理论探讨与应用[J]. 经济地理, 28(3): 425-429. [Feng K, Wu C F, Wei S C, et al. 2008. Research on urban growth boundary: Theoretical analysis and its application in China[J]. Economic Geography, 28(3): 425-429.]

韩非,蔡建明,刘军萍. 2010. 大都市郊区小城镇的经济地域类型及其空间分异探析: 以北京市为例[J]. 城市发展研究, 17(4): 123-128. [Han F, Cai J M, Liu J P. 2010. Regional economic types and spatial differentiation of small towns in peri-urban Beijing[J]. Urban Studies, 17(4): 123-128.]

韩会然,杨成凤,宋金平. 2015. 北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J]. 地理科学进展, 34(8): 976-986. [Han H R, Yang C F, Song J P. 2015. Simulation and projection of land-use change in Beijing under different scenarios [J]. Progress in Geography, 34(8): 976-986.]

何春阳,陈晋,史培军,等. 2003. 大都市区城市扩展模型: 以北京城市扩展模拟为例[J]. 地理学报, 58(2): 294-304. [He C Y, Chen J, Shi P J, et al. 2003. City expansion model of metropolitan area in China: A case study of Beijing [J]. Acta Geographica Sinica, 58(2): 294-304.]

黄明,张学霞,张建军,等. 2012. 基于CLUE-S模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J]. 资源科学, 34(4): 769-776. [Huang M, Zhang X X, Zhang J J, et al. 2012. A multi-scale simulation of land use change in Luoyugou watershed based on CLUE-S model[J]. Resources Science, 34(4): 769-776.]

黎夏,李丹,刘小平,等. 2009. 地理模拟优化系统GeoSOS及前沿研究[J]. 地球科学进展, 24(8): 899-907. [Li X, Li D, Liu X P, et al. 2009. Geographical Simulation And Optimization System (GeoSOS) and its cutting-edge researches[J]. Advances in Earth Science, 24(8): 899-907.]

黎夏,李丹,刘小平,等. 2010. 地理模拟优化系统GeoSOS软

- 件构建与应用[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 49(4): 1-5. [Li X, Li D, Liu X P, et al. 2010. The implementation and application of Geographical Simulation And Optimization Systems (GeoSOS)[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 49(4): 1-5.]
- 黎夏, 叶嘉安. 1999. 约束性单元自动演化CA模型及可持续城市发展形态的模拟[J]. 地理学报, 54(4): 289-298. [Li X, Yeh A G O. 1999. Constrained Cellular Automata for modelling sustainable urban forms[J]. Acta Geographica Sinica, 54(4): 289-298.]
- 黎夏, 叶嘉安. 2002. 基于神经网络的单元自动机CA及真实和优化的城市模拟[J]. 地理学报, 57(2): 159-166. [Li X, Yeh A G O. 2002. Neural-network-based Cellular Automata for realistic and idealized urban simulation[J]. Acta Geographica Sinica, 57(2): 159-166.]
- 林涛. 2010. 郊区新城发展与大都市空间结构调整: 松江案例[J]. 人文地理, (5): 75-80, 159. [Lin T. 2010. Suburban new town development and its impacts on the metropolis spatial structure: A case study of Songjiang, Shanghai[J]. Human Geography, (5): 75-80, 159.]
- 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[J]. 测绘与空间地理信息, 36(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, 36(4): 122-125.]
- 刘耀林, 刘艳芳, 明冬萍. 2004. 基于灰色局势决策规则的元胞自动机城市扩展模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 29(1): 7-13. [Liu Y L, Liu Y F, Ming D P. 2004. Urban expansion model based on Cellular Automata of decision-making with grey situation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 29(1): 7-13.]
- 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, 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.]
- 罗平, 杜清运, 雷元新, 等. 2004. 城市土地利用演化CA模型的扩展研究[J]. 地理与地理信息科学, 20(4): 48-51. [Luo P, Du Q Y, Lei Y X, et al. 2004. Study on urban land use evolvement model based on extended Cellular Automata[J]. Geography and Geo-Information Science, 20(4): 48-51.]
- 吕晓, 钟太洋, 张晓玲, 等. 2012. 土地督察对土地违法的遏制效应评价[J]. 中国人口·资源与环境, 22(8): 121-127. [Lv X, Zhong T Y, Zhang X L, et al. 2012. Effects of land supervision on containing the illegal land use in China[J]. China Population, Resources and Environment, 22(8): 121-127.]
- 马世发, 艾彬, 念沛豪. 2014. 基于约束性CA的土地利用规划预评估及警情探测[J]. 地理与地理信息科学, 30(4): 51-55. [Ma S F, Ai B, Nian P H. 2014. Pre-assessment and warning of land use planning with constrained Cellular Automata[J]. Geography and Geo-Information Science, 30(4): 51-55.]
- 马世发, 艾彬, 欧金沛. 2013. 约束性CA在城乡建设用地指标空间化中的应用[J]. 地理科学, 33(10): 1245-1251. [Ma S F, Ai B, Ou J P. 2013. Spatial allocation of construction land with constrained Cellular Automata model [J]. Scientia Geographica Sinica, 33(10): 1245-1251.]
- 宁越敏. 2012. 中国城市化特点、问题及治理[J]. 南京社会科学, (10): 19-27. [Ning Y M. 2012. A study on the urbanization, urban problems and solution in China[J]. Social Sciences in Nanjing, (10): 19-27.]
- 邵景安. 2009. 大都市郊区山地景观规划的案例研究[J]. 农业工程学报, 25(2): 228-234. [Shao J A. 2009. Case study of mountainous landscape planning for metropolitan outskirts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 25(2): 228-234.]
- 石忆邵, 谭文晔. 2007. 从近域郊区化到远域郊区化: 上海大都市郊区化发展的新课题[J]. 城市规划学刊, (4): 103-107. [Shi Y S, Tan W K. 2007. From inner suburbanization to outer suburbanization: A new theme on the development of Shanghai metropolitan suburbanization[J]. Urban Planning Forum, (4): 103-107.]
- 舒帮荣, 刘友兆, 张鸿辉, 等. 2013. 集成变权与约束性模糊CA的城镇用地扩张情景模拟[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 38(4): 498-503. [Shu B R, Liu Y Z, Zhang H H, et al. 2013. Scenario simulation of urban land expansion integrate variable weight with constrained fuzzy Cellular Automata[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 38(4): 498-503.]
- 孙平军, 修春亮. 2014. 中国城市空间扩展研究进展[J]. 地域研究与开发, 33(4): 46-52. [Sun P J, Xiu C L. 2014. Progress in research on urban spatial expansion of China[J]. Areal Research and Development, 33(4): 46-52.]
- 王海军, 贺三维, 张文婷. 2010. 利用地图代数和数据场拓展

- 元胞自动机理论[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 35(12): 1474-1477. [Wang H J, He S W, Zhang W T. 2010. Theoretical study on Cellular Automata utilizing data field and map algebra[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 35(12): 1474-1477.]
- 王海军, 张文婷, 陈莹莹, 等. 2011. 利用元胞自动机作用域构建林火蔓延模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 36(5): 575-578. [Wang H J, Zhang W T, Chen Y Y, et al. 2011. Fire spreading model based on CA scope[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 36(5): 575-578.]
- 王海军, 张文婷, 贺三维, 等. 2010. 利用元胞自动机和模糊C均值进行图像分割[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 35(11): 1288-1291. [Wang H J, Zhang W T, He S W, et al. 2010. An image segmentation method based on Cellular Automata and fuzzy C-means[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 35(11): 1288-1291.]
- 吴之凌, 汪云, 夏巍. 2013. 新型城镇化视角下的武汉近郊区规划管控研究[J]. 规划师, 29(9): 94-98. [Wu Z L, Wang Y, Xia W. 2013. Metropolitan suburb planning control from new urbanization viewpoint, Wuhan[J]. Planners, 29(9): 94-98.]
- 徐昔保, 杨桂山, 张建明. 2009. 近50年兰州城市空间扩展模拟及其未来预测[J]. 干旱区研究, 26(5): 763-769. [Xu X B, Yang G S, Zhang J M. 2009. Simulation and prediction of urban spatial expansion of Lanzhou City[J]. Arid Zone Research, 26(5): 763-769.]
- 杨国清, 刘耀林, 吴志峰. 2007. 基于CA-Markov模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 32(5): 414-418. [Yang G Q, Liu Y L, Wu Z F. 2007. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 32(5): 414-418.]
- 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 2015. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟: 以大连经济技术开发区为例[J]. 地理学报, 70(3): 461-475. [Yang J, Xie P, Xi J C, et al. 2015. LUCC simulation based on the Cellular Automata simulation: A case study of Dalian economic and technological development zone[J]. Acta Geographica Sinica, 70(3): 461-475.]
- 杨青生, 黎夏. 2007. 基于遗传算法自动获取CA模型的参数: 以东莞市城市发展模拟为例[J]. 地理研究, 26(2): 229-237. [Yang Q S, Li X. 2007. Calibrating urban Cellular Automata using genetic algorithms[J]. Geographical Research, 26(2): 229-237.]
- 于伟, 杨帅, 郭敏, 等. 2012. 功能疏解背景下北京商业郊区化研究[J]. 地理研究, 31(1): 123-134. [Yu W, Yang S, Guo M, et al. 2012. A research on commercial suburbanization in Beijing under the background of urban function dissemination[J]. Geographical Research, 31(1): 123-134.]
- 张兵, 林永新, 刘宛, 等. 2014. “城市开发边界”政策与国家的空间治理[J]. 城市规划学刊, (3): 20-27. [Zhang B, Lin Y X, Liu W, et al. 2014. Debate on urban development boundary: The perspective of spatial governance in China[J]. Urban Planning Forum, (3): 20-27.]
- 张磊. 2010. 基于CA的南京市城市空间结构演变模拟[J]. 测绘与空间地理信息, 33(6): 159-162. [Zhang L. 2010. Simulation of urban spatial structure dynamic process in Nanjing based on Cellular Automata[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 33(6): 159-162.]
- 张显峰, 崔伟宏. 2001. 集成GIS和细胞自动机模型进行地理时空过程模拟与预测的新方法[J]. 测绘学报, 30(2): 148-155. [Zhang X F, Cui W H. 2001. Integrating GIS with Cellular Automaton model to establish a new approach for spatio-temporal process simulation and prediction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 30(2): 148-155.]
- 周成虎, 欧阳, 马廷, 等. 2009. 地理系统模拟的CA模型理论探讨[J]. 地理科学进展, 28(6): 833-838. [Zhou C H, Ou Y, Ma T, et al. 2009. Theoretical perspectives of CA-based geographical system modeling[J]. Progress in Geography, 28(6): 833-838.]
- 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: 1-163. [Zhou C H, Sun Z L, Xie Y C. 1999. Dili yuanbao zidongji yanjiu[M]. Beijing, China: Science Press: 1-163.]
- Geertman S, Hagoort M, Ottens H. 2007. Spatial-temporal specific neighbourhood rules for Cellular Automata land-use modelling[J]. International Journal of Geographical Information Science, 21(5): 547-568.
- He C Y, Okada N, Zhang Q F, et al. 2008. Modelling dynamic urban expansion processes incorporating a potential model with Cellular Automata[J]. Landscape and Urban Planning, 86(1): 79-91.
- He Q Q, Dai L, Zhang W T, et al. 2013. An unsupervised classifier for remote-sensing imagery based on improved Cellular Automata[J]. International Journal of Remote Sensing, 34(21): 7821-7837.
- Li J, Dong S C, Li Z H, et al. 2014. A bibliometric analysis of Chinese ecological and environmental research on urbanization[J]. Journal of Resources and Ecology, 5(3): 211-

- 221.
- Sun J, Zhang L H, Peng C L, et al. 2012. CA-based urban land use prediction model: A case study on orange county, Florida, U.S.[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12(6): 85-92.
- Wang H J, He Q Q, Liu X J, et al. 2012. Global urbanization research from 1991 to 2009: A systematic research review [J]. *Landscape and Urban Planning*, 104(3-4): 299-309.
- Wu F L. 2002. Calibration of stochastic Cellular Automata: The application to rural-urban land conversions[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(8): 795-818.

Scenario simulation and control of metropolitan outskirts urban growth based on constrained CA: A case study of Jiangxia District of Wuhan City

WANG Haijun^{1,2}, XIA Chang¹, ZHANG Anqi^{1,3}, DENG Yu⁴

(1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Systems, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. School of Urban Planning and Design, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: In the process of rapid urbanization in China, metropolitan outskirts are areas where land use change most frequently occurred and human-nature relationship most complex, and it is very important to understand changes in land management and urban planning in these areas. Constrained Cellular Automata (constrained CA) can simulate complicated urban dynamic changes in accordance with certain simple rules and has become an important tool in the study of spatiotemporal changes of urban land use. Using land use data of Jiangxia District of Wuhan City collected in 2007 and 2011, this study incorporated considerations such as overall land use planning index, strategic arrangement of urban spatial development, and land use constraints into the transition rules of Cellular Automata. Then the logistic regression method was employed to determine the influencing factors of city spatial development and a constrained CA model was established to simulate scenario urban construction of Jiangxia District in 2020. The findings were compared with the prediction of forecast-CA. The simulation results show that: (1) Jiangxia District gradually absorbs some of the functions and population of the city center during the study period, but the urban expansion and land use is of low efficiency. The population of the study area will not grow significantly and the expansion of the area will not ease the high population pressure in the city center. (2) Constrained CA is able to depict a vivid picture of the layout and structure of small towns in metropolitan outskirts and is suitable for land use planning and urban planning. (3) Overlay analysis of the results of scenario simulations can identify the key monitoring areas of land use supervision and provide warning messages for the supervision and control of illegal land use.

Key words: constrained Cellular Automata (constrained CA); metropolitan outskirts; urban growth; scenario simulation; land use supervision; Jiangxia District of Wuhan City